

УПРАВЛЕНИЕ ЭВОЛЮЦИЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

А. В. Матвеев

Книга может быть интересна и полезна всем, кто занимается, прямо или косвенно, электрическими машинами, электроприводом, их применениями или смежными системами: студентам, аспирантам, преподавателям ВУЗов, ученым, инженерам, руководителям разного уровня на электромашиностроительных предприятиях и в компаниях, занимающихся разработкой или внедрением оборудования, а также изобретателям и философам техники. Освоение материала книги не потребует специальной подготовки, книга написана простым языком, без использования сложной математики. В то же время книга дает новые знания и формирует новый взгляд на электромеханику, позволяет осознать свою роль в эволюции электрических машин, предлагает инструменты для конструирования будущего. В качестве иллюстраций приемов решений различных технических задач в книге дано около двухсот примеров новаторских решений из области электрических машин и электропривода.

Введение

Предлагаемая читателю книга раскрывает тему пока мало изученную – управление эволюцией электрических машин (ЭМ). Обычно слово «эволюция» ассоциируется с историей, но данная книга – не про историю, а про конструирование будущего. Если классические книги по электромеханике обычно дают в значительной мере «статическую» картину теории и практики в области ЭМ, показывая то, что было и есть, то в данной книге дается «динамическое» представление – с указанием на возможные изменения, потенциал развития.

В какой-то мере, книга — это попытка переоценки известного профессионалам материала, нового взгляда на него, с предложением новых инструментов анализа. Некоторые предложения могут даже показаться радикальными. В частности, производится деструкция некоторых доминирующих в современной электромеханике нарративов и практик, например, в таких областях как классификация и сравнение машин.

Одна из основных целей книги – поддержать сложное и свободное мышление в области электромеханики. Это возможно через осмысление реальности с использованием концепций философии техники, самостоятельный синтез знаний о трендах и паттернах эволюции, изобретательские практики.

Книга построены следующим образом:

В **главе 1** ЭМ представляется как объект техносферы, кратко описывается их функциональность, назначение, размеры, материалы, из которых ЭМ производят, основные законы по которым ЭМ работают. Описывается механизм информационного отбора, действующего в процессе техноэволюции, его критерии. Показаны особенности таких популярных применений ЭМ как ВЭУ, пропульсивные установки кораблей, летательные аппараты. Показан отбор в данных применениях, с использованием соответствующих показателей качества (критериев). Поскольку массогабаритные показатели – один из самых важных критериев, уделено внимание эмпирически полученному закону, описывающему «предопределенность» массы машины через ее мощность и частоту вращения, на основании чего выведены универсальные выражения для оценки массы и габаритных размеров ЭМ. На основании этих выражений предлагается метод сравнения машин, как один из инструментов информационного отбора. Уделено внимание стоимости конечного продукта, как одному из важнейших критериев, даны примеры ценовых моделей.

Одна из ключевых идей, на которых построена книга состоит в том, что эволюция ЭМ идет по неким трендам и паттернам и процессом эволюции можно, до известной степени, управлять. В **главе 2** обсуждаются движущие силы и направления эволюции ЭМ. Показана роль крупных изобретений и небольших усовершенствований, даны примеры трендов и паттернов эволюции, описана эволюция ЭМ в осях «надсистема-система-подсистема». Рассмотрены примеры эволюции материалов, которые используются в ЭМ, очерчены тренды развития методов проектирования и производства. Приведены конкретные примеры направлений эволюции ЭМ, описаны противодействующие силы и ограничения.

В **главе 3** ставится ключевой вопрос об управлении процессом эволюции. Рассматриваются основные акторы процесса эволюции и их роли. Обсуждается роль в эволюции ЭМ университетов,

компаний, инвесторов, государственных и наднациональных органов. Рассматриваются технологические платформы, управление ключевыми показателями качества в рамках одной и той же платформы. Отдельно представлены изобретатели – ключевые игроки процессы эволюции, рассмотрена их психология. Рассмотрены исторические примеры изобретений. Показано использование интеллектуальной собственности (ИС) в конкурентной борьбе и роль ИС в развитии ЭМ.

Для «пересборки» электромеханики для наступающей технологической эпохи могут понадобиться на первый взгляд радикальные шаги, некоторые вещи должны быть переосмыслены. В **главе 4** предлагается новая классификация ЭМ, основанная на наборе признаков, отличном от общепринятого. Новый подход представляется более полезным для изобретателей, работающих в области ЭМ, и для применения искусственного интеллекта с целью создания новых типов и конфигураций ЭМ. Также в главе 4 показана концепция организации и передачи знаний по ЭМ совокупностью логических блоков, графически описанных пентаграммой – известным символом и геометрической фигурой. Пентаграмма показывает связность и взаимозависимость процессов в ЭМ и может быть навигатором при создании новых ЭМ.

В процессе управления эволюцией безусловно понадобятся специальные методики мышления. В **главе 5** демонстрируется применение Теории Решения Изобретательских Задач (ТРИЗ) в задачах электромеханики. Дается минимально необходимый инструментарий для самостоятельной работы в данном направлении. В качестве вспомогательного материала описаны (на конкретном примере) вещественно-полевые ресурсы, а также показано использование физических и химических эффектов, имеющих место в ЭМ. Кратко рассмотрены техники для прогнозирования развития ЭМ.

Чтобы найти свое собственное видение результатов процесса эволюции и определить свое место в процессе, необходимо выйти за пределы только технических наук и обратиться к гуманитарным – в первую очередь к философии. В **главе 6** поставлены философские вопросы об источниках знания, философской сущности электрических машин, уникальности электромеханики и ряд других вопросов. Рассмотрены относящиеся к поставленным вопросам идеи ряда философов техники. Сделана попытка осмыслить современную ситуацию и «вписать» электромеханику в контекст идей и концепций философии техники. Произведен синтез идей ряда философов и сделана попытка предложить элементы картины мира, в которую может быть вписана профессиональная деятельность электромехаников. Выдвинуто несколько гипотез. Исходя из предложенной картины мира и на основании выдвинутых гипотез, предложены ответы на поставленные вопросы и сформулированы задачи для электромехаников. На обсуждение вынесены тезисы, предложенные для включения в специальный раздел философии техники – философию электромеханики.

По мнению автора, участие в управлении эволюцией ЭМ возможно на основе трех блоков приобретённых знаний и представлений, подробно рассмотренных в книге:

- знание эволюционных трендов и паттернов эволюции ЭМ и механизмов информационного отбора поможет построить картину объективной реальности, в том, что касается развития ЭМ,
- методики инженерного творчества, например ТРИЗ, работающие в пространстве новой классификации ЭМ помогут, создавать новые решения в области ЭМ и смежных систем,

- философия техники даст этические точки отсчета, научит парадоксальному сложному мышлению, поможет осознать свою роль в настоящем и будущем, выработать собственную стратегию участия в процессе эволюции, создавать новую реальность электромеханики.

В завершение предисловия стоит сказать, что материал книги – своего рода «конструктор», который каждый читатель соберет по-своему.

Содержание

Введение

Глава 1. Критерии оценки и механизмы отбора ЭМ в процессе эволюции

Глава 2. Движущие силы и направления эволюции

Глава 3. Действующие лица процесса эволюции и их роли

Глава 4. «Анатомия» ЭМ как объекта эволюции

Глава 5. Инструментарий решения изобретательских задач в области ЭМ

Глава 6. Философские основы управления эволюцией

Заключение

Приложения

П.1. Сопоставление постоянной C_m с машинной постоянной Арнольда

П.2. Примеры оценки размеров и масштабирования

П.3. Статистика по патентным заявкам

П.4. Алгоритмы патентного поиска

П.5. Ас-матрица навигаторов 39х39

П.6. 40 приемов с примерами из ЭМ

П.7. Физические и химические эффекты

П.8. Словарь некоторых использованных терминов

Список использованных символов и аббревиатур

Глава 1. Критерии оценки и механизмы отбора в процессе эволюции

Электрические машины как объекты биосферы, техносферы¹ и вселенной

Эта книга – для тех, кто знает, что такое электрические машины (ЭМ) и знаком с классическими книгами по данному предмету, например с [1.1]. Мы не будем повторять материал, хорошо проработанный в классической литературе по ЭМ. Вместо этого, в первой главе мы попытаемся посмотреть на ЭМ не из контекста деятельности одной организации (ВУЗа, завода, и т. п.), а в контексте техносферы нашей планеты. Для целей нашего исследования в последующих главах будет предложено иногда смотреть на предмет исследования с разных позиций и представлять себя не только в роли инженера или ученого, но и в роли, например философа, изобретателя, и т.д. Итак, предположим, что мы решили объяснить, что такое ЭМ кому-то, кто никогда о них не думал, не знал, или, в лучшем случае, представляет их приблизительно - представим себе ребенка или, еще лучше, жителя инопланетной цивилизации. Воспользуемся подходом, известными еще с античных времен - практически любой объект можно охарактеризовать по следующим признакам: внешний вид, его функции и принципы работы, размеры, материалы из которых сделан объект, его поведение, влияние на человека, отношение с окружающим миром, откуда объект появляется и куда исчезает. Пройдем по этому списку и заодно проверим на прочность некоторые общеизвестные в мире электромеханики истины. На выходе мы получим одно из многих возможных описаний ЭМ как объекта техносферы.

1. Внешний вид и форма. Вращающиеся ЭМ могут иметь форму, близкую к форме цилиндра или диска, иногда - прямоугольного параллелепипеда. Например, на Рис. 1.1,а показан двигатель (в разрезе) предназначенный для привода насоса в нефтяной скважине. Удлиненная форма двигателя объясняется ограниченностью пространства скважины. На Рис. 1.1,б показан генератор, приводимый в движение гидротурбиной. Его форма – с большим диаметром и короткая в аксиальном направлении – объясняется необходимостью высокого момента на низких частотах вращения. Линейные и планарные машины обычно имеют форму прямоугольного параллелепипеда. На Рис.1.1,в показан один из вариантов линейной машины, на Рис. 1.1,г - планарной. Когда какая-либо машина встроена в другой объект, ее форму иногда не просто определить. В целом, ЭМ могут иметь бесчисленное количество конструктивных исполнений.

2. Особенности функционирования. ЭМ – преобразователи энергии. Это их основная заданная людьми функция. Исходя из цели создания ЭМ, они обычно представляются как преобразователи электрической энергии в механическую энергию движения (двигатели), или наоборот – механической - в электрическую (генераторы). По 2-му закону Электромеханики все ЭМ – обратимы [1.2], т. е. в принципе, любая машина может работать и как двигатель и как генератор. Представим, что группа исследователей-инопланетян, обладающими развитыми средствами измерения физических величин, решили это проверить! Действительно, если подключить электрическую нагрузку (группу резисторов) на клеммы статора синхронной машины с постоянными магнитами и

¹ Техносфера - часть биосферы, преобразуемая с помощью технических средств в социально-экономических целях.

пусковой обмоткой на роторе и начать вращать вал, то будет получен ток в цепи статора – реализуется генераторный режим. Если же подключить цепь статора этой же машины к источнику переменного тока, то вал машины начнет вращаться – реализуется двигательный режим. Однако, если подключить нагрузку на клеммы статора асинхронной машины с короткозамкнутым ротором и начать вращать вал, то ток в цепи статора не появится! То же касается, например, и синхронной реактивной машины. Мы то знаем, что в двух последних случаях понадобятся дополнительные средства, чтобы работа в генераторном режиме состоялась, а инопланетные исследователи могли бы прийти к неверным выводам об обратимости ЭМ. Т. е. получается, что ЭМ в принципе обратимы, но иногда на практике это реализуется только при определенных условиях.

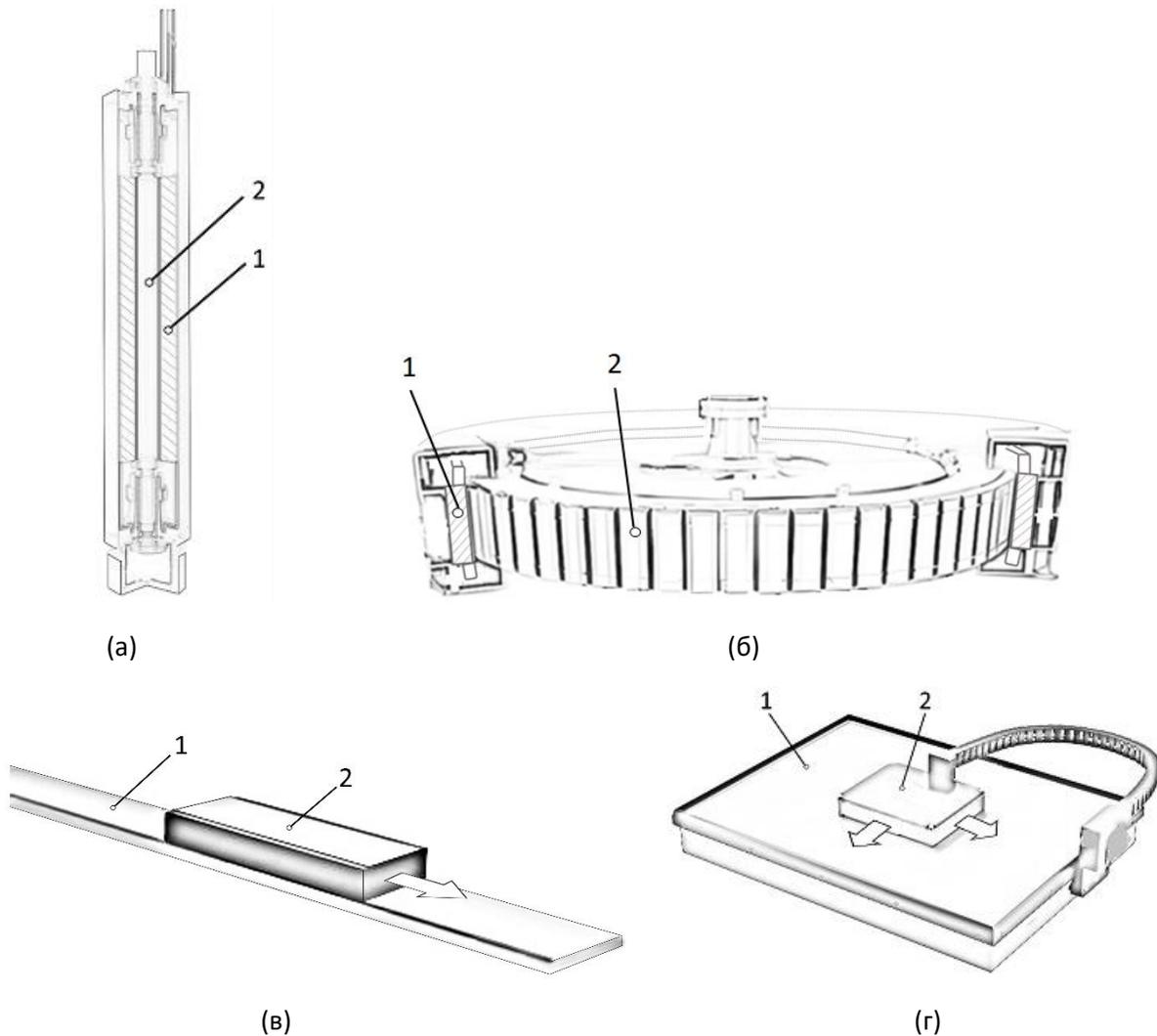


Рис. 1.1. Некоторые примеры ЭМ различных форм (1 – стационарная часть, 2 – движущаяся часть).

Вернемся к типам преобразуемых энергий. ЭМ иначе называют электромеханическими преобразователями, отражая в названии только два типа энергии – электрическую и механическую. Как известно, по 1-му закону Электромеханики все ЭМ имеют КПД меньше 100%, т.е. часть энергии теряется, выделяясь в виде тепла и механических вибраций. Схема потоков энергии в двигательном (а) и генераторном (б) режимах показана на Рис. 1.2. Получается, что в любом режиме ЭМ – генератор тепловой энергии и механических вибраций. Интересно, что электродвигатель, работающий с КПД ниже 50%, т. е. производящий больше тепловой энергии потерь, чем механической энергии, мог бы быть идентифицирован исследователем-инопланетянином как электротепловой преобразователь, а не электромеханический! Это рассуждение, пригодится нам в пятой главе при разговоре о прогнозировании развития ЭМ.

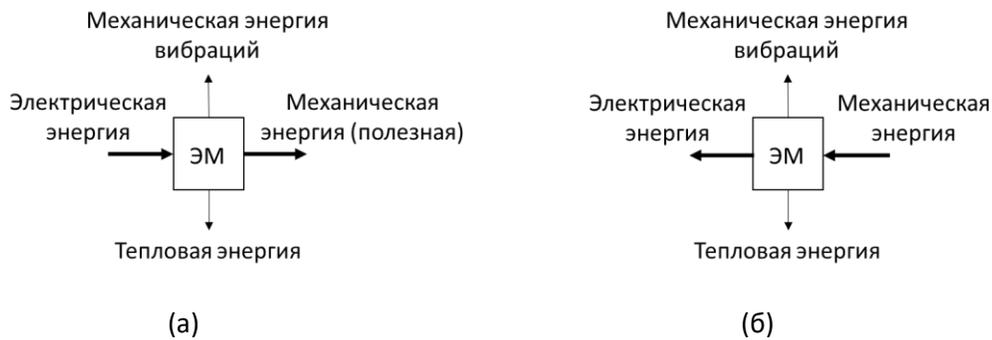


Рис. 1.2. Схемы потоков энергии в ЭМ: (а) двигательный режим, (б) генераторный режим.

3. Количественные характеристики. В качестве количественных характеристик можно взять размеры и преобразуемую энергию. Сразу отметим, что ЭМ бывают естественные (природные) и «искусственные» - созданные человеком. Традиционные машины, созданные человеком, используемые для генерации энергии, в промышленности, обеспечении привычной современному человеку бытовой инфраструктуры могут иметь мощность приблизительно от долей ватта до 2 гигаватт, размеры (наибольший размер машины - диаметр или длина) – в диапазоне приблизительно от 1 мм до 20 м. Т. е. ЭМ бывают очень разные по размерам и преобразуемой энергии. Для сравнения с другими преобразователями энергии, созданными человеком, можно привести следующий пример: самый мощный ракетный двигатель имеет мощность порядка 30 ГВт, т. е. на порядок больше, чем самая мощная ЭМ.

Существует класс устройств, также созданных человеком, имеющих размеры, меньшие самых маленьких традиционных ЭМ – это микроэлектромеханические системы (МЭМС) – устройства, объединяющие в себе взаимосвязанные механические и электрические компоненты микронных размеров. МЭМС состоят из компонентов размером от 1 до 100 микрометров (т. е. от 0,001 до 0,1 мм). Размеры самих МЭМС - от 0,02 до 1 мм. Пример МЭМС двигателя показан на Рис. 1.3. Наконец, самый маленький рукотворный «молекулярный» электродвигатель имеет размер – 200 нм.

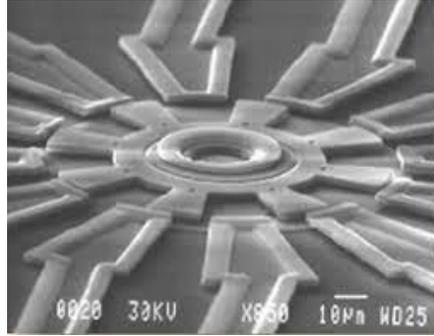


Рис. 1.3. МЭМС двигатель.

Для сравнения, приведем предельные размеры и мощность природных ЭМ:

- Самый маленький природный «бактериальный» электродвигатель имеет размер около 45 нм в диаметре. Мощность ворсинки бактерии - 10^{-17} Вт.
- С другой стороны спектра – планета Земля, которая по мнению И.П. Копылова [1.3] и ряда других ученых является гигантской ЭМ – униполярного типа. Диаметр Земли – 12600 км, мощность - $6.5 \cdot 10^{29}$ Вт.

Расположение как природных, так и рукотворных ЭМ на логарифмической шкале размеров показано на Рис. 1.4.

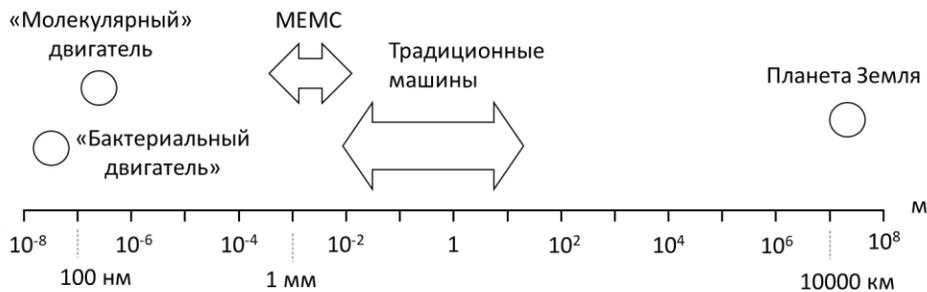


Рис. 1.4. Размеры различных типов электрических машин на логарифмической шкале.

4. Материалы, из которых сделан объект. В основном для производства ЭМ используются металлы, но также, в сравнительно меньшем объеме, используются полимеры, пластики, композитные материалы. Пожалуй, единственным необходимым компонентом ЭМ являются проводники для несения электрического тока или электрических зарядов, поскольку без электрических токов или зарядов преобразование энергии невозможно. Остальные компоненты (магнитопроводы, вал, корпус и пр.) – опциональны.

5. Отношения с окружающим миром, влияние на мир и на человека. ЭМ «встроены» в мир через различные системы, которые приводятся электрическими машинами в движение – насосы,

вентиляторы, конвейеры, подъемные механизмы и т. д., или которые приводят в движение электрические генераторы. В целом ЭМ встроены в вертикаль надсистемы-системы-подсистемы (об этом в Главе 4). Влияние на человека и окружающую среду (вне основной функции ЭМ) возможно посредством генерируемого тепла, электромагнитного излучения, вибраций, акустического шума. В аварийных режимах, например, при коротких замыканиях, ЭМ могут представлять опасность жизни и здоровью человека. ЭМ могут работать в вакууме, при высоких давлениях, в агрессивных средах, при температурах от абсолютного нуля до сотен градусов Цельсия.

6. Появление и исчезновение. В данной книге рассматриваются в основном ЭМ, создаваемые человеком. Очевидно, что именно люди придумывают, строят, эксплуатируют, снимают с производства и утилизируют ЭМ после окончания срока службы. Но здесь возникает вопрос: кто же именно решает, какие ЭМ должны появиться или исчезнуть? Один из возможных ответов на него - в следующей части.

Информационный отбор

Техноэволюция – направленное постепенное и закономерное изменение видов изделий в ряду поколений. Как один из видов технических изделий ЭМ являются частью процесса техноэволюции. Одним из ключевых механизмов техноэволюции является информационный отбор (термин использованный Б.И. Кудриным² в [1.4]). Информационный отбор, действующий в техносфере, имеет общие черты с естественным отбором, действующим в биосфере, основанном на изменчивости, наследственности и отборе. Ниже механизмы информационного отбора будут описаны на примере сходств и различий с естественным отбором.

В современной экономике происходит рост количества и разнообразия выпускаемых изделий, в том числе ЭМ. Большим разнообразием отличаются линейки продуктов даже отдельно взятого крупного производителя. Одна из причин увеличения количества видов – оптимизация ЭМ под конкретное, иногда весьма узкое, применение³.

Элементарная единица техноэволюции - группа изделий (особей) одного вида, занимающая область пространства с определенными границами. Назовем такую группу «популяция». Для каждой популяции ЭМ как вида (серии, типоминимала) могут быть составлены предельные значения всех физико-химических факторов (например, диапазоны нагрузок, среда - температура, влажность, давление и т.п.), в результате чего может быть описан некий n-мерный объем – экологическая ниша, фиксированная в пространстве и во времени.

В биологии установлено, что организмов каждого вида рождается больше, чем может найти себе пропитание, выжить и оставить потомство. Аналогично и в технике - видов изделий разрабатывается больше, чем есть свободных экологических ниш. Если два вида начинают претендовать на одну нишу, то вид с большей конкурентоспособностью вытесняет другой.

Изменчивость видов изделий в процессе техноэволюции очевидна. Любое изделие создается в соответствии с документацией. ЭМ принципиально не может быть создана без документации

² Трактовка в данной книге отличается от варианта, предложенного Кудриным.

³ «Применения» – «Applications» в английском языке.

(чертежей, расчетов, технических условий и т. д.). Любой документ изменяется; изменение изделия как вида есть следствие изменения документации.

Можно дать следующие определения, заимствуя термины из биологии:

- Генотип – устройство изделия, описанное документально; совокупность всех документов, определяющих изделие.
- Фенотип – реализованный комплекс признаков изделия; работоспособное, отлаженное изделие (реализованный генотип).

Создание нового генотипа изделия (с сопутствующей модификаций существующей или разработкой новой документации), определяющего появление нового вида изделия, аналогично мутации генетической информации биологических систем.

Принципиальное отличие естественного отбора от информационного заключается в том, что уничтожение биоособи означает одновременное уничтожение генетической информации, сохранение – воспроизведение себе подобной особи и подобной (тождественной) информации. Уничтожение же или сохранение изделия не имеет прямого отношения к документу – генетической информации об изделии [1.5]. Таким образом, фиксируем важное отличие: в биосфере генотип и фенотип объединены, а в техносфере – разделены.

Изделия, появляющиеся как следствие попыток реализации новых идей борются за попадание в конкретные сообщества технических изделий, где количество экологических ниш ограничено. Популяции изделий, которые обладают признаками, способствующими освоению новых или перераспределению в свою пользу существующих экологических ниш, выживают. В техносфере «борьбу за существование» при ограниченности вещественных и энергетических ресурсов ведут и генотипы, и фенотипы. Схема механизма информационного отбора представлена на рис.1.5.

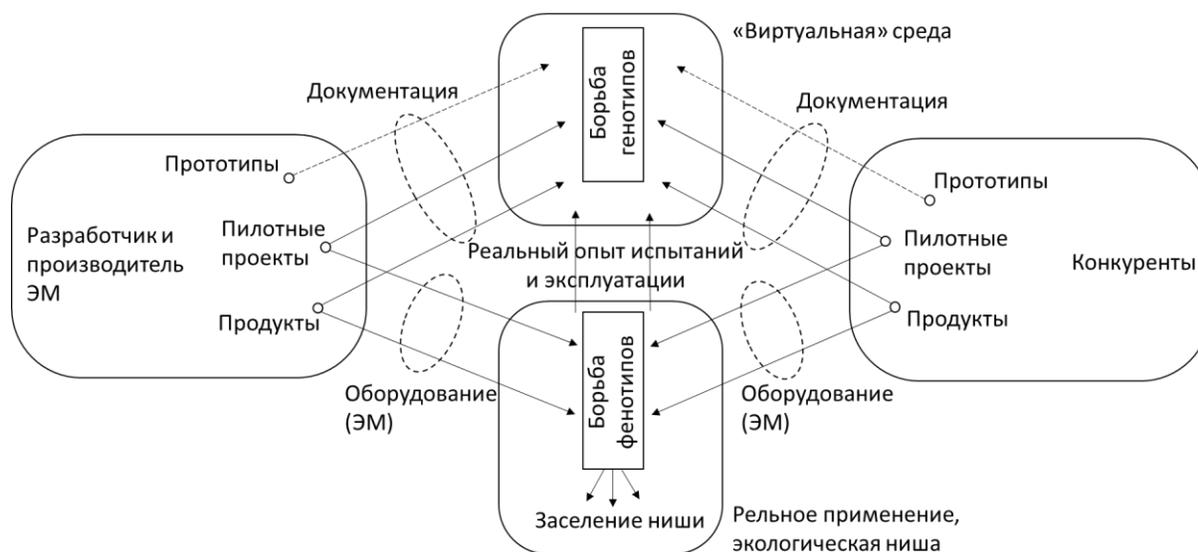


Рис. 1.5. Схема информационного отбора ЭМ.

На пути к своей экологической нише изделие проходит несколько стадий. Первый шаг – прототип(ы). Это «внутренний контур» разработки, замкнутый внутри предприятия или исследовательского центра. Готовый прототип обычно отличается от того, что предусмотрено в документации, поэтому необходимы доводка, обкатка и испытания. Уже на этом этапе можно говорить о процессе преобразования наследственной информации в фенотипическую, что отражается в проявление индивидуальности изделий (в частности, присвоение имен-номеров).

В случае успеха делается следующий шаг - установка ЭМ в реальную среду, что часто называется пилотным проектом. Здесь изделие впервые попадает в экосистему. Происходит непосредственное сравнение с другими типами ЭМ.

В случае успешного опыта эксплуатации начинается серийное, массовое производство, новый тип ЭМ становится «продуктом». На этапе выхода на серийное производство продуктов все улучшения документируются и превращаются в программу производства, установки, пуско-наладки, обслуживания, ремонта, утилизации.

В современной экономике основным процессом информационного отбора является состязание отделов маркетинга и продаж поставщиков, которое часто происходит на поле отделов закупок и инженерных служб интеграторов или потребителей ЭМ. Процесс обычно не идеален и не сводится только к технико-экономическим параметрам, могут играть роль политические факторы разных уровней, допускаться ошибки, иметь место манипуляции. Например, отчет с испытаний или маркетинговая информация с не совсем верной информацией может повлиять на результаты отбора.

В процессе информационного отбора многократно происходит создание незакрепленной информации – принятия *мнения* (в различных организациях на разных уровнях иерархий) что изделие работоспособно или требует доработки, «лучше» или «хуже» и т. д. Мнения формируются на всех этапах развития новой популяции (прототипы, пилотные проекты/установки, продукты). Цикл за циклом реализуется информационный отбор - документальное оформление совокупности мнений "лучше-хуже". В технической среде, как и в биоценозах, конкурентные взаимоотношения наиболее сильно проявляются вблизи положения равновесия: в момент развития нового рынка/применения или создания промышленного предприятия комбинация изделий может быть более широкой, в то время как для устоявшихся рынков внедрение нового вида ЭМ сложнее, вызывает большее противодействие и возможен отрицательный результат даже для лучших вариантов ЭМ, из-за консерватизма системы, высокого потенциала барьера вступления.

Важно отметить, что какими бы существенными или несущественными ни были вносимые изменения в прототипы или пилотные установки в реальной рабочей среде, они не будут воспроизведены, если они не закреплены документально, поскольку наследуются только генетические изменения. «Наследственность» – обязательная черта информационного отбора: любой документ содержит «наследственную» информацию, материализованный опыт предшествующих поколений. Отбор генотипов ведет к реализации фенотипов. Одним из элементов закрепления генетической информации является достижение договоренности по всей цепочке от субпоставщиков до потребителей. Любая популяция ЭМ без соответствующей документации (утраченной, например) является источником незакрепленной информации. Если документация утрачена в результате, например катастроф, банкротств компаний, конфликтов в коллективах (что маловероятно для средних и крупных компаний, но можно допустить для стартапов), то гибель

генотипа может означать и гибель популяции. Реверсивный/обратный инжиниринг по фенотипам возможен, но это редкость и, скорее, исключение из правил.

В целом, вытеснение существующих популяций происходит потому, что у них часть показателей «хуже», чем у вновь появившихся. Происходит остановка выпуска ЭМ старых популяций и, соответственно остановка из распространения. С «виртуализацией» мира борьба генотипов становится все более важной (можно сказать, решающей) по сравнению с борьбой фенотипов. В будущем, вероятно, станет возможным использовать комплексное моделирование, чтобы оценить результаты воздействия вновь пришедшей популяции на экосистему и экосистемы на вновь пришедшую популяцию, т. е. оценить потенциальные итоги борьбы за существование. Это в перспективе может ускорить эволюцию.

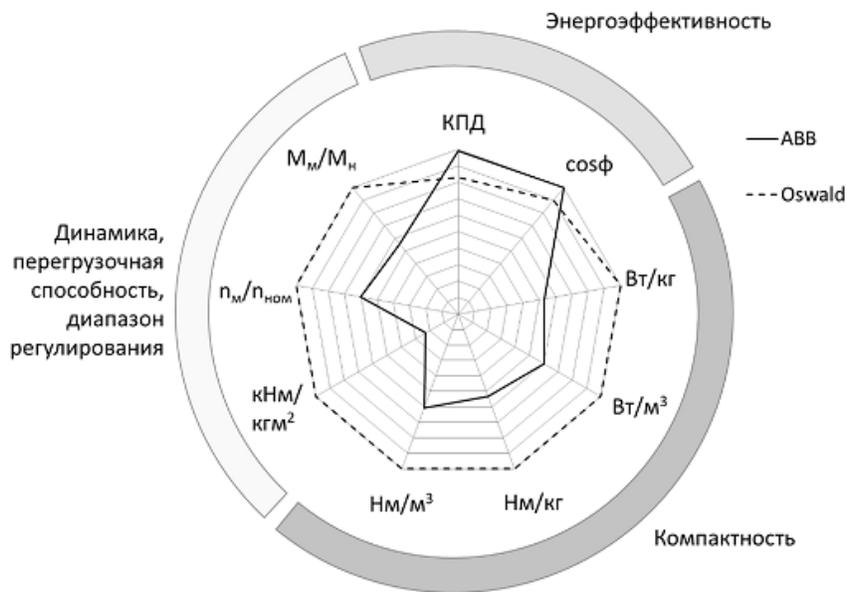


Рис. 1.6. Визуализация сравнения.

Критерии сравнения и отбора

Для ответа на вопрос, какая машина из определенного ряда «лучше» или «хуже», и формирования обоснованного мнения по этому поводу, можно выбрать ряд критериев и провести сравнение выбранных машин. Для примера возьмем две машины типа СМППМ⁴ ведущих западноевропейских производителей - Oswald TF36.12 [1.6] и ABB AMZ0500LN10_AM [1.7] с мощностью одного порядка (300-500 кВт) и одинаковой номинальной частотой вращения (250 об/мин) и выберем следующие критерии: удельные мощность и момент, плотность мощности и момента по объему, соотношение максимально возможной и номинальной частот вращения, соотношение максимального перегрузочного и номинального моментов, отношение максимального момента и момента инерции, КПД и cosφ. Нормализуем параметры для графического представления (Рис. 1.6)

⁴ СМППМ – синхронная машина с постоянными магнитами.

следующим образом: чем ближе точка, соответствующая некой характеристике, к периферии диаграммы, тем лучше данная характеристика машины. Для удобства визуального восприятия можно объединить ряд критериев в условные группы: «энергоэффективность», «компактность» и «динамика». При таком сравнении машина ABB уступает машине Oswald в компактности и динамике, но более «энергоэффективна»⁵. Получается, что нельзя заключить, что одна из машин безоговорочно лучше, чем другая. Важно понимать, что ЭМ может быть «лучше» или «хуже» только относительно какого-либо применения. Например, в металлообрабатывающей промышленности «динамика» важна, а в работе насосных и вентиляторных агрегатов «динамика» не важна, но важен высокий КПД. Сравнение характеристик ЭМ вне контекста применений обычно не имеет большого смысла. Наконец, на практике цена машины обязательно будет одним из параметров сравнения. Большая дешевизна одной из машин может объяснять ее отставание в некоторых характеристиках. Не стоит забывать и о преобразователях частоты (ПЧ) и других элементах системы, характеристики которых могут напрямую определяться выбором ЭМ.

Итак, поскольку адекватное сравнение машин может быть только через призму применений, на которые они рассчитаны, рассмотрим несколько соответствующих примеров применений. В первых трех примерах покажем зависимость КПД систем от типа ЭМ и структуры привода и роль КПД в некоторых применениях.

Пример 1. В первом примере рассмотрим двигатель-генератор (Д-Г) гибридной пропульсивной системы Рис. 1.7. Данная ЭМ может работать в следующий режимах:

- «генераторном»: при движении на главном дизельном двигателе (ГДД), питая потребителей на главной шине, давая, таким образом, возможность отключить дизель-генераторы (поток энергии «2» на Рис. 1.7),
- «бустерном»: в качестве двигателя, добавляя крутящий момент на валу, помогая ГДД (поток энергии «1» и «3»),
- «электродвижения»: Д-Г работает в качестве единственного приводящего вал во вращение двигателя, с питанием от главной шины, в случае выхода ГДД из строя дизеля или в условиях, когда работа ГДД не оправдана и он отключен или механически отсоединен от вала (поток энергии «3»).

В рамках данного применения рассмотрим две альтернативы по типу Д-Г: АМКЗ и СМПМ. Размеры и масса Д-Г в данном применении не очень важны, но важно влияние типа машины на потери энергии и расход топлива на судне, т. е. важен КПД машины, причем в широком диапазоне нагрузок. На рис. 1.8 в качестве примера показаны результаты измерения (для АМКЗ) и моделирования (для СМПМ) за несколько месяцев плавания рыболовного траулера с подобной пропульсивной системой. Основной режим – генераторный, другие режимы не использовались. В данной случае, генератор практически все время работал на 20-40% от своей номинальной мощности. Использование в качестве Д-Г СМПМ позволит значительно снизить потери, что означает экономию электроэнергии и, как следствие, экономию топлива на судне. Оправданность выбора более дорогой системы с СМПМ вместо системы с АМКЗ должна определяться технико-

⁵ Результаты сравнения данных конкретных машин ABB и Oswald ни в коем случае не должны вести к выводам о возможностях данных поставщиков. Они в принципе способны делать машины с разным «фокусом» - эффективность, динамика, компактность и т.д.

экономическими расчетами, где входными данными будут цена той и другой машин и цена топлива.

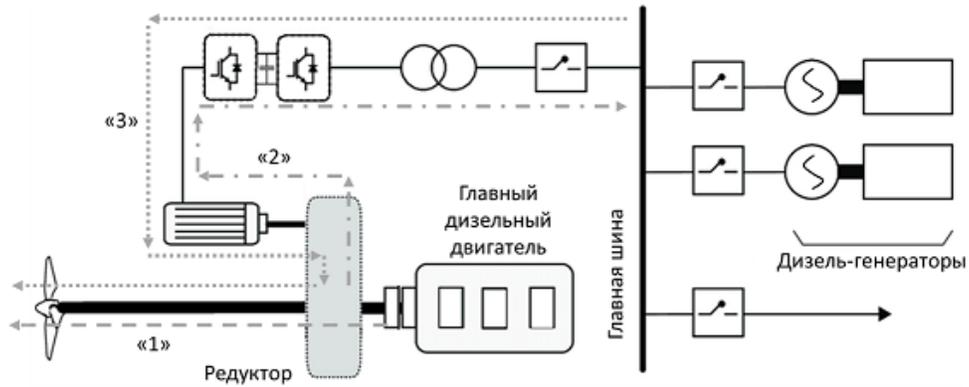


Рис. 1.7. Гибридная пропульсивная система.

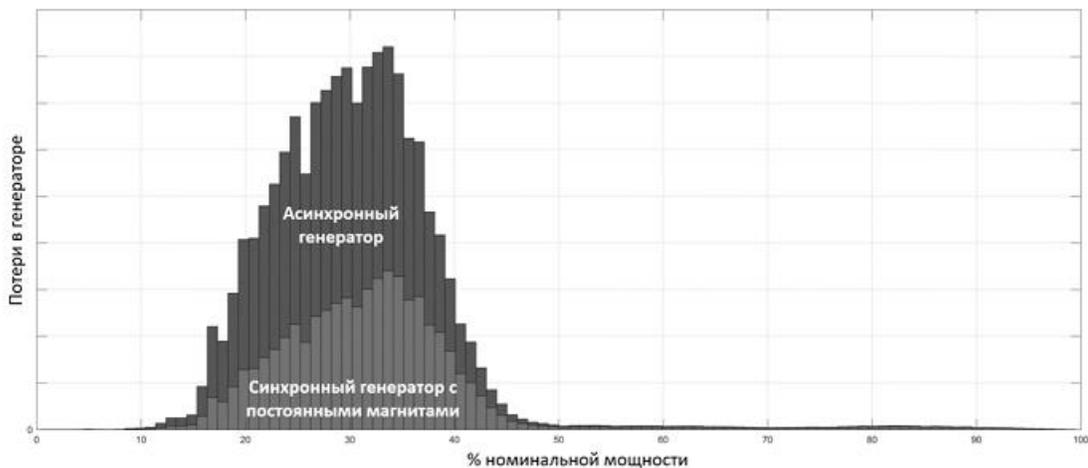


Рис. 1.8. Сравнение потерь в Д-Г.

Пример 2. Во втором примере покажем зависимость системного КПД от структуры привода в задаче выбора оптимальной системы привода для ветроэнергетической установки (ВЭУ). Выбор ЭМ (генератора) для системы определяется как структурой всей системы, так и характеристиками самой ЭМ. Тип и структура обмоток ЭМ будут определять тип и структуру ПЧ и трансформатора. Вариантов структуры в приводе обычно четыре: прямой привод (Рис. 1.9,а) и системы с механическим мультипликатором⁶ с 1-й (Рис. 1.9,б), 2-мя и 3-мя ступенями (Рис. 1.9,в). Как и в первом примере, один из важнейших критериев – КПД системы. Поскольку ВЭУ должны вырабатывать энергию при разных скоростях ветра, важно рассматривать КПД системы в широком диапазоне частот вращения. На Рис. 1.10 дано сравнение КПД восьми альтернативных системных решений (данные из [1.8]). Компоненты системы, включенные в расчет КПД: механический

⁶ Также часто используются термины «редуктор», «трансмиссия».

редуктор, генератор, преобразователь частоты и трансформатор. В каждом из этих компонентов будут потери, причем КПД каждого из компонентов обычно снижается при снижении нагрузки. Обозначения на Рис. 1.10: 1-с.р. – одноступенчатый редуктор, 3-с.р. – трехступенчатый редуктор, СГПМ – синхронный генератор с постоянными магнитами, АГДП – асинхронный генератор двойного питания, ПП – прямой привод, АГКЗ - асинхронный генератор с короткозамкнутым ротором, СГ – синхронный генератор с обмотками возбуждения. На диаграмме видно, что система «1-с.р.+СГПМ» обеспечивает наилучший КПД при высоких скоростях ветра (11...15 м/с), но на средних скоростях (5...9 м/с) уступает системе с ПП. На выбор оптимальной системы и соответственно выбор ЭМ повлияет статистическое распределение скоростей ветра в месте установки ВЭУ. Масса системы электропривода также будет иметь большое значение и по этому критерию фаворитами могут быть не те системы, которые имеют наилучший КПД. Переход от системного КПД к численной оценке выработанной или сэкономленной энергии будет показан на следующем примере.

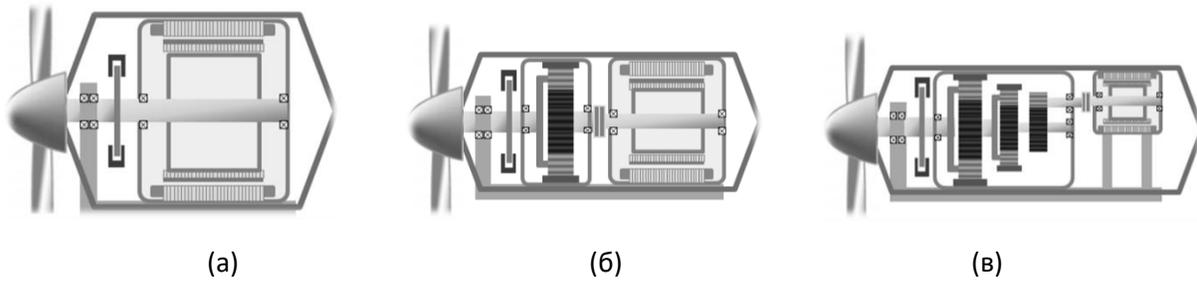


Рис. 1.9. Три сравниваемые альтернативы структуры привода⁷.

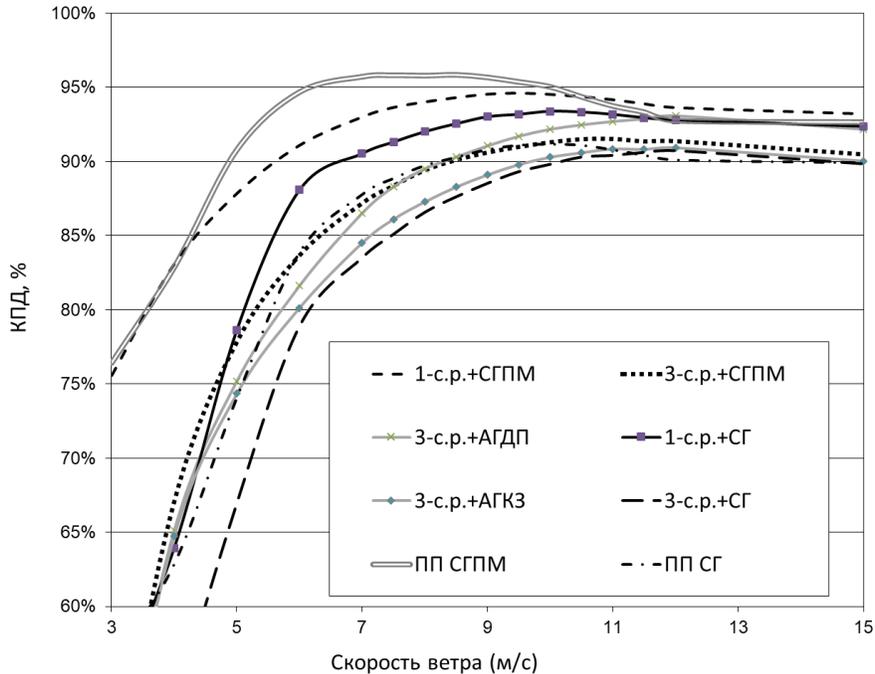


Рис. 1.10. Системный КПД для различных комбинаций редукторов и ЭМ.

⁷ Иллюстрация не отражает реальной компоновки и пропорций компонентов.

Пример 3. В третьем примере рассмотрим КПД конкурирующих систем для винто-рулевой колонки (ВРК) морского судна. При выборе оптимальной системы привода ВРК можно рассмотреть два варианта, представленных на Рис. 1.11: система с двумя угловыми редукторами и АМ (Рис.1.11,а), и система с одним угловым редуктором и СМПМ вертикальной установки (Рис.1.11,б). Частота вращения, на которую рассчитаны машины – разная. Машина в системе с одним угловым редуктором – более тихоходная и с большим моментом. Сравнить эти варианты можно по потребляемой энергии, взятой за определенный репрезентативный период времени. Во время плавания судно движется с различными скоростями - на Рис.1.12,а показано статистическое распределение времени работы на этих скоростях⁸. В частности, на Рис.1.12,а видно, что около четверти времени судно не движется, либо рулевая колонка не используется. Высокая скорость движения соответствует высокой частоте вращения винта ВРК, соответственно ЭМ. Потребляемая ВРК энергия на каждом уровне нагрузки напрямую зависит от КПД системы на этом уровне. На больших частотах вращения нагрузка и мощность на валу возрастает, и даже относительно меньшая разница в КПД систем, которую мы имеем на больших частотах вращения, играет большую роль с точки зрения потерь в ЭМ и потребляемой энергии. На малых частотах вращения разница в КПД систем – большая, поэтому разница в потребляемой энергии также заметна, несмотря на относительно небольшие уровни нагрузки. Годовое потребление энергии на различных скоростях для двух сравниваемых систем показано на Рис. 1.12,б. Чтобы получить суммарную разницу в потребленной энергии X , необходимо сложить разницы Δ на всех скоростях. Значение X (в кВт/ч в год) используется в оценке времени окупаемости инвестиции, в случае замены системы с АД на более дорогую систему с СМПМ (обозначим размер инвестиции Y): если цена электроэнергии (возможно, пересчитанная из цены топлива) за 1 кВт/ч – Z , то стоимость сэкономленной энергии - $X*Y$ в год, и время окупаемости инвестиции $Y/(X*Z)$.

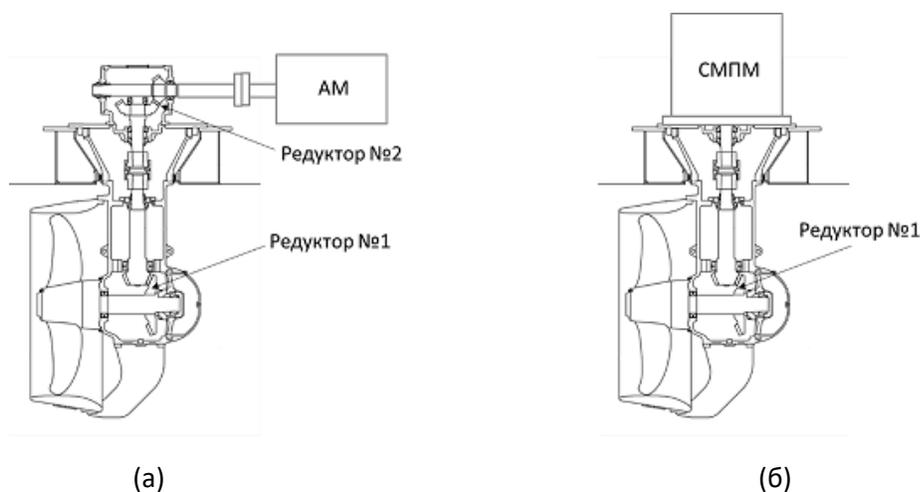


Рис. 1.11. Сравнимые системы привода ВРК.

Важность совместимости характеристик ЭМ и нагрузки и противоречия между критериями на системном уровне показаны в примере 4.

⁸ Все величины на Рис.1.12 нормализованы.

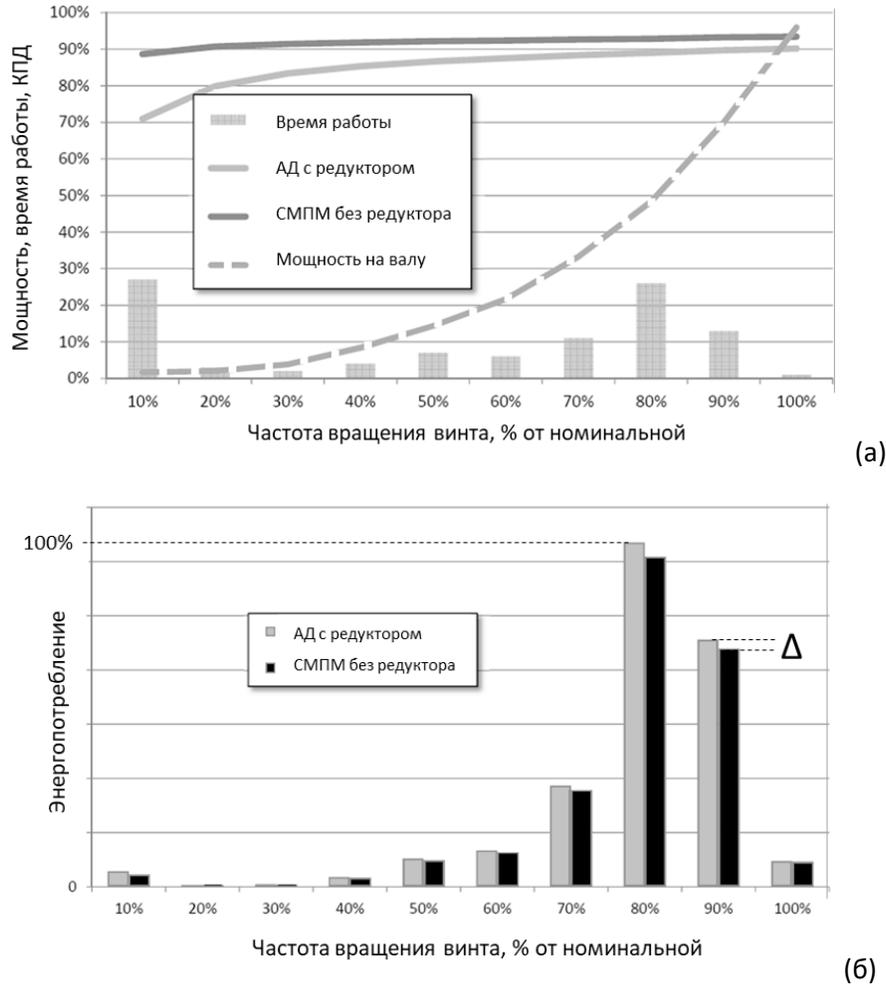


Рис. 1.12. Расчет разницы потребленной энергии.

Пример 4. Рассмотрим выбор ЭМ в контексте такого применения как БПЛА с батарейным питанием, которые часто называют дронами. Вопросы, связанные с выбором оптимальной технологии ЭМ, обычно являются неотъемлемой частью задач проектирования более высокого уровня, связанных с общей конструкцией дрона, включая проектирование всей энергетической системы, состоящей из батареи, нескольких консолей с пропеллерами и электронных регуляторов частоты вращения. В целом пространство выбора разработчиков дронов можно представить так, как показано на рис. 1.13, - в каждом отдельном случае приходится искать компромисс между стоимостью, грузоподъемностью и дальностью полета дрона. Улучшение одного из показателей часто может быть достигнуто только за счет другого. Чтобы понять, каким образом выбирается ЭМ, надо понять пространство системных компромиссов. Сначала рассмотрим влияние емкости батареи (и, соответственно, ее размера) на полезную нагрузку и длительность полета:

- При фиксированном размере батареи меньшая полезная нагрузка позволяет совершать более длительные полеты, поскольку импульсивные системы работая с меньшим моментом и на более низкой частоте вращения, потребляя меньше энергии,

- При фиксированной массе полезной нагрузки больший размер батареи означает более длительные полеты, если пропульсивные установки позволяют поднять в воздух более тяжелый дрон, при этом работая без критических перегрузок и с тем же КПД,
- Также очевидно, что более емкая (и тяжелая) батарея приводит к увеличению стоимости дрона.

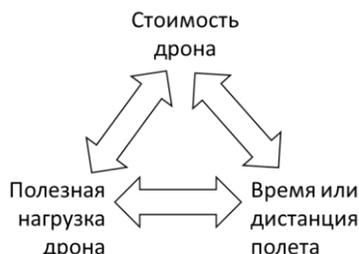


Рис. 1.13. Пространство компромиссов.

Теперь введем в рассмотрение ЭМ. В настоящее время (2020-е годы) практически все дроны используют технологии СМПМ. Существуют различные варианты СМПМ, характеризующиеся различными уровнями энергоэффективности, и ЭМ, относящаяся к одному и тому же классу, может быть спроектирована для более высокого КПД за счет большего объема активных материалов и соответственно большей массы. Замена существующего двигателя на более эффективный приведет к меньшему разряду батареи во время работы, обеспечивая более длительные полеты — это, безусловно, верно, когда вес двигателя остается неизменным, однако, когда более высокая эффективность достигается за счет большей массы двигателя, выбор становится менее очевидным. Более того, двигатель с большей массой обычно стоит дороже, поэтому проблема выбора правильного двигателя становится еще более сложной. Задача конструктора – в том числе найти баланс между массой двигателей и батареи.

Но более важно выбрать оптимальные комбинации пропеллера и двигателя – это даже важнее, чем иметь высокий КПД или малую массу отдельного двигателя. Рассмотрим это на примере. На Рис. 1.14 показаны нагрузки на пропульсивную систему в процессе полета дрона службы доставки. На диаграмме выделены три основных уровня нагрузки, соответствующих следующим режимам: «1» - горизонтальный полет, «2» - «парение», «3» - маневрирование, поддержание устойчивости в порыве ветра.

Рассмотрим нагрузочную характеристику системы «пропеллер-двигатель» (Рис. 1.15). Частота вращения и момент нормализованы:

$$n' = \frac{n}{n_{max}} \quad (1.1)$$

$$M' = \frac{M}{M_{max}} \quad (1.2)$$

Точка «3» на пропеллерной кривой, в которой достигается максимальный момент, и соответствующая максимальная частота вращения имеет координату [1;1].

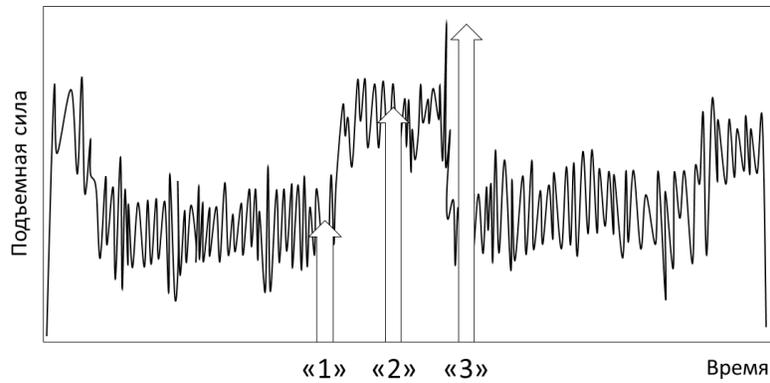


Рис. 1.14. Вариации подъемной силы, три уровня.

Обычно, точка «3» - критический режим, в котором необходимо проработать только несколько секунд. Эта точка определяет перегрузочная способность двигателя. Режимы «1» и «2» - длительные. Поскольку в режиме «1» система проводит больше времени, именно на этом участке нагрузочной кривой важно иметь высокий КПД. Режим «2» определяет ограничение по тепловой нагрузке ЭМ. Но существует еще один важный аспект, который необходимо рассмотреть. На Рис. 1.16 показаны два двигателя-кандидата: в первом случае (Рис. 1.16,а) ЭМ имеет КПД до 95%, но работая на нагрузочной кривой в длительных режимах будет иметь КПД около 80-85%. Во втором случае, хотя ЭМ имеет максимальный КПД 90%, именно с этим значением она и будет работать, потому что зона максимального КПД совпадает с областью длительной работы на нагрузочной кривой. Таким образом, оптимальная (для данного пропеллера) карта КПД может быть более важной, чем максимальное значение КПД.

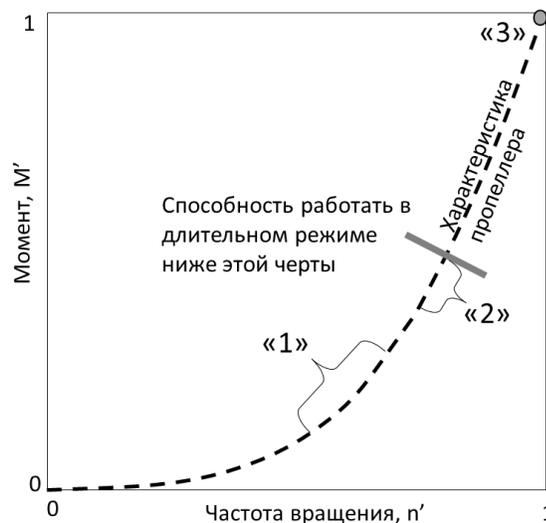


Рис. 1.15. Характеристика пропеллера и рабочие участки.

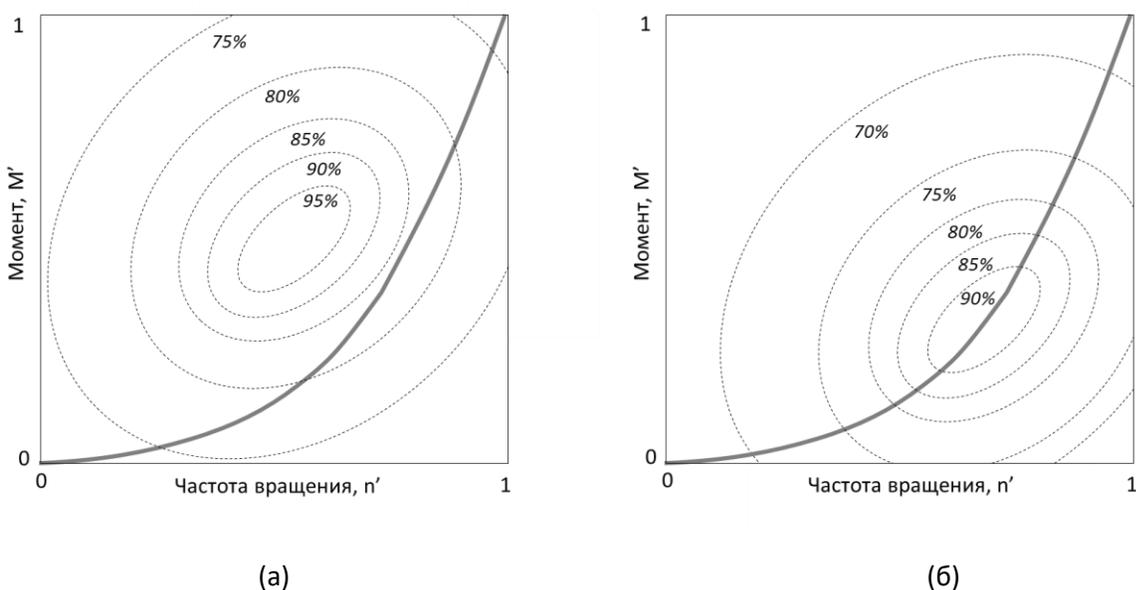


Рис. 1.16. Характеристика пропеллера на карте КПД: (а) неоптимальная карта, (б) оптимальная карта.

В завершение примера с электродвигателями для дронов следует сказать, что главное требование к гражданским дронам – безопасность полетов, что обеспечивается, в значительной степени, безотказной работой пропульсивных систем. Исходя из этого, более дешевая система с высоким КПД и низкой массой может проиграть в информационном отборе более дорогой и менее энергоэффективной, если последняя продемонстрирует более высокую надежность.

В завершение описания возможных критериев оценки и отбора, рассмотрим пример с еще более расширенным набором критериев.

Пример 5. При проектировании приливных турбин⁹ используется многосоставный критерий – нормированная стоимость электроэнергии («НСЭ»), графически представленный на Рис. 1.17. Принцип построения критерия (главной целевой функцией), следующий: в числителе – все затраты (за время существования турбины или всего парка турбин), в знаменателе – вся произведенная энергия (за этот же период). Значения – дисконтированные во времени, что отображено призматической формой графических элементов, содержащих текст. Улучшения (снижения) значения критерия можно достичь снижением затрат и/или повышением производства энергии, как показано стрелками на Рис.1.17.

Снижения НСЭ можно получить, например, повышая КПД, снижая затраты, как на закупку оборудования, так и на его ремонт (что зависит от *доступности* оборудования). Уточним, что "доступность"¹⁰ означает степень, в которой система находится в рабочем состоянии и

⁹ В данной книге используется «калька» с английского термина «Tidal turbine» – «приливно-ветровая турбина». Альтернативный термин - «гидротурбина».

¹⁰ англ. термин availability.

рассчитывается по следующей формуле: $A = \frac{T_w}{T_w + T_s}$, где T_w - время, в течение которого система полностью функционирует и работает по своему назначению, T_s - время, в течение которого система недоступна или не работает по своему назначению. Более высокое значение доступности указывают на лучшую надежность системы. Достижение высокой доступности часто включает в себя внедрение резервирования, устойчивости к отказам и стратегий восстановления после неисправности, чтобы минимизировать простои.

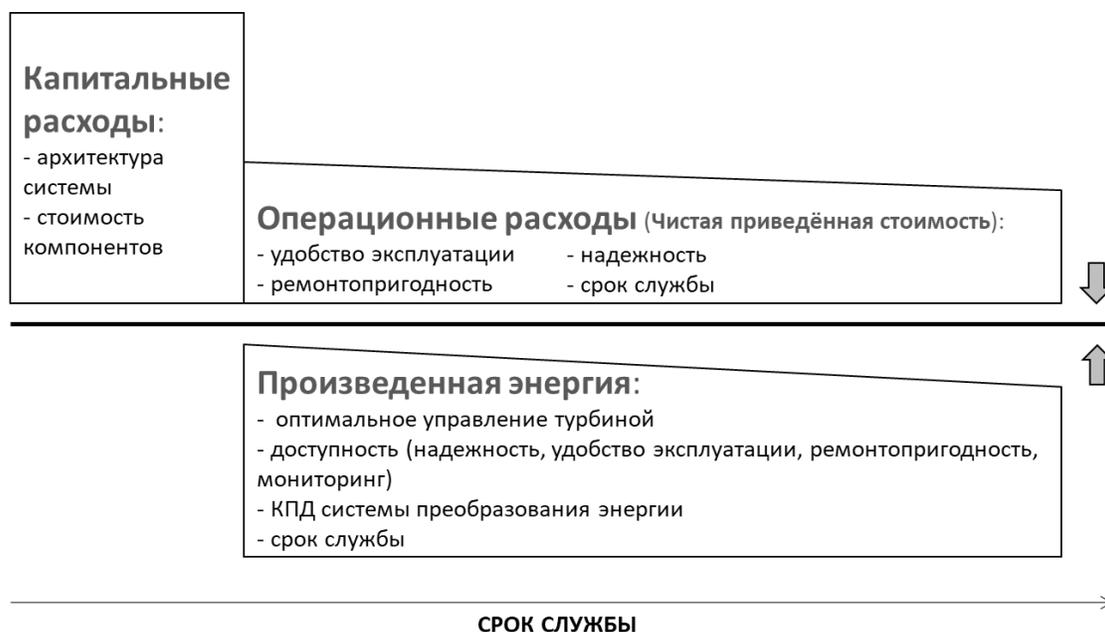


Рис. 1.17. Графическая иллюстрация стоимости энергии.

Главный вопрос - каким образом та или иная ЭМ будет влиять на систему и системные характеристики и, соответственно, критерии. Т. е. в процессе информационного отбора на машину смотрят через «фильтр» критериев, причем взаимозависимых и противоречащих друг другу критериев. В нашем примере можно указать на как минимум два противоречия, показанных на Рис.1.18:

- П1 – Высокий КПД может быть достигнут за счет использования в ЭМ большего количества активных материалов, но это увеличит цену ЭМ, т.е. капитальные затраты проекта.
- П2 – ЭМ, меньше нагруженная в тепловом отношении – более надежная, но при этом больше по размерам и массе, т.е. более дорогая. Получается, что капитальные затраты находятся в прямом противоречии с доступностью.

Также можно показать прямое влияние («ПВ» на Рис.1.18) одного из критериев на другой: низкая надежность, ведущая к необходимости частого ремонта, или даже замены ЭМ, приводят к возрастанию операционных издержек.

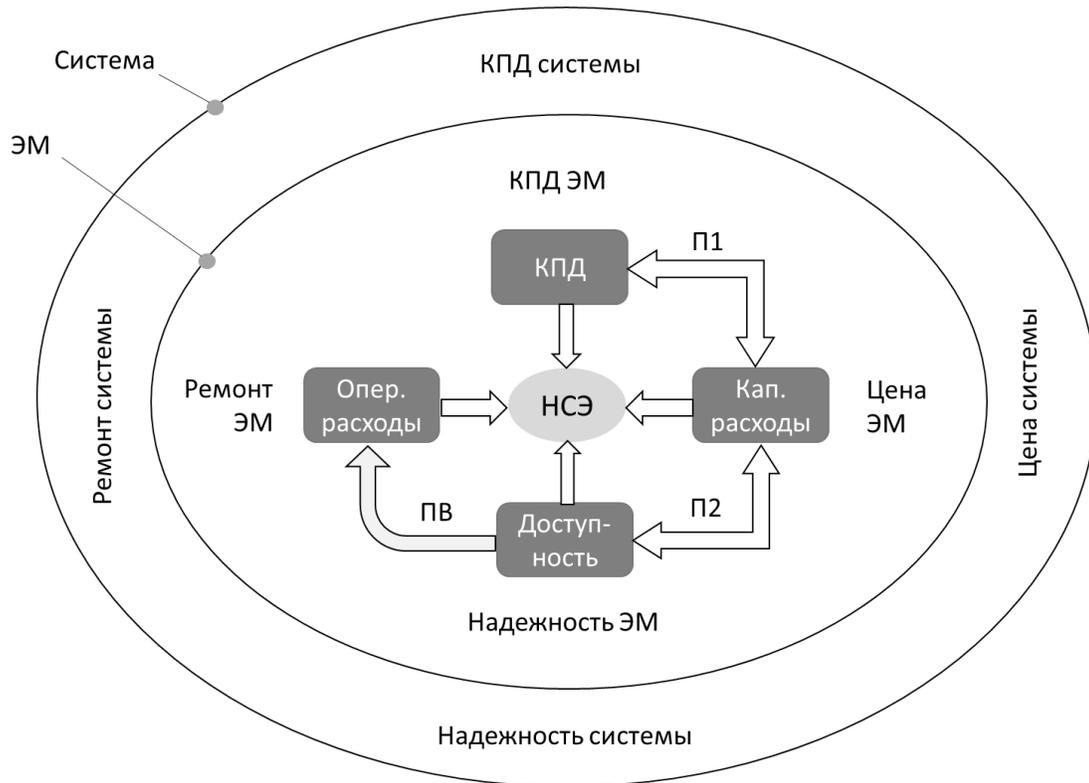


Рис. 1.18. Зависимость критериев и системный контекст.

Важно понимать, что в дополнение к основным критериям в проекте создания и внедрения турбины будет приниматься во внимание еще множество других критериев, которые могут определять результаты информационного отбора. Перечислим некоторые из них для случая варианта с радикально новой ЭМ, как альтернативой некой традиционной проверенной ЭМ:

- *Чувствительность СЭ к изменениям*: как изменится НСЭ, если выбранная новая ЭМ окажется ненадежной и ее придется заменить проверенной ЭМ другого типа, и потребуются изменения на уровне системы? Если затраты высоки, то НСЭ проекта неприемлемо увеличится.
- *Возможность замены*: если механический интерфейс ЭМ особенный, ее замена может стать проблемой, поскольку может потребоваться перепроектирование гондолы турбины.
- *Патентная чистота*: если выбранная ЭМ - специальная, то, скорее всего, в ней будут использованы специальные решения, которые, с небольшой, но все же ненулевой вероятностью, могут быть запатентованы кем-то другим. Это потенциально может создать проблемы для поставщика турбин.
- *Доступность компонентов*: если, например, в ЭМ используется очень специальный компенсатор давления, или используется особая топология преобразователя частоты, в будущем ремонт или замена неисправных деталей может стать проблемой оператора парка турбин.

- *Простота транспортировки:* если диаметр ЭМ – большой (несколько метров), что может иметь место в решениях с прямым приводом, транспортировка на место сборки турбины может стать невозможной автомобильным транспортом и могут потребоваться другие виды транспорта (морской, вертолетный)
- *Уровень готовности технологии:* если ЭМ все еще является прототипом, выбирать его для проекта может быть рискованно
- *Год готовности технологии:* если прототип испытан недостаточно, стандартизация ЭМ может занять продолжительное время, что может быть неприемлемо долго для проекта.
- *Ремонтопригодность:* возможность отремонтировать ЭМ на сайте или только на заводе-изготовителе.
- *Сложность обслуживания:* требуется ли вспомогательным системам ЭМ (охлаждение, компенсация давления, подшипники) обслуживание в процессе эксплуатации.
- *Возможность тестирования:* должно быть проверено наличие испытательного стенда для полномасштабных испытаний всей системы электропривода перед ее постановкой на подводную турбину.
- *Срок службы:* если машина - новая, статистических данных для прогнозирования срока службы нет, в то время как для традиционной проверенной ЭМ есть все данные и эти данные показывают высокую вероятность безотказной работы в течение многих лет.

По результатам рассмотренных выше примеров можно подвести некоторые итоги:

- Оценивать машины в отрыве от применений не имеет большого смысла, реальный набор критериев оценки задаются применениями.
- Обычно в каждом применении есть самый «видимый» критерий (как КПД в первых трех примерах), но общее количество критериев - велико.
- Отдельные критерии могут быть объединены в многосоставные критерии (как НСЭ).
- Критерии могут находиться в противоречиях друг с другом.

В завершение отметим, что в мире применений ЭМ существует множество других критериев, не упомянутых выше, например точность позиционирования, отсутствие пульсаций момента, низкие вибрации и шум, высокая динамика.

Цена и стоимость

Цена - один из важнейших критериев при выборе электрической машины для любого применения, поэтому цену обязательно следует включить в набор ключевых показателей качества (КПК), наряду с массогабаритными показателями и КПД. При создании новой машины следует ориентироваться на ситуацию на рынке и цены на существующие серии машин, с которыми планируется конкурировать. Вопрос о потенциальной цене машины на рынке, для которого она создается, в процессе разработки машины следует ставить как можно раньше. В отличие от других КПК, стоимость – критерий «плавающий», «гибкий», меняющийся во времени.

При создании новой машины следует постараться найти ответы на следующие вопросы:

- Как определить цену, от которой необходимо отстраиваться и насколько эта цифра надежна?
- Как цены на конкурирующие машины может меняться со временем, например в условиях конкурентной борьбы?

Следует понимать структуру цены, такие составляющие как заложенную прибыль, поправки на ожидаемую инфляцию, различные риски, гарантии, налоги, стоимость материалов и трудозатраты, операционные затраты предприятия. Это понимание поможет, в частности, спланировать меры по снижению стоимости создаваемой машины, например, выбрать оптимальный производственный процесс или разделение труда между субпоставщиками.

Планируемая цена продукта может оказывать влияние на другие КПК. Например, требования по низкой цене могут заставить проектировщика пожертвовать другими характеристиками, например уровнем КПД.

Структура стоимости может меняться при быстром развитии одного из используемых в конструкции машины активных материалов. Например, в [1.7] показано, что стоимость ВТСП ленты может снизиться на порядок, при усовершенствовании самой ленты и при переходе на массовое производство. В этом случае доля ВТСП ленты в структуре стоимости СП-машины значительно снизится.

Примеры упрощенных ценовых моделей

Ценовые модели могут строиться на основании анализа доступных каталогов и прайс-листов. Модель, описывающая серию машин, может быть надежнее, чем ценовая информация об отдельной машине. В целом, поскольку основой затрат являются материалы, из которых изготовлена машина, то массу машины, определяемую количеством израсходованных материалов, в основном – металлов, можно принимать за основной параметр модели.

Пример 1. В онлайн-курсе *DriveConstructor*, описанном в [1.8], для стандартных машин общепромышленного применения цена приблизительно оценивается на основании массы машины, типа машины, уровня напряжения, степени защиты, материала корпуса и типа монтажа:

$$\epsilon = k_1 k_2 k_3 k_4 k_5 m^\alpha, \quad (1.3)$$

где ϵ – цена в у.е., m – масса в кг, коэффициенты:

- $\alpha = 0.9$ для напряжений 0.3-0.7 кВ, $\alpha = 0.8$ для напряжений выше 3 кВ,
- $k_1 = 30$ для напряжений 0.3-0.7 кВ, $k_1 = 100$ для напряжений выше 3 кВ,
- $k_2 = 1$ для АДКЗ (IE2) и СРМ, $k_2 = 1.4$ для СМППМ,
- $k_3 = 1$ для степеней защиты IP54/55, $k_3 = 0.97$ для IP21/23,
- $k_4 = 1$ для машин со стальным корпусом, $k_4 = 0.95$ - с чугунным корпусом, $k_4 = 1.2$ - с алюминиевым корпусом,
- $k_5 = 1$ для монтажа на лапах, $k_5 = 1.02$ для монтажа на фланце, $k_5 = 1.05$ для монтажа на лапах и фланце.

Стоит заметить, что данная модель может работать для низковольтных машин с мощностью от 1,1 до 2000 кВт и высоковольтных машин с мощностью от 200 до 5000 кВт.

Пример 2. Ценовая модель СМПМ малой мощности, с уровнем напряжения 10÷40 В, открытого исполнения, с охлаждением потоком воздуха, разработанных для дронов, также может быть построена на основе массы машины [1.9]:

$$\epsilon = 400m^{0.4}, \quad (1.4)$$

где ϵ – цена в у.е., масса m - в кг.

Универсальную ценовую модель, действующую для любого типа машин, построить сложно, да и, пожалуй, не имеет практического смысла. В то же время необходимо строить ценовые и стоимостные модели для определенных типов ЭМ, и отдельных серий.

Факторы, определяющие массогабариты ЭМ

Важно понимать факторы, определяющие массу и размеры ЭМ. Для предметного разговора о целях и результатах проектирования электрических машин нужны надежные точки отсчета. Сравнение новой машины с современным уровнем техники может являться инструментом оценки качества выбранных технических решений и используемых технологий, и позволяет выбирать стратегии дальнейшего усовершенствования. Основная концепция, от которой мы будем отталкиваться - гипотеза о массе электрической машины, сформулированная в [1.14] следующим образом: «Масса любой вращающейся ЭМ пропорциональна ее мощности, взятой с степени 0.75, и обратно пропорциональна ее частоте вращения, взятой с степени 0.5». Соответствующее выражение:

$$m \equiv \frac{P^{0.75}}{n^{0.5}} \quad (1.5a)$$

В более общей форме гипотеза может быть представлена как:

$$m \equiv \frac{P^{C_p}}{n^{C_n}} \quad (1.5b)$$

где C_p и C_n – коэффициенты, отражающие общую тенденцию изменения массы электрических машин при варьировании мощности и частоты вращения. [1.14] сделано предположение, что C_p и C_n определяются «природой» электрических машин как класса технических устройств. Значения $C_p = 0.75$ и $C_n = -0.5$ были получены и протестированы в работах [1.12]-[1.14]. В поисках объяснения значения $C_p = 0.75$ можно обратиться к [1.13], где показано, что для геометрически подобных машин при постоянстве токовой нагрузки и магнитной индукции мощность P пропорциональна базисному размеру l в четвертой степени: $P \sim l^4$. Тогда, принимая, упрощенно, что масса машины пропорциональна ее объему и базисному размеру в третьей степени $m \sim V \sim l^3$, можно прийти к выражению $m \sim P^{3/4}$. Таким образом масса пропорциональна мощности в степени 0.75 и, соответственно, $C_p = 0.75$. Четкого логического объяснения $C_n = -0.5$ пока не предложено.

Еще одним ключевым элементом необходимым для понимания факторов, определяющих массогабариты ЭМ, является логарифмическая карта (Рис. 1.19), описывающая распределение удельных показателей электрических машин (без разделения на типы) в зависимости от уровней мощностей и частот вращения. В [1.14] утверждается, что электрические машины – класс устройств, в значительной степени подчиняющийся логарифмическим законам в том, что касается изменению массы в зависимости от мощности и частоты вращения.

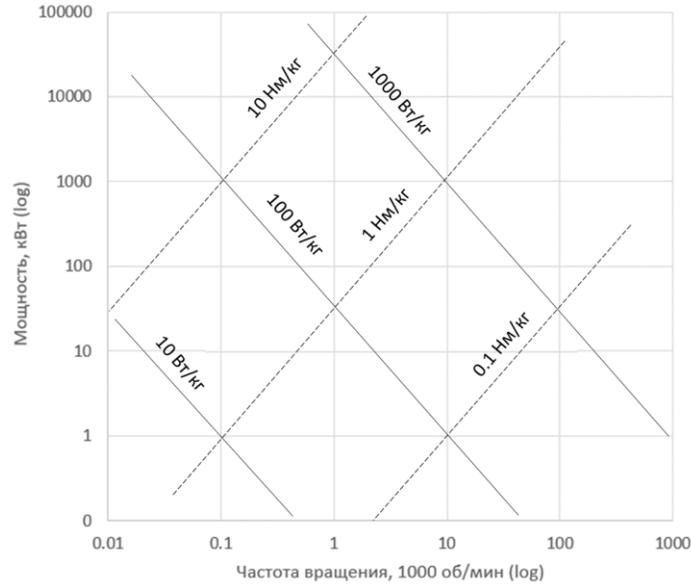


Рис. 1.19. Линии равных удельных мощности и момента.

Машинная постоянная C_M , возможность введения которой проистекает из гипотезы о массе, определяется как:

$$C_M = \frac{m}{P^{c_p} n^{c_n}}, \quad (1.6)$$

Соответственно, масса может быть определена через C_M :

$$m = C_M P^{c_p} n^{c_n}, \quad (1.7a)$$

или, с учетом предложенных значений коэффициентов C_p и C_n :

$$m = C_M P^{0.75} n^{-0.5}, \quad (1.76)$$

где m - в кг, P - в кВт, n - в об/мин.

В какой-то степени выражения (1.7a, 1.76) описывают что-то подобное закону гравитации, где «гравитацией» является отношение $\frac{P^{0.75}}{n^{0.5}}$ и которую проектировщики пытаются преодолеть, работая над снижением значения машинной постоянной C_M .

Машинная постоянная C_M зависит от многих факторов. В [1.12] выбраны восемь основных фактора, и постоянная представлена следующим образом:

$$C_M = K_t K_e K_c K_u K_{fp} K_s K_i K_o K_x. \quad (1.8)$$

где K_t – фактор типа машины, K_e – фактор требования к КПД, K_c – фактор типа охлаждения, K_u – фактор уровня напряжения, K_{fp} - фактор частоты и полюсов, K_s - фактор формы, K_i - фактор наличия конструкционных частей, K_o - фактор перегрузок, K_x - прочие факторы.

Отметим, что факторы построены так, что наиболее стандартные исполнения машин соответствуют значениям факторов равным единице. Это относится ко всем факторам, кроме K_t . Рассмотрим вышеупомянутые факторы, влияющие на машинную постоянную C_M .

Фактор типа машины (K_t). Чем ниже значение C_M тем компактнее машина. Компактность - обиходный термин, связанный с объемом, а масса и объем машины на практике обычно находятся в прямой зависимости. «Высокая компактность» машины часто справедливо понимается как «малая масса». Именно в таком смысле термин «компактность» будет использован ниже. Компактность описывается фактором типа ЭМ K_t . В [1.13] предложено значение $K_t = 1100$ для АМ двойного питания, $K_t = 1000$ для АМ с короткозамкнутым ротором, $K_t = 700$ для АМ с массивным ротором. В [1.14] для СМПП предлагается протестировать значение $K_t = 500$. В дальнейшем было бы интересно построить иерархию компактности различных типов ЭМ на основе значений фактора типа K_t .

Фактор напряжения (K_u). Уровень напряжения определяет толщину изоляции в обмотке ЭМ и, соответственно, интенсивность теплоотвода в активных частях машины, и, следовательно, ее размеры. В [1.13] было выведено линейное выражение для фактора напряжения, которое можно использовать для напряжений выше 400 В: $K_u = 1 + 0.035 * (U - 400)/1000$, где U – напряжение в В. Для включения в рассмотрение ЭМ с уровнем напряжения ниже 400 В, в [1.14] предлагается более универсальное выражение, которое работает для всего возможного диапазона напряжений - как ниже, так и выше 400 В:

$$K_u = 0.2 \ln (U^{0.8}). \quad (1.9)$$

Фактор охлаждения (K_c). В [1.13] на основе анализа серий АМ были предложены значения факторов для различных типов охлаждения и степеней защиты как показано в Табл. 1.1. Таблицу в будущем нужно будет расширять. Например, для двигателей дронов и полностью электрических самолетов с протоком воздуха через зазор машины охлаждение может быть еще более эффективным, чем самое эффективное охлаждение из Табл. 1.1, и для подобных случаев предлагается значение $K_c = 0.4$. Для естественного охлаждения машины закрытого исполнения без обдува воздухом (IP55, IC400) можно предложить $K_c = 1.1 \dots 1.2$. Следует учесть, что тип хладагента, его температура и интенсивность его прохождения через машину могут сильно варьироваться, т. е. все предложенные здесь значения весьма приблизительны.

Таблица 1.1. Значения фактора типа охлаждения.

Охлаждение и степень защиты	Фактор K_c
IP55, IC411	1
IP55, IC71W	0.80
IP55, IC611	0.66
IP55, IC81W	0.55
IP23, IC01	0.53

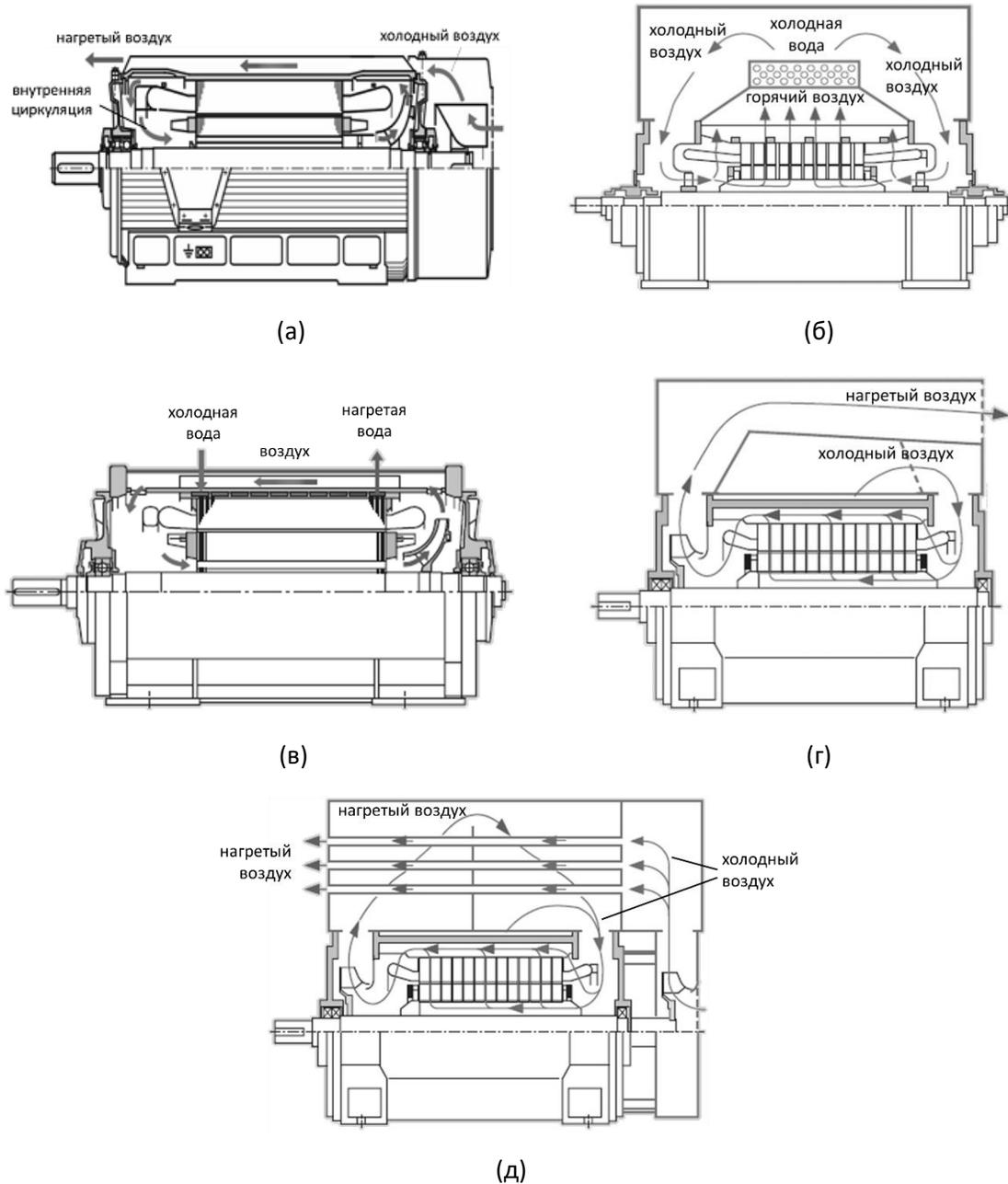


Рис. 1.21. Рассматриваемые типы охлаждения IC411 (а), IC81W (б), IC71W (в), IC01 (г), IC611 (д).

Фактор уровня КПД (K_e). Размер машины, спроектированной на максимально высокий уровень КПД, может быть значительно больше размера машины, спроектированной с оптимизацией по массе с допустимым низким уровнем КПД. В [1.14] был представлен «фронт» оптимальных по Парето решений для СМПМ мощностью 1 МВт, полученный посредством автоматизированного электромагнитного расчета активных частей множества машин (воспроизведен на Рис.1.22). Под кривой-«фронтом» располагается множество рассчитанных не оптимальных вариантов. Приемлемым компромиссом для проектировщика может быть точка «1» на «колене» кривой. На

Рис. 1.22 точка «2» представляет вариант, приемлемый в случае оптимизации по массе с допустимым низким уровнем КПД, в то время как точка «3» представляет вариант, приемлемый в случае требования максимального КПД.

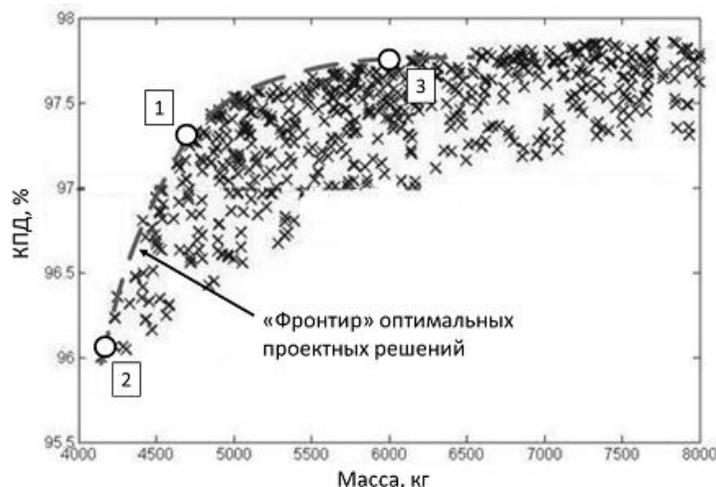


Рис. 1.22. «Фронт» оптимальных по Парето проектных решений.

Для практического использования предлагаются следующие значения факторов уровня КПД: $K_e = 1$ для среднего уровня КПД (приблизительно точка «1» на Рис. 1.22), $K_e = 0.8 \dots 0.9$ для низкого уровня КПД (приблизительно точка «2»), $K_e = 1.2 \dots 1.3$ для высокого уровня КПД (приблизительно точка «3»). С добавлением в рассмотрение конструкционных частей машины (корпус, вал и пр.) влияние выбранного уровня КПД на размер всей машины будет меньше - предлагаются следующие значения фактора уровня КПД (для чугунного или стального корпуса): $K_e = 1$ для среднего уровня КПД (также как для случая только активных частей), $K_e = 0.9 \dots 0.95$ для низкого уровня КПД, $K_e = 1.1 \dots 1.15$ для высокого уровня КПД. Отметим, что если корпус легкий (алюминиевый) - то значения факторов могут быть следующие: $K_e = 0.9$ для низкого уровня КПД, $K_e = 1.15$ для высокого уровня КПД.

Фактор частоты и полюсов (K_{fp}). Комбинация высокой частоты питания и большого количества полюсов может дать значительное снижение веса машины. На Рис. 1.23 схематично показаны топологии машин с 4, 16 и 80 полюсами, при этом для машин Рис. 1.23,а и 1.23,б показаны силовые линии поля, но структура ротора не показана. Очевидно, что 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. Отметим, что для той же номинальной частоты вращения при увеличении числа полюсов приходится принимать увеличение частоты питания. При увеличении частоты питания растут потери, как в стали, так и в меди, так что существует разумный предел этого подхода к снижению массы. Успешная реализация такого подхода возможна не для всех типов машин. Машины с большим количеством полюсов – обычно синхронные.

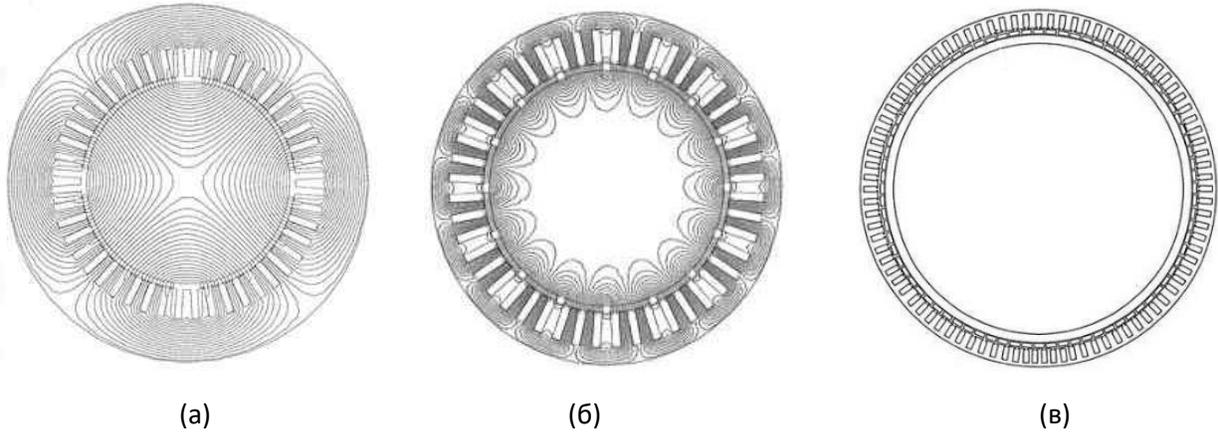


Рис. 1.23. Машины с различным числом полюсов: 4 (а), 16 (б) и 80 (в).

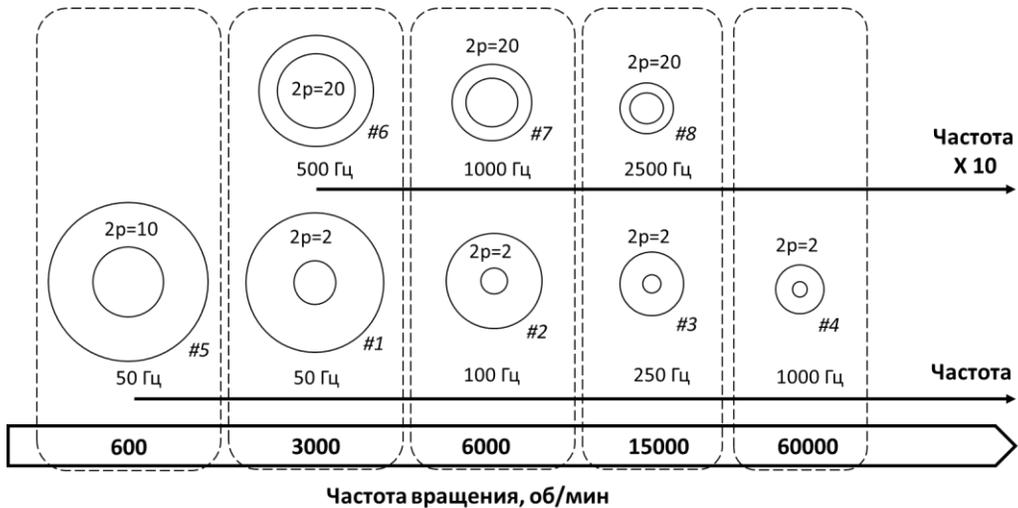


Рис. 1.24. Различные варианты реализации ЭМ для некоторых частот вращения.

Традиционно при проектировании ЭМ проектировщики отталкиваются от частоты питания $f = 50$ Гц. Например, для получения частоты вращения машины 3000 об/мин используется 2-полюсная машина. Для получения удвоенной частоты вращения - 6000 об/мин - потребуется удвоенная частота питания ($f = 100$ Гц), получаемая с помощью преобразователя частоты. Для получения еще более высокой частоты вращения соответственно используется еще более высокая частота питания при сохранении того же числа полюсов. Для получения более низкой частоты вращения, например 600 об/мин, можно использовать многополюсную машину. Данный подход к выбору частоты питания и числа полюсов проиллюстрирован на Рис. 1.24 нижним рядом машин. Альтернативой может быть подход с использованием значительно более высокой частоты - например, в 10 раз, как проиллюстрировано верхним рядом машин на Рис. 1.24. Машины верхнего ряда обычно будут иметь меньшую массу, чем машины нижнего ряда. Для учета влияния данного подхода (повышенной частоты и большого количества полюсов) предлагаются следующие

ориентировочные значения: $K_{fp} = 1$ для $2 < p < 20$, $K_{fp} = 0.8$ для $20 < p < 30$, $K_{fp} = 0.6$ для $30 < p < 40$, $K_{fp} = 0.5$ для $p > 40$. Наличие конструктивных частей значительно влияет на значение фактора, как будет показано ниже.

Фактор перегрузок (K_o). Требования к перегрузочной способности могут оказывать влияние на массу машины. Различные типы машин имеют различную перегрузочную способность. Например, допустимая кратковременная перегрузка для СМПМ – обычно 150...200% от номинальной, для АМ – 200...300%, для беспазовых¹¹ СМПМ - до 500...700%. Если перегрузка, например, при пуске или в процессе работы превышает 200%, то при проектировании СМПМ, придется заложить большую массу машины, чем для случая без перегрузок. В то же время, при проектировании АМ для кратковременных перегрузок 200% масса машины обычно будет такой же как для случая без перегрузок. В данной методике предлагаются следующие ориентировочные значения: $K_o = 1$ для случая, когда для данного типа машин перегрузка не оказывает влияния на массу, $K_o = 1.2$ для некоторого влияния перегрузок на массу, $K_o = 1.4 \dots 2$ для случая значительного влияния перегрузок на массу. Также фактором K_o можно отразить работу машины в повторно-кратковременный режиме без перегрузок (тогда $K_o < 1$).

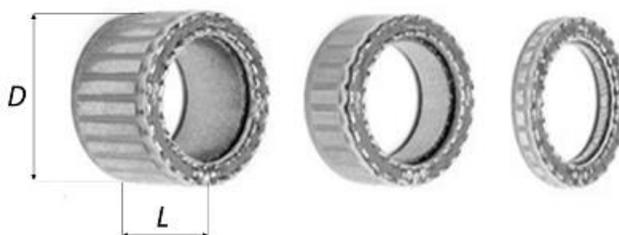


Рис. 1.25. Примеры различных соотношений диаметра и длины активных частей.

Фактор формы (K_s). Масса активных частей машины зависит от их формы, т. е. от соотношения диаметра (D) и длины (L). На Рис. 1.25 показаны три варианта формы машин, где сохраняется тот же диаметр, но варьируется аксиальная длина. Если принять $\frac{D}{L} = 2$ за стандартное соотношение, соответствующее значению фактора $K_s = 1$, тогда варианты с $\frac{D}{L} > 2$ будут соответствовать $K_s < 1$, т. е. большей компактности, а варианты с $\frac{D}{L} < 2$ будут соответствовать $K_s > 1$, т. е. меньшей компактности (большей массе). В [1.14] предложено следующее выражение:

$$K_s = 1.1 - 0.052 * \frac{D}{L} \quad (1.10)$$

Фактор наличия конструктивных частей (K_i). Можно представить два крайних варианта того, как машина может быть представлена в каталоге или спецификации: (1) представлены только активные части машины, (2) представлена «полная» машина, имеющая корпус, подшипники, щиты, вал,

¹¹ Также иногда используется термин «бессердечниковые»

клеммную коробку и т. д. Между этими вариантами существует множество промежуточных вариантов. Например, показанный на Рис. 1.26 двигатель SP200D (Siemens) для интеграции в корпус полностью электрического самолета не имеет вала и подшипниковых щитов. В случае мотор-колеса на Рис. 1.27, несущие механические структуры колеса одновременно являются несущими структурами ротора с постоянными магнитами, т. е. только статор имеет несущую конструкцию, а в остальном машина состоит практически только из активных частей.



Рис. 1.26. Двигатель для интеграции в ПЭС.

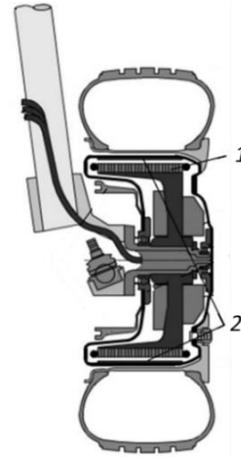


Рис.1.27. Мотор-колесо (1-статор, 2-ротор).

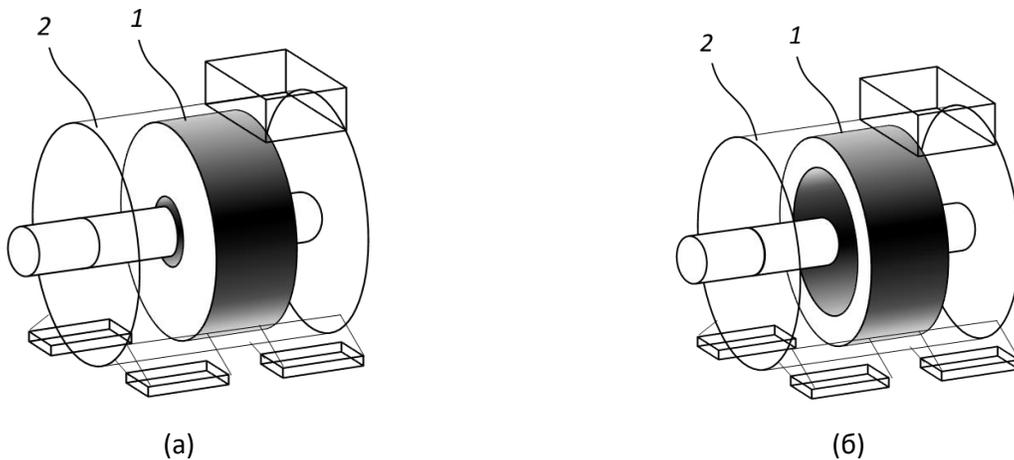


Рис. 1.28. Машины с малым количеством полюсов (а) и с большим количеством полюсов (б) (1 – активные части, 2 – несущие конструкции).

Масса всех конструкционных элементов полной машины обычно приблизительно равна массе активных частей (в случае если корпус чугунный или стальной), т. е. можно сказать, что масса полной машины приблизительно равна удвоенной массе активных частей. Если корпус алюминиевый – более легкий, поскольку алюминий в 2.5 раза легче стали или чугуна, то разница массы полной машины и массы ее активных частей - меньше. В данной методике предлагаются

следующие ориентировочные значения: $K_i = 1$ - для полной машины, $K_i = 0.5$ - только для активных частей. Если корпус легкий (алюминий), то для полной машины можно принять $K_i = 0.8$.

Прочие факторы (K_x). Конфигурации ЭМ настолько разнообразны, что приведенными выше факторами все варианты описать невозможно. Поэтому в методику включен фактор K_x , объединяющий в себе «все прочие влияющие факторы». Можно привести следующие примеры решений, когда масса машины будет несколько ниже, чем обычно ($K_x < 1$): (1) конструкция с внешним ротором, (2) использование дорогих материалов с повышенными характеристиками, (3) машина, рассчитанная на работу со сравнительно низких температурах окружающей среды. Можно также привести примеры ситуаций, когда масса машины будет несколько выше, чем обычно ($K_x > 1$): (1) применение на большой высоте над уровнем моря, например в летательных аппаратах, (2) высокая окружающая температура, например машина в глубокой нефтяной скважине, (3) машины, заполненные жидкостью, имеющие высокие потери на трение в зазоре, например в погружной машине.

Взаимозависимость факторов. Важно отметить, что факторы не являются независимыми друг от друга. Этот недостаток, впрочем, можно в значительной степени устранить, исследовав эти взаимозависимости. Приведем некоторые примеры:

- Взаимозависимость K_i и K_{fp} . Если несущие части составляют половину массы машины, то уменьшение толщины «кольца» активных частей повлияет на общую массу не так сильно, как в случае рассмотрения машины, состоящей только из активных частей. Данный эффект проиллюстрированный на Рис. 1.28, следует учитывать при выборе K_{fp} : при $K_i = 1$, K_{fp} ближе к единице, чем при $K_i = 0.5$.
- Взаимозависимость K_c и K_e . Высокий КПД может облегчить охлаждение - при низких потерях переход с воздушного на водяное охлаждение не дает столь высокого эффекта и $K_c > 0.8$. С другой стороны, интенсивное охлаждение позволяет иметь низкий КПД, если это возможно по заданию на разработку.
- Взаимозависимость K_i и K_s . С увеличением диаметра D масса конструктивных частей начинает непропорционально возрастать. Поэтому при $K_i = 1$ слишком высокое значение $\frac{D}{L}$ может приводить к снижению отклонения K_s от 1.

Также важно отметить, что минимально достижимые значения машинной постоянной для одной и той же технологии варьируются в пространстве характеристик и параметров, таких как частота питания, частота вращения, мощность и т.д. Различные технологии могут иметь преимущества в разных частях пространства характеристик и параметров - графически эта идея представлена на Рис. 1.29. Например, синхронные машины с обмоткой возбуждения на роторе могут быть конкурентоспособны, когда они созданы для низких и средних частот вращения, но по причинам механической прочности имеют пониженные характеристики при проектировании для высоких частот вращения. А вот АД плохо приспособлены для постоянной работы на низких частотах вращения, где обычно, при частотах 50 Гц, используется большое количество полюсов, что приводит к увеличению потоков рассеяния и снижению характеристик АД.

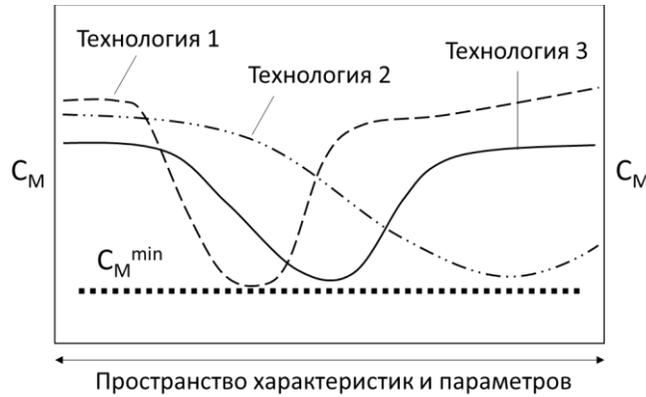


Рис. 1.29. Качественное описание оптимальных областей характеристик и параметров для различных технологий.

В завершение представления метода с постоянной C_M , основанном на гипотезе о массе ЭМ, можно дать общее объединяющую иллюстрацию как на Рис. 1.30 с указанием некоторых возможных значений коэффициентов.

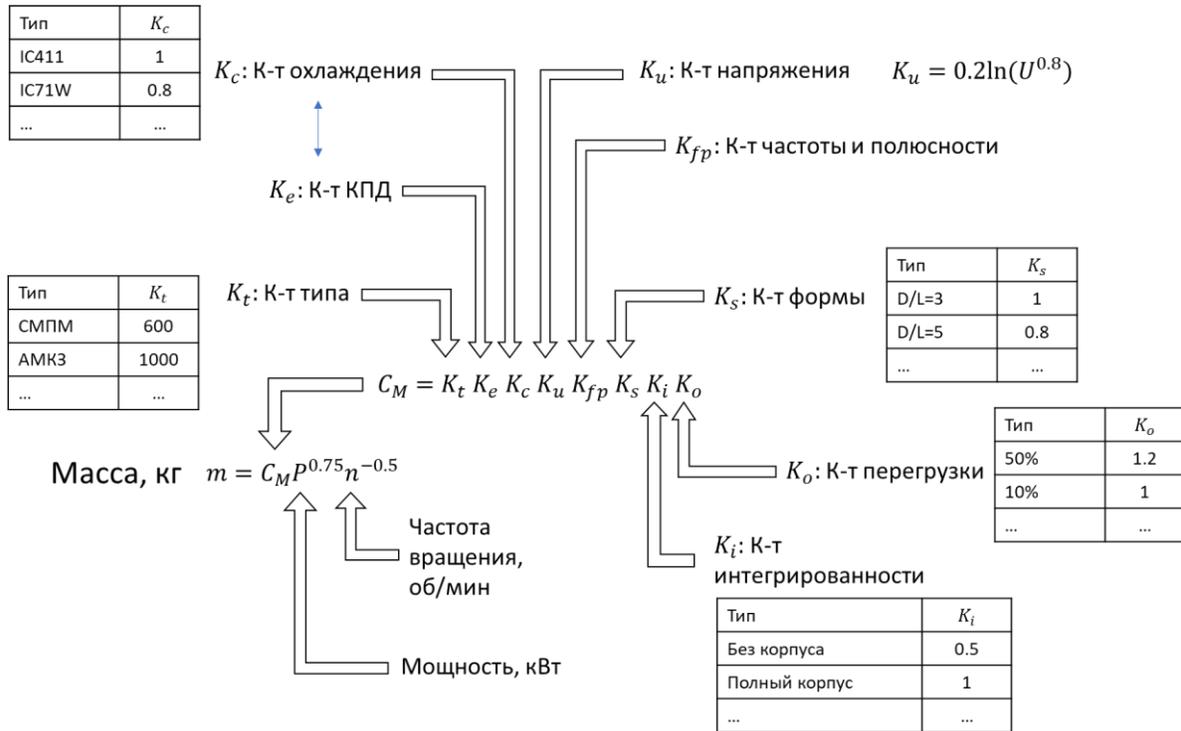


Рис. 1.30. Обзор факторов, определяющий массу ЭМ.

В формуле (1.76) правая ее часть имеет две компоненты – первая - C_M и вторая - произведение $P^{0.75}n^{-0.5}$, представляющие собой как бы два уровня «настройки» в процессе оценки массы: «грубая» - произведение $P^{0.75}n^{-0.5}$ (вариативность около 8-9 порядков) и «точная» - машинная постоянная C_M (вариативность около двух порядков). Значение отношения $\frac{P^{0.75}}{n^{0.5}}$ – определяющее для массы машины. Различные параметры, объединенные в постоянной C_M имеют значительно меньшее влияние. Графически это описано на Рис. 1.31. Значение $\frac{P^{0.75}}{n^{0.5}}$ максимально для высоких мощностей и низких частот вращения и минимально для низких мощностей и высоких частот вращения (Рис. 1.32).

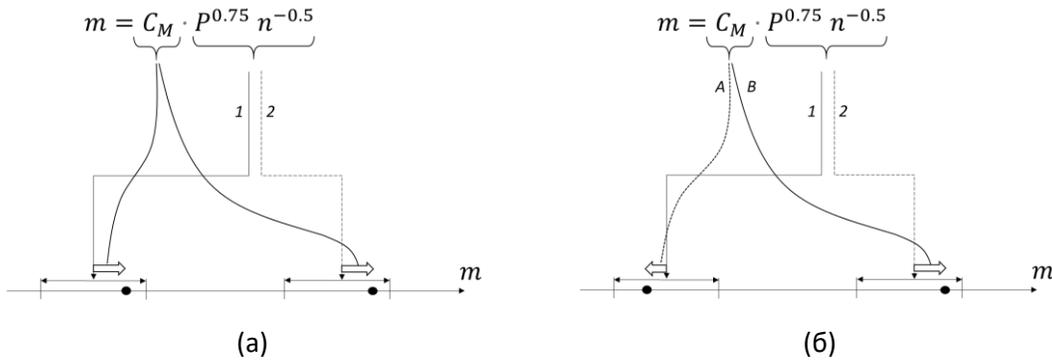


Рис. 1.31. Иллюстрация влияния мощности и частоты вращения.

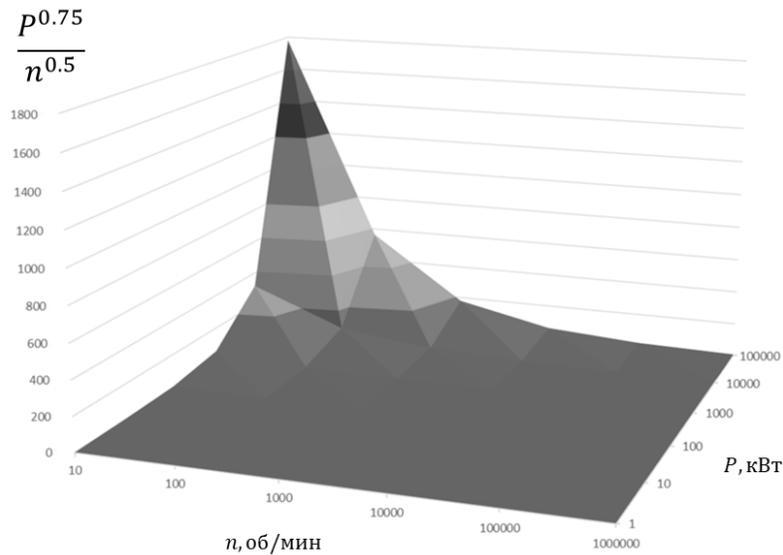


Рис. 1.32 Графическое отображение отношения $\frac{P^{0.75}}{n^{0.5}}$.

C_M - новая разработка, альтернатива общепринятым машинным постоянным. Сравнение постоянной C_M и постоянной Арнольда дано в Приложении 1. Детали можно найти в [1.12-1.14].

Границы применения формул для разных типов машин. СМ значительно больше, чем АД. АД редко производятся на частоты вращения ниже 250 об/мин. ВЧ СМПМ – на высокие мощности нет электроники.

Сравнение машин

При сравнении ЭМ обычной практикой является использование удельных мощности и момента. Однако, как мы видели на Рис. 1.19, удельные показатели $P_{уд}$ и $M_{уд}$ сильно варьируются в зависимости от уровня мощности и частоты вращения, что, естественно, ограничивает случаи, когда их использование не приведет к неверным выводам. Для иллюстрации выберем из каталога [1.15], несколько машин разных мощностей, таким образом, чтобы разница между мощностями была приблизительно один порядок (10 раз). Результаты расчета $P_{уд}$ и $M_{уд}$ приведены в Табл. 1.2. Мы видим, что значения как $P_{уд}$ так и $M_{уд}$ в рамках одной и той же серии машин могут отличаться в несколько раз. Кроме того, стоит отметить, что машина с более высокой удельной мощностью по сравнению с другой машиной, может иметь более низкий удельный момент. Таким образом, использовать для сравнения только один из этих двух критериев – небезопасно с точки зрения правомерности выводов, за исключением случаев, когда значения мощности и частоты вращения сравниваемых машин – идентичны.

При этом отметим, что для тех же машин из Табл. 1.2 постоянная C_M будет варьироваться в пределах порядка 50%, т. е. C_M выглядит значительно более надежным критерием, причем интегральным (один критерий вместо двух).

Таблица 1.2. Удельные показатели некоторых машин АВВ из [1.15].

об/мин	3000	1500	1000	3000	1500	1000	3000	1500	1000
кВт	масса, кг			удельный момент, Нм/кг			удельная мощность, кВт/кг		
1.1	18	26	28	0.19	0.27	0.38	61	42	39
11	127	135	172	0.28	0.52	0.61	87	81	64
110	880	900	1000	0.40	0.78	1.05	125	122	110
1000	4400	4700	-	0.72	1.35	-	227	213	-

Вариативность удельных показателей не единственная проблема. Дело в том, что даже в рамках одной и той же серии машины могут спроектированы таким образом, что компактность машин, взятых из соседних строчек каталога, может отличаться на десятки процентов.

В качестве иллюстрации сравним серии низковольтных машин с чугунными корпусами АВВ (данные из [1.15]) и Siemens (данные из [1.16]). Обе серии имеют один и тот же класс КПД (IE2), охлаждение (IC411) и класс защиты (IP55). В качестве критерия компактности используем машинную постоянную C_M , поскольку она, как мы уже знаем, пропорциональна массе (в соответствии с (1.6)), но не привязана к мощности и частоте вращения. Результаты расчета значений постоянной C_M для 4 и 6-полюсных машин обоих производителей представлены на Рис. 1.33. Мы видим, что для 4-полюсных машин на Рис. 1.33 (а) машины Siemens значительно более компактны, при этом, на мощности 4 кВт или 7.5 кВт машины сопоставимы, а например на мощности 15 кВт преимущество Siemens составляет до 40%. При этом разница в компактности 4-полюсных машин двух серий не может быть

объяснена разницей в энергетических показателях, поскольку на Рис. 1.33 (б) мы видим, что они на том же уровне у обоих производителей.

Проведя аналогичный анализ 6-полюсных машин мы, однако, приходим к совершенно противоположным результатам. Уже машины АВВ демонстрируют большую компактность – см. Рис. 1.33 (в), при этом на мощности 15 кВт преимущество АВВ составляет те же 30-40%. В целом, по результатам сравнения 4 и 6-полюсных машин можно сказать, что серии АВВ и Siemens выглядят равными по качеству машин. Серии просто спроектированы несколько по-разному.

По результатам данного анализа становится очевидным, что брать для сравнения только одну машину из каталога или статьи не имеет смысла, поскольку можно прийти к совершенно неверным выводам. Кроме того, мы видим, что сравнивать серии или производителей по ряду машин для одной синхронной частоты вращения (одного количества полюсов) – также неверно и надо рассматривать все частоты вращения. Более адекватным сравнением было бы сравнение по среднему значению машинной постоянной C_M для всей серии машин.

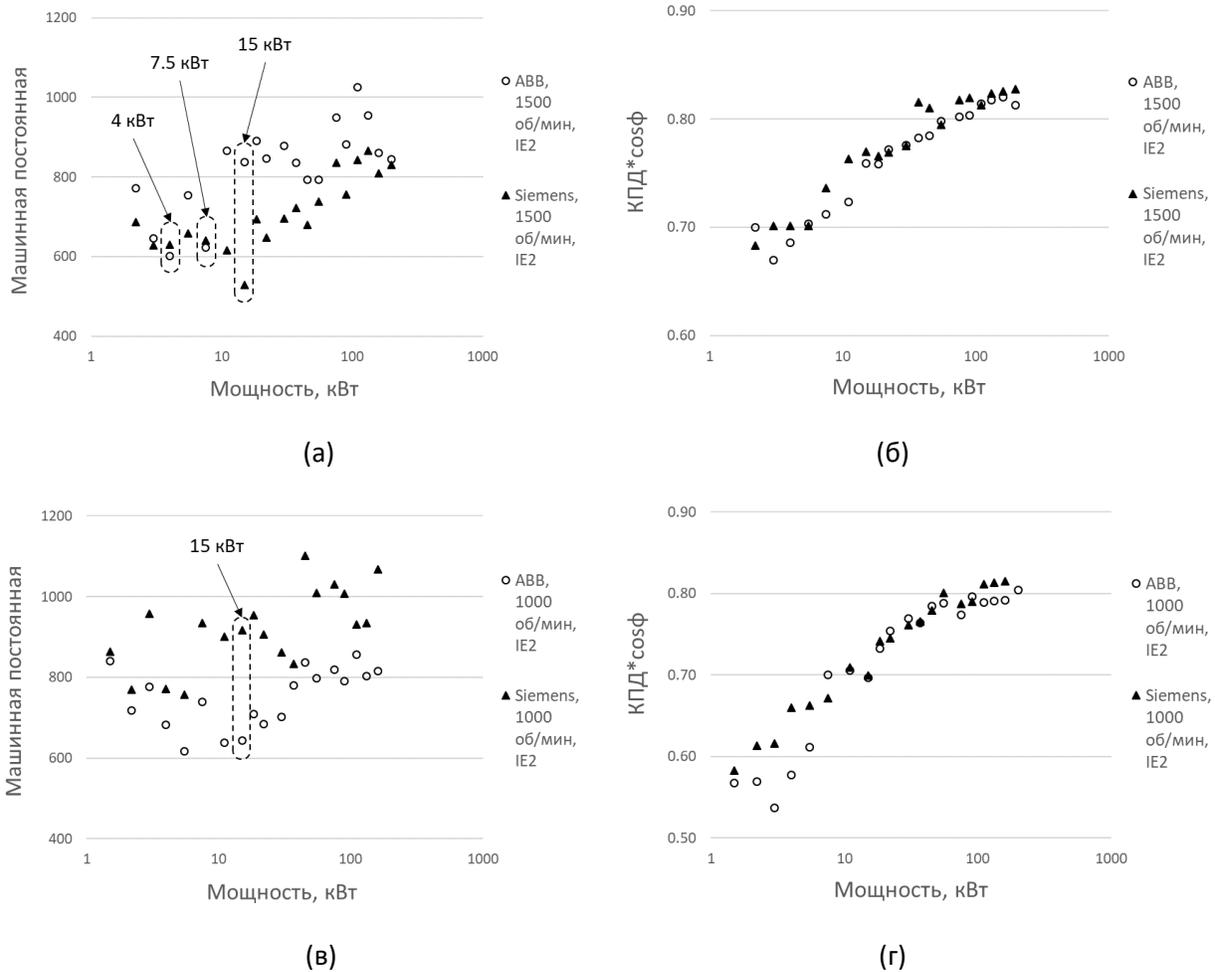


Рис. 1.33. Сравнение серий АДКЗ с чугунными корпусами.

Подводя промежуточные итоги, можно сказать, что C_M дает возможность сравнения не только отдельных машин друг с другом, но и сравнение целых серий, типов машин и, опосредовано, используемых технологий. Отметим также, что при сравнении двух отдельных машин, для получения правильных выводов важно, чтобы сравниваемые машины (или серии машин):

- имели одинаковые системы охлаждения и одинаковую степень защиты,
- имели одно и то же номинальное напряжение,
- были спроектированы для того же применения (те же перегрузки и т.п.).

Также, естественно, важно, чтобы сравниваемые машины имели ту же «комплектацию» - корпус, клеммную коробку и т. п. При сравнении следует учитывать уровень КПД и коэффициента мощности.

Возможно сравнение и только активных частей машин (без корпуса, вала и прочих несущих структур), но тогда важно, чтобы обе сравниваемые машины не имели корпуса, вала и т. д.

Очевидно, что в случае, когда сравниваемые ЭМ ведут к различным реализуемым решениям, необходимо сравнивать уже целые системы.

Кроме сравнения машин постоянная C_M может использоваться для масштабирования – оценки массогабаритов новой ЭМ по ЭМ с известными массогабаритами (см. Приложение 2).

Заключительные комментарии к главе 1

При планировании инновационных изменений стоит хорошо представлять себе принципы отбора инновационных предложений и «ландшафт» мира применений ЭМ. Важно понимать, что ЭМ в информационном отборе оценивается через призму применений и системных решений, частью которых ЭМ может являться.

Задача оценки массы и габаритных размеров является одной из первоочередных как при разработке электрических машин, так и при проектировании систем, в которых ЭМ являются одними из компонентов. Сравнение вариантов ЭМ является инструментом отбора, поэтому данной теме уделено особое внимание. Показан основной принцип зависимости массогабаритов от большинства наиболее влиятельных факторов. Отметим, что, во-первых, детали предложенного подхода еще предстоит уточнять в процессе использования на практике, а во-вторых, методика подходит только для вращающихся ЭМ основной функцией которых является преобразование энергии, а не, например, точное позиционирование. В будущем предложенный подход может быть адаптирован и для линейных ЭМ.

Литература к главе 1

[1.1] А. В. Иванов-Смоленский, Электрические машины, М.: Энергия, 1980. - 928 с.

[1.2] И. П. Копылов, Электрические машины, М.: Энергоатомиздат, 1986. - 360 с.

- [1.3] И. П. Копылов, Электромагнитная вселенная, 2-е изд. перераб. и допол. М. Издательство МЭИ, 1999.
- [1.4] Б. И. Кудрин. Технетика: новая парадигма философии техники (третья научная картина мира). - Томск: Изд-во Том. ун-та, 1998. - 40с.
- [1.5] Б. И. Кудрин, Исследования технических систем как сообществ изделий – техноценозов. Системные исследования. Методологические проблемы. 1980. М.: Наука, 1981. 236 с.
- [1.6] Каталог «Torque motors PM synchronous motors. Series TF water-cooled» Oswald Elektromotoren GmbH, www.oswald.de.
- [1.7] Каталог ABB BU/Permanent magnet motors GB 05-2004. www.abb.com.
- [1.8] Z. Zhang, A. Matveev, S. Øvrebø, R. Nilssen, A. Nysveen, State of the art on generator technology for offshore wind energy conversion system. International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC 2011), Niagara Falls, USA, 15–18 May 2011. IEEE International, p. 1131 –1136.
- [1.9] R. Schiferl, A. Flory, W. Livoti, S. Umans, High-Temperature Superconducting Synchronous Motors: Economic Issues for Industrial Applications, IEEE Transactions on Industry Applications, pp. 1376-1384, Oct. 2008.
- [1.10] А. В. Матвеев, К.А. Оладипо, В.В. Плыткевич, В.А. Кузьмичев, С.В. Ширинский, DriveConstructor: онлайн-курс для обучения по системам электропривода, IV международная научно-практическая конференция «Информатизация инженерного образования» (Инфорино-2018), Москва, Октябрь, 2018.
- [1.11] P. Ruhland, K. Kvinnesland, A. Matveev, S. Coutandin, K. Nielsen, J. Fleischer, "New production techniques for electric motors in high performance lightweight applications", Electric Drives Production Conference (E|DPC), 08 - 09 Dec. 2020, Ludwigsburg, Germany.
- [1.12] А. В. Матвеев, Альтернативная машинная постоянная и оценка массы и габаритов электрических машин, Электричество, №11, 2019.
- [1.13] А. В. Матвеев, Анализ типов и серий асинхронных машин с помощью альтернативной машинной постоянной, Электричество, №7, 2020.
- [1.14] А. В. Матвеев, Тестирование гипотезы о зависимости массы электрических машин от мощности и частоты вращения, Электричество, №7, 2021.
- [1.15] Каталог "Low voltage process performance motors according to EU MEPS", 9AKK105944 EN, October 2013, ABB Motors and Generators, www.abb.com.
- [1.16] Каталог "SIMOTICS low-voltage motors type, series 1LE1, 1MB1 and 1PC1", D 81.1, 2013, Siemens, www.siemens.com.

Глава 2. Движущие силы и направления эволюции электрических машин

Роль крупных изобретений и небольших усовершенствований

В процессе длительной эволюции технической системы (такой как ЭМ) почти всегда происходят интересные события – разработчику удается изменить в нужном направлении, улучшить характеристики системы, которые сперва считались принципиально неизменными и которые считалось невозможным 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 на 5 уровней по сложности. Приведем описание уровней (от высшего к низшему) с примерами из области ЭМ¹²:

- **Уровень 5** (наивысший). Создание совершенно новой системы с новой функцией. Созданию изобретения 5-го уровня обычно предшествует великое открытие. Примеры: (1) «Вольтов столб» (Вольта, 1800 г.) - первый гальванический элемент, предшествующее открытие – открытие электричества, (2) электромагнит (Стерджен, 1820 г.), предшествующее открытие (изобретение) – соленоид.
- **Уровень 4.** Создание нового поколения системы, выполняющего ту же основную функцию, но работающую на новом принципе. Решение обычно лежит 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.), асинхронные машины¹³ (работы Бейли, Феррариса, Теслы в 1870-1880 годах).
- **Уровень 3.** Кардинальное улучшение существующей системы с применением методов не известных в данной отрасли, но известных в других отраслях. Методы находятся 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 линий машин постоянного тока (прообраз вентильно-индукторной машины, Дэвидсон, 1842) или асинхронных машин (АМ с короткозамкнутым ротором, фазным ротором (работы Теслы и Доливо-Добровольского, 1887-1890)
- **Уровень 2.** Проблема решается методами известными в данной отрасли. Хороший инженер обычно способен найти решение, но для этого может потребоваться перебор 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 варианта решения. Примеры: большинство современных патентов в области ЭМ, хотя решения,

¹² Изобретения в примерах отнесены к определенным уровням по субъективному мнению автора.

¹³ Изобретение асинхронной машины можно было бы отнести и к третьему уровню.

приведенные в таких патентах изобретениями называть, пожалуй, некорректно, поскольку это скорее «инженерные улучшения» систем.

В [2.1] проанализирована история изобретений в области ЭМ в XIX веке. Некоторые результаты этой работы можно обобщить в форме упрощенной картины, показанной на Рис.2.1, где изобретения 4 и 5 уровня обозначены как «выдающиеся», а 3-го уровня – как «другие значительные» изобретения.

В целом уровень изобретений уменьшается с ходом истории развития дисциплины. В XX веке также были изобретены новые типы машин, соответствующие 3-му уровню, например, шаговый двигатель (1918, Вудс), двигатель с катящимся ротором (1944, Москвитин), но они либо были «прямыми потомками» машин XIX века, либо не имели большого распространения (и, соответственно, значения).

Существует стереотип, что изобретение – результат «озарения», т. е. изобретательство и сопутствующие инновации – в какой-то степени «случайный» процесс. Случайность открытий – просто признак очень раннего этапа развития той или иной науки или инженерной дисциплины, когда учёных мало, и исследуют они более-менее случайные вещи (в электромеханике - это период до начала XIX века). Таким образом, постепенно в случайном порядке вскрываются разные интересные вещи. Но как только некоторые начальные «раскопки» удались, ситуация достаточно быстро меняется. В область приходит множество исследователей (в электромеханике - уже с 1820х годов), приходят компании (в электромеханике - с середины XIX века), и следующий уровень открытий становится просто неизбежным - откроет не один так другой, идёт игра на опережение.

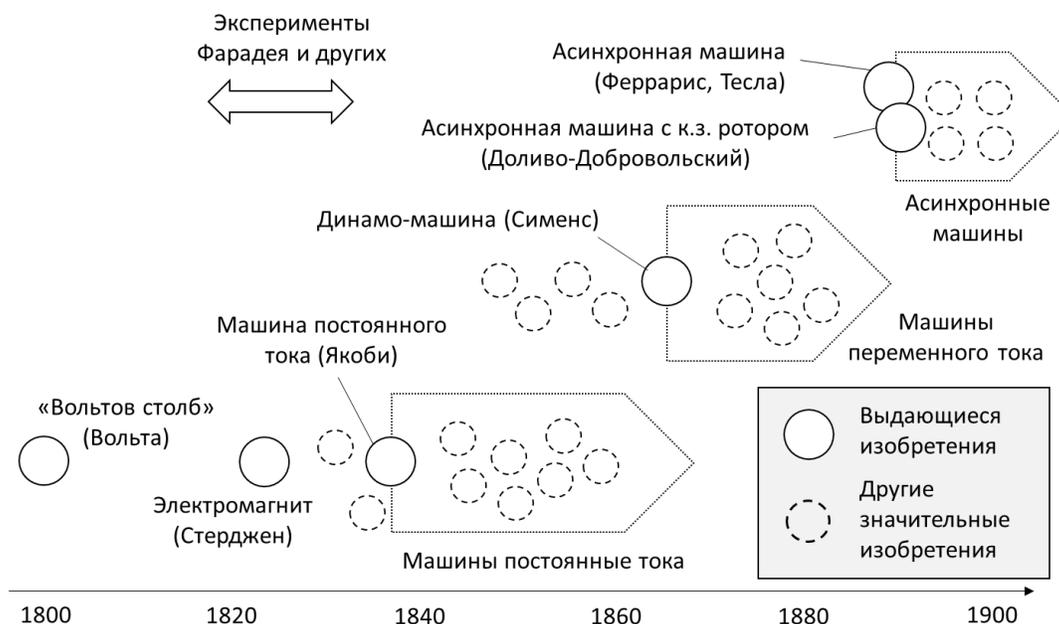


Рис. 2.1. Основные изобретения в области электрических машин в XIX веке.

Крупные изобретения порождает вторичные задачи разного типа – устранение недостатков, улучшение системы, решение вторичных проблем, решения проблем с адаптации к новым нишам и тому подобное. Все эти вторичные проблемы группируются вокруг центрального изобретения и его последующей реализации.

Отдавая должное изобретениям, не стоит недооценивать роль мелких улучшений. В попытках улучшить систему разработчиками перебираются варианты усовершенствований, делаются определенные шаги, каждый из которых прост и логичен, проверяется и служит основой для других шагов. Множество мелких усовершенствований, при незначительности каждого из них в отдельности, обладает кумулятивным действием. В [2.2] технический прогресс представляется как цепная реакция нарастания знаний и умений, как обучение¹⁴, то есть накопление опыта, которое идёт очень хорошо в рамках конкретной инновационной деятельности и при этом имеет в значительной степени практический, а не теоретически 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). К какой-то момент, когда накопленный со временем опыт достигает определенного объема, происходит «взрыв», дающий переход на новый уровень (некий «квантовый скачек»). Таким образом, процесс развития техники – нелинейный, проходящей через серию «взрывных» изменений.

Обычно «квантовый скачек» представляет собой одно изобретение или кластер изобретений (обычно 2-го уровня), которые обычно оформляются как патентные заявки (Рис.2.2).

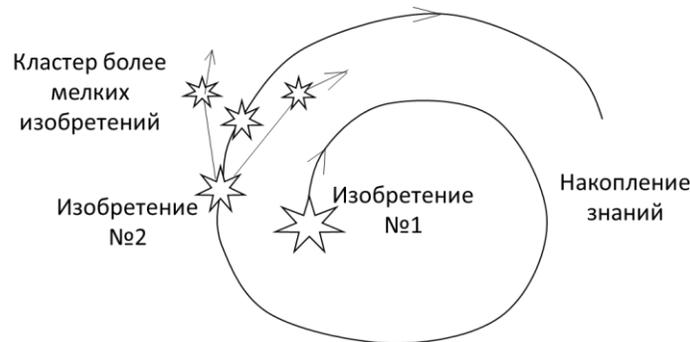


Рис. 2.2. Иллюстрация накопления знаний после большого изобретения и появления новых изобретений.

Таким образом, можно сказать, что изобретения порождают вторичные задачи и мелкие улучшения, но также и накопление улучшений может приводить к значительным изобретениям. То есть одно «большое» изобретение может спровоцировать серию малых, и наоборот (Рис. 2.2).

¹⁴ Важной частью упомянутого процесса обучения является математическое моделирование и модельные испытания, которые позволяет 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.

Отметим, что даже выдающиеся изобретения Теслы и Доливо-Добровольского основаны на опыте, накопленном по результатам работ Араго 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 1-го и 2-го уровня). То есть развитие ЭМ представляет собой постепенной, медленный, но непрерывный прогресс. Отметим, что именно такое «нормальное» развитие подчиняется определенным весьма сильным закономерностям, которые следует изучать для того, чтобы создавать новые более конкурентные технологии и продукты. Наиболее полно соответствующие вопросы исследованы в ТРИЗ [2.3]. Превратившись из методики решения технических задач в науку об эволюции технических систем, ТРИЗ предложила соответствующий понятийный комплекс и инструменты анализа [2.4].

Появление и развитие такого класса технических систем (ТС) как электрические машины (ЭМ) – 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.

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 ТС многообразна и многомерна и подчиняется ряду Паттернов, которые сосуществуют во времени. Паттерны показывают и предсказывают изменения, происходящие с технической системой в процессе эволюции. Примеры Паттернов: «Снижения участия человека в жизни технической системы», «Увеличение динамизма и управляемости системы». Одни и те же Паттерны могут реализовываться для разных технических систем. Паттерны представляют собой устойчивые исторически повторяющиеся тенденции, в то время как Тренды более переменчивы.

Рассмотрим Паттерны, приведённые выше, как примеры, более детально. Реализация Паттерна «Снижение участия человека в жизни технической системы» в случае электрической машины приведет в обозримом будущем к следующему: проектирование машины с помощью искусственного интеллекта, производство без участия человека с использованием роботов, диагностика с помощью искусственного интеллекта через информацию, считываемую с датчиков, интегрированных в машину, обслуживание и ремонт машины с помощью роботов. Реализация Паттерна «Увеличение степени динамизма и управляемости электрической машиной» может означать большую роль силовой и управляющей электроники, а также появление большего числа механических степеней свободы благодаря наличию большего количества 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 идеальности¹⁵ систем, созданных человеком,
- использование ресурсов нетипичных для биологической эволюции, например высокого давления и температуры, мощных источников энергии, опасных субстанций, и т. д.

Кроме эволюционных Трендов и Паттернов существуют также так называемые Линии Эволюции, показывающие последовательность изменений через который проходит техническая система 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 ТС является последовательность двух переходов: первый переход от постоянного поля к пульсирующему полю и второй переход от пульсирующего поля к полю, пульсирующему с согласованной частотой. ЭМ уже прошли эту Линию эволюции в XIX веке: униполярная машина Фарадея (постоянное поле) - двигатель возвратно-поступательного 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 обсуждать эволюцию ЭМ в контексте и терминологии технологических укладов (сейчас идет переход к 6-му укладу) или промышленных революций (сейчас идет 4-я). ЭМ пришли с третьим технологическим укладом. Они продолжают существовать в последующих укладах (четвертом и пятом). Происходит взаимопроникновение ЭМ и технологий новых укладов. Например все большую роль в ЭМ играют электроника, датчики, искусственный интеллект, в свою очередь ЭМ приводят в движение хард-диски и вентиляторы ПК.

Информацию по развитию ТС можно найти в [2.2], [2.4].

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 не осознанные. В целом потребители хотят больше функциональности и качества при снижении затрат и с меньшими негативными последствиями. В ТРИЗ существует понятие «идеальности потребностей». В [2.5] предлагается представить степень идеальности потребностей следующей формулой:

¹⁵ Идеальность – понятие, рассмотренные ниже.

$$I = \alpha \frac{\sum_{i=1, j=1}^{\infty} Qn_i Ql_j}{\sum_{k=m}^0 C_k + \sum_{l=n}^0 \beta_l H_l} \Rightarrow \infty, \quad (2.1)$$

где I - степень идеальности потребностей, Qn - количество потребностей, Ql - 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.

1. Приливная турбина. Как уже было показано в Главе 1, основным критерием разработки турбин, использующих энергию приливов и морских течений, является нормированная стоимость электроэнергии (C_E):

$$C_E = C_{\Sigma} / E_{\Sigma}, \quad (2.2)$$

где C_{Σ} – все затраты, E_{Σ} – вся произведенная электроэнергия.

$$C_{\Sigma} = \sum_{t=1}^n \frac{(I_t + M_t)}{(1+r)^t}, \quad (2.3)$$

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

$$E_{\Sigma} = \sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t} \quad (2.4)$$

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.

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

$$C_{\Sigma} = I + C_e + M, \quad (2.5)$$

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 двигателя является основной целевой функцией для ЭМ в данном применении.

3. Полностью электрический самолет (ПЭС). Основные требования при проектировании любых пассажирский самолетов – обеспечение безопасности и экономической эффективности эксплуатации – решаются совместно. Целевая функция, соответствующая экономической эффективности - себестоимость перевозок (a), которую можно представить следующим образом:

$$a = \frac{C}{N_p \cdot L}, \quad (2.6)$$

где C – затраты, N_p – количество перевезенных пассажиров, L – суммарной расстояние, на которое перевезены пассажиры.

В ПЭС частью затрат будет стоимость затраченной электроэнергии. Важная характеристика ПЭС, прямо влияющая на широкое внедрение данного вида транспорта - дальность полета. Выбор ЭМ будет являться частью задачи объемно-весовой и конструктивно-силовой компоновки ПЭС. Для перевозки максимального количества пассажиров на максимальное расстояние ПЭС должен обладать минимальной собственной массой, кроме того, безопасность перевозки ставит 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 трех рассмотренных примеров сведена в более краткой форме в таблице 2.1. Мы видим, что целевые функции для ЭМ значительно меняются от применения к применению. В информационном отборе именно целевые функции применений имеют первостепенное значение.

Табл. 2.1. 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	$C_E = C_\Sigma / E_\Sigma$	Высокий КПД, высокая надежность, низкая стоимость, механическая интеграция
Насос водоснабжения	Затраты в течение жизненного цикла	$C_\Sigma = I + C_e + M$	Высокий КПД, низкая стоимость
ПЭС	Эффективность перевозки пассажиров	$a = \frac{C}{N_p \cdot L}$	Малая масса, высокая надежность, высокий КПД, высокая степень механической интеграции, система резервирования

Существует ряд применений, где электрификация является следствием оптимизации по целевой функции, не связанной с экономикой. Например, замена дизельных двигателей главного движения на электрические на морских паромах в настоящее время определяется в большей степени экологическими соображениями, в частности стремлением снизить выбросы углекислого газа и снижению значения $CO_{2y} = \frac{CO_2}{N}$, где CO_2 – количество выбросов углекислого газа за год, N – количество 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 парова будет такой же как 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 в это вовлечён и определяет эволюцию ЭМ.

С конца XX века ВЭУ и приливные турбины проходили через стадию определения оптимальной структуры системы преобразования энергии (электропривода). В лабораториях и на рынках конкурировали системы с мультипликатором (с разным количеством 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, что передаточное число мультипликатора определяет характеристики ЭМ (генератора), а также зачастую его тип. Т. е. выбор (посредством рыночных механизмов) структуры привода турбины решающим образом влияет на инвестиции в тот или иной тип и топологию электрических генераторов.

Эволюция в осях «Надсистема-Система-Подсистема»

Связанные системы, принадлежащие к различным иерархическим уровням, развиваются совместно и координировано. Имеется в виду система, надсистема и подсистема (Рис. 2.3).

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, возможно - интернет вещей), производственная среда, а также применения - 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 различные узлы и компоненты ЭМ. Параллельно с развитием новых материалов появляются новые технологии производства.



Рис. 2.3. Три иерархических уровня эволюции.

Можно дискутировать о том, куда отнести новые производственные технологии – в надсистему (вместе с производственной средой) или в подсистему (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.2.4, где производственная среда и производственные технологии выделены в отдельный блок, влияющий на эволюцию ЭМ, и связанный как с надсистемой, так и с подсистемой.

Надсистемы: сеть и силовая электроника, информационная 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.

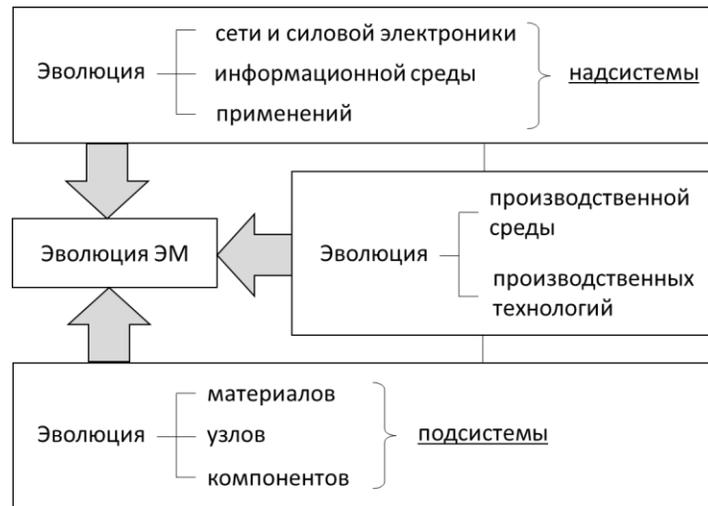


Рис. 2.4. Надсистемы и подсистемы, определяющие эволюцию ЭМ.

Во-первых, появился ряд машин, например вентильно-индукторные, синхронно-реактивные или основные типы 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, и 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 сила связи между такими системами усиливаются с процессом эволюции. Совместная эволюция электрических машин и силовых электронных ПЧ является здесь хорошим примером и отдельным вопросом эволюции является постепенная интеграция ПЧ и ЭМ в единую систему до полного слияния в единый модуль («интеграция в надсистему» в терминах ТРИЗ).

Эволюцию технического устройства или системы можно описать через изменение 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 удельной мощности ПЧ с 1970 года проиллюстрировано на Рис.2.5, где 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 данными ПЧ 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 с небольшой мощностью.

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

Производственная среда. 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 используются роботы. При проектировании машины необходимо учитывать особенности производства, на котором предполагается изготовление машины.

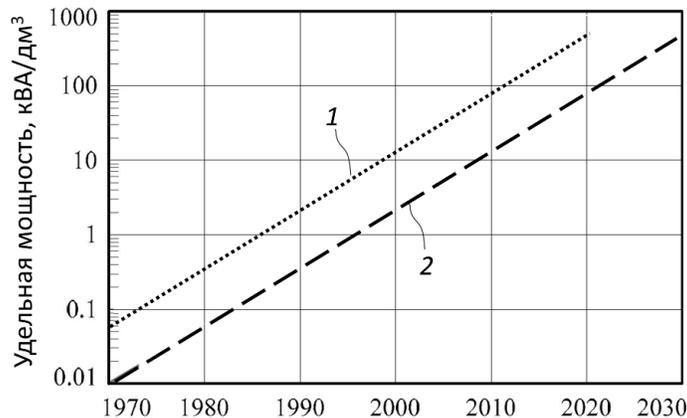


Рис.2.5. Увеличение удельной мощности электронных преобразователей с 1970 года [2.6]: прямая 1 – системы на стадии НИОКР, прямая 2 – системы уже присутствующие на рынке.

Эволюция сетей

Растет доля генерации энергии из возобновляемых источников, таких как ветряная и солнечная энергия. Генерация становится все более децентрализованной. В сети встраиваются накопители

энергии различных типов, т.е. появляется больше элементов с двунаправленным/реверсируемым потоком энергии. Появляется больше автономных сетей. Сеть становится более «умной», чтобы справляться с нестабильностями разного рода. Больше устройств силовой электроники, в том числе большой мощности, в сети становится больше гармонических искажений, что может приводить к проблемам электромагнитной совместимости с новыми внедряемыми системами. ЭМ – ключевой элемент многих новых систем генерации и, например, накопителей на базе маховиков, так что качество и стабильность сети следует принимать во внимание при разработке новых ЭМ.

Важность эволюции подсистем

В [2.2] показано, что мощность электрических турбогенераторов выросла с 0,8 МВт в 1917 году до 540 МВт в 1972 году, и 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. Т. е. имела место эволюция подсистем, к которым в первую очередь относятся материалы, из которых изготовлены ЭМ.

Эволюция материалов

Относительная важность инженерных материалов меняется в процессе эволюции человечества - одна из графических интерпретаций дана на Рис.2.6. Данные тренды отражаются и на мире ЭМ. Мы видим это, в частности, на примере применения керамических подшипников, эпоксидных смол для консолидирования обмоток, композитных материалов в несущих конструкциях ЭМ.

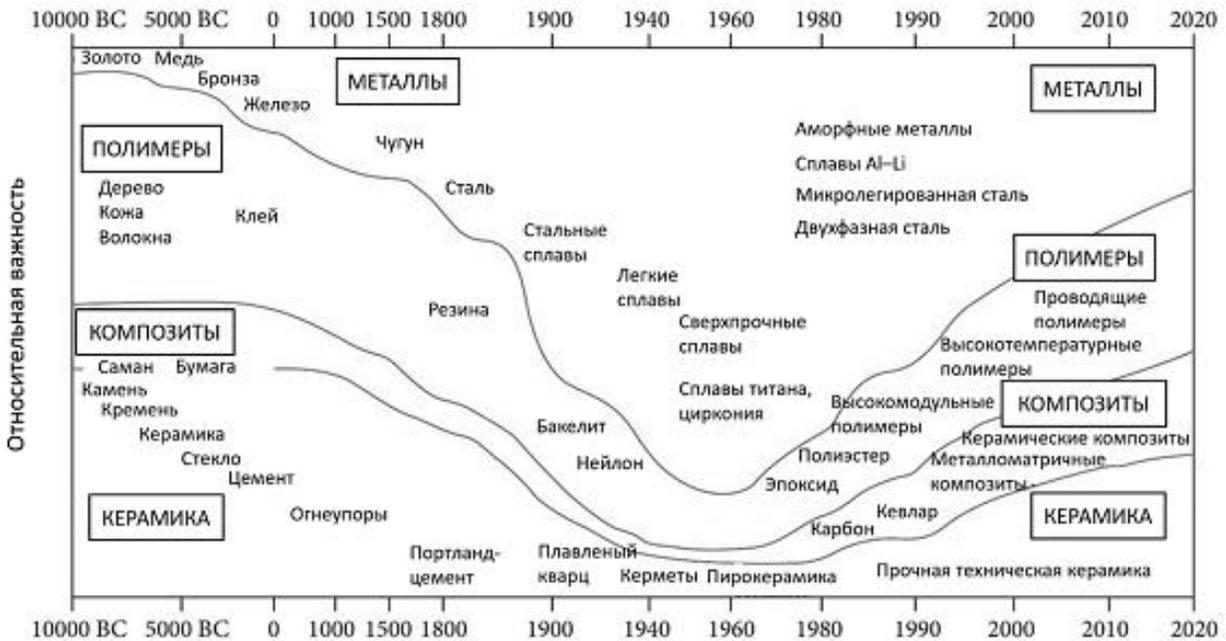


Рис.2.6. Изменения в относительной важности инженерных материалов.

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).

Улучшения свойств сталей включают повышение индукции насыщения, механической прочности, максимальной рабочей температуры, магнитной проницаемости, а также снижение потерь и температурного коэффициента. В качестве примера улучшения одного из свойств приведем тренд снижения потерь в стали (вдвое за 50 лет) в различных сортах сталей компании JFE Steel (Рис.2.7). Отметим, что улучшение некоторых свойств на практике возможно только за счет ухудшения других свойств.

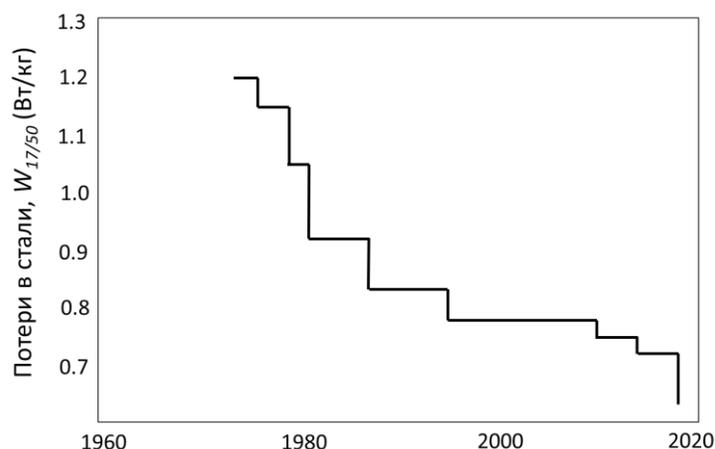


Рис.2.7. Снижение потерь в стали при разработке различных сортов сталей JFE Steel [2.7].

Среди основных направлений исследований по магнитотвердым материалам (постоянным магнитам, ПМ) – увеличение энергетического произведения (ЭП), улучшение механических свойств, работа на высоких температурах. Для ПМ критическим параметром системы, по которому можно описать эволюцию, является ЭП. Интересно, что исторический рост ЭП (Рис. 2.8) напоминает S-образную кривую, что может указывать на предел развития ПМ на основе редкоземельных элементов. Некоторые материалы, из которых делают ПМ, приближаются к своему теоретическому пределу. Тем не менее, уровень ЭП, достигнутый в конце XX века, 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 собой 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 (начало 2020-х) удалось достигнуть уровня электропроводности волокна УНТ 15-20 МСм/м (Рис.2.9), т. е. уровень электропроводности меди пока не достигнут.

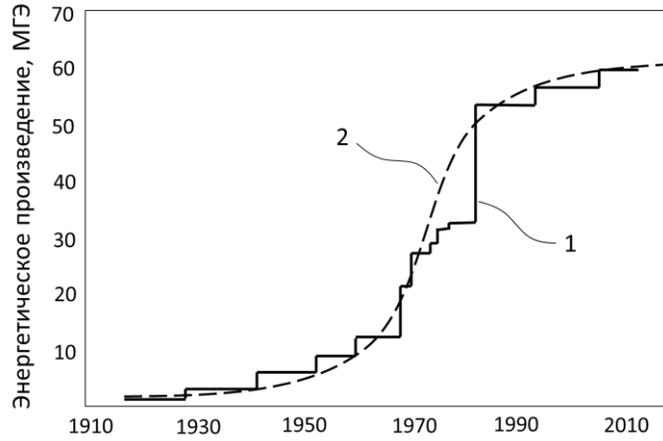


Рис.2.8. Улучшение ЭП ПМ материалов: 1 – реальные значения, 2 – огибающая кривая.



Рис.2.9. Увеличение электропроводности волокон УНТ со временем [2.8].

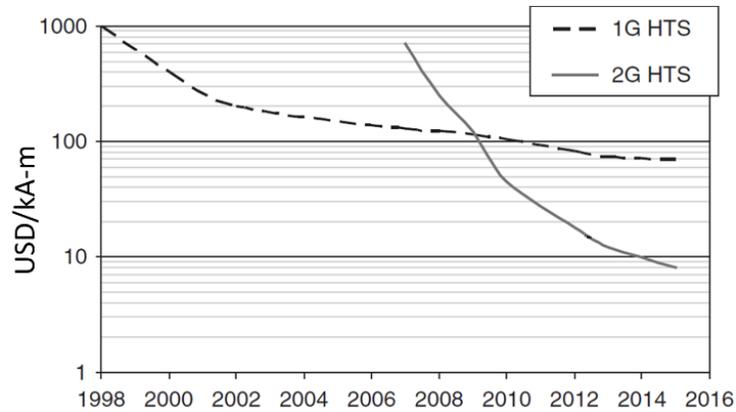


Рис.2.10. Ценовые тренды СП двух поколений.

Сверхпроводники (СП) BSCCO, YBCO, появившиеся в конце 1980-х годов, и MgB_2 , появившиеся в XXI веке, уже используются в электрических машинах, хотя пока в большей степени и 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. В настоящее время ведутся разработки по созданию СП, работающих при комнатной температуре. Недавно полученные СП H_2S , YN_6 , YN_{10} , LaH_{10} уже работают при температурах выше 200 K, но только при очень высоких давлениях – свыше 150 ГПа [2.9]. Данные разработки, конечно, не дают гарантии появления СП, работающих при комнатной температуре и нормальном давлении в ближайшие годы, но делает это вполне вероятным в обозримом будущем.

Важным фактором, сдерживающим внедрение СП, долгое время являлась их чрезвычайно высокая цена. В [2.10] приведены исторические данные и прогноз снижения цены для СП 1-го и 2-го поколений (Рис.2.10). Темпы и абсолютные значения снижения очень существенные – практически на 1-2 порядка за 5-10 лет. 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, по изоляционным материалам 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 года электрическая прочность полиэтилентерефталата (ПЭТ) увеличилась с 300 МВ/м до 520-600 МВ/м [2.11].

Можно приблизительно оценить эффект внедрения новых материалов, которые, возможно, появятся в будущем. Предположим, что изобретен новый проводящий ток сплав с электропроводностью, вдвое превышающей электропроводность меди. Применение такого проводящего материала в ЭМ означает уменьшение потерь в обмотке в два раза или сохранение прежних потерь в обмотке с увеличением тока в $\sqrt{2}$ раз. Если также изобрести новый магнитный материал с индукцией насыщения, превышающей в два раза индукцию насыщения современной ламинированной магнитной стали, то индукцию в воздушном зазоре можно будет увеличить

примерно в два раза. Можно в первом приближении принять, что объем ЭМ обратно пропорционален токовой нагрузке и индукции в воздушном зазоре. Применение обоих вышеупомянутых материалов приведет к уменьшению объема машины в $2 \cdot \sqrt{2} \sim 2,82$ раза. Масса также может быть снижена примерно в такой же пропорции. Это могло бы быть значительным улучшением, которое привело бы к радикальным изменениям в ряде применений, где масса и габариты ЭМ имеют большое значение, например, в летательных аппаратах и экзоскелетах.

Эволюция методов и инструментов проектирования и производства

На Рис.2.11 показаны основные вехи развития методов проектирования и вычислительных возможностей. В последние годы появились инструменты для решения мультифизических и сопряженных задач. Началось использование нейронных сетей, машинного обучения, появилась инфраструктура для распределенных расчетов. В ближайшем будущем, вероятно, станет возможным проводить виртуальные испытания.

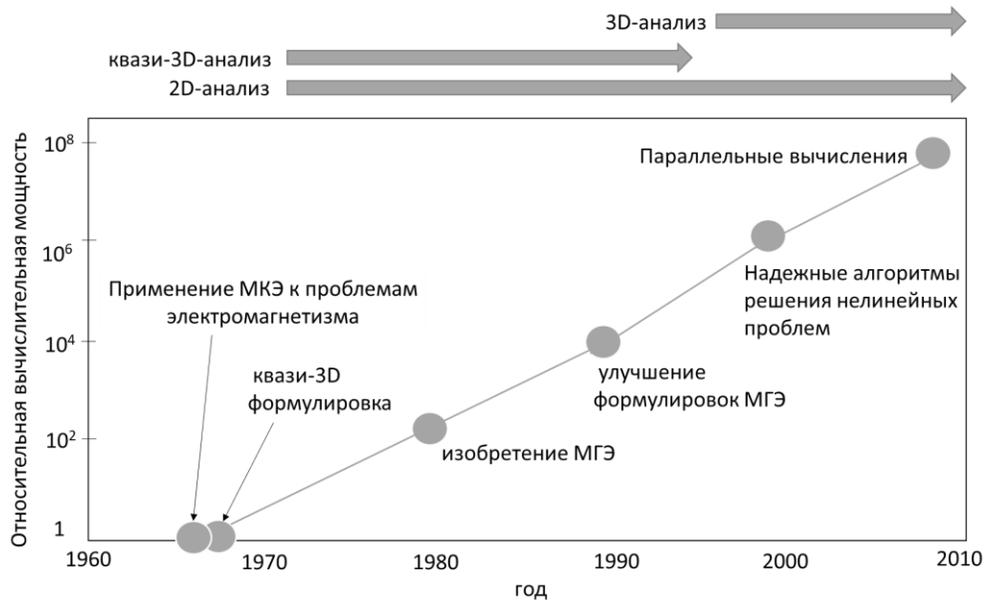


Рис.2.11. Эволюция методов проектирования и вычислительных возможностей.

В области производства ЭМ дают новые возможности все более развитые станки с ЧПУ и автоматизированные производственные комплексы. В целом повсеместно происходит повышение степени роботизации. Также появляются развитые методы и инструменты измерения, оценки качества компонентов и материалов (например, постоянных магнитов). В качестве примера новых технологий производства можно привести аддитивные технологии и литографию [2.12], что дает, например возможность «печатать» обмотки с высоким коэффициентом заполнения медью для некоторых типов микромашин.

Направления эволюции ЭМ

Обозначим основные направления эволюции:

- Увеличение максимально достижимых мощности, момента,
- Повышение управляемости
- Повышение максимально достижимой частоты вращения
- Повышение эффективности преобразования энергии (повышение КПД)
- Увеличение удельных мощности и момента (повышение компактности, снижение массы)
- Повышение степени механической интеграции с окружающими структурами (интеграция в применение - надсистему)
- Миниатюризация

Проиллюстрируем движение в некоторых из этих направлений. Самые мощные машины – турбогенераторы. За последние 60 лет мощность самых больших турбогенераторов увеличилась практически на порядок [2.13] - Рис. 2.12. Сегодня человечество вышло на уровень мощности порядка 2 ГВт (для 4-полюсных машин). Это близко к пределу возможностей современных технологий. Процитируем [2.14]: «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 тонн). И все же есть уверенность, что в будущем с появлением новых материалов, как активных, так и конструкционных, удастся значительно увеличить компактность турбогенераторов и перешагнуть предел 2.5 ГВт (для 2-полюсных машин). 4-полюсные машины, видимо перейдут этот рубеж раньше 2-полюсных.

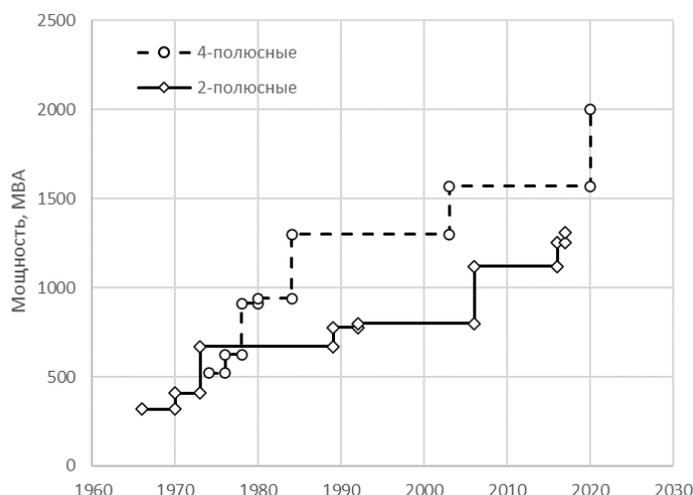


Рис. 2.12. Историческое увеличение мощности турбогенераторов.

В качестве примера роста момента машин возьмем машины с обмотками возбуждения из высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП). На Рис. 2.13 показано, что практически сразу после появления ВТСП начинается поступательный рост максимально достижимого номинального момента таких машин. Сегодня достигнут уровень момента свыше 10 миллионов Нм.

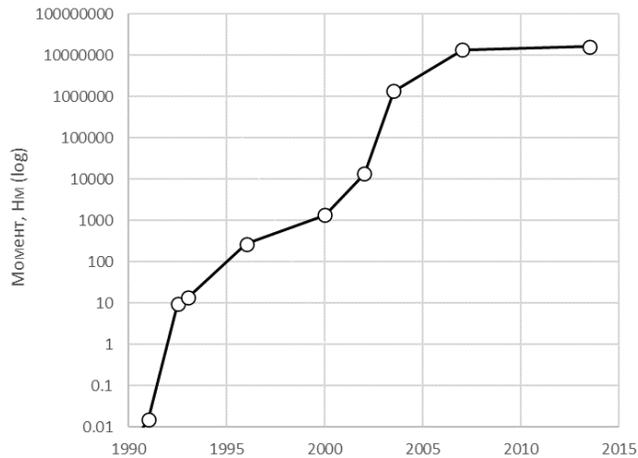


Рис. 2.13. Историческое увеличение момента машин с ВТСП, данные из [2.15].

Идет работа и в направлении миниатюризации. Например, в компании Orbray, производящей микромашины за период с 1973 по 2014 год минимальный размер машины, который способна произвести компания, снизился с 10 мм до 0.6 мм (Рис. 2.13).

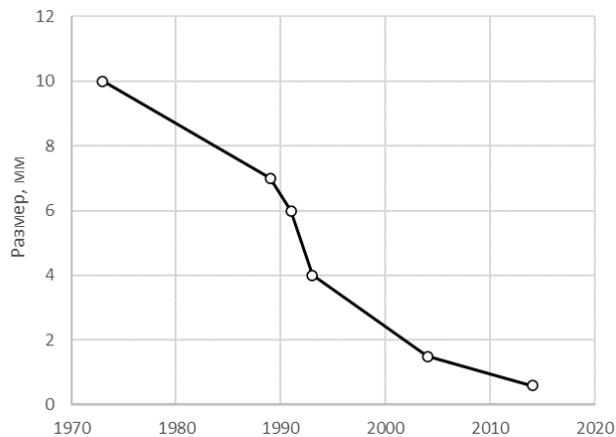


Рис. 2.14. Уменьшение минимально возможных размеров [2.16].

Благодаря возможностям силовой электроники в генерации высоких частот питания растет достижимая максимальная частота вращения машин. В машинах малой мощности уже достигнута частота вращения в один миллион оборотов. Важно отметить, что рекордные мощности машин

достигнуты на сравнительно низких частотах вращения (1500 об/мин), а рекордные частоты вращения достигнуты на малых мощностях (менее 1 кВт). На Рис. 2.15,а показаны применения, которые очерчивают границы современных возможностей по мощностям и частотам вращения. Мы можем представить эволюцию как попытку сдвинуть границу на Рис. 2.15,б вправо-вверх.

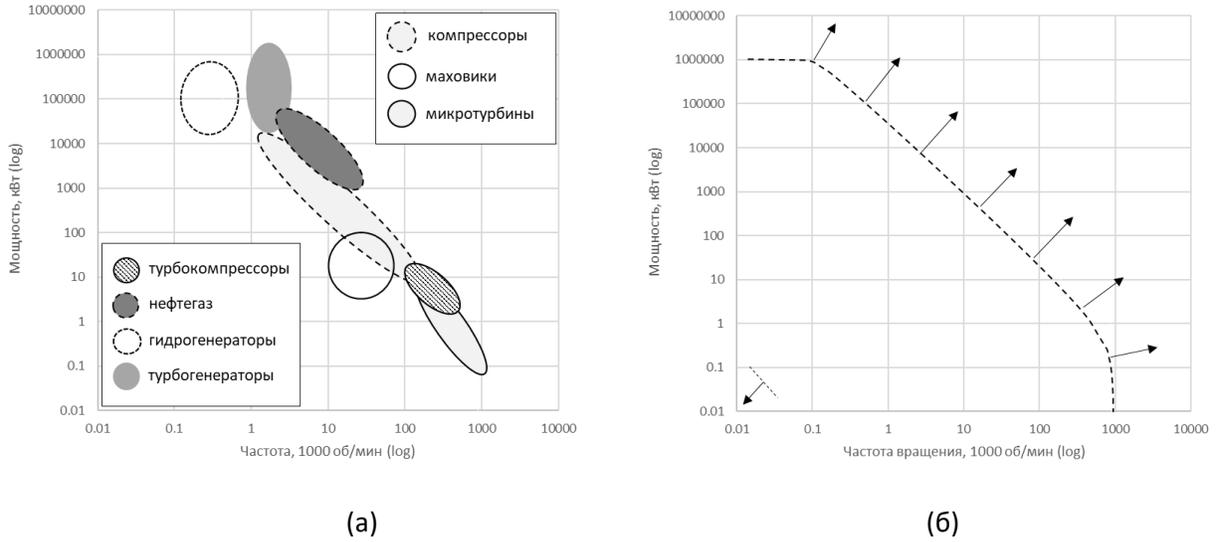


Рис. 2.15. Применения машин с высокими мощностями и частотами вращения (а) и схематическое обозначение «границы возможного» (б).

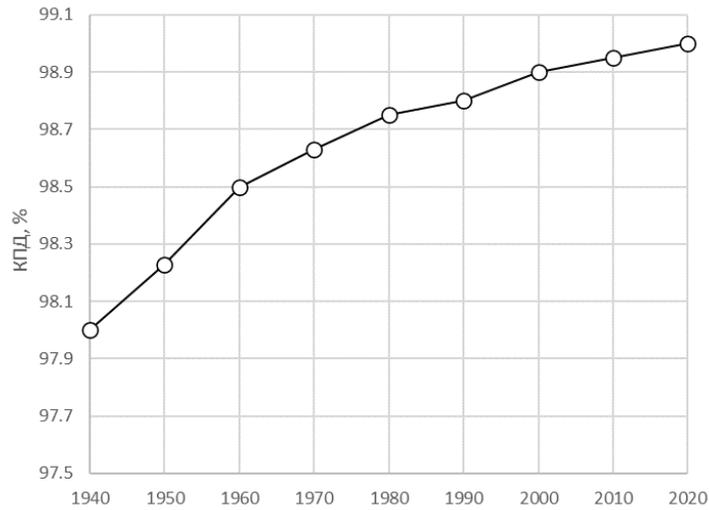


Рис. 2.16. Тренд улучшения КПД генераторов Siemens [2.17].

Отметим, что силовая электроника в целом значительно увеличивает управляемость 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 – (Рис. 2.16).

В Главе 1 представлена постоянная C_M . Чем ниже значение C_M тем компактнее машина. Компактность (обиходный термин, связанный с объемом) и масса машины на практике обычно находятся в прямой зависимости. «Высокая компактность» машины часто справедливо понимается как «малая масса». Именно в таком смысле термин «компактность» будет использован ниже. На Рис. 2.17 показана эволюция компактности ВЧСМПМ¹⁶ и СМОВСП¹⁷ [2.18]. Вертикальными стрелками показаны диапазоны, в которых обычно находятся значения C_M для данного типа машин. Мы видим, что ВЧСМПМ значительно компактнее АД и СМОВСП. Это, в первую очередь, эффект применения высокой частоты питания, а также эффект использования большого количества полюсов.

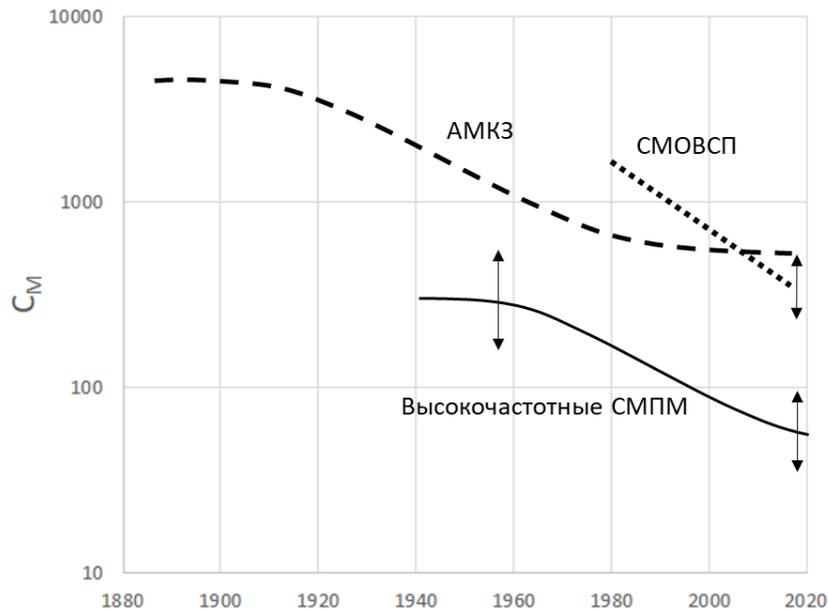


Рис. 2.17. Тренды снижения машинной постоянной.

В таблице 2.2 дано сравнение конкретной ВЧ системы с СМПМ с конкретной традиционной системой ПЧ-АД [2.21]. Разница в компактности – очень большая. Система ПЧ-АД практически выглядит в сравнении с ВЧ системой как система предыдущего поколения. Можно сказать, что сегодня на рынке сосуществуют системы разных поколений. На Рис. 2.18 показаны традиционная система (а) и высокочастотная система (б), причем масштаб рисунков выбран так, чтобы показать разницу в размерах соответствующих ЭМ и ПЧ. Такое преимущество высокочастотных систем с СМПМ может привести к новым стандартам в промышленности. Машины, прежде называемые

¹⁶ Высокочастотные синхронные машины с постоянными магнитами.

¹⁷ Синхронные машины с обмотками возбуждения из сверхпроводников.

«специальными» машинами, могут перейти в категорию «общепромышленные». Следует отметить, что интенсивное воздушное охлаждение пропеллером играет важную роль.



Рис. 2.18. Традиционная система Siemens (а) и высокочастотная система T-motor (б).

Таблица 2.2. Сравнение традиционной и высокочастотной систем.

	Традиционная система (ABB, Западная Европа)	Высокочастотная система (T-motor, Китай)
Электрическая машина	MЗВР 80 МС	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, куб. см	5760	336
Масса, кг	18	0.650
C_m	900	33
Преобразователь частоты (ПЧ)	ACS580-01-04A0-4	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	222 x 303 x 125	84 x 35.5 x 19.5
Объем, куб. см	8408	58
Масса, кг	5.1 кг	0.109 кг
Система (машина + ПЧ)		
Объем, куб. см	14168	394
Масса, кг	23.1	0.759

На Рис. 2.19 предложен прогноз возможного развития систем регулируемого электропривода. На Рис. 2.19,а показана наиболее распространенная топология с ПЧ расположенном в распределительном устройстве и двигателем, соединенным с ПЧ длинным кабелем. В последние 20 лет внедряются интегрированные привода, где ПЧ и ЭМ являются единым модулем (Рис. 2.19,б). В будущем, вероятно, будут использоваться преимущества высокочастотных систем, и частота между ПЧ и двигателем (типа СМПМ) будет значительно увеличена (Рис. 2.19,в). Вполне вероятно, что двигатель в такой системе будет иметь несколько гальванически независимых многофазных обмоток.

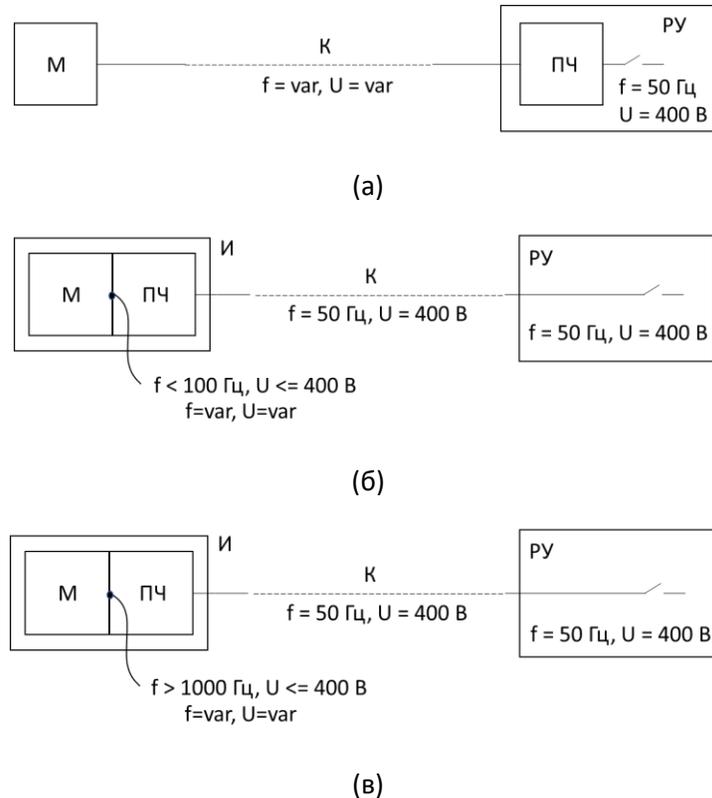


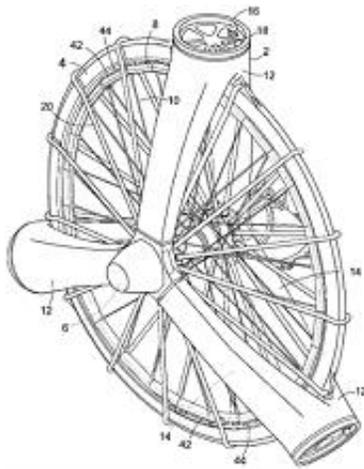
Рис. 2.19. Эволюция топологий систем: М – машины, ПЧ – преобразователи частоты, РУ – распределительного устройства, И – интегрированный модуль.

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 [2.14] приводятся данные, указывающие, что за счет улучшения конструкции, форсированного охлаждения и применения изоляционных материалов, допускающих более высокие превышения температуры, удалось в течение 50 лет (приблизительно с 1935 по 1985 год) 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.

Одно из направлений эволюции - повышение степени механической интеграции с окружающими структурами (интеграция в применение - надсистему). В обычных генераторах с ПМ для ВЭУ с прямым приводом масса несущих структур генератора может составлять до 50% от его общей массы. За счет механической интеграции массу можно значительно снизить. Хорошо иллюстрирует этот принцип генератор для ВЭУ Sway (Рис. 2.20). За счет значительного увеличения диаметра увеличивается окружная скорость, что положительно сказывается на массе генератора - получается, как бы «встроенный мультипликатор». Генератор Sway – аксиальная СМППМ без сердечника на статоре (БС-СМППМ), что позволяет облегчить конструкционные элементы, поддерживающие активные части, поскольку отсутствуют аксиальные силы притяжения между статором и ротором. Несущей структурой для ротора являются в значительной степени лопасти ВЭУ.

Это хороший теоретический пример, но по крайней мере три компании, занимавшиеся данной технологией, обанкротились.



(а)



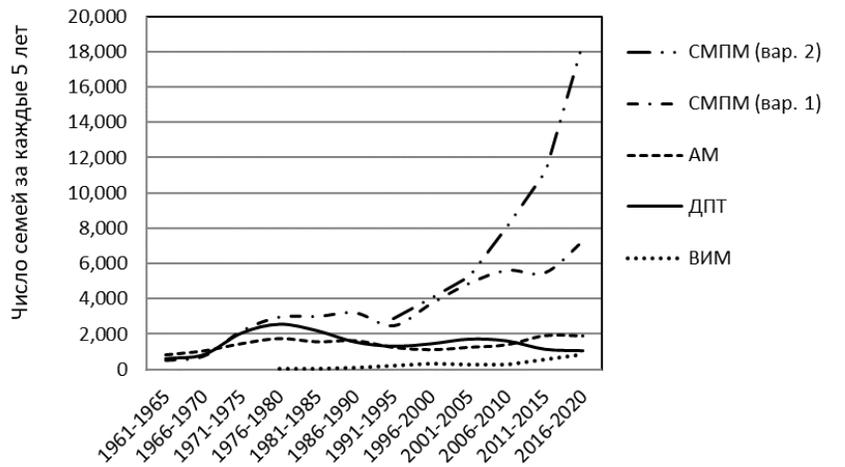
(б)

Рис. 2.20. ВЭУ Sway: иллюстрация из патента CN103987962A2 (а) и рисунок из [2.22] (б).

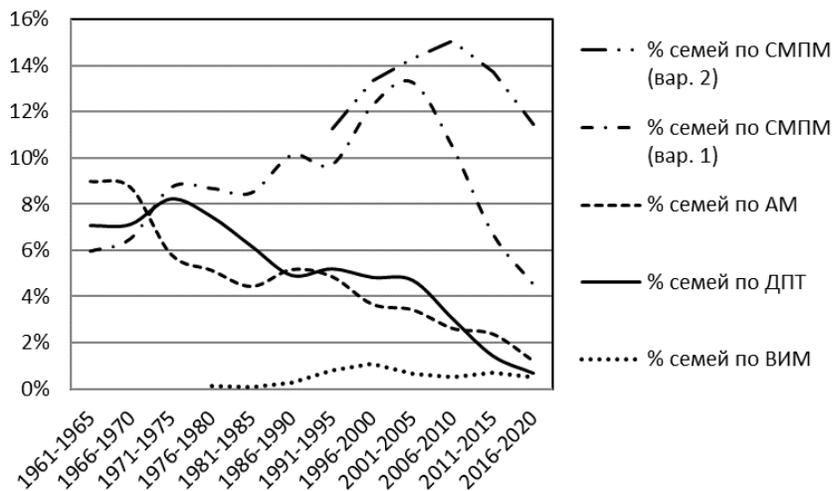
Одной из характеристик процесса эволюции является вытеснение одних типов машин другими. Число патентных заявок по отдельно взятой технологии – косвенный показатель уровня инвестиций и количества разработчиков, вовлеченных в развитие той или иной технологии.

На Рис. 2.21 показана историческая динамика подачи патентных заявок по четырем типам ЭМ в абсолютных (а) и относительных (б) цифрах. Количество изобретений по СМППМ 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 СМППМ. На Рис.2.20,б хорошо видно, что в процентном отношении доли АМ и ДПТ падают. Интересно сопоставить кривую изменения C_M для АМ (Рис. 2.21) с падающей долей патентов по АМ – становится очевидно, что инвестиции в АМ снижаются по сравнению с инвестициями в другие типы ЭМ и, соответственно, данный тип машин не развивается. На этом фоне очевидно бурное развитие СМППМ. В Приложении 3 дана более подробная статистика по патентам 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.



(а)



(б)

Рис. 2.21. Динамика подачи патентных заявок.

Иллюстрация примеров процесса эволюции компактности. В главе 1 на Рис. 1.19 представлена логарифмическая карта, связывающая удельные мощность и момент с номинальными мощностью и частотой вращения в максимально широких диапазонах. 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 [2.19]. Можно попытаться проиллюстрировать эволюцию компактности некоторых из рассмотренных выше типов машин с

помощью данной карты, как показано на Рис. 2.22. Определенная технология ЭМ обычно существует и развивается в определенном диапазоне мощностей и частот вращения и занимает соответствующую область на логарифмической карте. Улучшение компактности из-за, например, механической интеграции или использования высокой частоты питания, можно представить как «взламывание» карты и переход области существования технологии в область более высоких удельных показателей.

На Рис. 2.22 очерчена приблизительная область развития СМОВСП и ВЧСМПМ. Вероятно, в ближайшем будущем мы станем свидетелями конкуренции между СМСПОВ и ВЧСМПМ за диапазон мощностей и частот вращения 0.1–1 МВт, 1000-3000 об/мин. При снижении цен на СП может стать рентабельным создание СМСПОВ на мощности ниже 1 МВт. Со своей стороны, ВЧСМПМ уже начинают занимать ниши в применениях с мощностью выше 100 кВт. В целом мы видим, что развитие ЭМ как класса систем идет неравномерно и за счет внедрения разных типов ЭМ в разных применениях.

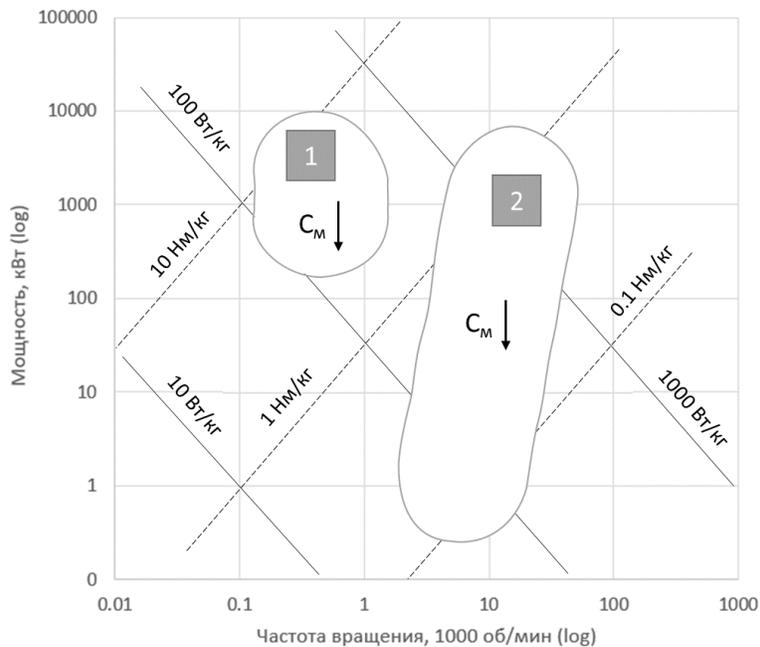


Рис. 2.22. Примеры эволюции компактности: 1 - СМОВСП, 2- высокочастотные СМПМ.

Противодействующие силы и ограничения

Эволюция характеризуется не только движущими силами, но и противодействующими силами и ограничениями, совместно определяющими направление эволюции (Рис. 2.23).

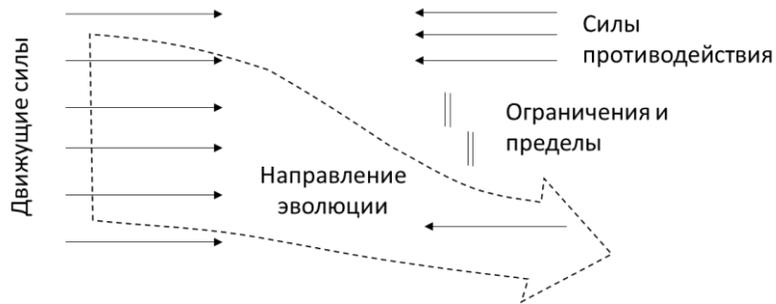


Рис. 2.23. Иллюстрация движущих сил, сил противодействия, ограничений и направления эволюции.

Любая сложная техническая система "сопротивляется" изменениям тем или иным образом. Противодействующие силы создаются, в частности, людьми, которые либо подвержены психологической инерции, либо опасаются ухудшения своего положения в результате внедрения чего-то 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. 2.3.

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 [2.2] показывается каким образом может ограничиваться мощность турбогенератора - отношение мощности генератора к мощности системы ограничено простым эмпирическим правилом: мощность одного генератора не должно превышать 10% мощности всей системы чтобы его можно было при отказе заменить за счет резерва мощности системы которые 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 ещё не скоро. В то же время, определенные типы ЭМ вполне могут «упираться в потолок» собственного развития и вытесняться альтернативными вариантами.

Таблица 2.3. Примеры ограничений.

Ограничения связанные с ...	Примеры из области ЭМ
... законами физики, химии и биологии	Механические ограничения связанные с высокой окружной скорости 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 это 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 1830е 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 «псевдо-прямой привод» (Pseudo Direct Drive, PDD)
... конечностью не возобновляемых природных ресурсов	Редкоземельные элементы, из которых изготавливаются постоянные магниты, являются ограниченным ресурсом
... с 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.

Отметим еще несколько особенностей эволюции технических систем, приведенных в [2.4], которые полностью применимы к ЭМ, и дадим соответствующие примеры:

- Изменения в разных областях технологий могут существенно влиять друг на друга. Одно изобретение может как способствовать другим изобретениям, так и тормозить их, и даже предотвращать. Аналогичным образом, одна техническая система может как поддерживать появление других 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: эволюции в одних осях может иметь иные закономерности, чем в других, при этом разные подсистемы могут эволюционировать с разной скоростью, могут влиять на эволюцию друг друга, ускоряя или замедляя её. Например, усовершенствование щеток машин постоянного тока, увеличение их срока службы, замедляет замену приводов постоянного тока на приводы переменного тока.

- При развитии техники присутствует два интересных 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 в этих применениях различны, что приводит к появлению непохожих конструкций СМПМ (дивергенция). В то же время опыт интеграции СМПМ в винто-рулевую колонку морского судна может использоваться для создания генераторов для приливных турбин (конвергенция).
- При эволюции системы в ней накапливаются изменения, причём они не просто накапливаются, а меняют систему, придавая ей новые свойства, и таким образом появляется новая система (происходит «перерождение»). Примером могут являться различные «гибридные» топологии ЭМ, соединяющие в себе принципы 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, то есть выбираются системы с наибольшей идеальностью. В кризисные времена 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 году из-за политической конъюнктуры (с достаточно быстрым возвращением к старому уровню цен - к 2013 году) ряд перспективных проектов ЭМ с прямым приводом были остановлены и предпочтения были отданы машинам без ПМ и соответствующим топологиям систем, несмотря на лучшие характеристики машин с ПМ.

Стандарты как ограничители и проводники

Создание и эксплуатация большинства ЭМ регламентируется различными стандартами и директивами. Приведем три примера:

1. ГОСТ МЭК 60034 регламентирует:

- габаритные, присоединительные размеры ЭМ,
- некоторые характеристики, например уровень акустического шума, классы КПД,
- некоторые процедуры, например процедуру испытания систем изоляции,
- руководства, например руководство по проектированию и эксплуатации двигателей переменного тока, специально разработанных для питания от преобразователей частоты.

2. Директива по низковольтному оборудованию регламентирует:

- защиту от опасностей, возникающих при использовании электрооборудования,
- электромагнитная совместимость (ЭМС),
- ограничения на использование определенных опасных веществ.

3. Рамочная директива по отходам определяет меры по защите окружающей среды и здоровья человека путем предотвращения или уменьшения неблагоприятного воздействия отходов производства, а также меры повышения эффективности использования ресурсов.

Стандартизация важна как для проектирования и эксплуатации систем или объектов использующих ЭМ, так и для разработчиков и производителей ЭМ. Стандарты определяют некое дискретное пространство, в рамках которого работают создатели новой техники. В чем же цель стандартизации? Во-первых, стандарты, директивы и законодательные требования обеспечивают соответствие ЭМ требованиям безопасности людей и оборудования. Во-вторых, обеспечивается беспроблемная интеграцию нового оборудования (ЭМ) в существующие промышленные агрегаты и линии, причем, независимо от страны происхождения оборудования. В-третьих, появляется предсказуемость в плане возможности замены поставленного оборудования даже через много лет.

Изначально производители ориентируются на международные, национальные и отраслевые стандарты, но спецификация или стандарт конкретного оператора или пользователя может быть более «требовательными» чем, например, отраслевой стандарт. Это может давать преимущество оператору, но может усложнять жизнь производителю оборудования.

Отдельная тема - военные спецификации и стандарты. Они в книге не рассматриваются, но можно упомянуть, что ЭМ в военных применениях зачастую существуют в тех же условиях, что и обычные. Но могут быть отличия, например, в требованиях по устойчивости к ударным воздействиям. Также достаточно важное отличие в том, что в военной технике могут использоваться запрещенные или очень редкие или дорогие материалы, обычно недоступные в гражданских применениях.

Заключительный комментарий к главе 2

Вероятно, можно сказать, что если в XIX веке основной движущей силой эволюции была изобретательская деятельность, благодаря которой были созданы основные типы ЭМ и отсеяны тупиковые варианты развития, то в XX веке основной движущей силой эволюции было улучшение свойств материалов и различных подсистем машин, а также появление силовой и управляющей электроники. В XXI веке, вероятно, эволюция материалов продолжит играть важную роль наряду с внедрением принципиально новых производственных технологий. Во все времена появление и развитие новых применений являлось 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: (1) появление новых применений и эволюция существующих, (2) новые материалы, (3) новые технологии производства.

ЭМ подчиняются тем же законам эволюции, что и другие технические системы. Эти законы важно знать и здесь электромеханикам будут полезны работы специалистов ТРИЗ.

Литература к главе 2

[2.1] B. J. G. van der Kooij, The Invention of the Electromotive Engine, 2015, ISBN: 1503095878.

- [2.2] D. Sahal, Patterns of Technological Innovation, Addison-Wesley, 1981. - 381 p.
- [2.3] М. А. Орлов, Основы классической ТРИЗ, Изд. 2-е, испр. и доп. М.: Солон-Пресс, 2006 - 432 с.
- [2.4] B. Zlotin, A. Zusman, Patterns of evolution: recent findings on structure and origin, TRIZCON'2006, April 2006, Milwaukee, WI, USA.
- [2.5] В. М. Петров, Технология инноваций, ISBN 965-7127-01-7, Тель-Авив, 2007 - 90 с.
- [2.6] J.W. Kolar, U. Drofenik, J. Biela, M. L. Heldwein, H. Ertl, T. Friedli and S.D. Round, PWM converter power density barriers, IEEJ Transactions on Industry Applications, 128(4): P-9 - P-29, May 2007.
- [2.7] T. Takamiya, K. Hanazawa, T. Suzuki, Recent development of grain-oriented electrical steel in JFE Steel, JFE, Technical report, No. 21 (Mar. 2016)
- [2.8] Carbon conductors for lightweight motors and generators, DE-EE0007865, Rice University, University of Maryland, DexMat, Irvin Global Industries, April 2017 – Oct 2019.
- [2.9] A. Extance, The race is on to make the first room temperature superconductor, Chemistryworld, November 1, 2019. [Электрон. ресурс] www.chemistryworld.com (дата обращения 19.06.2020).
- [2.10] Wei Tong, Wind power generation and wind turbine design, WIT Press, 2010, 741 pages. Chapter 9 «Direct drive superconducting wind generators» by Clive Lewis.
- [2.11] Shengtao Li, Shihu Yu, Yang Feng, Progress in and prospects for electrical insulating materials, IET Journals, High Volt., 2016, Vol. 1, Iss. 3, pp. 122–129, doi: 10.1049/hve.2016.0034.
- [2.12] B. Dehez, F. Baudart and Y. Perriard, 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.
- [2.13] 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 Vol. 52 No. 2, June 2015.
- [2.14] И. П. Копылов, Электрические машины 2-е изд., пер. и доп., Учебник для бакалавров, Юрайт, 2012.
- [2.15] AMSC presentation, Concepts for high power wind turbines introducing HTS technology, World Green Energy Forum 2010, Gyeongjucity, Korea, November 17-19, 2010.
- [2.16] Вебсайт компании Orbray [Электрон. ресурс] (дата обращения 16.09.2022) <https://orbray.com/en/product/dccorelessmotor/motorhistory.html>.
- [2.17] F. Werfel, Supraleitung und Innovationene in der Energietechnik, Internationale Fachtagung Innovative Glanzlichter fuer das Solarzeitalter aus Sachsen, June 14, 2012.
- [2.18] А. В. Матвеев, Анализ типов и серий асинхронных машин с помощью альтернативной машинной постоянной, Электричество, №7, 2020.
- [2.19] А. В. Матвеев, Движущие силы и направления эволюции вращающихся электрических машин. Ч. 1, Электричество, №1, 2021, стр. 44-54.

[2.20] А. В. Матвеев, Движущие силы и направления эволюции вращающихся электрических машин. Ч. 2, Электричество, №2, 2021, стр. 4-15.

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

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

Глава 3. Действующие лица процесса эволюции и их роли

Процесс эволюции можно представить как непрерывающийся поток инноваций. 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. Одиночками могут являться, пожалуй, только консультанты (например, консультанты по ТРИЗ). Даже одиночки – создатели стартапов достаточно быстро обрастают коллективом. Роль «изобретателей-одиночек» сводится в основном только к генерированию идей (хотя это и очень важная роль!). Дело в том, что при возникновении новой многообещающей идеи, как только о ней становится известно, практически немедленно в разных странах государственные исследовательские центры и частные корпорации начинают выделять средства на разработки по развитию данной идеи. Таким образом начинается соревнования больших коллективов. В конце концов именно коллектив становится победителем. В любом случае, в наши дни улучшение продуктов или решений начинает следовать практически сразу за первым появлением нового продукта или нового решения.

Создатель нового, желающий нарушить статус-кво и инициировать шаг в «эволюционно правильном» направлении, с его точки зрения, должен осознавать всю сложность структур мира инноваций, понимать цели и механизмы работы всех действующих лиц. Основные группы действующих лиц процесса эволюции находятся в четырех средах: (1) академическая среда, включая НИИ, (2) промышленность, включая отраслевые и межотраслевые комитеты, (3) государственные и наднациональные органы, (4) финансовый сектор частного капитала. Один и тот же человек может совмещать роли в двух или более средах. Например, университетский профессор может являться экспертом государственного органа, специалист с промышленного предприятия может по совместительству преподавать в университете, студент в свободное от учебы время работать в своем стартапе, и т. д.

Как было упомянуто в главе 2, 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. Таким образом вопрос инвестиций – ключевой. Инвестиции могут быть государственные и частные. Возможна их комбинация. Частные инвестиции могут быть от предприятий, фондов и частных лиц. По сути, можно сказать, что группы людей, имеющие политическое или финансовое влияние, определяют направления исследований и разработок, уровень финансирования и, соответственно, количество специалистов, работающих в выбранном направлении. Такие группы создают условия для инноваций (например, через механизм грантов) и контролируют процесс (например, через механизм сертификации).

Управление посредством постановки целей

В ООН были сформулированы цели устойчивого развития (Рис. 3.1). Государственные органы (в большой степени) и частные корпорации и фонды (в несколько меньшей степени) хотя бы частично опираются в своих планах на эти цели. В результате переговоров политики разных стран берут на себя обязательства по достижению более конкретных целей в рамках более общих целей,

поставленных ООН для всего человечества. Ориентируясь на эти цели организации-грантодатели управляют инвестициями. Пример такой организации – Еврокомиссия.



Рис. 3.1. Цели устойчивого развития, представленные в виде комбинации пиктограмм.

Например, на Рис.3.2 показан механизм влияния политических приоритетов Евросоюза на развитие гибридных и полностью электрических самолетов через постановку конкретных целей по снижению выбросов углекислого газа и расхода топлива наднациональным органом – Европейским Консультативным Советом по Исследованиям в Области Аэронавтики [3.1]. В результате постановки целей и целевого финансирования в последние годы было создано множество концепций гибридных и полностью электрических самолетов – взрывной рост количества проектов в области электрификации авиации показано на Рис. 3.3.

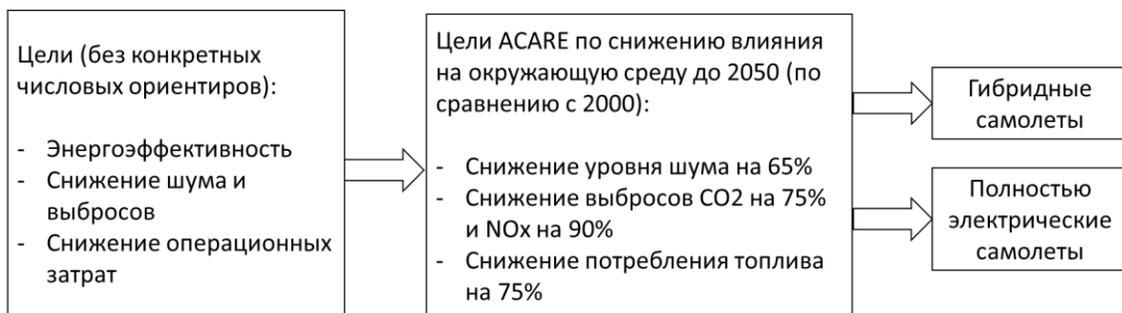


Рис. 3.2. Влияние выбранных политических приоритетов на электрификацию авиации.

В списке целей ООН можно указать некоторые цели устойчивого развития, по мнению автора наиболее непосредственно относящиеся к ЭМ:

- **Обеспечение доступа к недорогостоящим, надёжным, устойчивым и современным источникам энергии для всех.**
- **Принятие срочных мер по борьбе с изменением климата и его последствиями.**
- Обеспечение открытости, безопасности, жизнестойкости и устойчивости городов и населённых пунктов.
- Обеспечение рациональных моделей потребления и производства.
- Сохранение и рациональное использование океанов, морей и морских ресурсов в интересах устойчивого развития.

О целях, записанных в стратегиях различных организаций, финансирующих научные исследования и инженерные разработки, следует знать, поскольку в рамках этих целей легче получить поддержку своим идеям и разработкам.

Действующие лица различных комиссий и комитетов - политики и чиновники, опирающиеся на экспертное сообщество. Эта группа – очень влиятельная с точки зрения эволюции любых технических систем, в том числе и ЭМ.

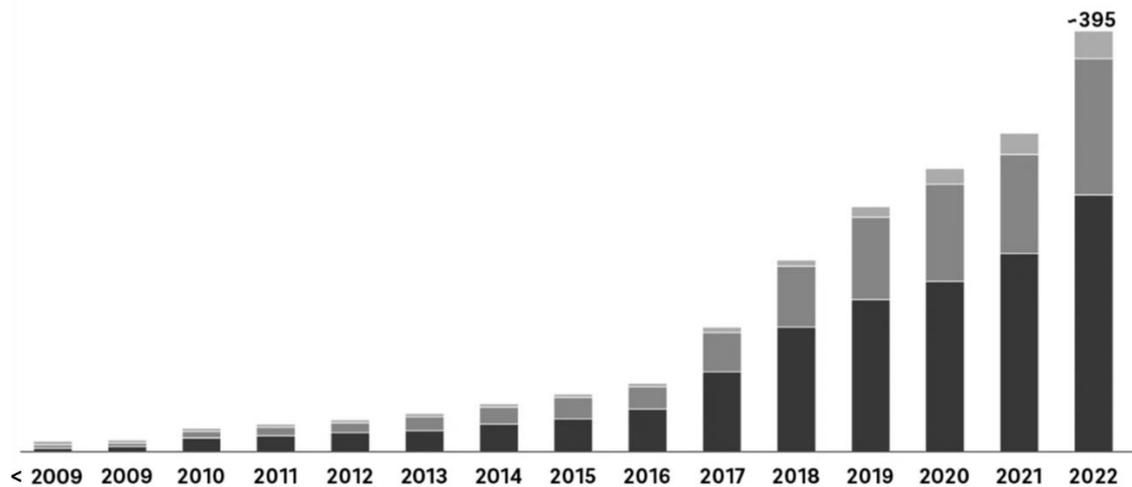


Рис. 3.3. Рост количества проектов в 2010-х годах [3.2].

Управление с помощью финансовой поддержки

Один из важнейших механизмов управления направлениями инноваций – инвестиции и гранты коммерческих и государственных институтов (Рис.3.4). Гранты бывают общественные, правительственные, частные, корпоративные.

Механизм управления через финансирование имеет три основные ступени:

- 1) определение и закрепление направлений исследований и разработок (например, энергетическая безопасность или защита окружающей среды),
- 2) определение более конкретных тем в заданных направлениях (например, береговые ВЭУ или самолеты на водородном топливе) и ожидаемых результатов проектов,
- 3) реализация отбора проектов, которые получают финансовую поддержку (обычно организуется достаточно жесткое сито отбора).

Финансирование новых разработок может быть также в форме кредитов и инвестиций – это уже более типично для негосударственных коммерческих организаций. Независимо от типа и источника финансирования, используются схожие процедуры, где, в частности, рассматривается соответствие проекта целям грантодателя или инвестора, производится оценка экспертами всего портфеля проектов грантодателя или инвестора, чтобы определить, насколько естественно туда могли бы вписаться новые проекты. Производится выбор критериев оценки и производится индивидуальная и групповая оценка проектов экспертами. Оценивается, насколько вероятно, что работа заявленной команды по предложенному плану с указанными ресурсами принесет ценные результаты. Поскольку оценка производится экспертами, роль экспертного сообщества, как в формулировании целей развития, так и оценке проектов, показанная на Рис.3.5 очень важна.

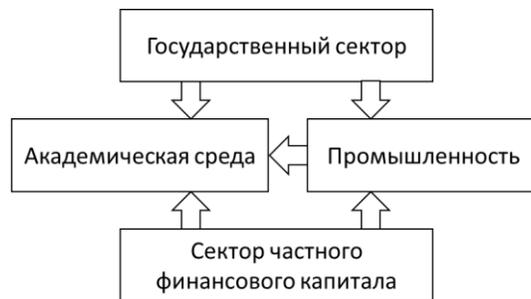


Рис. 3.4. Направление инвестиций (движение финансовых средств).

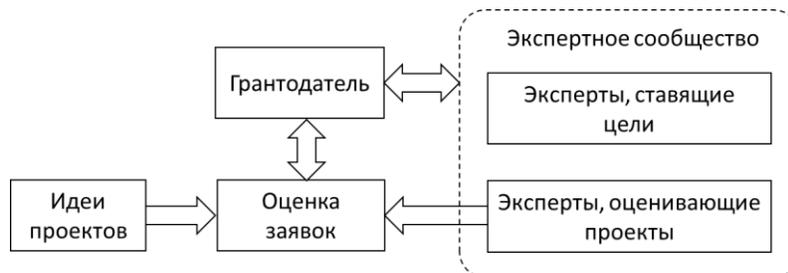


Рис. 3.5. Роль экспертного сообщества.

Роль в технической эволюции ВУЗов и НИИ

ВУЗы (университеты), в первую очередь несут ответственность за обучение следующего поколения ученых, инженеров и технологов, а также за подготовку будущих лидеров в области технологий и инноваций, которые будут способствовать прогрессу в различных отраслях и определять направление технологической эволюции. Помимо этого, университеты играют очень важную роль в развитии технологий несколькими более непосредственными способами:

- Университеты создают среду, способствующую творчеству и инновациям. Они побуждают студентов и исследователей мыслить критически, идти на риск и расширять границы возможного.
- В отличие от многих предприятий, университеты не ориентированы исключительно на краткосрочную прибыль. Они могут инвестировать в долгосрочные исследовательские проекты, которые могут занять годы или даже десятилетия, чтобы привести к фундаментальным открытиям и технологическим прорывам. Университеты поощряют междисциплинарные исследования, объединяя экспертов из разных областей для работы над сложными проблемами. Такой подход часто приводит к прорывам, которых было бы сложно достичь в рамках одной дисциплины.
- Университеты способствуют распространению знаний, публикуя результаты исследований и делая их доступными для общественности. Такая открытость способствует обмену информацией и ускоряет темпы технологического прогресса.
- Академическая среда также может работать как инкубатор и ускоритель разработок, пришедших извне. Университеты предоставляют среду, в которой сторонние исследователи могут развивать свои идеи и создавать новые знания, соответствующие тематике этих идей.
- Независимо от того, где возникла идея, внутри академических кругов или за их пределами, рано или поздно происходит передача технологий в промышленность, например, через сотрудничество с отраслевыми партнерами в исследовательских проектах. В университетах часто есть офисы по передаче технологий, которые способствуют коммерциализации результатов исследований. Передача технологий может включать в себя лицензирование технологий компаниям или создание новых предприятий на основе инноваций, разработанных университетами.
- Университеты также играют роль в исследовании и обсуждении этических, социальных и политических последствий появления новых технологий. Они участвуют в дискуссиях об ответственном развитии и использовании технологий, помогая формировать этические стандарты и правила. Этическая основа является очень важным элементом управления эволюцией.

На Рис. 3.6 показаны основные продукты деятельности ВУЗов, которые, при условии их качества и соответствия актуальным задачам, могут быть полезны для реализации инноваций.

Кроме ВУЗов значительную роль в инновациях играют научно-исследовательские институты (НИИ), которые могут быть частью как академического сообщества, так и промышленности, в зависимости от их конкретной ориентации и задач. В то время как ВУЗы сосредотачиваются на образовании студентов, НИИ ориентированы на научные исследования и инновации. НИИ помогают перевести научные исследования в конкретные продукты, услуги или технологии.

Отметим некоторых действующих лиц академической среды – это исследователи, профессора, аспиранты, сотрудники ответственные за инновации и трансфер технологий.

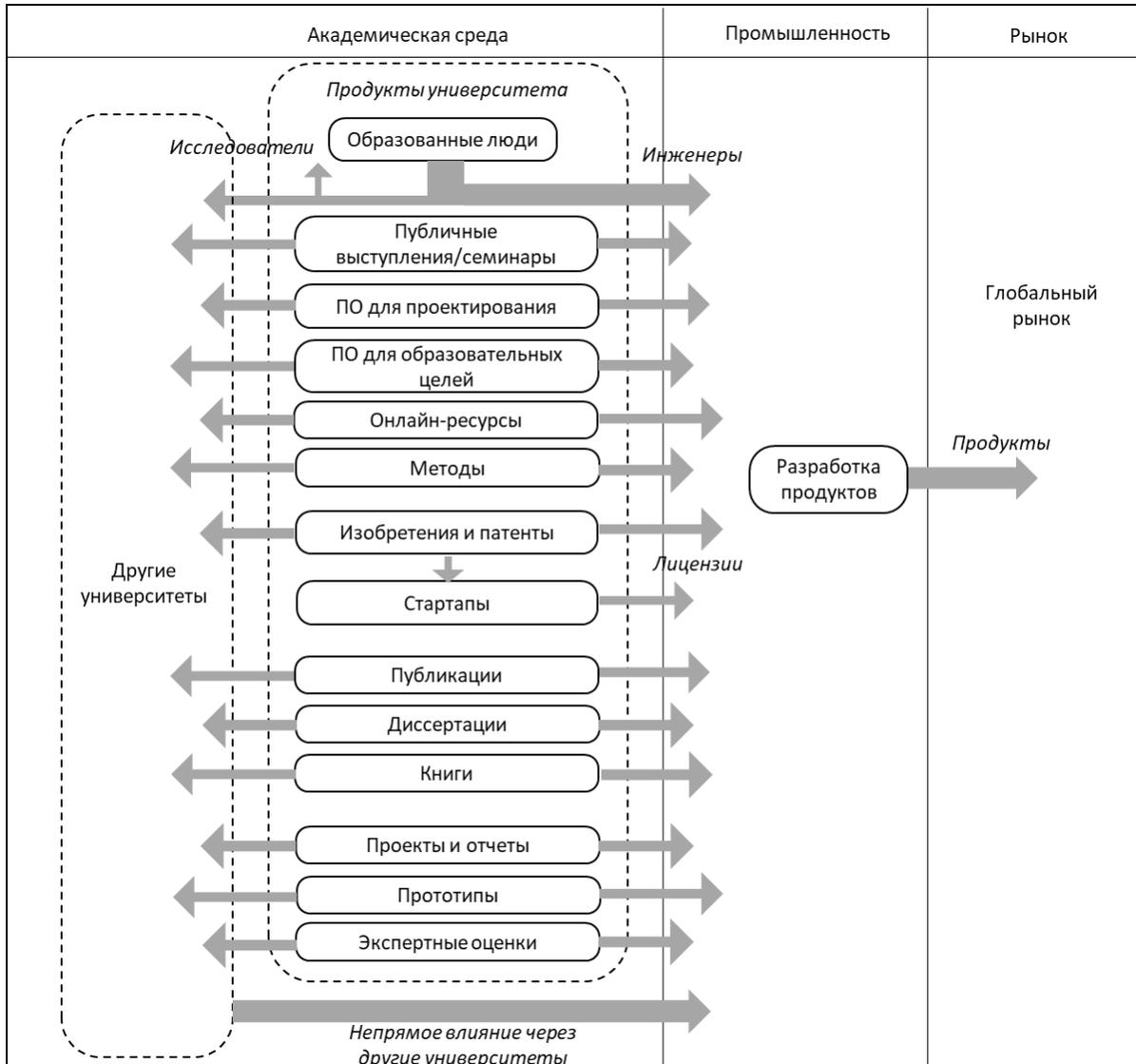


Рис. 3.6. Продукты деятельности университетов.

Действующие лица и некоторые процессы в промышленности

Успех в промышленности в значительной степени зависит от инноваций. В контексте данной книги инновацию можно определить как внедрение новой или улучшенной ЭМ или смежной системы, или нового процесса производства ЭМ. Подобная инновация может базироваться на одном или нескольких новых решениях - назовем сформулированные идеи таких решений «инновационными предложениями». Большинство инновационных предложений отсеиваются экспертами, но часть из

них реализуется и тестируется в прототипах, а некоторые идеи, пройдя стадию тестирования, становятся частью новых продуктов или процессов, т. е. становятся настоящими инновациями. Большинство инноваций реализуется в промышленности, поэтому некоторым сопутствующим процессам ниже будет уделено больше внимания.

При реализации своих идей в рамках промышленного предприятия следует понимать, как работают его структуры Рис. 3.7. Примечательно, что инновационная работа может включать все отделы, как будет продемонстрировано ниже.

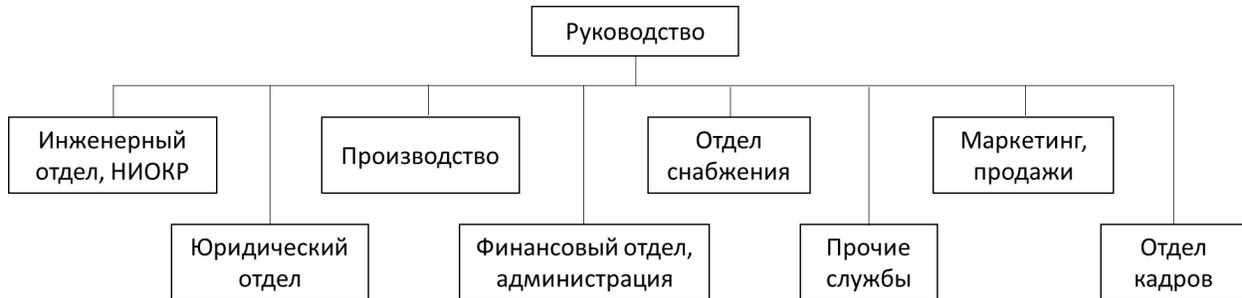


Рис. 3.7. Типичная структура предприятия.

Предположим, что появилось инновационное предложение. Для принятия решения о том, стоит ли идти в предлагаемом направлении, следует проработать ряд вопросов, с частности:

- Насколько технологии, непосредственно связанные с новой идеей проработаны, проверены и доступны, в том числе использованные в решении ключевые компоненты.
- По силам ли предприятию сделать инновационный рывок, исходя, например, из размера предприятия, опыта, компетенций и т. п.
- Насколько высоки риски на пути инновации.
- Какова ценность новой разработки для пользователя (нужно заранее четко видеть эффект от потенциального внедрения).

В получение ответов на эти вопросы могут быть вовлечены практически все подразделения предприятия, но основная работа по планирование стратегических шагов будет производиться руководством, совместно с инженерным, производственным, научно-исследовательским отделами, а также отделом маркетинга и продаж. Ниже, в четырех примерах покажем некоторые практические аспекты проработки данных вопросов и ряд возможных инструментов.

Пример 1. Оценка перспективности новой разработки в контексте современного состояния техники. Цикл хайпа Гартнера — это графическое представление и методология, разработанная для отслеживания внедрения, зрелости и ожиданий новых технологий, тенденций и концепций с течением времени. Показывается траектория, по которой технологии развиваются от ранних стадий до широкого внедрения. Это — ценный инструмент для лиц, принимающих решения, новаторов, помогающий им предвидеть и ориентироваться в проблемах и возможностях, связанных с новыми технологиями. Понимая, на каком этапе цикла Гартнера находится технология, заинтересованные

стороны могут принимать более обоснованные решения о том, когда и как инвестировать, внедрять или разворачивать новые технологии, управляя рисками и максимизируя выгоды. В качестве иллюстрации принципа цикла Гартнера на Рис.3.8 предложено расположение различных технологий, имеющих отношение к ЭМ на кривой цикла.

Важно отметить, что кроме работы с циклами и трендами (в частности, показанными в Главе 2) важно отслеживать возможные технические события с низкой вероятностью, но масштабными эффектами, например появление материала с кардинально улучшенными характеристиками. Такие события могут вести к фундаментальным трансформациям поэтому их важно вовремя идентифицировать, оценивать и использовать.



Рис. 3.8. Кривая цикла Гартнера и некоторые технологии.

Пример 2. Планирование стратегических шагов. В компании, особенно небольшой, решения всегда будут приниматься с точки зрения устойчивости бизнеса. Будет доминировать стремление избегать резких изменений. На Рис. 3.9 показан полезный инструмент, иллюстрирующий рекомендации, основанные на опыте многих поколений промышленных предпринимателей. В показанном на Рис. 3.9 пространстве решений переход на одну клетку от текущего состояния – допустим, а на две – не рекомендуется (такие варианты помечены «X»). Самый простой вариант – расширение использования проверенной технологии в похожем применении – на похожем рынке (ход обозначается «1»), например переход с рынка насосов на рынок промышленных вентиляторов с той же самой системой электропривода. А вот попытка выйти с теми же машинами и электроникой на рынок импульсных систем для электрических самолетов – не рекомендуется. Также считается надежным шагом ход «2» - например, для компании занимающейся (имеющей в портфолио) АМ и

СМПМ, добавление в портфель продуктов СРМ будет адекватным шагом. Ход «3», комбинирующий в себе «1» и «2» - тоже допустим, но может быть несколько более сложен.

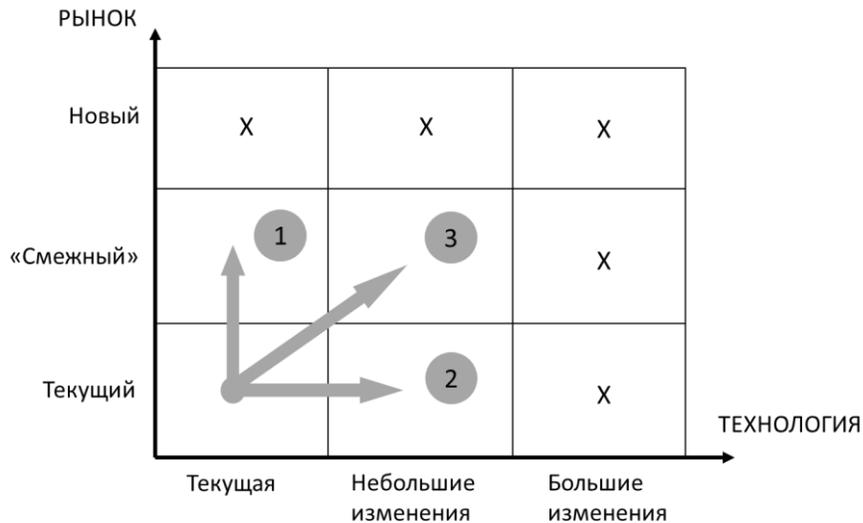


Рис. 3.9. Рекомендации для стартапов и небольших компаний.

Пример 3. Оценки рисков вложения ресурсов в некоторые технологии. Любая новая идея или технология будет проходить через оценку рисков, прежде чем предприятия производители вложат в разработку ресурсы. Это естественный процесс и к этому следует быть готовым тем, кто будет продвигать инновации. Покажем оценки рисков в контексте конкуренции компаний, сделавших ставку на разные типы машин - СМПМ и АДКЗР. Оценки рисков компаний на горизонте 5-10 лет будут даны субъективно и только в качестве иллюстрирующего примера. Экспертная оценка рисков дана в матрицах на Рис. 3.9, где правый верхний угол матрицы – область неприемлемого риска, левый нижний угол – область минимального риска, который можно игнорировать.

Начнем с производителя АД (Рис. 3.10,а). Можно предположить существование следующих рисков:

- «1» - появление более сильных причем не редкоземельных магнитов, с более низкой ценой, что может привести к приходу поставщиков СМПМ в традиционные применения АМ (*оценим вероятность в 21-40%, степень ущерба – средняя*),
- «2» - Повышение требований к энергоэффективности машин (принятие классов КПД IE5-6 как новых стандартов, запрет IE2) – потребует «перекройки» серий (*вероятность – 41-60%, степень ущерба – очень высокая*),
- «3» - Распространение синхронных реактивных машин (СРМ) в применениях с регулированием частоты вращения (*вероятность – 61-80%, степень ущерба – средняя*).

Для купирования последствий событий, соответствующим этим рискам, в любом случае, производителям АД, возможно, придется дополнительно инвестировать в маркетинговые усилия, чтобы подчеркнуть преимущества и применение асинхронных двигателей в конкретных контекстах.

Для производителя СМПМ (Рис. 3.10,б) можно предположить существование следующих рисков:

- «1» - Повышение цен на постоянные магниты в 5-10 раз - подобное уже происходило в 2011 году (вероятность – 61-80%, степень ущерба – очень высокая).
- «2» - Ограничение доступа к редкоземельным металлам по политическим причинам (вероятность – 0-20%, степень ущерба – критическая).
- «3» - Нарастание критики использования постоянных магнитов с экологических позиций, поскольку их производство связано с загрязнение окружающей среды (вероятность – 61-80%, степень ущерба – средняя).

Инструментом снижения риска может быть диверсификация портфеля продуктов, посредством включения в него машин, не использующих постоянные магниты. Другой путь – инвестиции в разработку не редкоземельных магнитов.

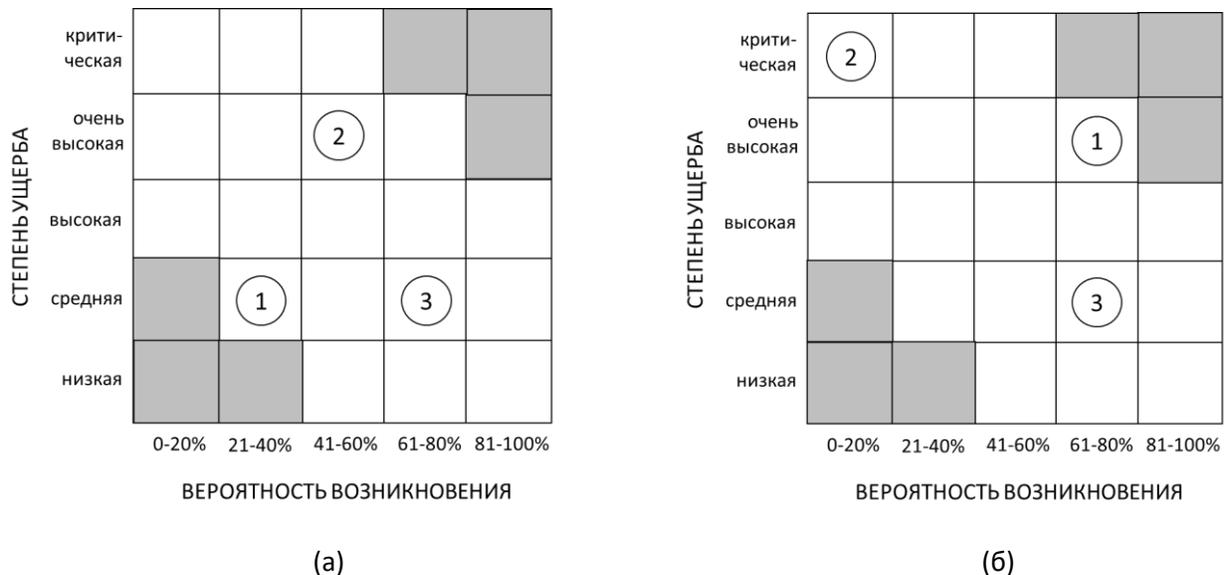


Рис. 3.10. Матрицы оценки рисков.

Пример 4. Выработка ценностного предложения. Непосредственными участниками информационного отбора являются сотрудники отделов маркетинга и продаж. Одной из их задач является формулировка «ценностных предложений» - той пользы или преимущества, которые новая улучшенная ЭМ может дать в конкретном применении. От квалификации продавца (здесь желательна инженерная подготовка) зачастую зависят перспективы новой разработки.

Для примера сформулируем предложение для применения ЭМ в дронах, для случая, когда новая ЭМ имеет более высокий по сравнению с конкурентами КПД и сниженную массу. Противоречия и

взаимная зависимость критериев выбора ЭМ для дрона рассмотрена в Главе 1. Опираясь на этот материал, кратко покажем, как может транслироваться ценностное предложение в ясной графической форме.

На Рис. 3.16 сплошными линиями показаны кривые, показывающие влияние размера батареи на время полета и грузоподъемность дрона. Даны три варианта аккумуляторных батарей: X, 1.5X и 2X, где X обозначает емкость или заряд батареи. Графики отражают тот факт, что чем меньше емкость и, соответственно, масса батареи, тем больше полезной нагрузки дрон может брать на борт, но при этом он, к сожалению, сможет провести в полете меньше времени.

При использовании ЭМ с более высоким КПД батарея медленнее разряжается и увеличивается время полета - соответствующий сдвиг кривой при внедрении новой ЭМ показан для случая с батареей 2X. Вариант ценностного предложения: «Наша технология позволяет дронам летать дальше» (Рис. 3.11,а). Если масса каждого двигателя ниже на Y грамм, а двигателей в дроне – 8, то освобождается 8Y грамм массы, которую можно заполнить, например, полезной нагрузкой. Вариант ценностного предложения: «Наша технология позволяет дронам перевозить более тяжелые грузы» (Рис. 3.11,б). Естественно, возможен и комбинированный вариант, и окончательное предложение может звучать следующим образом: «Наша технология позволяет дронам летать дальше и перевозить больше». Для дронов службы доставки внедрение новых ЭМ означает возможность покрыть большую географическую область и доставлять более крупные посылки.

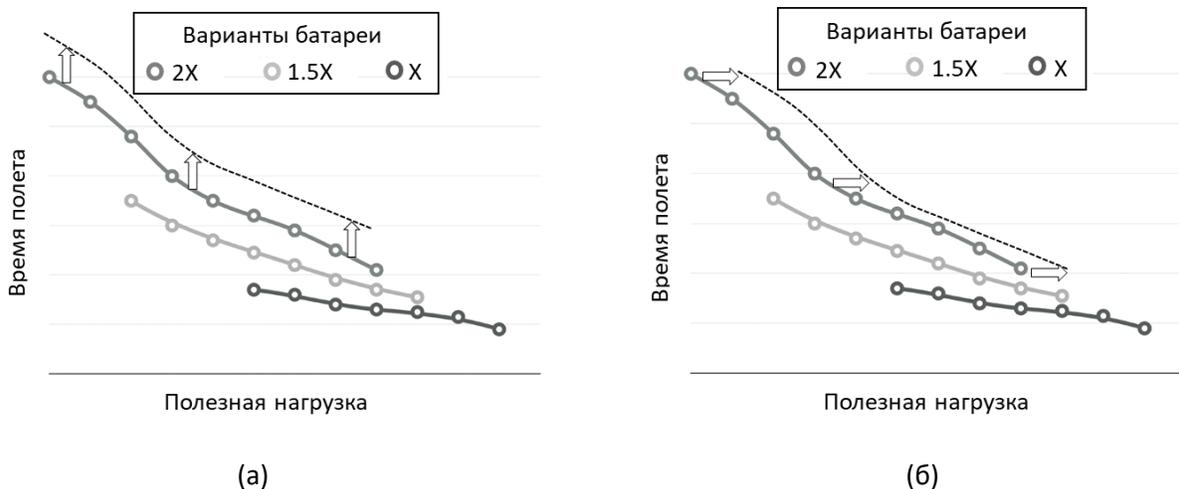


Рис. 3.11. Качественная графическая интерпретация ценностного предложения.

Итак, если позитивное решение о принятии инновационного предложения в работу принято, на следующем этапе будут важны, в частности, следующие вещи:

- Мультиплицирование вложенных ресурсов - если реализовать инновационное предложение, то желательно чтобы охват новой технологии был максимально широким

- При создании радикально новых решений важно выходить за рамки только своего продукта, технологии или решения
- Цена – важнейший критерий, в конце концов определяющий выживание продукта на рынке

История показывает, что инновации лучше реализуются в «правильной среде». Задача руководства, вместе со службой по персоналу - создать на предприятии культуру, поддерживающую новаторство во всех направлениях и на всех этапах. Такая культура включает в себя открытость к новым предложениям и терпимость к возможным неудачам. Должна быть настроена коммуникация между членами коллектива, включая все уровни иерархии. В целом должна иметь место установка на непрерывное совершенствование всех сфер деятельности предприятия.

Продолжая ряд практических примеров, покажем, какие отделы предприятия вовлечены и какие варианты сотрудничества внутри и вовне предприятия возможны.

Пример 5. Создание гибких технологических платформ. Новая концепция имеет больше шансов на принятие, если она имеет потенциал стать частью существующей технологической платформы или основой новой платформы. Технологическая платформа — это основа, которая предоставляет набор компонентов, инструментов (разработки и производства) и ноу-хау, на базе которых можно разрабатывать, развертывать и эксплуатировать определенные решения. Этот набор служит фундаментом, который упрощает и ускоряет разработку различных продуктов и систем в конкретной области применения. Платформу можно масштабировать, настраивать и конфигурировать в соответствии с конкретными требованиями. Может существовать экосистема разработчиков, партнеров, и интеграция их решений может расширить возможности платформы и ее охват.

Пример технологическая платформа на базе СМПП проиллюстрирован на Рис. 3.12. Основные элементы платформы:

- Роторы с постоянными магнитами поверхностного монтажа (+их удержание, защита)
- Сосредоточенная обмотка на зубцах статора
- Управление СМПП (включая бездатчиковое векторное)

На Рис. 3.12 показаны также примеры продуктов: турбогенератор, движитель, лебедка, генератор с мультипликатором, насос, для соответствующих областей применений: гибридные самолеты, морские суда, возобновляемая энергетика, нефтегазовая отрасль.

В рамках своей платформы отдел разработки должен быть способен управлять КПК машин. В качестве примера рассмотрим варианты изменения параметров генератора (СГПП) для ВЭУ при варьирования аксиальной длины и радиальной толщины активных частей. Генератор имеет следующие заданные характеристики: номинальная мощность 4.3 МВт, напряжение 690 В, частота вращения 15 об/мин, номинальный момент 2738 кНм, внешний диаметр активных частей 5.85 м. Варианты представлены в Таблице 3.2. Основные характеристики пяти вариантов сравниваются на Рис.3.13, при этом характеристики нормализованы таким образом, чтобы более приемлемые значения характеристик расположены ближе к центру диаграммы. Можно видеть, что ни один из вариантов в данном примере не является лучшим по всем пяти выбранным характеристикам. В зависимости от системных требований приведенные варианты будут оценены как «более» или

«менее» удачные. Для гибкости в рамках своей технологической платформы важно иметь развитый САПР.

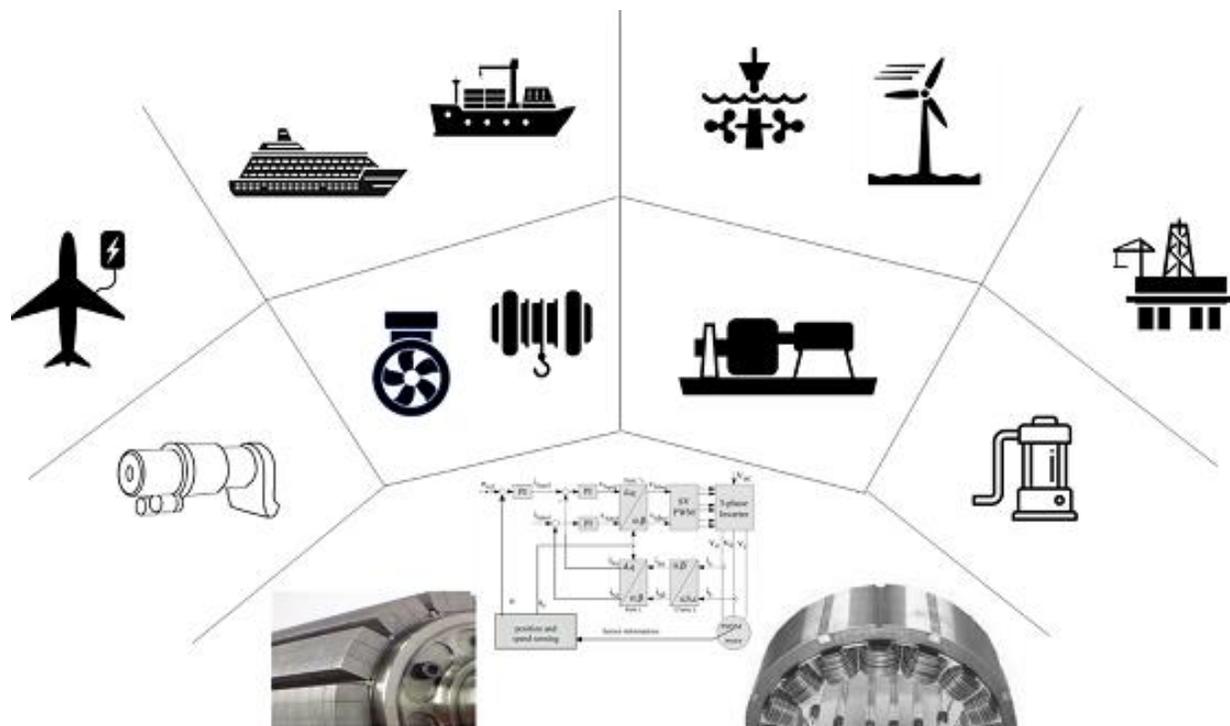


Рис. 3.12. Технологическая платформа и применения.

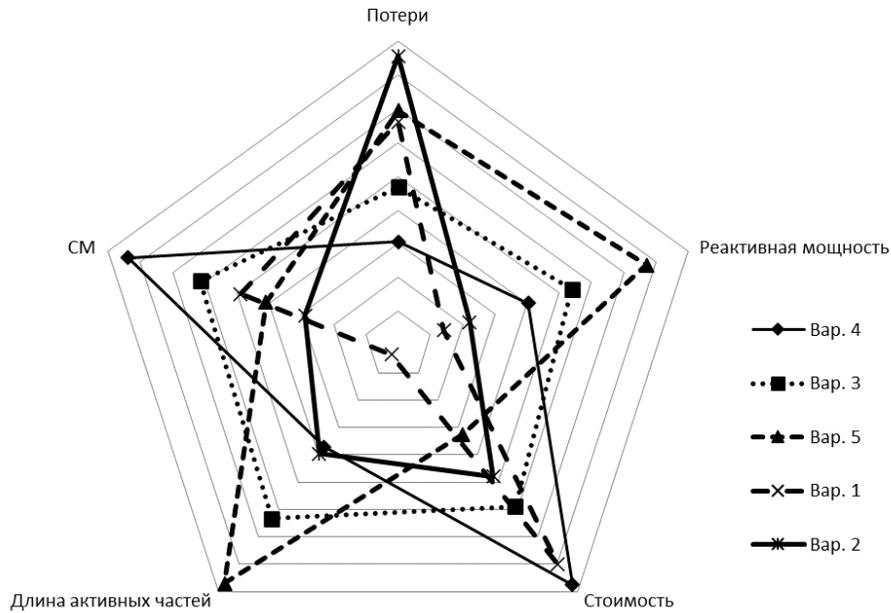


Рис. 3.13. Нормализованные характеристики (по максимальному значению параметров).

Таблица 3.2. Расчетные варианты СГПМ для ВЭУ.

	Вар. 1	Вар. 2	Вар. 3	Вар. 4	Вар. 5
Внутренний диаметр активных частей, м	5.57	5.57	5.39	5.39	5.39
Длина активных частей, м	1.64	1.35	1.16	1.37	0.97
масса железа статора, т	8.7	7.1	13.3	15.7	11.2
масса железа ротора, т	5.3	4.4	6.5	7.7	5.5
масса постоянных магнитов, т	7.5	6.2	4.2	5.0	3.5
масса обмотки, т	5.3	4.5	5.7	6.5	4.9
Масса всех активных частей, т	27.4	22.7	30.3	35.6	25.6
стоимость железа статора, тыс. у.е.	104.0	85.7	160.1	188.9	134.2
стоимость железа ротора, тыс. у.е.	63.9	52.7	78.1	92.1	65.4
стоимость постоянных магнитов, тыс. у.е.	301.3	248.4	168.6	198.2	140.7
стоимость обмотки, тыс. у.е.	48.1	40.5	51.0	58.6	44.1
Стоимость активных частей, тыс. у.е.	517.3	427.2	457.8	537.7	384.3
КПД, %	95.3	94.7	95.9	96.4	95.2
Потери, кВт	202	228	176	155	206
Cosφ	0.94	0.91	0.81	0.85	0.75
Реактивная мощность, кВА	284	430	1014	764	1439
Машинная постоянная C_M^{18}	200	165	221	260	186

¹⁸ Рассчитанная по массе активных частей.

Пример 6. Сотрудничество с заказчиком для достижения прорывных результатов. Тесное сотрудничество с заказчиком, или даже совместная разработка, может с большой вероятностью приводить к прорывным результатам. Наиболее часто это происходит в проектах, подразумевающих интеграцию ЭМ в какой-нибудь механизм или агрегат. Например, на Рис. 3.14 показано, что переход от АД к СДПМ в насосе для нефтедобычи, установленном на морском дне на большой глубине, может привести к значительному улучшению характеристик насоса. Чтобы выдержать давление в несколько сотен атмосфер, полость двигателя насоса заполнена специальной, так называемой «барьерной» жидкостью. Достижимая максимальная частота вращения и мощность двигателя ограничиваются потерями P_l на трение в барьерной жидкости. P_l зависит от частоты вращения n , радиуса ротора R , аксиальной длины ротора L по следующей формуле: $P_l \equiv n^3 R^4 L$. Снижение длины и радиуса при переходе от АД к СДПМ на 20% (Рис. 3.14) - грубая оценка, дающаяся только в качестве иллюстрации принципа. Снижение такого порядка может радикально повысить возможную частоту вращения и мощность насоса. Без адаптации всего насосного агрегата и даже всей системы питания и управления двигателем насоса данная инновация невозможна. В данном конкретном примере успех применения СДПМ будет, в частности, зависеть от возможности запуска и управления ЭМ через длинный кабель.

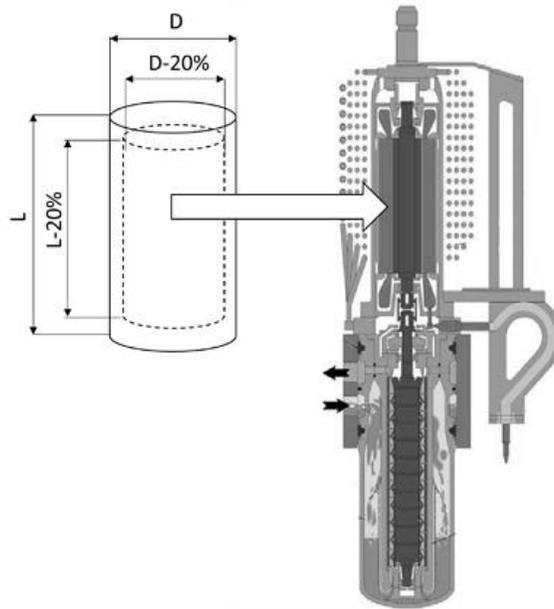


Рис. 3.14. Иллюстрация влияния типа ЭМ на размер ротора.

Пример 7. Анализ мер и затрат необходимых для выхода на требуемый объем производства и конкурентную цену продукта. Это совместная работа отдела снабжения, производственного отдела и разработчиков. В главе 1 были даны ценовые модели для ЭМ-продуктов, присутствующих на рынке. К такому состоянию – длинный путь. Рассмотрим в качестве примера многоступенчатый процесс прихода к окончательной цене для многополюсной СМПМ мощностью 1 кВт, которая может использоваться в бытовой технике, малых транспортных средствах или летательных аппаратах. Машина питается высокой частотой, и поэтому в машине использована шихтовка статора тонкими листами. Корпус машины – алюминиевый с ребрами охлаждения. Ротор – с магнитами NdFeB.

На Рис. 3.14 показаны элементы финансовой стороны проекта разработки и производства данной ЭМ. Цель проекта – выход на массовое производство в течение 2 лет. Показано как формируется цена конечного продукта в зависимости от планируемого объема производства. На каждом шаге планируется увеличение объема производства в 10 раз. В данном примере инвестиции производятся в несколько этапов и достигают 15 миллионов у.е. При этом есть два направления инвестиций: в ОКР и в производственную инфраструктуру (роботизированную линию). В нашем примере инвестиции в ОКР производятся в пять этапов:

1. для серии прототипов 10 шт. - 1 млн у.е.,
2. для пробной серии 100 шт. - 2 млн у.е.,
3. для серии 1000 шт. - 1.5 млн у.е.,
4. «доводка» для серии 10 тысяч шт. - 0.2 млн у.е.,
5. «доводка» для серии 100 тысяч шт. 0.2 млн у.е.

Инвестиции в создание роботизированной производственной линии производятся в три этапа:

1. для пробной серии 100 шт. – 2.5 млн у.е.,
2. для серии 1000 шт. - 4 млн у.е.,
3. «доводка» для серии 10 тысяч шт. - 4 млн у.е.

Как мы видим, при увеличении объема производства меняется очень многое. В частности:

- Радикально меняются затраты и цена продукта – в 30 раз!
- Сильно меняется пропорция ручного труда.
- Меняется тройка самых дорогих материалов и пропорции вклада этих материалов в цену продукта.

При сравнении своей разработки с конкурирующей машиной по цене, надо понимать и знать, на каком уровне становления на пути к массовому производству, находится машина, с которой мы сравниваем. Проектировать ЭМ всегда следует не только с позиций оптимизации активных материалов, но и под конкретную технологию производства (Рис.3.15). Отметим, что в случае микромашин, в современных условиях нет смысла проектировать машину и производство под ручные операции, только под автоматизированное производство.

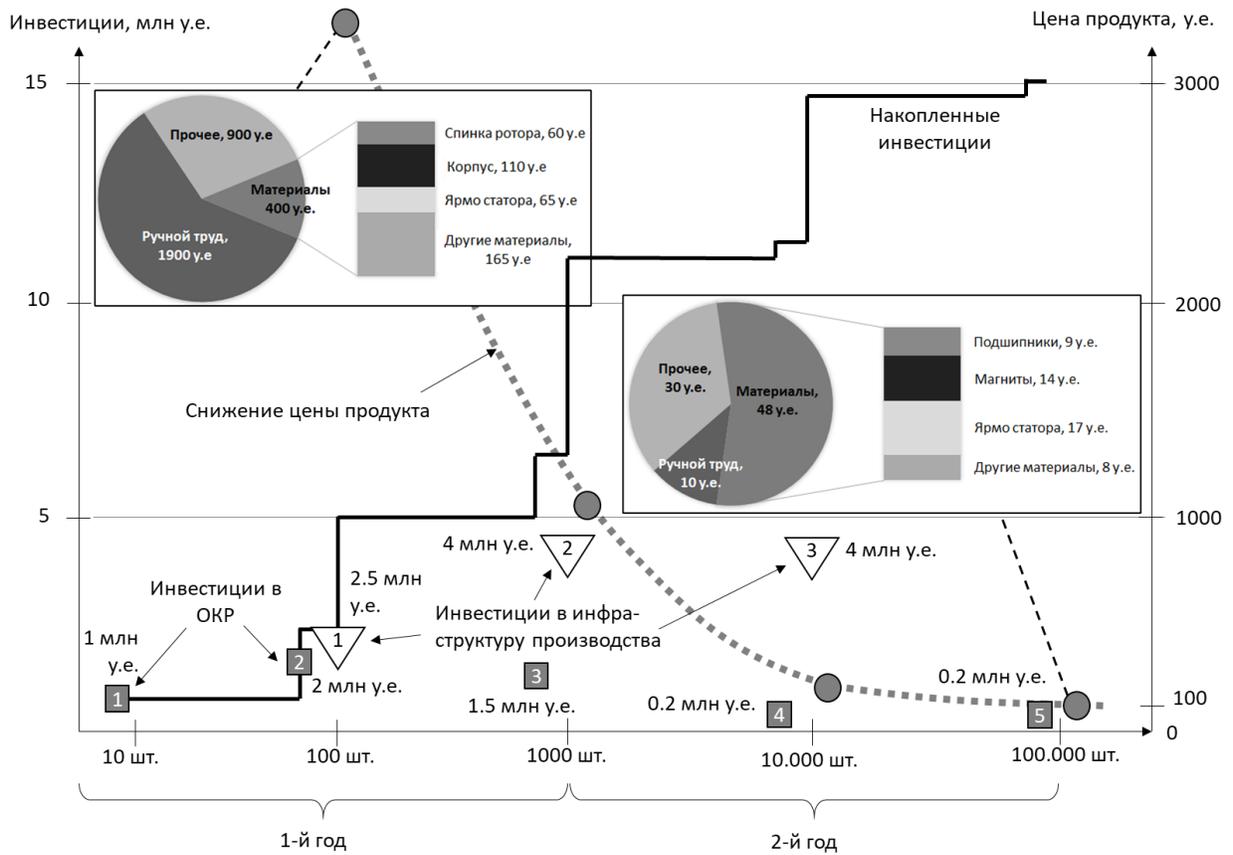


Рис. 3.14. Инвестиции и снижение цены продукта.

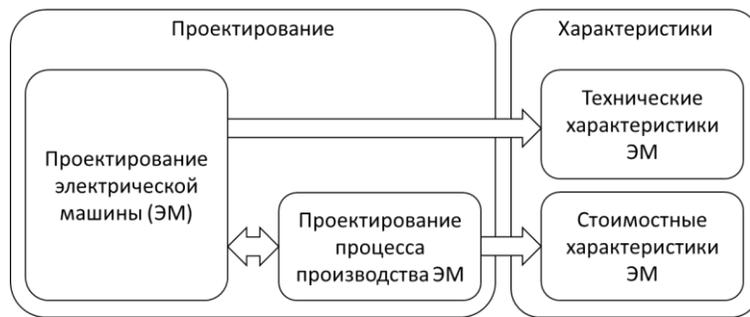


Рис. 3.15. Ориентиры проектирования.

Влияние изобретателей и их изобретений

В техническом контексте в большинстве случаев именно работа изобретателей является отправными точками всех инноваций и дает толчки эволюционным изменениям. В наши дни ЭМ продолжают развиваться в основном за счет непрекращающегося потока небольших усовершенствований, хотя крупные изобретения, пожалуй, тоже еще возможны. Оглядываясь назад, можно сказать, что главный в истории ЭМ прорыв, с точки зрения изобретения и внедрения ключевых решений, используемых до сих пор, состоялся в конце XIX века. В XX веке также можно отметить ряд важных изобретений. Рассмотрим некоторые исторические примеры с точки зрения «паттернов» появления изобретений и их жизненных циклов.

Асинхронные машины с фазным ротором и короткозамкнутым ротором

Первый многофазный двигатель, который по принципу действия можно назвать асинхронным, был предложен Вальтером Бэйли (Walter Baily) в 1879 году. Бэйли использовал неподвижный электромагнит с четырьмя полюсами, переключение токов в которых создавало движущееся магнитное поле в медном диске, расположенном под полюсами. Это приводило к возникновению в диске вихревых токов, которые, взаимодействуя с магнитным полем полюсов, приводили диск во вращение в направлении движения поля. По сути, это был асинхронный двигатель с массивным ротором (в современной терминологии).

В 1885 году Галилео Феррарис (Galileo Ferraris) продемонстрировал асинхронный двигатель, в котором также использовались две пары электромагнитов для создания вращающегося магнитного поля (он сделал это независимо от Бэйли). Двигатель Феррариса больше походил на современные, поскольку электромагниты окружали цилиндрический ротор, а не дисковый как у Бэйли. Однако, что более важно, Феррарис предложил создать вращающееся магнитное поле, подавая два синусоидальных переменных тока со сдвигом по фазе 90° друг относительно друга.

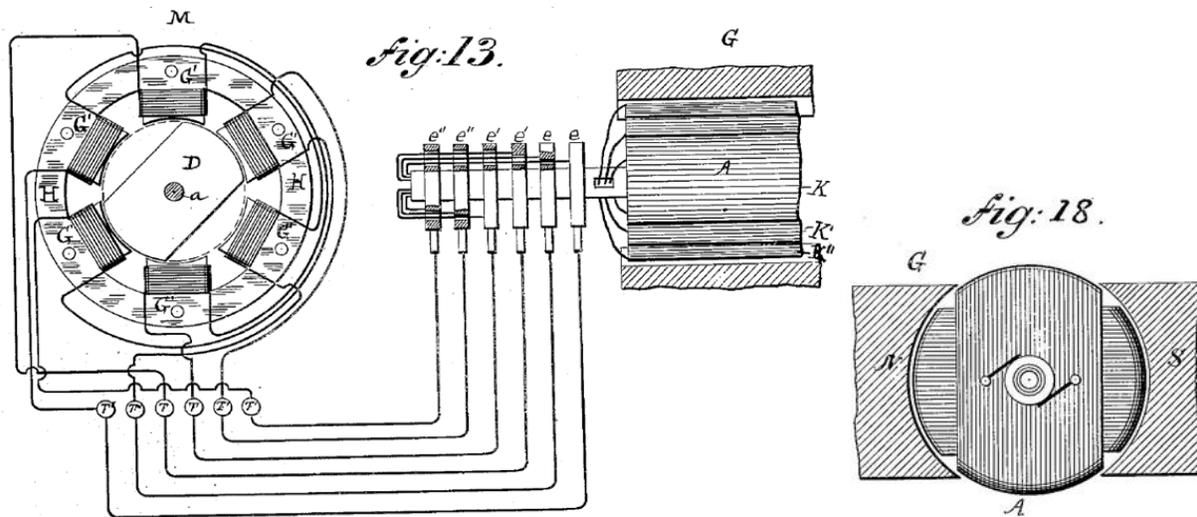


Рис. 3.17. Иллюстрации из US381968.

В том же году Никола Тесла демонстрирует двигатель очень близкой конструкции. Два годами позже (12.10.1887) Тесла также подает патентную заявку «Электромагнитный двигатель» («Electromagnetic motor») и получает по ней патент US381968 (01.05.1888). Решение, предложенное в данном патенте (Рис. 3.17) – представляет собой многофазный АД с контактными кольцами. Это решение стало одним из прообразов асинхронного двигателя с фазным ротором (АДФР).

Через полтора года после патента Теслы, М.О. Доливо-Добровольский патентует концепцию короткозамкнутого ротора - беличью клетку со стержнями и замыкающими кольцами (заявка СН1532А, 26.10.1889). Беличья клетка из патента показана на Рис. 3.18 – она практически не отличима от современного варианта. Конструкция ротора Доливо-Добровольского оказалась наилучшим решением и используется до сих пор в АДКЗ. Еще через год (в 1890-м) Доливо-Добровольский патентует еще и концепцию асинхронного двигателя с фазным ротором (АДФР), наиболее близкой к форме, в который этот тип ЭМ используется до сих пор.

С учетом вышесказанного можно заключить, что славу изобретения современных вариантов АД можно разделить между Бейли, Феррарисом, Теслой и Доливо-Добровольским. Создание АД (в вариантах, близких к современным) – огромный прорыв, но, как мы видим, авторство принадлежит нескольким изобретателям и процесс создания растянут во времени. Если рассматривать эксперименты Араго (1824) как отправную точку, то можно представить основные вехи, как показано на Рис. 3.19.

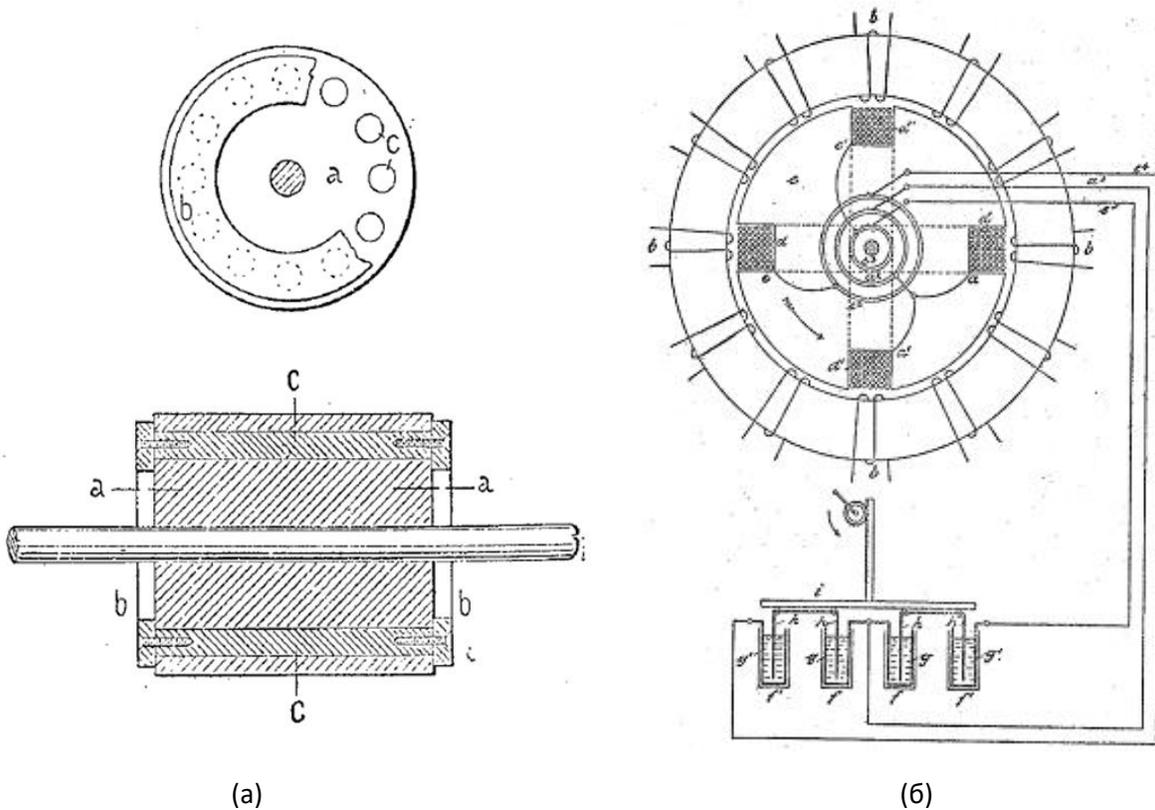


Рис. 3.18. Иллюстрация из патентов СН1532А (а) и 3062 (б).

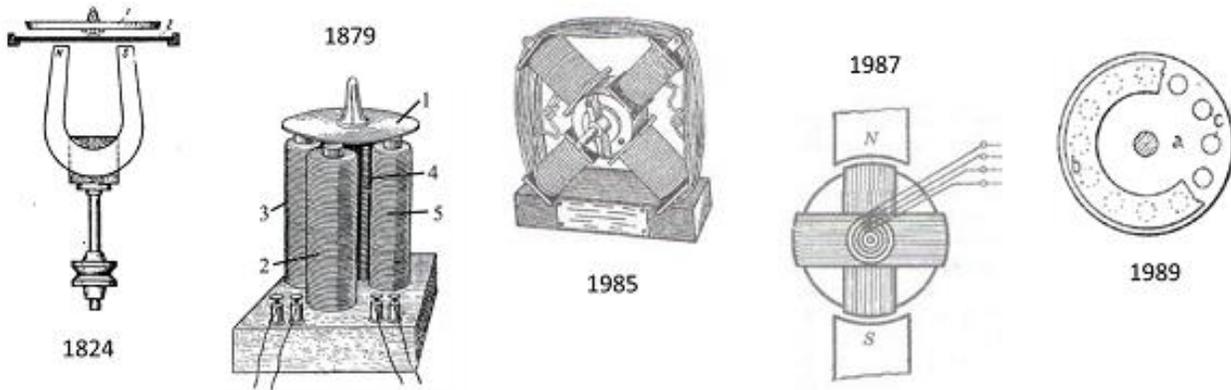


Рис. 3.19. Эволюция концепции АД.

3-фазный трансформатор

Кроме изобретения «беличей клетки» и АД с фазным ротором Доливо-Добровольский известен работой по продвижению концепции 3-фазной сети и демонстрации ее преимущества на практике, а также изобретением 3-фазного трансформатора (1892, заявка СА39585А, Рис. 3.20). Мало кто в истории электротехники может похвастаться такими крупными изобретениями. Эти изобретения, наряду с трехфазным генератором стали основными элементами 3-фазной системы генерации и потребления энергии, являющейся основным решением уже более 130 лет.

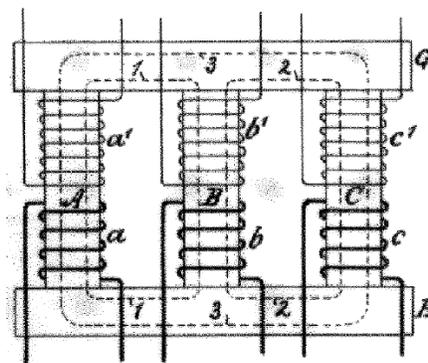


Рис. 3.20. Иллюстрация из СА39585А.

В XX веке также можно найти интересные изобретения. Рассмотрим некоторые из них.

Двигатель с катящимся (и волновым) ротором (Рис. 3.21) был изобретен А.И. Москвитиним (патентная заявка «Тихоходный электродвигатель», SU68211A1, 15.12.1944). Во второй половине XX века двигатели с катящимся ротором (ДКР) находят «нишевые» применения в некоторых производственных механизмах, таких как дозаторы, часовые механизмы, манипуляторы, системы телеметрического управления, станки для намотки реохордов и проволочных потенциометров, дуговые нагревательные печи. Серийно двигатели с катящимся ротором в широком ассортименте

выпускались во Франции, Англии, Японии, СССР и США. В настоящее время такие двигатели практически не используются¹⁹. Пример с ДКР показывает, что продолжительность жизни различных внедренных изобретений может быть конечной. В частности, ДКР оказались актуальны в течение 30...50 лет.

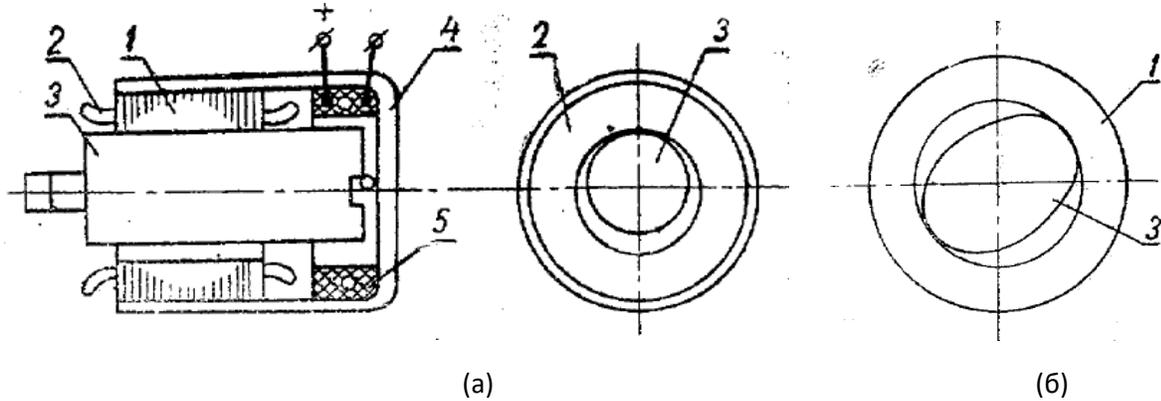


Рис. 3.21. Иллюстрации из SU68211A1: двигатели с катящимся (а) и волновым (б) ротором.

Шаговые двигатели (ШД)

Первый двигатель, который можно определить как «шаговый», появился в 1830-х годах и представлял собой электромагнит, приводящий в движение храповое колесо. Сложно с уверенностью сказать, кто предложил версию, наиболее близкую к современному ШД, но часто приводится имя Франка Вуда (Frank W. Wood), который в 1918 году подал патентную заявку US1408555A на изобретение «Способ производства пошаговых движений» («Art of producing step-by-step movements»). В заявке описан ШД с пятью катушками на статоре (Рис. 3.22). Управляя полярностью катушек статора, можно было создать ступенчатое движение. Также можно было изменять направление вращения. Примечательно что Вуд в своей патентной заявке цитирует собственное более раннее (1914 года) изобретение US1100860A «Электрическая система индикации» («Electric indicator system»), описывающую похожую систему. Практическое применение ШД началось на военных кораблях в 1920-х годах. Современные конструкции ШД были разработаны в 1950-х годах, стали популярными в следующем десятилетии и активно используются до сих пор. Вероятно будет преувеличением сказать, что Ф. Вуд изобрел ШД, но точно можно заключить, что Вуд внес важный вклад в развитие этого типа машин.

Электромашинные системы

Сельсины известны с начала XX века. В 1930-40-х годах А.Г. Иосифьян и Д.В. Свечарник в серии изобретений SU57094, SU56433A2, GB527976A предложили несколько вариантов бесконтактного сельсина (один из вариантов – на Рис. 3.23). Бесконтактные сельсины производятся до сих пор. Таким образом, можно сказать, что Иосифьян и Свечарник, хотя и не являются изобретателями сельсина как концепции, но предложили удачные широко используемые варианты бесконтактного сельсина.

¹⁹ По крайней мере информацию о выпускаемых сериях в отличие от других типов, найти сложно.

Еще один тип электромашинных систем - *Электромашинный усилитель (ЭМУ)*. ЭМУ изобретен в 1940 году Эрнстом Александерсоном (Ernst Alexanderson) и использовались почти до конца XX века, прежде чем на смену им пришли электронные системы, т.е. время использования этого изобретения оказалось порядка полувека.

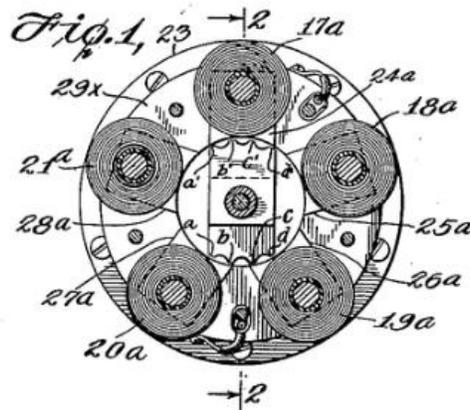


Рис. 3.22. Иллюстрация из US1408555A.

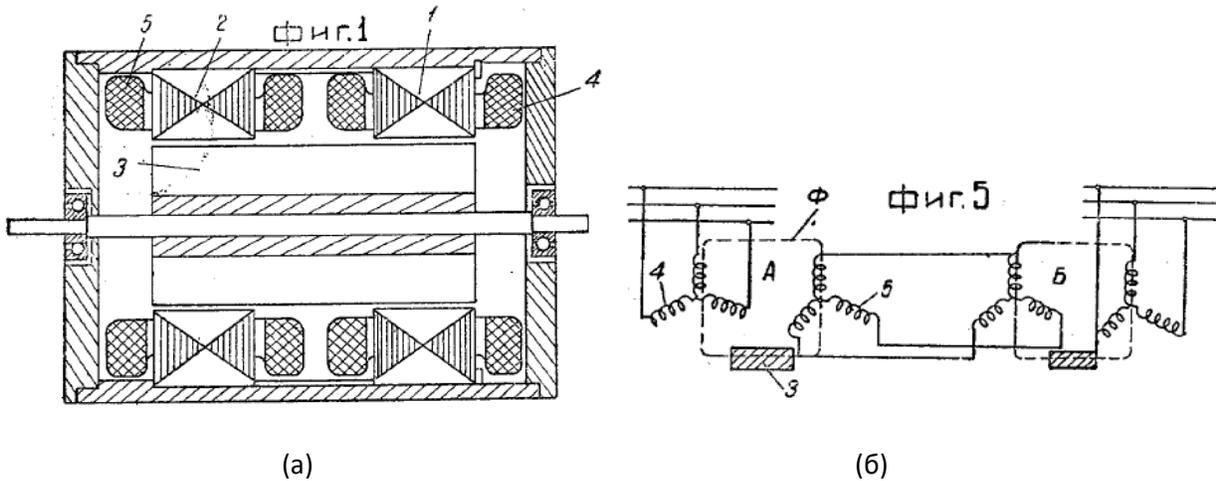


Рис. 3.23. Иллюстрация из описания изобретения №57094.

Магнитная сборка Хальбаха

Магнитная сборка Хальбаха (Рис. 3.24) — особая конфигурация постоянных магнитов, характеризующаяся тем, что магнитное поле с одной из её сторон практически полностью отсутствует благодаря особому расположению элементов сборки. Принцип был впервые предложен Джеймсом Вيني (James M. Winey) в 1970 году для идеального случая непрерывно вращающейся намагниченности, индуцированной односторонней катушкой в форме полоски

(патентная заявка US3674946A «Электромагнитный преобразователь» («Electromagnetic transducer»)). Эффект был также использован Джоном Маллинсоном (John C. Mallinson) в 1973 году при работе над улучшением свойств и качества записи на магнитную ленту. В 1980-х годах Клаус Хальбах (Klaus Halbach) разработал на основе данного эффекта магнитную сборку, предназначенную для мощного излучения пучком электронов в ускорителе. По имени последнего сборка и получила свое название. В ЭМ сборку Хальбаха начали применять с начала 1990-х годов. Она популярна до сих пор, особенно в машинах с высокими удельными мощностью и моментом, в частности в бессердечниковых СМПП.

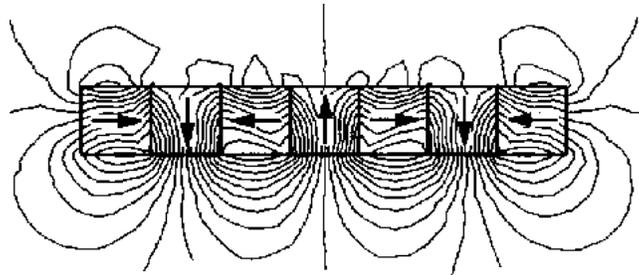


Рис. 3.24. Магнитное поле магнитной сборки Хальбаха.

Магнитные редукторы (МР) и «псевдо-прямой привод»

Возможно, первый электромагнитный редуктор был предложен А. Нойландом (A. Neuland) более 100 лет назад в 1916 году, в патентной заявке US1171351 «Аппарат для передачи энергии» («Apparatus for transmitting power»). В этом решении (Рис. 3.25) постоянные магниты не использовались.

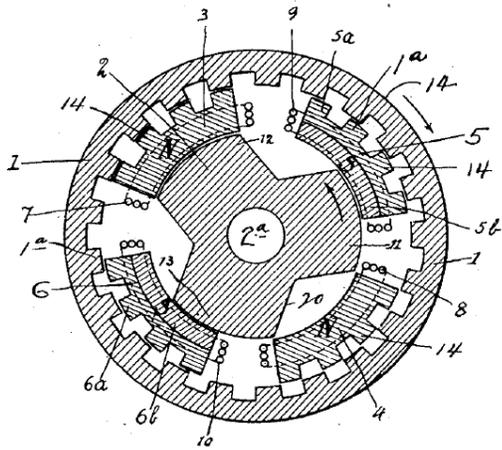


Рис. 3.25. Иллюстрация из US1171351.

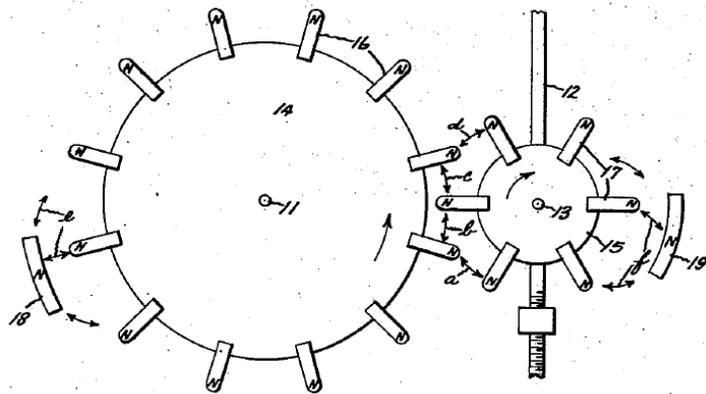


Рис. 3.26. Иллюстрация из US2243555.

В 1941 году Х. Фаус (H.Faus) предложил в патенте US2243555 («Magnet gearing») конструкцию редуктора, напоминающую по структуре обычный механический редуктор, но в котором зубцы

заменены постоянными магнитами. В 1972 году Н. Лианг (N. Laing) в патенте US3645650 (“Magnetic transmission”) вернулся к решению с соосными частями (Рис. 3.26), как у Нойланда, но с постоянными магнитами (Рис. 3.27).

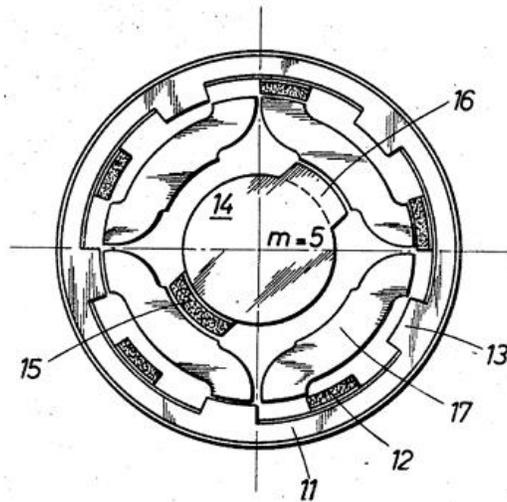


Рис. 3.27. Иллюстрация из US3645650.

В 1997 году Б. Акерман (B. Ackermann) в заявке US5633555A (“Magnetic drive arrangement comprising a plurality of magnetically cooperating parts which are movable relative to one another”) сделал следующий шаг, усовершенствовав зубцовые и магнитные структуры МР (Рис. 3.28).

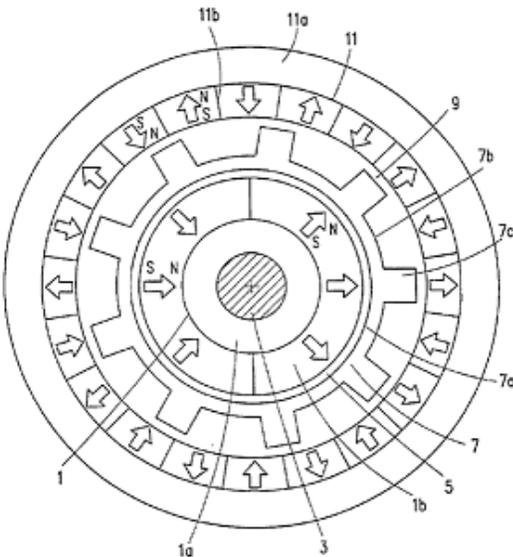


Рис. 3.28. Иллюстрация из US5633555A.

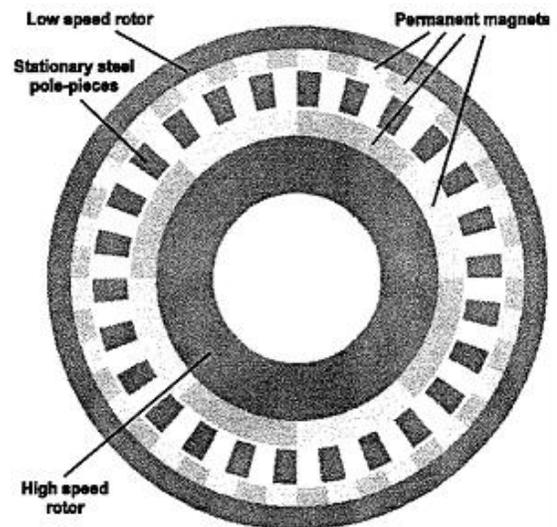


Рис. 3.29. Иллюстрация из [3.3].

Наконец, в 2001 году К. Аталла (K. Atallah) и Д. Хоу (D. Howe) в статье [3.3] описали версию МР (Рис. 3.29), которая по своим характеристикам оказалась конкурентоспособной на практике. К настоящему времени патенты по МР появляются уже в течение многих десятилетий. На Рис. 3.30 показаны основные вехи развития этих систем. Пожалуй, ни один изобретатель не может быть признан единственным создателем современного МР. Вместе с тем можно заключить, что переход к практически применимым версиям произошел на стыке XX и XXI века благодаря работам Акермана, Аталлы и Хоу.

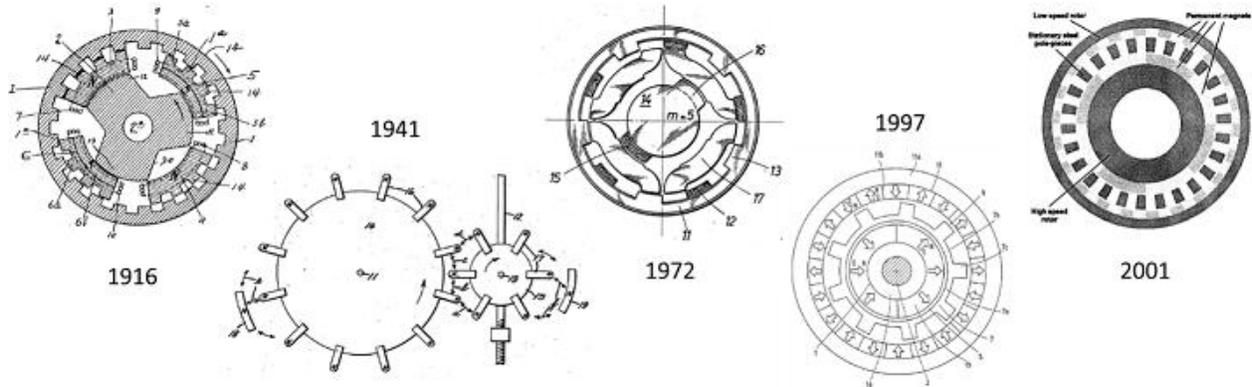


Рис. 3.30. Эволюция концепции МР.

В 2006 году вышеупомянутый К. Аталла совместно с Дж. Ренсом (J. Rens) в патентной заявке GB2437568A «Электрическая машина, имеющая элементы, взаимодействующие в магнитном зацеплении» (“Electric machine having elements interacting in a magnetically geared manner”) предложил машину со встроенным МР, которая получила название «Псевдо-прямой Привод» («Pseudo-direct drive»).

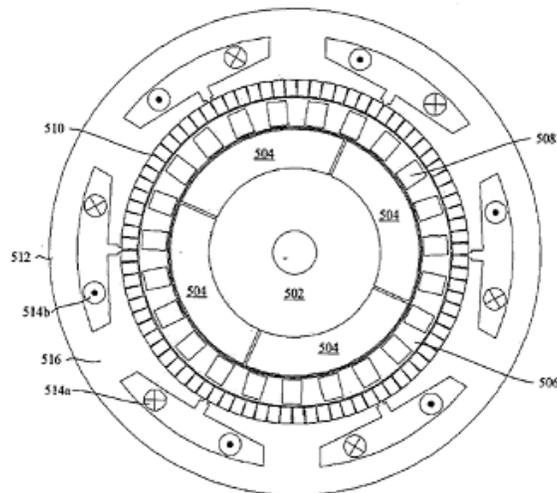


Рис. 3.31. Иллюстрация из GB2437568A.

Примечательно, что еще в 1968 году Ф.М. Юферов в патенте GB1196213 «Тихоходный синхронный электродвигатель» («Low-speed synchronous electric motor») предложил машину с

электромагнитной редукцией имеющую немало общих черт с ППП (Рис. 3.32), что еще раз подтверждает неоднозначность авторства технологических прорывов.

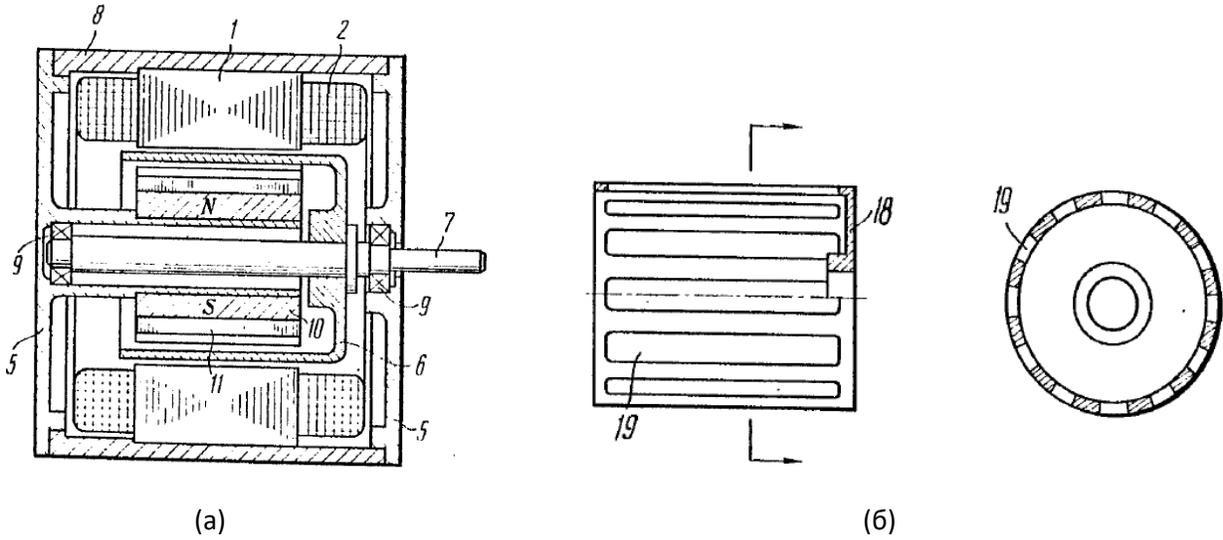


Рис. 3.32. Иллюстрация из GB1196213.

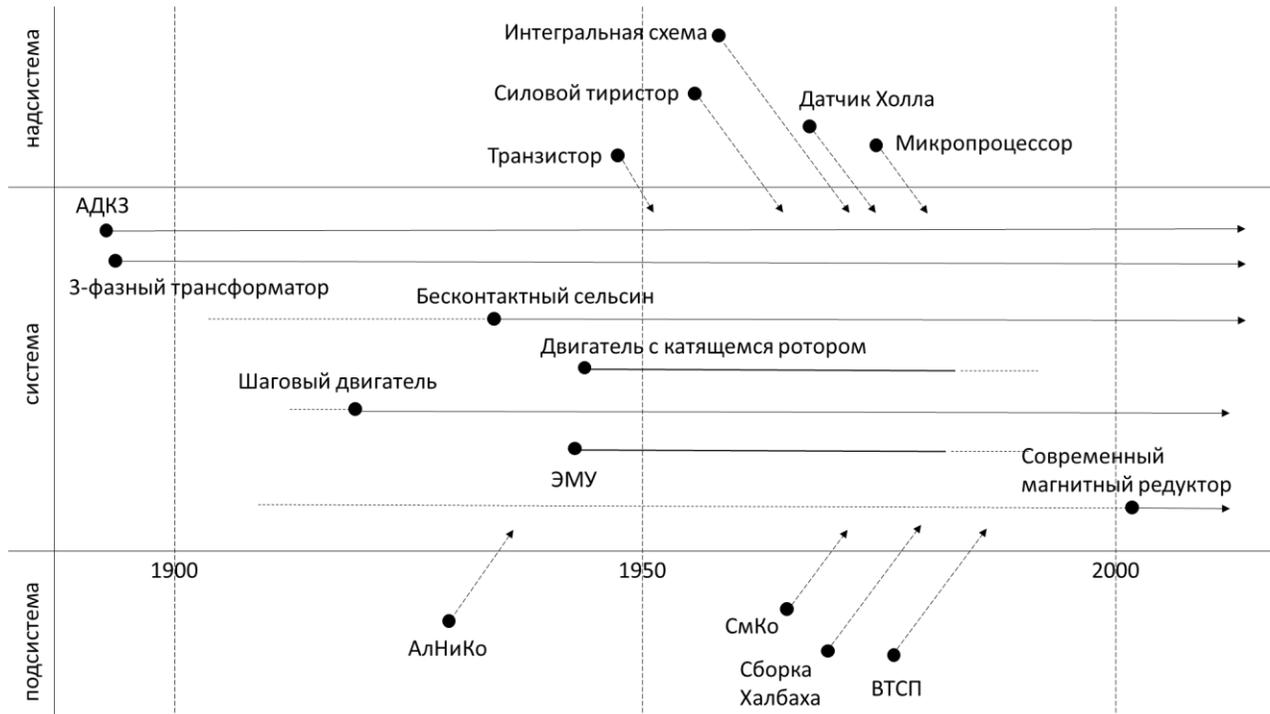


Рис. 3.33. Жизненные линии некоторых изобретений в контексте надсистем и подсистем.

Жизненные линии некоторых изобретений из области ЭМ и некоторые эволюционные изменения на уровнях надсистем и подсистем показаны на Рис. 3.33. Со стороны надсистем влияние оказывают различные устройства, имеющие отношение к электронным преобразователям для управления ЭМ (силовые ключи, ИС и микропроцессоры). Со стороны подсистем - постоянные магниты, сверхпроводящие материалы.

На примерах АМ и МР мы видим тот же самый паттерн: в какой-то момент на в принципе известном материале идет серия сильных изобретений. Как мы видели из примера с АД, эффект Араго был известен с 1824 года, но только в 1879-1889 годах произошел прорыв. Также и с МР – попытки предпринимались с 1916 года, но к практически полезным вариантам пришли только в 1997-2001 годах. Можно заключить, что умение выдающихся инноваторов в области ЭМ в том, чтобы увидеть в уже известной концепции недостатки, найти неожиданный путь их устранения и превратить ее из просто интересной идеи в «рабочий» вариант.

Далеко не все интересные и изначально многообещающие идеи проходят проверку временем. Можно привести пару исторических примеров многообещающих решений, не состоявшихся как инновации:

Первый пример – высоковольтные генераторы. В 70-е годы в СССР был разработан и создан гидрогенератор нового типа на напряжение 121 кВ, присоединяемый к линии электропередачи 110 кВ непосредственно без повышающего трансформатора. Для обмоток статора была применена бумажно-масляная изоляция кабельного типа. Гидрогенератор имел мощность 14,5 МВт и был установлен на Сходненской ГЭС в черте Москвы. Он успешно прошел испытания при подключении к сети Мосэнерго, доказав возможность создания гидрогенераторов на принципиально более высокие напряжения. В 90-е годы в Швеции были созданы гидрогенераторы и турбогенераторы с кабельной обмоткой типа «Power-former». На различные аспекты конструкций были получены десятки патентов. Гидрогенератор напряжением 45 кВ, мощностью 11 МВА, частотой вращения 600 об/мин так же как и советский генератор подключался к линии электропередач без использования повышающего трансформатора. Для обмотки статора применялась изоляция из «сшитого полиэтилена». Второй гидрогенератор напряжением 155 кВ, мощностью 75 МВА, частотой вращения 125 об/мин включен в мае 2001 г. Турбогенератор напряжением 136 кВ, мощностью 42 МВА, частотой вращения 3000 об/мин был включен в сеть в декабре 2000 г [3.2]. Несмотря на то, что данные машины были успешно продемонстрированы на практике, дальнейшего распространения они не получили.

Второй пример - бессердечниковые генераторы (с двумя роторами с магнитами и одним бессердечниковым статором) большого диаметра для ВЭУ. Машина одного из этих проектов показана на Рис.2.19. Несколько компаний, работающих над подобными решениями в 2010-х годах, прекратили существование, проекты были закрыты.

«Серийные» изобретатели

Выше в качестве примеров больших изобретений были представлены несколько патентов Теслы и Доливо-Добровольского. У каждого из этих двух выдающихся электротехников - десятки патентов на изобретения, но запоминаются и остаются в истории самые крупные, что естественно.

В настоящее время (начало 2020-х) в Мире, по данным базы Espacenet [3.5], в год подается около 40 тысяч патентных заявок, на изобретения, связанные с ЭМ. Это говорит о том, что потенциал для новых изобретений в электромеханике неисчерпаем несмотря на более чем двухсотлетний возраст этой науки. В истории изобретательства достаточно много «серийных» изобретателей, имеющих сотни, а в некоторых случаях даже тысячи патентов, хотя и не в области электромеханики. Многие из них активны и в настоящее время. Например, наши современники Shunpei Yamazaki и Kia Silverbrook имеют по несколько тысяч патентов²⁰! Особенности личных качеств и методов работы «серийных» изобретателей были изучены посредством ряда интервью. Обычно серийные изобретатели характеризуются следующим набором качеств: устойчивость к критике, энергичность, неудовлетворенность статусом-кво, любопытство, желание принимать и адаптировать все новое, нетрадиционное.

Были также выявлены следующие интересные моменты:

- Умения и навыки «серийных» изобретателей:
 - Умение синтезировать новые концепции, умение думать и «видеть» «поверх барьеров» различных областей техники и научных дисциплин
 - Умение комбинировать различные объекты в уме, визуализировать в воображении
 - Изучение патентов в «своей» области и «смежных» областях
 - Выработка представлений о том, что может быть достаточно новым, чтобы быть запатентованным
 - Приобретение навыков из смежных областей
- Их принципы:
 - Упрямство в достижении цели – не бросать задачу несмотря на ряд неудач
 - Не перекладывать задачу на других, пытаться найти решение самому
 - Не признавать, что есть непреодолимые препятствия
 - Понимать, что сотрудничество с коллегами абсолютно необходимо
- Их источники идей:
 - Выбор больших целей и попытки их достичь
 - Поиск проблем, которым требуется решение
 - Сотрудничество с другими людьми для нахождения проблем и генерации идей

У выдающихся изобретателей стоит учиться, как в планах личного развития, так и в целом в эволюции электромеханики и ЭМ, как и в других областях техники следует делать ставку именно на серийное изобретательство.

Экономический эффект изобретений и инноваций

Интересно было бы количественно определить поток инноваций и его динамику в области ЭМ в последние годы, но, к сожалению, подобных данных автору обнаружить не удалось и в данной работе дается только приблизительная оценка по косвенным признакам. Обратимся к смежной отрасли - автомобилестроению. В современном автомобиле десятки ЭМ, таким образом, автомобилестроение является смежной отраслью для электромашиностроения. В [3.6] показано,

²⁰ Здесь, пожалуй, можно предположить, что работают они не в одиночку.

что в таких компаниях как Opel и Volkswagen в начале 2000-х годов количество инновационных предложений в год составляло порядка 100 тысяч. Уровень предложений сильно варьировался – от небольших усовершенствований, до изобретений, принесших большой экономический эффект. Средний экономический эффект от предложения составлял около 1000 евро. Эффективность так называемых «выдающихся» инноваций определялась не ниже 400 тысяч евро. Интересно, что «выдающиеся» инновации приносили 15% от всего экономического эффекта, а 85% - массовые, т. е. значение небольших усовершенствований не стоит недооценивать. В эти же годы Opel и VW подавали по несколько сотен патентных заявок в год, т. е. менее одной заявки на 100 инновационных предложений. Вероятно, подобное соотношение (1:100) между количеством поданных идей и количеством патентных заявок имеет место и в электромашиностроении.

С учетом того, что по классу H02K («Динамоэлектрические машины») ежегодно подается 40 тысяч заявок, а соотношение инновационных предложений и патентных заявок 1:100, дает нам впечатляющую цифру в 4 млн инновационных предложений в год! Естественно, подавляющее большинство идей предполагает небольшое усовершенствование.

Пожалуй, также стоит отметить, что та же самая идея может иметь разную ценность в зависимости от города, страны, региона, в котором ее попытаются реализовать. Реализуемость определяется доступностью материалов, компонентов, производственных возможностей, традиций инженерных школ, стандартов, принятых системных решений и многих других факторов.

Роль патентов

Часть предлагаемых новых решений может быть на уровне изобретений, т. е. иметь новизну и изобретательский уровень²¹. В таком случае внедрение новых решений может сопровождаться оформлением прав интеллектуальной собственности (патентных заявок), дающей в отдельных случаях эксклюзивность на рынке или возможность лицензирования.

Патенты используются в конкурентной борьбе. Например, патент US5083039B1 «Ветряная турбина с регулируемой скоростью» («Variable speed wind turbine»), заявка на который была подана Робертом Ричардсоном (Robert Richardson) и Уильямом Эрдманом (William Erdman) в 1991 году, считается одним из самых ценных с коммерческой точки зрения патентов в области, связанной с электрическими машинами. Патентная заявка была изначально подана от имени компании US Windpower и по ней был выдан патент, но в последствии в результате нескольких слияний и поглощений патент оказался в собственности General Electric, которая, осознав его значение, смогла в высшей степени эффективно использовать патент в конкурентной борьбе на рынке ВЭУ в США.

1-й пункт формулы изобретения в US5083039B1 сформулирован следующим образом:

«Ветряная турбина с регулируемой частотой вращения включающая: ротор турбины, включающий по меньшей мере одну лопасть, установленную на вращающемся валу; многофазный генератор, имеющий статор и ротор, соединенный с валом турбины для вращения вместе с ним; силовой преобразователь частоты, включающий активные ключи, способные управлять электрическими величинами статора для каждой фазы

²¹ Термины патентного права.

генератора; средства управления крутящим моментом, связанные с датчиками параметров турбины для определения опорного сигнала крутящего момента; и средства контроллера генератора, соединенные с силовым преобразователем частоты для управления активными ключами, включая средства ориентации поля, реагирующие на опорный сигнал крутящего момента для определения желаемого тока поперечной оси в координатах поля, и средства управления переключениями для управления активными ключами для производства электрических величин статора, которые соответствуют желаемому току поперечной оси».²²

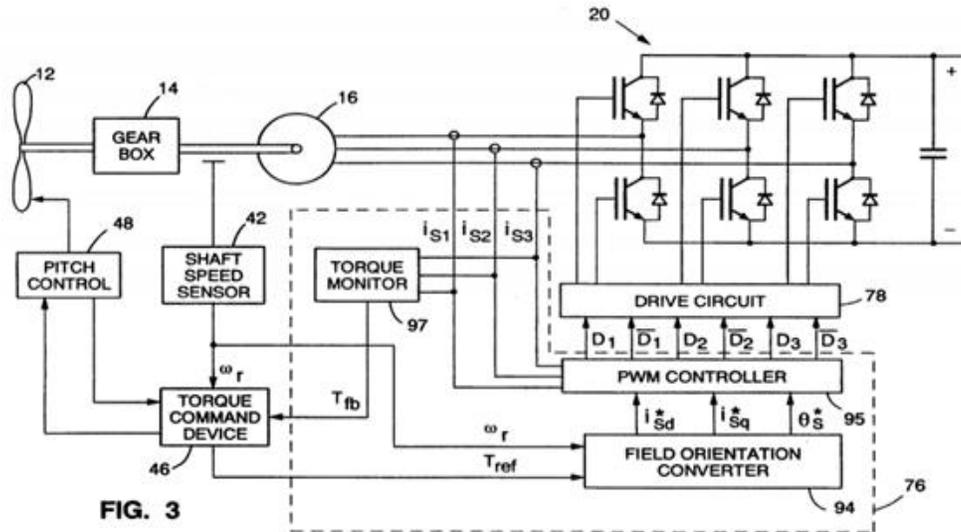


Рис. 3.34. Иллюстрация из US5083039B1.

То есть, описывается вполне стандартная схема управления полем статора генератора по обратной связи, проиллюстрированная на Рис.3.34. Данное решение оказалось весьма популярно в ветроэнергетике начиная с 2000-х годов. В принципе еще с 1970-х было известно векторное управление асинхронными машинами, т. е. принципиально новым данное решение готовы были признать далеко не все, несмотря на то что решение было перенесено в специфическую область - ветроэнергетику. Тем не менее патент был выдан и действовал до 2011 года. Многие конкуренты оспаривали оригинальность и новизну данного изобретения в 2000-е годы, когда GE начала использовать патент для блокирования доступа компаний-поставщиков ВЭУ, таких как Mitsubishi и Enercon, на американский рынок. GE удалось выиграть суды и отстоять по сути монополию на рынке регулируемых ВЭУ большой мощности на территории США. Некоторые конкуренты были вынуждены применять менее эффективные схемы управления, чтобы не попасть под действие патента GE.

Можно по-разному относиться к данной истории, но в любом случае стоит отметить искусство специалиста, написавших текст и формулу изобретения данного патента – обойти патент никому из конкурентов не удалось. Обычно патентные заявки пишутся патентными поверенными. Специалисты по патентному праву и в целом по интеллектуальной собственности являются

²² Перевод с английского автора книги.

важными действующими лицами процесса эволюции технических систем. Стратегии защиты интеллектуальной собственности, в частности патентования – отдельная область знания с обширной литературой, например [3.7]. Тем не менее, одна из практик доступна и для неспециалистов – это патентный поиск. Патентный поиск - исследование существующих патентных заявок и выданных патентов, тексты которых размещаются на сайтах национальных, региональных и международных патентных ведомств. Патентный поиск проводится обычно в следующих целях:

- Проверка патентоспособности технического решения перед возможной подачей патентной заявки. При пренебрежении проведением поиска до написания и подачи патентной заявки, во время экспертизы в патентном ведомстве может выявиться, что данная идея уже известна, не обладает необходимым условием новизны и ей не может быть предоставлена правовая охрана – т.е. не может быть выдан патент.
- Формирование базы знаний по своей сфере деятельности, выявление перспективных направлений для научно-исследовательской деятельности, прогнозирование развития науки и техники.
- Поиск решений, которые могут быть использованы в собственном производстве (например, по истекшим или не выданным патентам).
- Проверка возможности нарушения чужих авторских прав на сходное техническое решение при выводе собственной продукции на рынок.

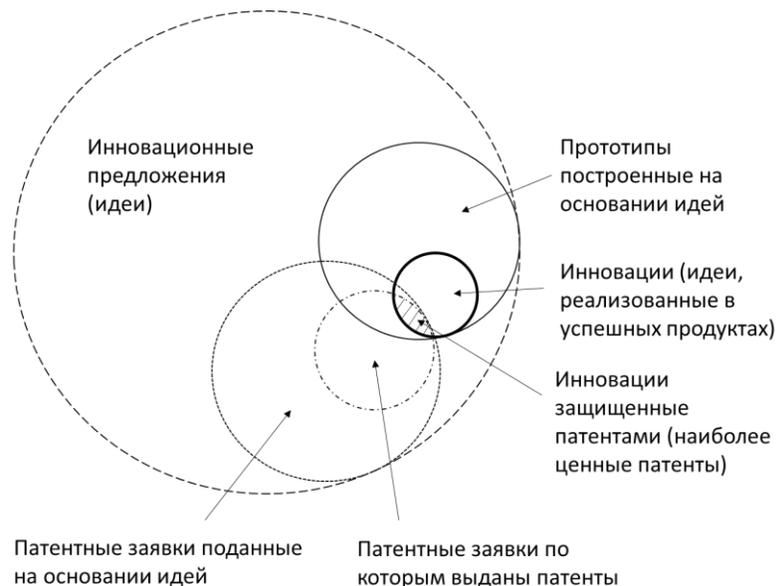


Рис. 3.35. Пересекающиеся множества.

Изобретения, патенты, прототипы и продукты

Надо иметь в виду, что далеко не все инновации сопровождаются патентными заявками и выданными патентами. В целом, ситуацию можно проиллюстрировать Рис. 3.35, где инновационные предложения (идеи) показаны как множество, представленное окружностью,

включающее другие множества. Множество патентных заявок, поданных на основании идей, включает множество заявок, по которым выданы патенты. Примечательно, что множество прототипов, построенных на основании идей, только частично пересекается с множеством идей, по которым поданы патентные заявки, т. е. процессы построения прототипов и патентования часто идут независимо друг от друга. Аналогично, инновации и выданные патенты являются только частично пересекающимися множествами, т. е. в большинстве случаев либо специалисты, отвечающие за интеллектуальную собственность не способны предугадать, какие идеи окажутся самыми эффективными, либо идеи не являются охраноспособными изначально. В [3.8] приводятся данные, согласно которым только 5% патентов имеют стратегическую ценность для своих правообладателей. Рис. 3.35 также показывает, что идеи, реализованные в успешных продуктах (инновации), составляют очень небольшую часть от всех поданных идей.

Использование патентной статистики для некоторых оценок

Число патентных заявок – косвенный показатель уровня инвестиций, количества вовлеченных разработчиков, а также успешности разработок в какой-либо отрасли, регионе или в какой-то период времени. В Табл. 3.2 даны систематизированные результаты поиска в открытой базе данных www.espacenet.com по классу H02K (dynamo-electric machines, динамоэлектрические машины). Количество патентных семей, приведенные в столбцах таблицы, даны за пятилетия. Также указаны ведущие страны и ведущие компании по количеству 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 СССР занимал 4-е место в мире по количеству патентных заявок. С 1970х годов мы 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 на 2-е место (после США) по размеру ВВП. В начале нового тысячелетия Китай опередил Японию и США и прочно занял место лидера. Интересно, что США, будучи крупнейшей мировой экономикой, в рассмотренный период (последние 65 лет) не были лидером по числу патентных заявок по ЭМ.

За семь десятилетий количество патентных заявок по классу H02K выросло примерно в восемь раз (Рис. 3.6). Объяснениями такого радикального роста могут быть увеличение населения Земли за этот период с 3 до 8 млрд, большая вовлеченность практически всех стран в процесс патентования, а также аномальная активность Китая в последние 10 лет.

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 и для электротехнической промышленности.

Имея патентную статистику, можно очень приблизительно оценить количество вовлеченных в инновационную деятельность специалистов и инвестиции. В соответствии с [3.9] в США в 2000-е годы на каждые 100 ученых и инженеров и каждые 10 миллионов долларов инвестиций в НИОКР приходилось 5 патентов. Примем эти соотношения (1 патент в год на 20 ученых, 1 патент в год на 2 миллиона долларов инвестиций) за базовые. Сегодня в мире ежегодно подается около 40 тысяч

новых патентных заявок по ЭМ. При расчете с использованием упомянутых выше соотношений мы приходим к цифре в 800 тысяч ученых и инженеров, работающих по тематике, связанной с ЭМ по всему миру, и инвестиции в НИОКР по той же тематике около 80 миллиардов долларов. С учетом того, что население России составляет около 2% от мирового, можно говорить о том, что по тематике ЭМ в России работают более десяти тысяч специалистов. С учетом того, что только около 5% всех патентов имеют реальный эффект, т. е. представляют реальные инновации, мы можем предположить, что ежегодное количество полезных усовершенствований по тематике ЭМ в мире – более тысячи в год, в России, соответственно, счет будет идти на десятки.

Проверим этот вывод по количеству поданных патентных заявок непосредственно в России. На основании анализа данных в базе [3.10] в России заявок по ЭМ (индекс МПК H02K) подавалось: в 2000-2010 годах - на уровне 300...400 в год, в 2011-2016 количество возросло до 500...600 в год, но в последние годы снова снизилось на уровень 300...400 в год. Подавляющее большинство заявок (примем, что приблизительно 80%) подано резидентами РФ, т. е. их количество косвенно отражает уровень инновационной активности в стране. Итак, очень грубо можно оценить количество инновационных предложений, относящихся к ЭМ, поданных в России, десятками тысяч в год, количество инноваций – десятками или даже сотнями в год, а количество наиболее ценных инноваций, защищенных патентами – порядка 10...20 ежегодно. Таким образом, мы приходим к тому же порядку цифр.

Итак, можно сформулировать: *«результатом работы сотен тысяч специалистов по всему миру ежегодно являются сотни усовершенствований ЭМ и непосредственно связанных с ними систем».*

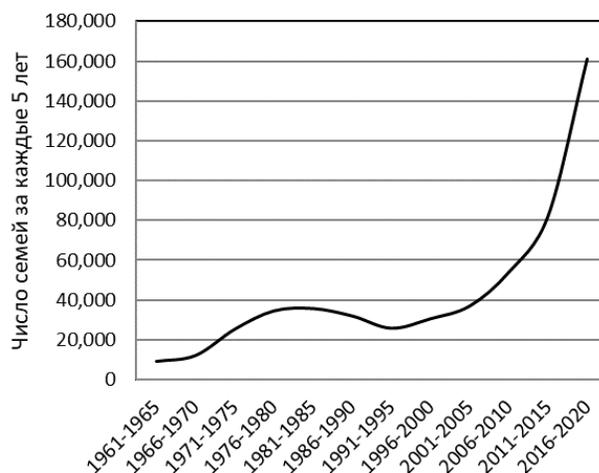


Рис. 3.36. Динамика подачи патентных заявок по классу H02K.

Заключительные комментарии к главе 3

Подводя итоги главы, можно еще раз перечислить основных действующих лиц: политики и чиновники, инвесторы, эксперты по технологиям и рынкам, исследователи, технологические скауты, предприниматели-визионеры, заказчики нового оборудования, руководители разного

уровня, продавцы, изобретатели, инженеры разработчики и конструкторы, патентные поверенные. Для успеха любой инновации нужны практически все действующие лица и важно, чтобы каждый качественно сыграть свою роль.

Третья глава завершает попытку хотя бы приблизительного описания всех основных механизмов, процессов и действующих лиц, имеющих отношение к эволюции ЭМ. Данное описание, естественно, субъективно, неполно, и автор надеется, что в будущем удастся изучить и проработать это вопрос более глубоко и детально, поскольку активное участие в процессе эволюции и, в предельном случае, управление эволюцией, невозможно без понимания всех основных процессов.

Табл. 3.2. 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

Табл. 3.2. Результаты поиска по классу H02K (продолжение)

	1991-1995	1996-2000	2001-2005	2006-2010	2011-2015	2016-2020
Число семей	25710	30490	36880	53910	82100	161000
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	Китай - 132400, Япония - 18370, США - 17680
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	Zhuhai Gree - 2057, Mitsubishi - 1325, Denso - 959
Крупнейшие экономики	США, Япония, Германия	США, Япония, Германия	США, Япония, Германия	США, Китай, Япония	США, Китай, Япония	США, Китай, Япония

Литература по главе 3

- [3.1] Вебсайт Европейского Консультативного Совета по Исследованиям в Области Аэронавтики (ACARE) [Электрон. ресурс] www.acare4europe.org (дата обращения 19.06.2020).
- [3.2] M. Hader, S. Baur, Regional Air Mobility: How to unlock a new era of aviation. Regional flight may be a niche market, but it could be vital in developing sustainable technologies, June 21, 2022, [Электрон. ресурс] <https://www.rolandberger.com/> (дата обращения 15.09.2023).
- [3.3] K. Atallah and D. Howe, "A novel high-performance magnetic gear," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 37, no. 4, pp. 2844-2846, July 2001.
- [3.4] Г. Ф. Быстрицкий, Г. Г. Гасангаджиев, В. С. Кожиченков, Общая энергетика. Основное оборудование, учебник для СПО, 2-е издание, исправленное и дополненное, Москва, Юрайт, 2018.
- [3.5] Патентная база данных Espacenet, www.espacenet.com.
- [3.6] М. А. Орлов Нетрудная ТРИЗ. Универсальный практический курс, М.: Солон-Пресс. 2011. - 384 с.
- [3.7] V. Irish, Intellectual property rights for engineers, The Institution of Electrical Engineers, 1994, UK.
- [3.8] S. S. Harrison, P. H. Sullivan, Edison in the boardroom revisited: how leading companies realize value from their Intellectual property, Ed. 2. John Wiley & Sons, 2011.
- [3.9] B. McKern, Managing the global network corporation, 2003, Routledge - 304 p.
- [3.10] Поисковая система Федерального Института Промышленной Собственности, [Электрон. ресурс] <https://www.fips.ru/elektronnye-servisy/informatsionno-poiskovaya-sistema/> (дата обращения 03.12.2020).

Глава 4. «Анатомия» ЭМ как объекта эволюции

Чтобы создать что-то радикально новое, вероятно стоит начать со смены парадигм и дискурсов. Ставку уже в ближайшем будущем можно будет сделать на комбинации нестандартного мышления и Искусственного интеллекта (ИИ). В данной главе предложена новая классификация машин как альтернатива устоявшемуся дискурсу, а также способ представления связности знаний о ЭМ.

Искусственный интеллект (ИИ) — свойство технических или программных систем выполнять творческие функции, которые традиционно считаются прерогативой человека. Известно, что уже существуют программные комплексы, имитирующие интеллектуальную деятельность, превосходящие разум человека в определённых узких областях, поэтому интересен и актуален вопрос, когда ИИ начнет применяться в разработке и проектировании электрических машин (ЭМ). ИИ постепенно находит применение в инженерных дисциплинах. Есть ряд работ, которые показывают применение ИИ в управлении стабильностью систем, прогностике, оптимизации. В области электромеханики в качестве примеров можно привести работы [4.1]-[4.3].

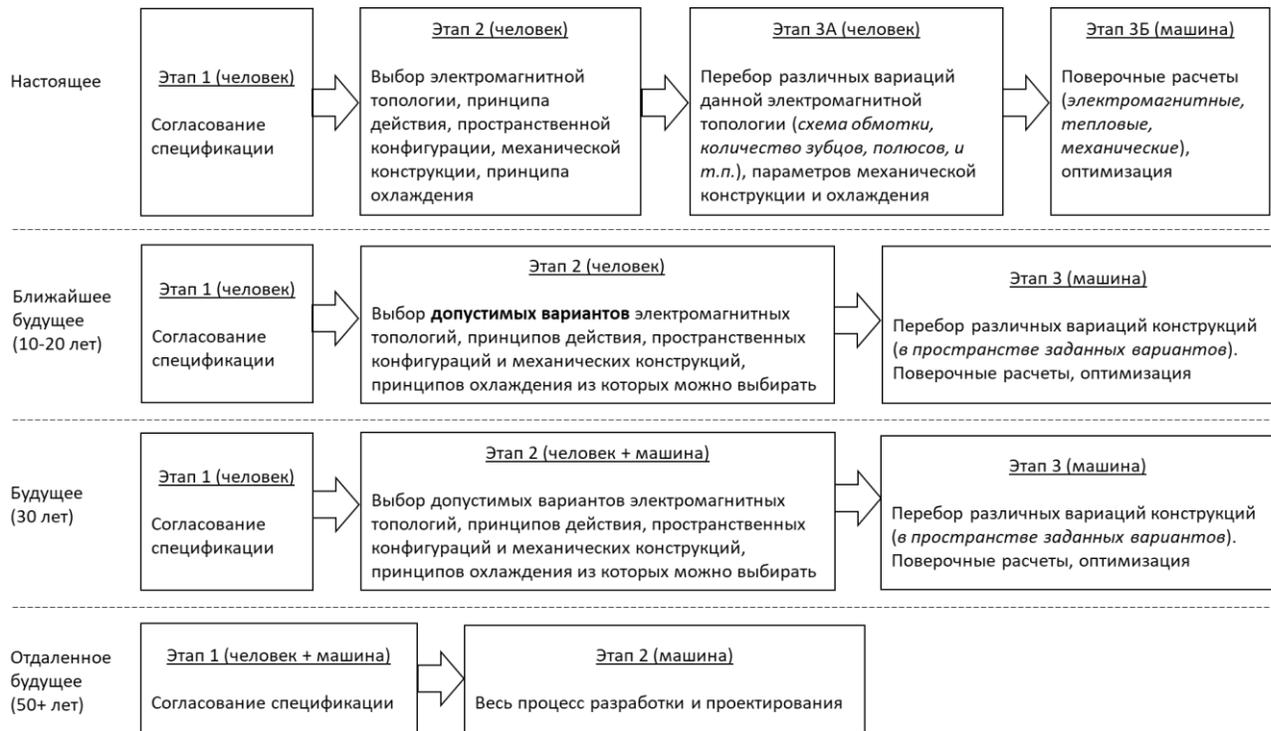


Рис. 4.1. Прогнозы по участию человека в основных этапах процесса разработки ЭМ.

Что касается времени прихода ИИ в электромеханику, достоверных прогнозов не существует, но можно предположить, что будут проходиться этапы, приведенные на Рис. 4.1. В настоящее время сложно предсказать, какой именно ИИ может использоваться для проектирования ЭМ. Среди типов ИИ можно назвать экспертные системы, базы знаний, системы логического вывода, имитирующие такие процессы как мышление, рассуждение, речь и т. д. Кроме того активно разрабатываются и

тестируются искусственные нейронные сети и эволюционные вычисления, моделирующих интеллектуальное поведение на основе биологических элементов. В частности, можно упомянуть о подходе, основанном на предпосылке о том, что элементами человеческого мышления служат не числа, а элементы некоторых нечетких множеств. ИИ может работать с нечеткими множествами значительно лучше людей. Условно говоря, если опытный конструктор может держать в уме десятки критических параметров машины, то ИИ способен держать на порядок больше таких параметров и комбинировать их, что в итоге может сказываться на скорости и качестве принимаемых проектных решений. Вполне возможна ситуация, когда будут использоваться комбинации различных типов ИИ.

Сделаем попытку представить, какой логике «рассуждений» можно обучать ИИ, а также предложить классификацию ЭМ в том числе и как «пространство» для работы данной логики.

Для иллюстрации логики рассуждений разработчика, которую можно попытаться «привить» ИИ, рассмотрим следующую задачу: надо обеспечить вращение с некоторым моментом, используя набор электромагнитов и ферромагнитных тел. Логика может быть следующей (по шагам):

1. Известно, что ферромагнитное тело притягивается к возбужденному электромагниту - об этом следует «сообщить» ИИ, задав таким образом тип пары взаимодействующих элементов: «электромагнит - ферромагнитное тело».
2. Если присоединить закрепленную в определенной точке консоль к ферромагнитному телу (как показано на Рис. 4.2а), то процесс притяжения тела к электромагниту приведет к повороту консоли вокруг точки крепления.
3. Когда притяжение произошло (как показано на Рис. 4.2б), вращение прекращается.
4. Если добавить еще одну пару взаимодействующих элементов, расположенную относительно первой пары как показано на Рис. 4.2с, то движение можно продолжить, отключив первый электромагнит и возбудив второй электромагнит.

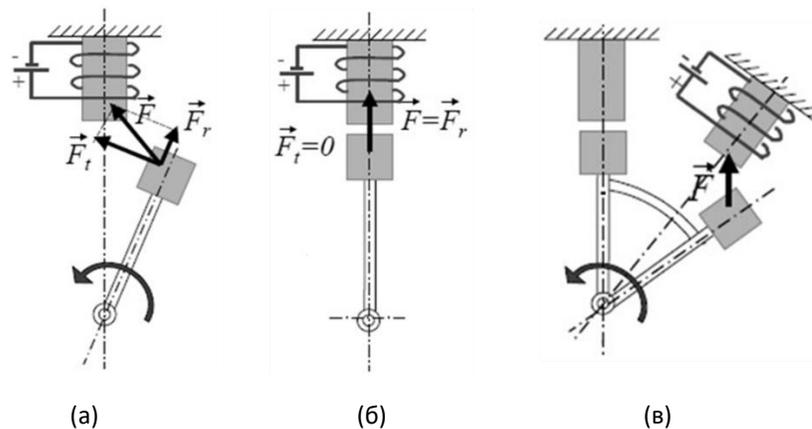


Рис. 4.2. Иллюстрация логики создания вращательного движения.

Когда ИИ «освоит» данную логику рассуждений, то можно поставить следующую задачу: как распределить электромагниты и ферромагнитные тела на консолях вокруг центра вращения, и как

включать и выключать электромагниты, чтобы обеспечить постоянное вращение. Можно использовать способность ИИ распознавать взаимное расположение элементов и оценивать их взаимодействие. В случае успеха с поставленной задачей ИИ научится реализовывать принцип действия вентильно-индукторного двигателя (ВИД). Можно отметить, что, вероятно, ВИД – самый простой пример для пробы ИИ в области проектирования ЭМ.

Также стоит отметить, что в данном примере использовался «строительный элемент» - пара взаимодействующих элементов «электромагнит - ферромагнитное тело», который может быть назван «базовым строительным элементом» для реализации логики построения данного типа ЭМ. Вероятно, правильный выбор подобных логических строительных блоков будет особенно важен для работы с ИИ в области ЭМ.

Вернемся к классификации как основному предмету статьи. Начнем с определения: *Классификация* — система группировки объектов исследования в соответствии с их общими признаками. В науке классификация подразумевает деление объёма понятия по определённому основанию (признаку), при котором объём родового понятия (класс) делится на виды (подклассы), а виды, в свою очередь делятся на подвиды и т. д. Самым высшим уровнем классификации ЭМ, пожалуй, можно признать классификацию по типу поля, в котором происходит преобразование энергии. По соответствующему признаку (критерию) ЭМ делятся на индуктивные (преобразование энергии в магнитном поле), емкостные (преобразование энергии в электрическом поле) и индуктивно-емкостные [Копылов]. Практически все промышленные машины сегодня – индуктивные, и данная работа ограничивается рассмотрением только этого класса ЭМ.

Стоит отметить, что результат классификации ЭМ по практически любому набору признаков - не дерево со «стволом» и «ветвями», а скорее многомерная матрица. Покажем это на примере. На Рис. 3 показана классификация по типу питания (роду тока), а на Рис. 4.4 – по типу передачи энергии на ротор. При рассмотрении частей деревьев классификаций на Рис. 4.3 и 4.4 становится очевидно, что по первому признаку, асинхронные и униполярные машины оказываются в различных группах, а по второму – в одной. Также, по первому признаку синхронные и коллекторные машины оказываются в различных группах, а по второму – в одной. Т. е. можно отметить, что при использовании различных признаков классификации отдельная ЭМ не обязательно имеет постоянных «соседей по подвиду» в ветвях деревьев классификации.



Рис. 4.3. Часть дерева классификации по роду тока.

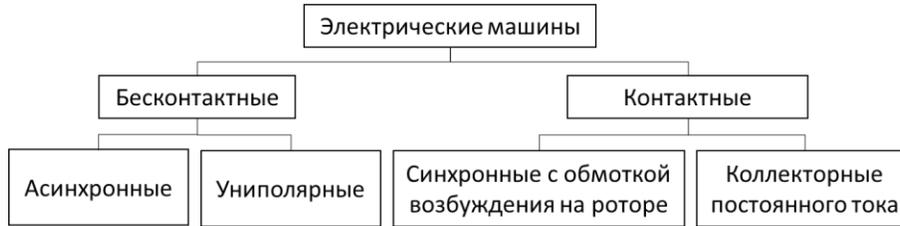


Рис. 4.4. Часть дерева классификации по передаче энергии на ротор.

Рассмотрим классификации, представленные в двух классических учебниках по ЭМ - [4.4] и [4.5]. В частности, в [4.4] дается следующая классификация:

- По роду тока – машины постоянного и переменного тока, при этом машины переменного тока делятся на асинхронные (несинхронные), синхронные, коллекторные и трансформаторы
- По направлению преобразования энергии: двигатели, генераторы и компенсаторы реактивной мощности
- По конструктивному исполнению: явнополюсные и неявнополюсные
- По расположению ротора: с внутренним и внешним ротором («обращенная» конструкция)
- По количеству движущихся сердечников: одномерные и многомерные

Оригинальный подход к классификации представлен в [4.5] где за исходную точку берется утверждение, что «непременным условием осуществления в машине электромагнитного преобразования является изменение индуктивностей или взаимных индуктивностей обмоток при повороте ротора». Соответственно, ставится вопрос о том, «каким образом должна быть устроена электрическая машина, чтобы индуктивности или взаимные индуктивности ее обмоток зависели от углового положения ротора и изменялись периодически при вращении ротора». В результате определяются три принципиальных исполнения (три ветви классификации): машина с одной обмоткой на статоре и одной обмоткой на роторе (И-1), машина с одной обмоткой на статоре и зубчатым магнитопроводом ротора (И-2), машина с двумя обмотками на статоре и зубчатым магнитопроводом ротора (И-3). Дополнительным признаком классификации в [4.5] выбирается тип магнитопровода - «зубчатый» и «гладкий», что соответствует делению на явнополюсные и неявнополюсные машины в [4.4].

Можно сделать определенные выводы о практически используемой классификации ЭМ в тот или иной период времени по содержанию учебников этого периода. Учебники играют важную роль, постольку они формируют представления целых поколений о предмете, задают основные парадигмы²³ и язык. В 20 веке было принято делить пространство учебников по ЭМ общего курса на трансформаторы, асинхронные машины, синхронные машины (с электромагнитным возбуждением), машины постоянного тока, а также все многообразие прочих машин, объединенных термином «специальные машины». Таким образом, по сути, на практике использовался еще один признак – популярность определенных типов машин (объем рынка, используемость), имеющий отношение скорее не к технике, а к экономике. Довольно часто

²³ Парадигма – набор концепций и шаблонов мышления.

даваемые классификации отражают популярность типов ЭМ на время написания учебника или статьи. В [4.6], книге уже 21-го века, ЭМ, исходя из структуры глав, делятся на асинхронные (включая 1-фазные), синхронные (включая синхронные реактивные и синхронные с постоянными магнитами) и вентильно-индукторные. Иногда создается впечатление, что выбор классов машин, которым посвящены главы учебников частично отражает опыт и научные интересы авторов этих учебников.

Критика существующих классификаций. Укажем на некоторые недостатки (по субъективному мнению автора) существующих классификаций. Например, подход к классификации в [4.5], с тремя исполнениям (И-1, И-2, И-3) можно критиковать, указывая на известные машины, не попадающие в три вышеперечисленные исполнения, например на синхронные реактивные машины, различные гибридные машины или асинхронные машины с полым ротором. Кроме того, четкую границу между «зубчатыми» и «гладкими» магнитопроводами провести сложно, учитывая, что существуют полузакрытые пазы и открытые пазы с магнитными пазовыми клиньями. Также существуют роторы с абсолютно гладкой поверхностью, но с различным магнитным сопротивлением по разным осям (как у синхронно-реактивных двигателей).

Далее, четкое деление на асинхронные и синхронные машины не всегда оправдано, поскольку известны «синхронизированная асинхронная» и «асинхронизированная синхронная» машины. Ряд машин с $q < 1$ не являются синхронными в соответствии с классическим определением (работают на высших гармониках). ВИД – машины с «прыгающим» полем – тоже не синхронная машина, но в то же время и не асинхронная, поскольку в ней нет скольжения. Т. е. известные классификации не всегда соответствуют разнообразию мира ЭМ.

Еще один часто используемый признак классификации, который можно покритиковать – направление преобразования энергии и, соответственно, назначение машины, по которому машины делятся на двигатели, генераторы и компенсаторы реактивной мощности. Дело в том, что, например, в электромобиле происходит постоянный переход в режим рекуперации энергии в стандартном городском режиме движения. Получается, что ЭМ главного привода в электромобиле нельзя определить только как двигатель или только как генератор. Таких примеров много.

Что касается классификации по роду тока питания, то можно указать на примеры, когда статор питается переменным током, а ротор – постоянным (классическая синхронная машина) или когда на статоре присутствуют две обмотки, питающиеся токами разных типов (индукторная машина). Отнесение этих машин к машинам переменного тока или постоянного тока будет спорным. Кроме того, появление и распространение устройств силовой электроники меняет в целом отношение к тому, какой ток питания доступен к использованию (тип сети). Особенно это очевидно в случае электроники, интегрированной с активными частями машины. Форма токов и напряжений, создаваемых электроникой, может быть очень разнообразной – прямоугольной, трапецеидальной и пр., поэтому даже понятие «переменный» ток стало в какой-то степени неопределенным. В дополнение к сказанному стоит добавить, что уже обсуждаются автономные сети переменной частоты и переменного напряжения, что еще более усложнит вопрос классификации по роду тока.

И, пожалуй, последнее замечание: ниже будет показано, что деление на машины с радиальным и аксиальным потоком не всегда имеет смысл и часто является недопустимым упрощением.

Возвращаясь к современной литературе, можно сказать, что разнообразные предлагаемые классификации не только не идеальны, но и зачастую содержат ошибки. В некоторых публикациях

даже допускается так называемые *пересечения понятий* («машины асинхронные, постоянного тока, ... и дисковые»). Также существуют неудачные примеры классификации, отраженные в названиях машин, например «бесщеточная машина постоянного тока» («*brushless DC machine*») - данная машина в действительности питается переменным током трапецеидальной формы, т. е. является машиной переменного тока, но традиционно сохраняет свое «неправильное» название.

Подводя промежуточные итоги, можно сказать, что ситуация с классификациями ЭМ как минимум заслуживает критического взгляда.

Вопрос смены парадигмы и языка. Можно поставить следующие вопросы: «Какова цель классификации ЭМ? К чему общепринятые типы классификации нас привели? Какое положение дел они закрепляют? Насколько они современны и актуальны? Помогают ли они развитию электромеханики?»

Очевидно, что существующие классификации безусловно полезны, и даже незаменимы при коммуникации между специалистами, особенно в сфере внедрения оборудования. А вот для разработчика-изобретателя устоявшийся язык и связанные с ним шаблоны мышления – скорее недостаток. Термины определяют лишь некоторые «островки» в «море» возможного разнообразия, не позволяют видеть всего пространства вариантов. При поиске нового цель - не в том, чтобы дать чему-либо название и определить на некую «полочку», а в свободе мышления. Задача изобретателя, в какой-то степени - рассыпать собранную кем-то другим мозаику, чтобы собрать что-то новое.

Если вернуться к ИИ, то тут скорее всего потребности еще более далеки от того, что могут предложить существующие классификации: ИИ, вероятно вообще не заинтересован в человеческих терминах. Определения в рамках человеческого языка могут даже мешать - слова действуют как «якоря», «границы». В теории ИИ может «вывести» интересные «гибриды», вообще не имеющие адекватного описания на общепринятом профессиональном языке.

С учетом вышесказанного можно заключить, что назревает потребность в пересмотре устоявшейся парадигмы и изменении языка. Здесь можно поставить следующий вопрос: «Можно ли описать все многообразие машин какой-то практически полезной и применимой (для изобретателей и ИИ) классификацией, свободной от недостатков существующих классификаций?» Данная работа ставит целью предложить именно такую классификацию – исчерпывающую, всеобъемлющую и непротиворечивую классификацию ЭМ для изобретателей и ИИ. Новая классификация определит границы многомерного пространства возможного в области ЭМ, внутри которого будут представлены все возможные варианты исполнений ЭМ.

Итак, начнем с радикального предложения: в новой классификации предлагается не использовать в качестве основных такие ставшие привычными признаки, как:

- род тока в сети, от которой питается машина
- синхронность вращения поля и ротора (соответственно, деление машин на асинхронные и синхронные)
- направление преобразования энергии (двигатели и генераторы)
- направление потока относительно оси вращения (машины с радиальным или аксиальным потоком)

Кроме того, несколько другое значение в данной работе будет иметь зубчатость или гладкость сердечников.

Базовый элемент и новые признаки классификации. Новый подход к классификации потребует определения так называемого базового элемента. Поскольку преобразование энергии происходит в зазоре, именно зазор можно взять за «точку отсчета». За базовый элемент можно принять пару взаимодействующих активных частей (АЧ) и плоскость зазора между ними, «извлеченная» из машины как показано на Рис. 4.5. Таким образом мы получаем Пиктограмму (на Рис. 4.5 справа) – основной базовый элемент визуализации и логический строительный блок.

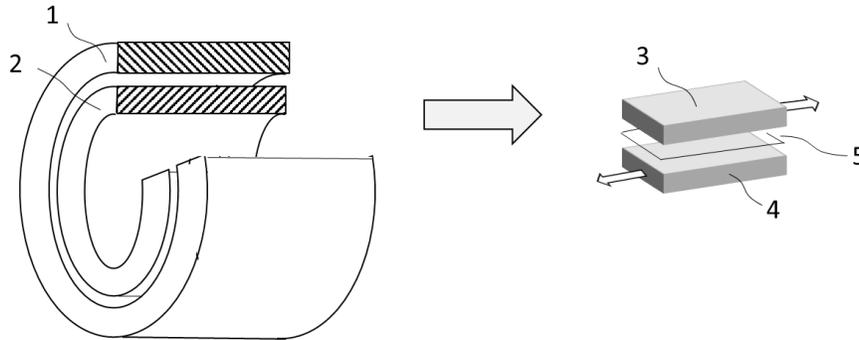


Рис. 4.5. Активные части с вырезанным сегментом и Пиктограмма (1 – статор, 2 – ротор, 3 – элемент статора, 4 – элемент ротора, 5 – плоскость зазора между ними).

Пиктограммы могут применяться, в частности для иллюстрации наличия в машине двух и более АЧ, разделенных зазорами, подведения питания к обмоткам (однофазным, многофазным) и типов питающих токов. В то же время в задачи пиктограмм не входит отражение пространственных конфигураций машин (вращающиеся, линейные и т. п.). На Рис. 4.6 даны примеры пиктограмм:

- Рис. 4.6, а показывает некий общий случай: три движущиеся взаимодействующие АЧ каждая - с питанием различными токами (не определенными).
- Рис. 4.6, б показывает две АЧ одна из которых стационарна и питается неким неопределенным набором токов, а вторая не получает питания извне.
- Рис. 4.6, в показывает более конкретно, какие обмотки имеет стационарная АЧ: одну - питаемую постоянным током и еще одну – переменным.

В новой классификации делается упор на «источники и конфигураторы поля». Итак, шесть основных признаков:

1. По движению АЧ и типу/способу передачи энергии на эти АЧ
2. По составу активных элементов и типу питания (по источникам поля)
3. По механизму/методу создания силы взаимодействия АЧ
4. По пространственной конфигурации/ориентации взаимодействующих АЧ
5. По количеству пар АЧ (количеству зазоров)
6. По расположению основного контура магнитного потока относительно плоскости зазора и направления движения

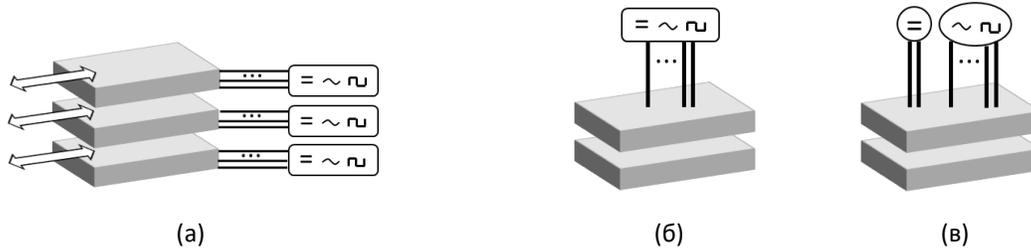


Рис. 4.6. Примеры использования пиктограмм.

Ни один из признаков не является признаком более высокого уровня относительно любого другого. Получается не иерархическая, а «плоская» матричная классификация, где нет родов, классов и т. п. Любой из шести признаков может комбинироваться с любыми вариантами и комбинациями других признаков.

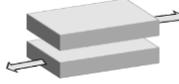
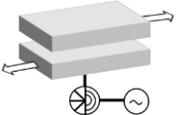
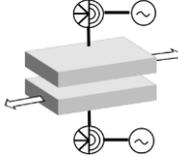
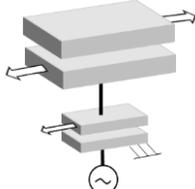
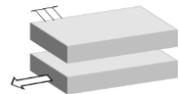
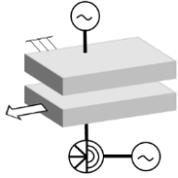
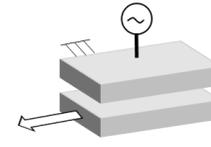
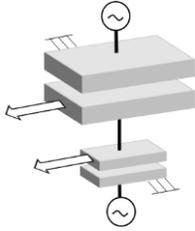
Важно отметить, что некоторые аспекты конструкции, не относящиеся напрямую к электромагнитным процессам, новая классификация не затрагивает: остаются неизменными такие традиционные признаки классификаций как: по конструкционным частям и способу монтажа (например В3, В5, В35, ...), защите (например IP21, IP54, ...), охлаждению (например IC01, IC411, ...). Дополнительно, в особых случаях, можно использовать такие признаки как: агрегатное состояние активных частей, тип движения (поступательное, вращательное, вращательно-поступательное), и некоторые другие.

Рассмотрим применение предложенных признаков в деталях.

Признак 1: «По движения активных частей (АЧ) и типу передачи энергии на эти АЧ». Подавляющее большинство ЭМ имеет одну стационарную АЧ и одну – движущуюся. АЧ в ЭМ может быть больше двух: например, одна из АЧ может двигаться, а две других могут быть стационарны или наоборот – две АЧ могут двигаться, а третья – быть стационарной (движущиеся АЧ могут быть механически соединены). ЭМ с двумя АЧ, обе из которых движутся относительно окружающих стационарных объектов, достаточно редки. Передача энергии на стационарную АЧ может быть прямая гальваническая, на движущуюся – либо через контактные кольца или коллектор, либо посредством вращающихся трансформаторов (электромеханические каскады). Возможна также передача энергии через магнитное поле в главном воздушном зазоре.

Можно попытаться систематизировать эти варианты, используя пиктограммы. В качестве примера в Табл. 4.1 приведены все возможные комбинации движения и передачи энергии для двух АЧ. В ряду таблицы, обозначенном «1Д» – почти все наиболее распространенные машины. Машины в ряду «2Д» - более редкие. Контактные кольца или коллектор описываются одним и тем же универсальным символом – окружностью, разделенную пополам, с концентрическими кругами справа и расходящимися лучами слева. Внешние источники энергии отображены окружностями с сегментом синусоиды внутри. На топологии в ячейках таблицы можно обратиться/сослаться, используя указатели, например - «2Д-1К» или «1Д-2К». Для варианта «2Д-ЭМК» передача через вращающийся трансформатор возможна также на обе АЧ (в таблице 4.1 этот вариант не показан). В варианте «2Д-НП» на одной из движущихся АЧ может быть накопитель энергии — это также весьма экзотический вариант. Очевидно, что количество АЧ может быть больше двух. Таблицу 4.1 при необходимости можно легко «достроить», используя ту же логику.

Таблица 4.1. Пиктограммы, описывающие варианты движения и передачи энергии

		Передача энергии на движущиеся АЧ				
		Коллектор или кольца с щетками		Нет передачи	Электро-механические каскады	
		на 1 АЧ	на 2 АЧ			
		«1К»	«2К»	«НП»	«ЭМК»	
Движение АЧ	Двигутся обе АЧ 	«2Д»			 Потребитель или источник энергии – на одной из АЧ или обоих	
	Двигается одна АЧ 	«1Д»				

Признак-2: «По источникам и конфигураторам поля и типу питания обмоток». Источниками поля могут быть обмотки с токами (расположенные на сердечниках или без них) и постоянные магниты. Обмотки могут питаться различными типами токов. Конфигураторами поля являются сердечники, являющимися проводниками магнитного потока. Сердечники могут иметь сложную форму, содержать каналы. Практически любая зубцовая зона является конфигуратором поля. Исключения – закрытые пазы и безсердечниковые машины.

Примеры пиктограмм для некоторых известных типов машин даны на Рис. 4.7 и Рис. 4.8. Конфигураторы поля символически отображены ломаной линией, короткозамкнутая обмотка (беличья клетка или демпферная обмотка) обозначается маленькими белыми окружностями. Постоянные магниты показаны стрелками. Пиктограммы для некоторых типов машин без передачи энергии на ротор показаны на Рис. 4.7. Пиктограммы с передачей энергии на ротор показаны на Рис. 4.8.

С помощью пиктограмм можно «покрывать» целые размерности (сечения) пространства вариантов, соответствующих одному из признаков классификации. В качестве примера в Табл. 4.2 даны все возможные варианты машин с одной многофазной обмоткой, питаемой синусоидальным током, для случая с одной стационарной и одной движущейся активной частью, без передачи энергии на эту движущуюся часть («бесконтактные» машины). Таблица построена следующим образом: во-первых, определяются конфигурации для движущейся АЧ. Содержание АЧ – источники и конфигураторы поля. Короткозамкнутая обмотка (беличья клетка или демпферная обмотка) обозначается «КЗО». Магнитная неравномерность (конфигуратор поля) – «МН». На Рис. 4.9 показаны все варианты комбинаций источников и конфигураторов на движущейся АЧ.

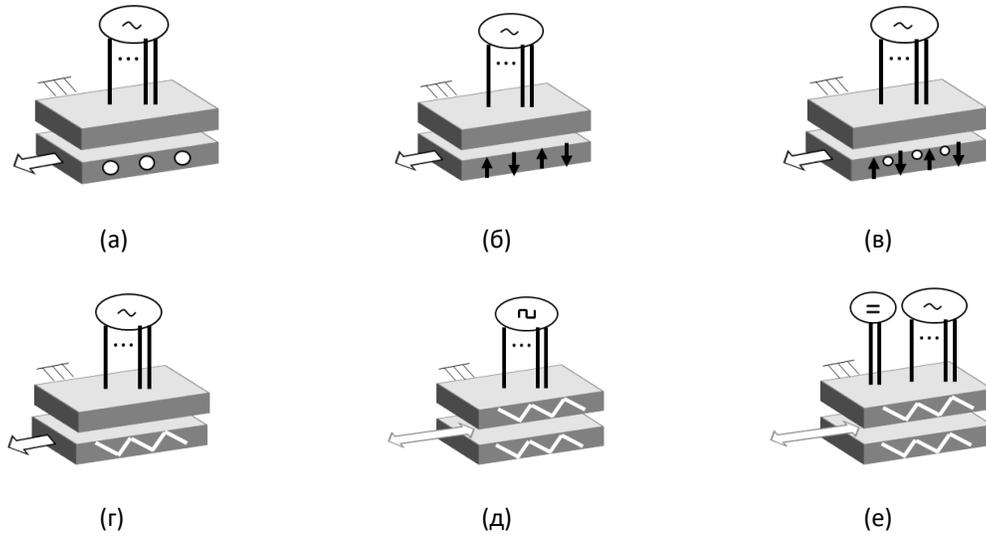


Рис. 4.7. Пиктограммы АДКЗ (а), СМПМ (б), СМПМ с демпферной обмоткой (в), синхронная реактивная машина (г), вентильно-индукторная машина (д), индукторная машина с подмагничиванием (е).

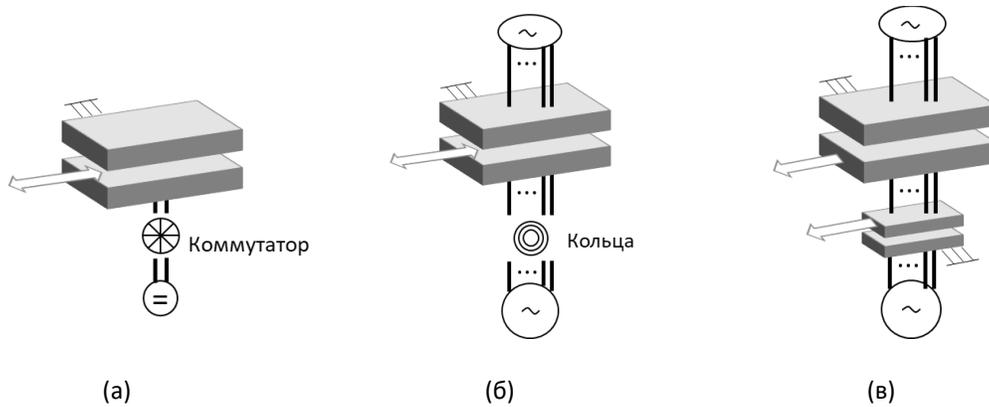


Рис. 4.8. Пиктограммы машины постоянного тока (а), асинхронной машины двойного питания (с фазным ротором) (б), СМ с возбудителем на валу (в).

	1	2	3	4	5	6	7	8
КЗО		x			x	x		X
МН			x		x		x	X
магниты				x		x	x	X

Рис. 4.9. Восемь вариантов для движущейся части.

Во-вторых, определяются конфигурации для стационарной АЧ. Сделано предположение, что КЗО на стационарную АЧ ставить нет смысла. На Рис. 4.10 показаны варианты, не включая главной обмотки, которая является неотъемлемой частью любой пиктограммы.

	A	B	C	D
МН		x		x
магниты			x	x

Рис. 4.10. Четыре варианта для стационарной части.

Некоторые конфигурации из Табл. 4.2 узнаваемы и хорошо известны: АДКЗ – в ячейке «А-2», АДСР - «А-1», СМППМ - «А-4», СМ с переключаемым потоком - «D-3», СРМ - «А-3», СМППМ с демпферной обмоткой - «А-6», ВИМ с синусоидальным питанием - «В-3».

Можно представить похожую таблицу, с единственным различием – питанием не синусоидальным, а прямоугольным или трапецеидальным током или током более сложной формы. Соответственно, во всех пиктограммах значок в овалах изменится. Еще одна возможная группа вариантов – с разделением (как на Рис. 4.7,е) обмоток на обмотки с питанием постоянным током и обмотки с питанием переменным током – такое разделение помогает «конкретизировать» топологии. В целом, тип питания (однофазное или многофазное) и тип тока питания во многом определяют обмотку машины, т. е. задается значительно ограниченное пространство вариантов конструкции. Важно отметить, что для тех же источников и конфигураторов, варианты обмоток могут быть очень разнообразны.

Большинство комбинаций, которые можно визуализировать подобным образом, – вероятно неудачные (не практичные). Это относится и к Табл. 4.2 и другим подобным таблицам. Тем не менее, составление подобных таблиц может быть полезно для разработчиков-изобретателей. В частности, пиктограммы или их части могут создаваться/рисоваться ИИ или изобретателями, а потом комбинироваться с вариантами конструкции, приведенными ниже и исследоваться.

Признак-3: «По механизму создания силы взаимодействия между активными частями». Предлагается разделить все возможные варианты создания электромагнитных сил на четыре принципа, как показано в Табл. 4.3. Можно ли свести к этим четырем принципам и их комбинациям все возможные случаи – вопрос, который заслуживает научной дискуссии. Тем не менее такое предположение сделано, с прицелом на обучение ИИ.

По 1-му принципу («Электромагнит притягивает ферромагнитное тело») работают, в частности, индукторные машины (ИМ), двигатели с катящимся ротором, синхронно-реактивные машины (СРМ).

По 2-му принципу («Электромагнит притягивает/отталкивает электромагнит») работают СМ с электромагнитным возбуждением и частично (как будет показано ниже) АМ. На Рис. 4.11 статор СМ представляет собой «вывернутый» электромагнит, который, при вращении поля, «ведет» за собой ротор – тоже, в своем роде, «электромагнит».

Таблица 4.2. Машины с одной движущейся АЧ с многофазной обмоткой с синусоидальным током

Общий случай		стационарная часть				
		гладкая поверхность	МН	Магниты	МН + магниты	
		A	B	C	D	
движущаяся часть	массивная	1				
	КЗО	2				
	МН	3				
	магниты	4				
	КЗО + МН	5				
	КЗО + магниты	6				
	магниты + МН	7				
	КЗО + магниты + МН	8				

Таблица 4.3. Принципы создания сил и частные случаи

№	Принципы создания сил ²⁴	Частные случаи
1	Ферромагнитное тело ориентируется во внешнем магнитном поле	Электромагнит притягивает ферромагнитное тело
2	Электромагнит ориентируется во внешнем магнитном поле	Электромагнит притягивает/отталкивает электромагнит, Постоянный магнит притягивает/отталкивает электромагнит
3	Постоянный магнит ориентируется во внешнем магнитном поле	Электромагнит притягивает/отталкивает постоянный магнит
4	Сила ампера, действующая на элемент, несущий электрический ток	Сила действует на проводник с током, находящимся в поле, созданном электромагнитами или постоянными магнитами

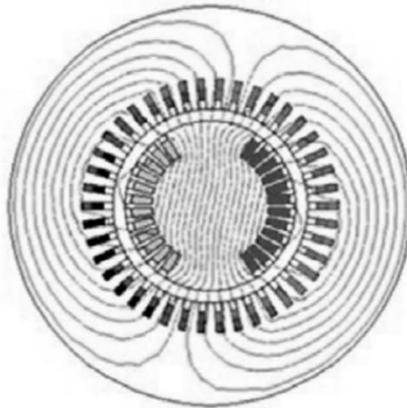


Рис. 4.11. Синхронная машина с электромагнитным возбуждением.

По 3-му принципу («Электромагнит притягивает/отталкивает постоянный магнит») работают СМ с возбуждением от постоянных магнитов (СМПМ). На Рис. 4.12 показана СМПМ, в которой при перемещении поля из положения «А» в положение «Б» изменяется взаимное положение возбужденных зубцов с обмотками, представляющих собой электромагниты, и трех постоянных магнитов, представляющих собой один полюс. В положении «А» сила притяжения в целом радиальная, а в положении «Б» - появляется тангенциальная компонента, т. е. реализуется принцип притяжения. Интересно, что в СМПМ с дробной обмоткой присутствуют как притягивания, так и отталкивания постоянных магнитов. Задача построения структуры обмотки такой машины – чтобы токи в пазах создавали направление поля в зубцах, соответствующему полю проходящих мимо пазов магнитов.

²⁴ Важно отметить, что силы, действующие на статор и ротор во многих случаях разного типа.

По 4-му принципу («Сила ампера, действующая на проводник с током») работают, в частности, СМППМ с беспазовой обмоткой (Рис. 4.13) и АМ со сплошным (или полым) ротором.

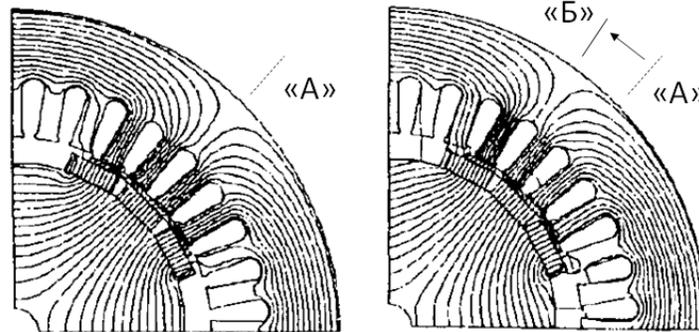


Рис. 4.12. Синхронная машина с ПМ.

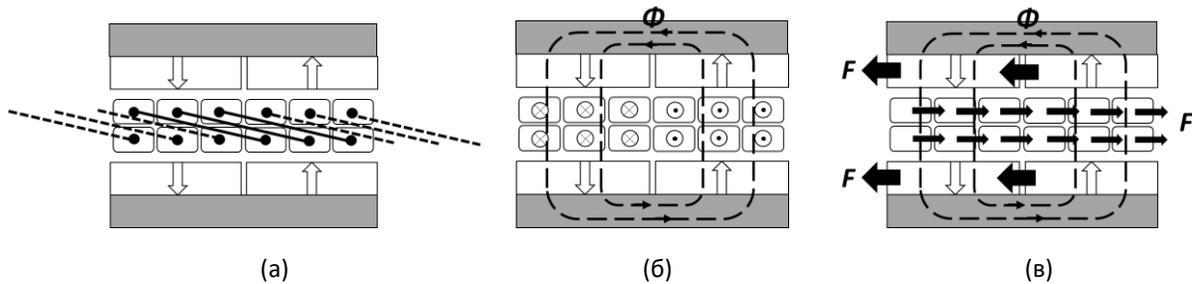


Рис. 4.13. СМППМ с беспазовой обмоткой: (а) структура обмотки, (б) распределение токов, (с) распределение сил.

Особый случай представляет собой асинхронная машина с короткозамкнутым ротором (АДКЗ). Часто принцип действия АДКЗ описывается следующим образом: трехфазная система токов статора создает вращающееся магнитное поле, которое пересекая замкнутые контура проводников обмотки ротора, индуцирует в них токи, которые в свою очередь, взаимодействуя с полем статора создают момент. Подразумевается, что принцип действия АДКЗ – действие сил Ампера на проводники обмотки ротора. В такой картине есть «нестыковка»: дело в том, что магнитное поле идет по ферромагнитным сердечникам ротора (как показано на Рис. 4.14,а), а не через пазы, таким образом, оно не пересекает проводники в пазу и проводники не могут взаимодействовать с полем статора. Интересное исследование было приведено в [4.7], где для анализа областей приложения тангенциальных сил используется идеализированная модель машины с прямоугольными зубцами. Результаты были получены следующие: без учета насыщения стали распределение тангенциальных сил, действующих на различные зоны паза, такое: на проводник с током – 3%, на границы зубца – 97%, на объем тела зубца – 0%. С учетом насыщения стали картина распределения меняется: на проводник с током – 34.4%, на границы зубца – 27.6%, на объем тела зубца – 37.9%. На основании этого исследования можно предложить более логичное описание принципа действия АДКЗ: многофазная система токов статора создает вращающееся магнитное поле, которое пересекает замкнутые контуры обмотки ротора, индуцируя в них токи – обозначим это как логический шаг 1.

Далее следует логический шаг 2 — индуцированные токи создают собственное поле (Рис. 4.14, б), данное поле накладывается на поле статора и результирующее поле может выглядеть как показано на Рис. 4.14, в. Таким образом, происходит «закручивание» токами ротора поля статора (Рис. 4.14, б), и результирующее поле создает полный момент, где приблизительно $1/3$ сил действует на стенку паза, $1/3$ — на проводник с током и $1/3$ — на тело зубца.

Результаты и выводы из [4.7] визуально подтверждаются распределением поля в машине из [4.6] показанном на Рис. 4.15:

- Когда машина работает с небольшой нагрузкой (56 Нм), магнитное поле не идет в пазы (Рис. 4.15,а), насыщения стали, очевидно, нет.
- При сильной перегрузке (560 Нм) из-за насыщения стали поле идет в пазы, при этом линии поля более растянуты в тангенциальном направлении (Рис. 4.15, б).

Отметим, что в пазах «бутылочной» формы распределение поля выглядит несколько отличо от упрощенной модели Рис. 4.14.

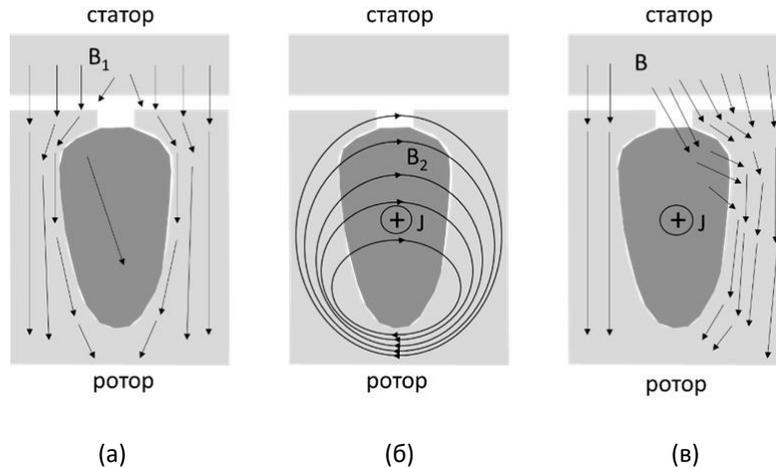


Рис. 4.14. Логика создания поля в роторе.

Далее сделаем несколько рискованное предложение: соседние зубцы, окруженные проводниками с током, между которыми протянулись линии магнитного поля, могут рассматриваться как электромагниты, притягивающие друг друга (Рис. 4.15, в).

Таким образом мы имеем «двухступенчатый» процесс (два вышеописанных логических шага) и смешанный принцип действия — «Электромагнит притягивает/отталкивает электромагнит» и «Сила ампера, действующая на элемент, несущий электрический ток». Особенности принципа действия АДКЗ также в том, что, машина несколько меняет принцип создания момента, переходя от режима пуска, когда высокие токи приводят к насыщению стали и силы приложены в основном к проводникам, в режим постоянной работы, так что можно сказать, что АДКЗ имеет «двухступенчатый», «смешанный» и «плавающий» принцип действия.

Объяснение принципа действия АДКЗ, вероятно может быть предметом отдельной дискуссии. В данной работе предложенное описание предназначено для обучения ИИ (отсюда важны два

логических шага). Задача ИИ при проектировании АДКЗ - выбрать правильные комбинации числа пазов статора и ротора и работающее распределение токов в каждый момент времени. Именно этому случаю стоит обучать ИИ, чтобы показать ИИ, что при создании сил в ЭМ возможны «многоходовые комбинации».

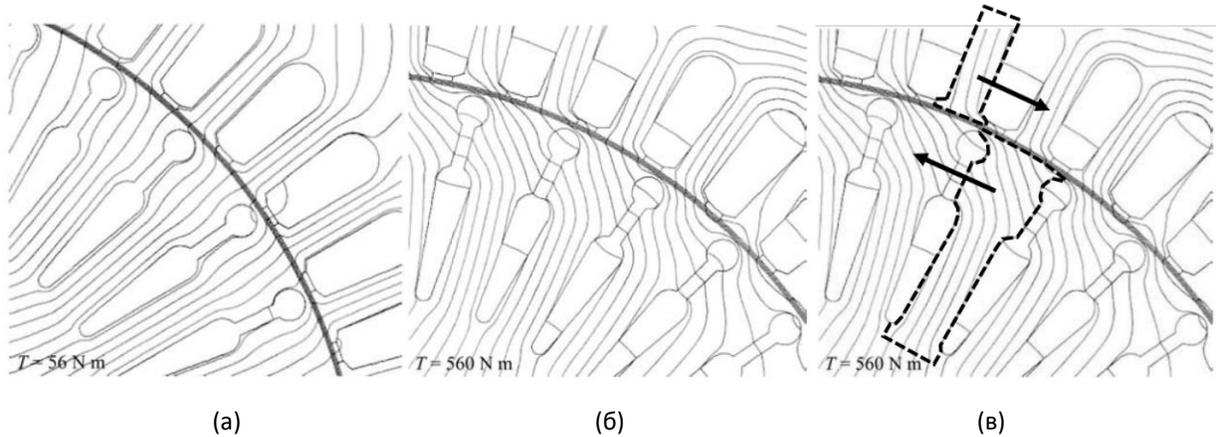


Рис. 4.15. Картины поля 4-полюсного АДКЗ мощностью 30 кВт [4.6].

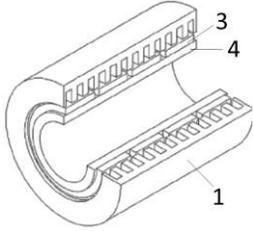
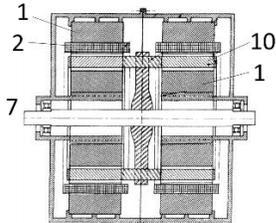
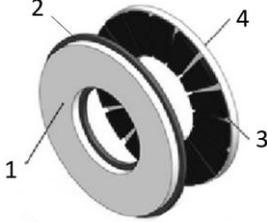
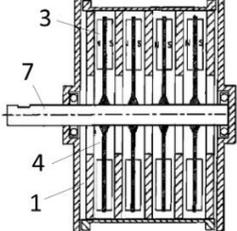
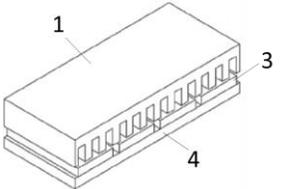
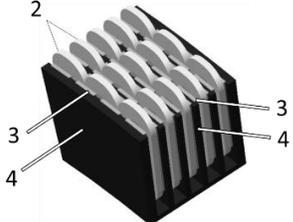
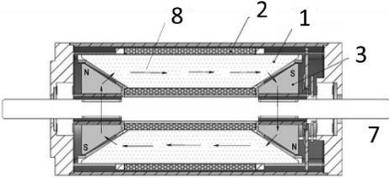
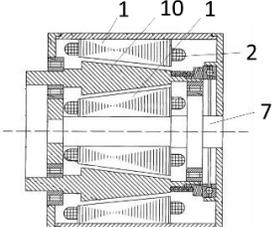
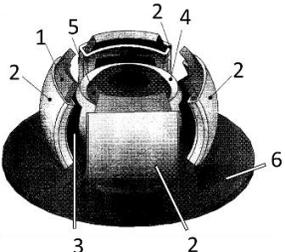
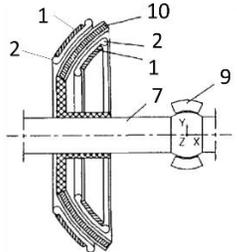
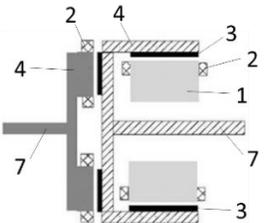
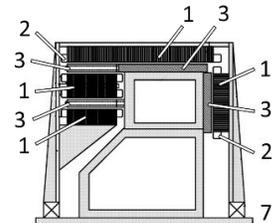
Важно отметить, что не все асинхронные машины имеют одинаковый принцип действия: если в АМ с КЗ ротором работает комбинация двух принципов – «Электромагнит притягивает/отталкивает электромагнит» и «Сила ампера, действующая на элемент, несущий электрический ток», то в АМ со сплошным/полым ротором проявляется только один принцип действия - «Сила ампера, действующая на элемент, несущий электрический ток».

В качестве примеров других машин стоит упомянуть, что в машинах постоянного тока действует та же комбинация двух принципов, но процесс создания момента – «одноступенчатый», поскольку ток ротора уже присутствует изначально. А вот в гистерезисном двигателе – двухступенчатый принцип работы (1-й шаг – намагничивание ротора, 2-й шаг – взаимодействие поля статора с намагниченным ротором).

Подводя итоги по данному (третьему) признаку классификации, скажем, что для обучения ИИ предложены четыре принципа создания сил/момента (Табл. 4.2), при этом могут присутствовать комбинации принципов, а в процессе работы могут происходить переходы между принципами или комбинациями принципов. Показывается, что есть машины с «одноступенчатым» принципом действия и «двухступенчатым».

Признак-4: «По пространственной конфигурации АЧ» и Признак-5: «По количеству пар АЧ». В Табл. 4.4 приведены варианты, отражающие комбинации сразу по двум признакам – 4 и 5. По пространственной конфигурации типы указаны в левом столбце таблицы. Количество пар АЧ соответствует количеству зазоров.

Таблица 4.4. Иллюстрации вариантов по признакам 4 и 5

Типы	с одним зазором	с двумя и более зазорами
Цилиндрические (вращающиеся и/или линейные)		
Дисковые		
Плоскостные (линейные или планарные)		
Конические		
Сферические + эллиптические		
Комбинированные (например, смесь цилиндрических и дисковых структур)		

Обозначения в таблице: 1 - Неподвижный сердечник, 2 – Обмотка, 3 - Постоянные магниты, 4 - Подвижный сердечник, 5 - Сферический чашеобразный подшипник, 6 – Основание, 7 – Вал, 8 - Путь магнитного потока, 9 – Шарнир, 10 - Подвижный сердечник с активными элементами.

Признак-6: «По расположению основного контура магнитного потока относительно плоскости зазора». Направление потока может определяться относительно плоскости зазора, разделяющего взаимодействующие АЧ. Если зазор неравномерный (из-за зубчатости) АЧ, то берется плоскость, проходящая между взаимодействующими АЧ, там, где зазор минимален. Плоскость зазора в случае вращающихся машин - искривленная – может соответствовать форме цилиндра, диска, конуса, сферы или иметь более сложную форму. В случае линейных и планарных машин плоскость не искривлена. Дополнительным пространственным ориентиром для определения направления потока является направления движения (перемещения АЧ друг относительно друга).

Проиллюстрируем расположение плоскости зазора для нескольких характерных конфигураций машин. Во всех случаях укажем направления движения. Самое распространенное расположение контура потока относительно плоскости зазора (П) - продольное (как для машины на Рис. 4.16,а). Контур потока лежит в той же плоскости, что и вектор направления движения (Н) – отсюда название данной конфигурации - «продольное».

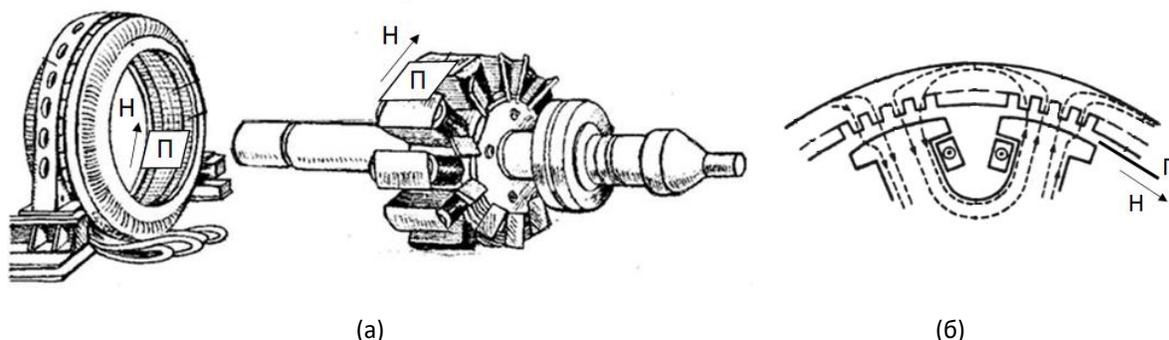


Рис. 4.16. Синхронная явнополюсная машина (П – элемент плоскости зазора, Н - направление движения).

Отметим, что расположение контура потока в общем случае не связано с пространственным расположением активных частей. Например, АЧ «дисковой» машины Рис. 4.17 может быть и линейной машиной.

Если есть выход за пределы цилиндра или границы диска, очерченных плоскостями зазора, то можно говорить о «латеральном выносе». Например, в машине на Рис. 4.18 контуры потока в значительной степени лежат в плоскости, перпендикулярной плоскости зазора и вектору направления движения. Контур потока также выходит за пределы области взаимодействия активных частей в латеральном направлении. Отсюда название расположения контура потока - поперечное с латеральным выносом.

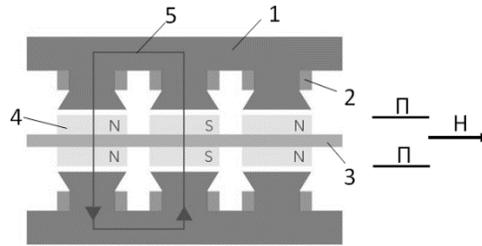


Рис. 4.17. СМПМ с аксиальным потоком (1 – сердечник статора, 2 - обмотки статора, 3 – сердечник ротора, 4 - магниты, 5 – контуры магнитных потоков).

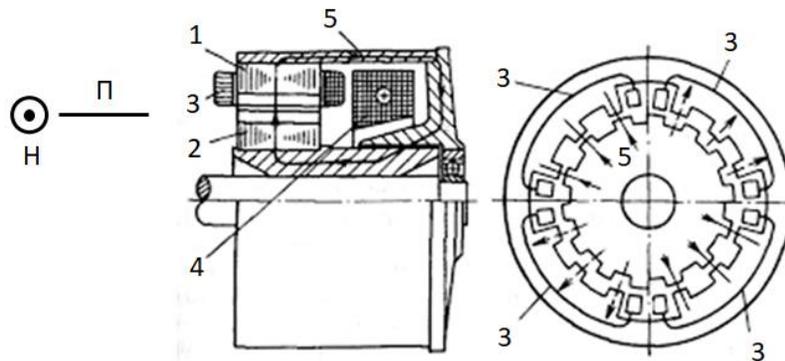


Рис. 4.18. Индукторная машина (1 – сердечник статора, 2 - сердечник ротора, 3 – обмотки якоря, 4 - обмотка возбуждения, 5 – контуры магнитных потоков).

На Рис. 4.19 показана машина со смешанным продольным и поперечным положением контура потока без латерального выноса. На Рис. 4.20,а показана машина с поперечным положением контура потока без латерального выноса. На Рис. 4.20,б показана машина со смешанным продольным и поперечным положением контура потока с латеральным выносом.

Итак, мы привели пять примеров, соответствующих основным вариантам классификации по признаку-б. Варианты расположения, следующие: продольное, поперечное, смешанное (продольное и поперечное). При этом расположение может быть без латерального выноса и с латеральным выносом.

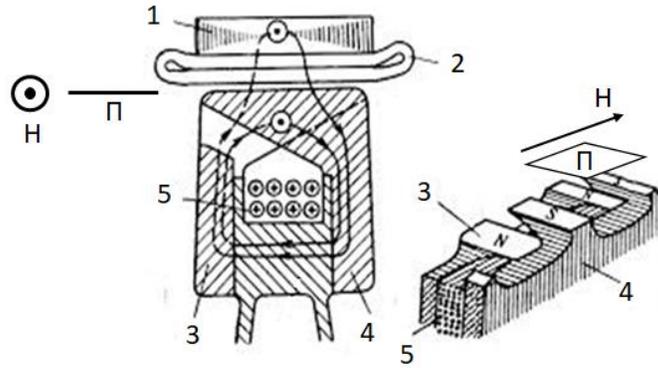


Рис. 4.19. Машина с когтеобразными полюсами (1 – сердечник статора, 2 - обмотка якоря, 3,4 – сердечники ротора с «когтями», 5 – обмотка возбуждения).

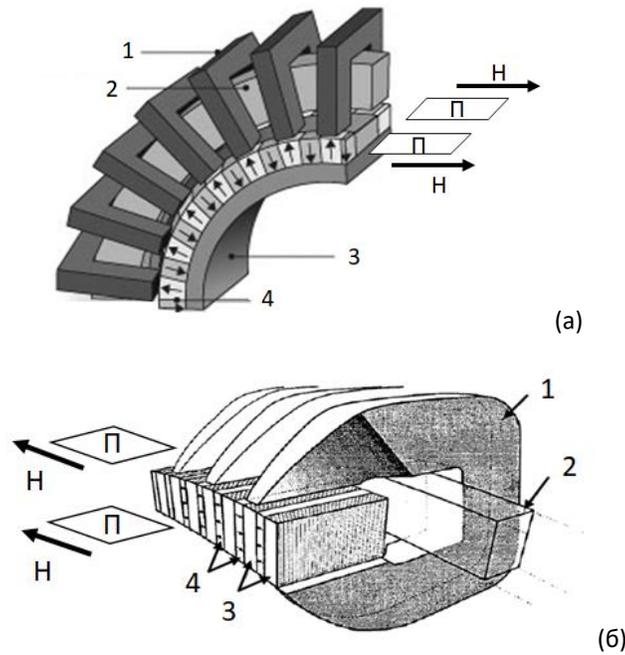


Рис. 4.20. Машина с поперечным потоком (1 – сердечник статора, 2 - обмотка возбуждения, 3 – ярмо ротора, 4 – магниты).

Интегрированные решения

Предложенная классификация описывает в том числе прочего пространственные конфигурации. Реализация любой из пространственных конфигураций требует специальных решений по несущей структуре, системе охлаждения и т. п. Как одно из направлений, интересны интегрированные решения. У машины может не быть собственного вала и подшипников. Например, на Рис. 4.21 показана концепция интеграции активных частей генератора в структуры ВЭУ (1 - несущая структура статора, 2 – активные части статора, 3 - несущая структура ротора, 4 – постоянные магниты на

роторе). В таком решении ЭМ использует вал и подшипники ВЭУ. Не только у машины, но даже у всего агрегата может не быть вала вообще. Например, у приливной турбины с интегрированным СГПМ на Рис. 4.22 нет вала, а специальные подшипники расположены на периферии ротора (1 - статор, 2 - ротор, 3 - лопасти, 4 – кожух).

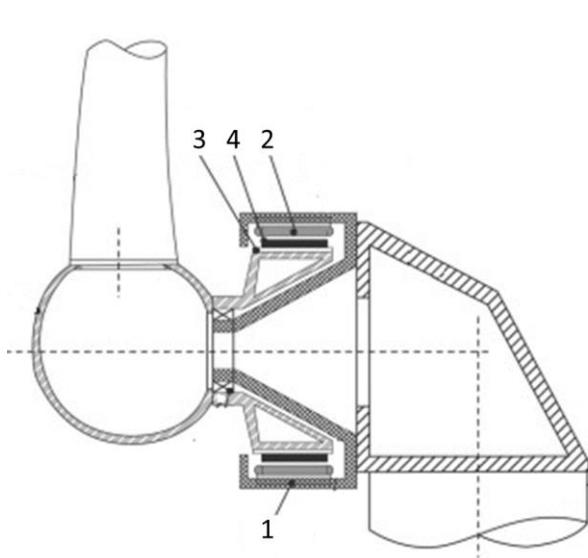


Рис. 4.21. ВЭУ.

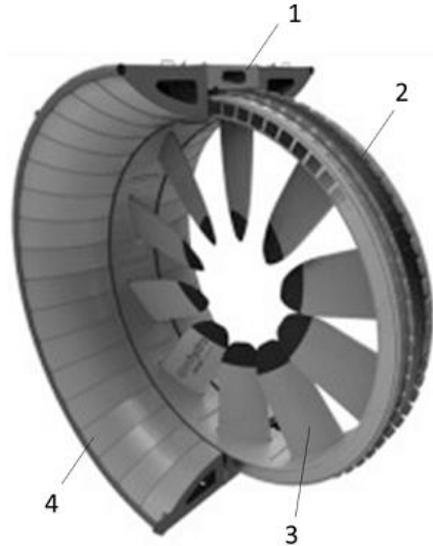


Рис. 4.22. Приливная турбина.

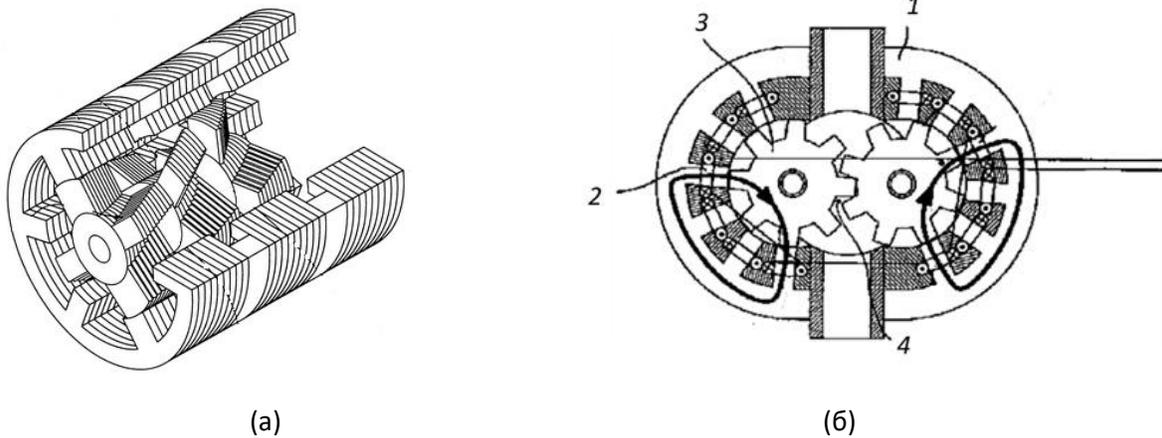


Рис. 4.23. Радикальная интеграция.

Можно привести пример еще более радикальной, максимальной интеграции. На Рис. 4.23 показаны решения, где зубцы ротора ВИД являются рабочими элементами (лопастями) насоса. На Рис. 4.23, а – [4.8] аксиальный насос. Рис. 4.23, б – [4.9] шестерёнчатый насос.

Связь знаний и полнота картины

При создании новой ЭМ нужна связность знаний и полнота картины. В [4.10] предложено использовать для приобретения, организации и передачи знаний совокупность логических блоков, графически описанных *пентаграммой* (Рис.4.24) – известным символом и геометрической фигурой.



Рис.4.24. Пентаграмма, адаптированная для изучения электрических машин.

Пентаграмма состоит из узлов и треугольников. Узлом может быть объект, процесс или физический эффект. Узлы обозначены литерами, например: «С - Силы», «И – Источники поля», «П – Потери». Треугольников – две группы; треугольники первой группы, расположенные в центре пентаграммы, обозначены цифрами: «1», «2» и так далее, треугольники второй группы – лучи пентаграммы – не имеют обозначений. Можно заметить, что треугольники первой группы имеют узлы в качестве вершин. Таким образом, объекты, процессы и эффекты оказываются объединенными в группы по три, которые можно назвать «тройками» или «триадами».

Основное содержание элементов, из которых состоят объекты изучения, соответствующее основным узлам пентаграммы, расположенных в центре пентаграммы и на пересечении ее линий, предложено в таблице 4.5.

Должны приобретаться не только знания, но и навыки, компетенции.

Таблица 4.5. Основные узлы пентаграммы и блоки знаний.

Узлы	Блоки знаний (пример)
(А) Активные части	Сердечники, проводники, изоляция, постоянные магниты. Топологии/схемы обмоток. Формы сердечников. Варианты пространственных конфигураций (по направлению магнитного потока через зазор): радиальные, аксиальные, линейные, планарные
(И) Источники электромагнитного поля	Варианты источников поля; проводники с токами, постоянные магниты. Характеристики магнитов. Основные конфигурации источников поля, направление токов и потоков. Как напряжения на терминалах создают токи
(С) Электромагнитные силы	Классификация по направлению: тангенциальные, радиальные, аксиальные силы. Места приложения сил. Классификация механизмов создания сил. Методы расчета по энергии и ко-энергии, тензору натяжения. Методы расчета полей и сил, например МКЭ
(П) Потери	Потери в сердечниках; на гистерезис, вихревые токи. Потери в проводниках; «АС» и «ДС» сопротивления. Потери в постоянных магнитах. Потери из-за высокочастотных эффектов от ПЧ. Механические потери
(О) Охлаждение	Водяное, воздушное, водородное, смешанное. Искусственное, естественное. Механизмы теплопередачи; радиация, конвекция, проводимость. Стандарты (IC). Влияние высоты над уровнем моря
(К) Несущие конструкции	Вал, подшипники, корпус, щиты. Варианты пространственных конфигураций несущих конструкций – соответствуют активным частям (Узел А). Пыле- и влаго-защищенность (IP54, ...). Варианты установки (B3, B5, ...)

В частности, при работе с материалом, соответствующем узлам (А) и (К), цель - понять свободу выбора любой пространственной конфигурации, оптимальной для заданного применения, уходя от стереотипа, что электрическая машина – это цилиндр с выступающим концом вала и клеммной коробкой сверху.

Следующий, и более сложный уровень – триады. Отметим, что в каждой из триад оказываются объекты или процессы, объединенные определенной логикой взаимозависимости. Можно сказать, что триады показывают объекты или процессы, между которыми связи – «сильные», в то время как связи между любыми двумя узлами пентаграммы, не принадлежащими к одной триаде – «слабые», или вообще отсутствуют.

Польза триад в том, что становится возможным усложнить взгляд на проблемы от уровня логики «элемент А влияет позитивно на элемент В» до уровня «элемент А влияет позитивно на элемент В, но при этом негативно влияет на элемент С». Например, от утверждения «выбор меньшей толщины ярма статора позволит снизить массу машины» - к утверждению «выбор меньшей толщины ярма статора позволит снизить массу машины, но при этом возрастут потери в стали». Оперировав несколькими соседними триадами, можно добавить к данной логической цепочке, что «также снизится КПД и возрастут вибрации». Таким образом вполне допустимо одновременное рассмотрение двух триад для построения более сложных логических цепочек. Именно понимание подобных взаимных связей характерно для опытных проектировщиков. Отметим также, что понимание связи трех элементов – не сложно для восприятия, поэтому триады, вероятно, -

оптимальный по размерности логический блок для передачи знаний. Содержание материала, соответствующее триадам пентаграммы для электрической машины предложено в таблице 4.6.

Таблица 4.6. Блоки знаний, соответствующие триадам.

Триады	Темы (пример)
(1) источники электромагнитного поля - активные части - электромагнитные силы	<i>Тема «Преобразование энергии и силы»</i> Варианты источников поля. Варианты направлений токов и магнитных потоков. Варианты структур активных частей. Показать, каким образом источники электромагнитного поля, расположенные в активных частях, создают электромагнитные силы, действующие на активные части машины. Создание движения: поле → силы → движение. Принципы действия машин (АД, ДПТ, СМ, ...) Варианты создания и приложения сил. Векторы и векторный анализ. Распределение сил, приложенных к активным частям. Преобразование энергии. Активная и реактивная мощность, коэффициент мощности, $\cos\phi$
(2) активные части – электромагнитные силы – несущие конструкции	<i>Тема «Силы, вибрации и шум»</i> Варианты несущих конструкций. Классы защиты. Варианты активных частей. Варианты приложения сил. Каким образом тангенциальные и радиальные силы влияют на выбор конструкций и размеров несущих структур. Каким образом силы создают вибрации и акустический шум. Каким образом структура и размеры несущих конструкций влияет на вибрации и акустический шум. Износ, время службы, наработка на отказ, надежность.
(3) активные части – системы охлаждения – несущие конструкции	<i>Тема «Машина как физический объект. Механическая конструкция»</i> Проектирование имея критерием минимальную стоимость, проектирование для автоматизированного производства. Интеграция системы охлаждения и несущих конструкций. Установка, наладка, обслуживание. Неисправности и ремонт Варианты пространственных конфигураций активных частей и несущих конструкций. Типы систем охлаждения. Классы защиты. Показать, что сложность и стоимость производства зависит от пространственной конфигурации активных частей, несущих конструкций и систем охлаждения. Обслуживание, ремонтпригодность.
(4) потери – активные части – системы охлаждения	<i>Тема «Генерация тепла и теплоотвод»</i> Потери и генерация тепла. Источники тепла и их распределение в активных частях. Варианты пространственных конфигураций активных частей. Механизмы теплопередачи; радиация, конвекция, проводимость. Тепловое поле. Тепловые нагрузки, старение изоляции, надежность, время службы элементов машины Повторно-кратковременные режимы работы. Типы потерь. Типы систем охлаждения. Компромиссы при проектировании

(5) источники электромагнитного поля – активные части – потери	<p><i>Тема «Энергоэффективность»</i></p> <p>Варианты источников поля. Варианты направлений токов и магнитных потоков. Варианты структур активных частей. Типы потерь. Источники поля и потери в активных частях. Энергоэффективность, КПД. КПД при неполных нагрузках. Компромисс: размер/вес и КПД (иллюстрация – на Рис.3)</p>
--	--

В частности, при работе с триадой (3), цель - найти, как взаимодействующие активные части (статор и ротор) могут в принципе охлаждаться, не фокусируясь только на одном или двух основных методов.

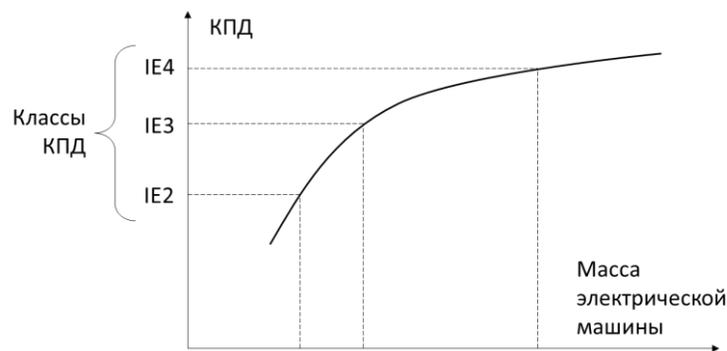


Рис.4.25. График зависимости массы машины от требования к КПД.

Триада (1) – особенная, поскольку она отражает интеграцию электрической машины в систему электропривода. Луч этой триады содержит несколько соответствующих узлов, необходимых для описания процесса формирования требуемой формы движения посредством формирования напряжений и токов, и передачи энергии на активные части машины.

Отметим, что триадам и лучам пентаграммы соответствуют следующие ключевые показатели качества, такие как:

1. Качество движения, динамика, точность
2. Электромагнитная совместимость
3. Вибрации
4. Акустический шум
5. Заложенное время службы машины
6. Вес и размеры
7. Стоимость
8. Надежность
9. Энергоэффективность

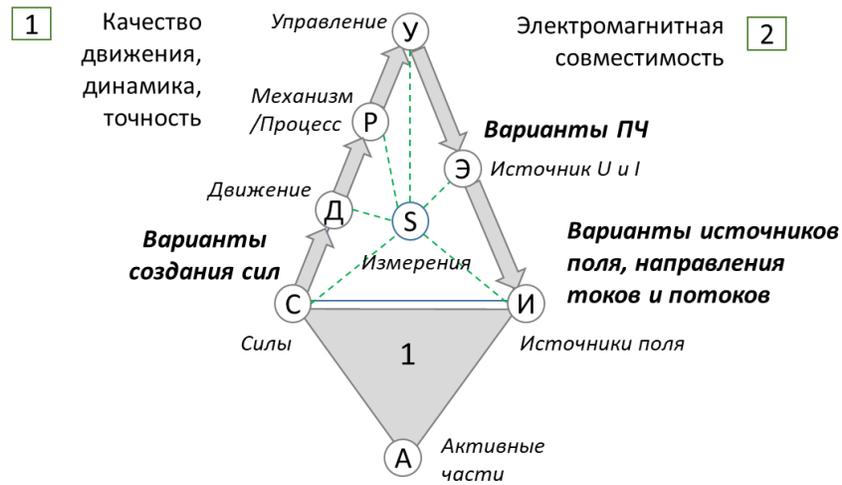


Рис. 4.26. Триада (1) и включение ЭМ в систему электропривода.

Пентаграмма как набор связанных логических блоков, описывает совокупность физических процессов, эффектов, их связей между собой и, в чем-то даже философию построения электротехнических устройств. Пентаграмма может также являться своеобразным навигатором и «напоминателем» для проектировщика. Для любой новой машины лучи Пентаграммы должны быть сбалансированы.

Использование пентаграммы для обучения

Пентаграмма может использоваться в учебном процессе, а не только при разработке и проектировании ЭМ. Процесс передачи знаний, организованный в соответствии с логическими блоками пентаграммы, становится более структурированным и понятным для изучающего предмет. Это можем иметь особенный положительный эффект при ограничении времени для передачи знаний определенного объема, например только одним семестром.

Ускорение темпа появления и внедрения новых технологий в современном мире требует изменений в области инженерного образования. Большой объем знаний требуется передавать за более короткое время. Таким образом, практически тот же набор знаний по традиционным электротехническим устройствам требуется передавать быстрее - за ограниченное количество лекций и семинаров.

Предполагается, что метод передачи знаний с помощью Пентаграммы будет более эффективным с точки зрения затраченного времени. Если мы принимаем Пентаграмму для обучения, то блоки знаний из таблиц 4.5–4.6 становятся темами лекций и семинаров.

В методике, поставлена задача консолидации всей необходимой информации и ставится достаточно амбициозная задача развития у студента широты кругозора профессионального

разработчика, которая обычно достигается за счет многолетнего опыта. При этом ставка делается, кроме прочего, на специфику восприятия графической информации, опираясь на принцип «один рисунок стоит тысячи слов». С самого начала четко определяется и показывается набор знаний, которые предстоит приобрести.

Стоит заметить, что пентаграмма, написанная одной линией (Рис. 4.27) – один из самых древних символов, который имел разные толкования в разные исторические периоды. Одно из толкований – символ магического воздействия и господства дисциплинированной воли над явлениями мира – вполне применимо к сфере науки и образованию, если его перефразировать как воздействие воли ученого на процессы в техносфере, в частности на процессы создания технических систем. Еще одно толкование пентаграммы – символ совершенного человека (Рис. 4.28) – также переключается с целью процесса образования. Есть ли здесь какая-либо связь с учениями древних или это простое совпадение – может быть предметом увлекательной дискуссии между преподавателем и студентами и привести к новым вопросам, например «указывает ли возможность использования пентаграммы для структурирования совокупности логических связей в электротехнических устройствах на взаимосвязь всех вещей на земле (в ноосфере)?» или «можно ли «приспособить» для целей обучения или проектирования другие древние символы?» или «каким образом стихии («земля», «воздух» и т.д.) классической пентаграммы на Рис. 4.28 соответствуют содержанию лучей пентаграммы на Рис. 4.24?»



Рис. 4.27. Пентаграмма, написанная одной линией

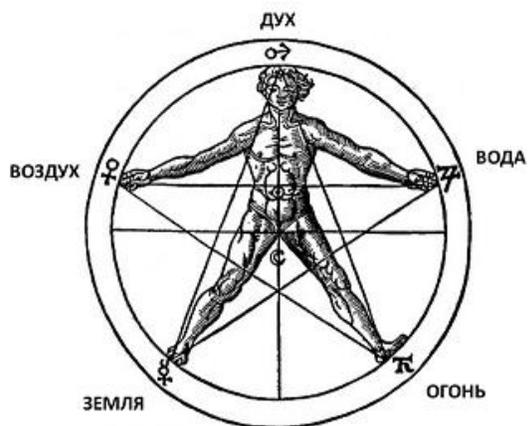


Рис.4.28. Пентаграмма со стихиями и совершенным человеком

Заключительные комментарии к Главе 4

В данной главе предложено, по сути, сделать шаг в 19 век – во времена даже до Теслы и Доливо-Добровольского, чтобы «пересобрать» мир электромеханики. Пиктограммы и кодовые описания могут быть новыми средствами языка на стыке человек-машина. ИИ надо будет научить произносить первые слова и делать первые шаги - как ребенка, затем он, вероятно, превзойдет своих создателей. Также ИИ надо «показать» пространство вариантов, которое он уже сам

«освоит». Что касается изобретателей, то им важно понимать, что является «базовыми строительными блоками ЭМ, чтобы собирать из них что-то новое.

Возможно, читатель не согласится с некоторыми из предложенных признаков классификации или с подходом в целом. Данную концепцию следует рассматривать как приглашение к дискуссии о смене парадигмы в области классификации ЭМ.

Литература к главе 4

- [4.1] Barmada S., et al. Deep Learning and Reduced Models for Fast Optimization in Electromagnetics. – IEEE Transactions on Magnetics, 2020, vol. 56, No. 3, 7513604, DOI: 10.1109/TMAG.2019.2957197.
- [4.2] Sasaki H., Igarashi H. Topology Optimization Accelerated by Deep Learning. – IEEE Transactions on Magnetics, 2019, vol. 55, No. 6, 7401305, DOI: 10.1109/TMAG.2019.2901906.
- [4.3] Gabdullin N., Madanzadeh S., Vilkin A. Towards End-to-End Deep Learning Performance Analysis of Electric Motors. – Actuators, 2021, 10 (2): 28, DOI:10.3390/act10020028.
- [4.4] Копылов И.П. Электрические машины. М.: Энергоатомиздат, 1986, 360 с.
- [4.5] Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. М.: Издательский дом МЭИ, 2004, 534 с.
- [4.6] Pyrhoenen J., Jokinen T., Hrabovcova V. Design of rotating electrical machines. - John Wiley & Sons, 2008, 612 p.
- [4.7] Иванов-Смоленский А.В. Электромагнитные силы и преобразование энергии в электрических машинах. М.: Высшая школа, 1989, 312 с.
- [4.8] Yang Sheng-Ming et al, “Switched reluctance motor with axial flow pump function”, патент TWI305973B.
- [4.9] Hatsuda Tadayuki, “Reluctance motor integrated type pump”, патент JPH11280664A.
- [4.10] А.В. Матвеев, Использование пентаграммы для структурирования процесса изучения электротехнических устройств, Электричество, № 2, 2020, стр. 10-17.

Глава 5. Инструментарий решения изобретательских задач в области ЭМ

Теория решения изобретательских задач и электромеханика

Одна из целей данной книги – повысить инновационную активность специалистов и качество предлагаемых решений. Ценность инноваций на уровне изобретений – очевидна, поэтому задача увеличения их количества более чем актуальна. Одна из популярных методологий для поиска новых решений - Теория Решения Изобретательских Задач (ТРИЗ), созданная Г.С. Альтшулером [5.1], [5.2]. Классическая ТРИЗ базируется на следующих постулатах [5.3]:

- Техника, её объекты развиваются в целом закономерно.
- Закономерности развития техники познаваемы и могут быть использованы для поиска новых технических решений.
- Процесс поиска нового решения можно описать в виде последовательности интеллектуальных, мыслительных действий.

В ТРИЗ создан информационный фонд, включающий в частности:

- приёмы устранения противоречий и таблицы их применения,
- базы физических, химических и прочих эффектов и способы их использования,
- способы использования ресурсов природы и техники.

Современная ТРИЗ включает список из 40 основных приёмов устранения противоречий. Эти приёмы показывают лишь направление и область, где могут быть сильные решения. Конкретный же вариант решения они не выдают. Эта работа остаётся за человеком.

Ниже мы попытаемся продемонстрировать возможности ТРИЗ в области электромеханики, показать сопутствующие сложности и пути их преодоления. Задача не тривиальна по ряду причин, приведенных ниже.

По определению, приведенному в [5.4], ТРИЗ – эмпирическая, конструктивная, качественная, универсальная методология генерации эффективных идей и разрешения проблем на основе моделей противоречий и методов их разрешения, экстрагированных из известных примеров эффективных решений. Можно дать дополнительные уточнения: ТРИЗ является *конструктивной* методологией, поскольку содержит практически воспроизводимые модели и методы, позволяющие изобретать новые эффективные решения и обучать процессу, моделям и методам создания эффективных идей. ТРИЗ является *качественной* методологией, поскольку ее модели и методы имеют характер рекомендаций, основанных на подобии качественных (в отличие от количественных) свойств моделей для преобразуемых или вновь создаваемых объектов, и не основанных на строгой математической аксиоматике и на математических правилах вывода следствия (решения) из некоторых исходных данных. Итак, ТРИЗ – не математическая, количественная теория, а качественная методология. Формальные понятия, концепты теории, имеют характер категорий, образов, метафор. Многошаговые процедуры ТРИЗ, применяемые для решения задач, называются алгоритмами.

Электромеханика — раздел электротехники, технической науки, которая изучает применение электрических и магнитных явлений для практического использования. Электромеханика опирается, в первую очередь, на понятия и аппарат физики и математики. В Электромеханике, как практически в любом подразделе инженерной науки - используется специализированная терминология. Например, компактность машин описывается (формализуется) такими параметрами как «удельная мощность», «удельный момент», эффективность преобразования энергии – КПД. Среди эксплуатационных характеристик – такие параметры как «уровень акустического шума», «наработка на отказ». Эти термины и многие другие термины Электромеханики не используются в классической ТРИЗ.

Язык науки электромеханики требует максимальной определенности и точности, в то время как для применения ТРИЗ также важны гибкость, образность и метафоричность. Таким образом, сложность и нетривиальность задачи применения ТРИЗ в области ЭМ состоит в различиях в языке и способе мышления ТРИЗ и электромеханики.

ТРИЗ оперирует противоречиями: административными, техническими, физическими. *Административное противоречие* (АП) возникает, когда необходимо что-то сделать, но неизвестно каким способом. АП звучит так: «*надо улучшить систему, но я не знаю, как сделать это*». Например: «*необходимо сохранить высокие значения параметра доступности²⁵ генератора ВЭУ при увеличении мощности в 10 раз с 1 до 10 МВт, но непонятно как, ведь быстро отремонтировать такой большой генератор в случае выхода из строя не просто*» или «*желательно измерять вибрации корпуса машины, но соединение датчика вибрации с системой мониторинга сигнальным кабелем – слишком сложно*».

Техническое противоречие (ТП) описывается следующим образом: **если** известными способами улучшить одну часть (или один параметр) технической системы, недопустимо ухудшится другая часть (или другой параметр), т. е. «**улучшение одного параметра системы приводит к ухудшению другого параметра**». Более строгая формулировка, применяемая в данной работе следующая: ТП – двухфакторная модель, в которой первый фактор соответствует и содействует главной полезной функции системы («плюс-фактор»), а другой фактор не соответствует или противодействует этой функции («минус-фактор»).

Композиционное противоречие (КП) – это совокупность нескольких ТП, сформулированных для одной задачи. Определение *физического противоречия* (ФП) будет дано ниже в одном из примеров.

Использование ресурсов при решении задач в области ЭМ

Ресурсом в ТРИЗ называют все, что может быть использовано для решения задачи или развития системы. Существуют ресурсы времени, пространства, энергии, вещества, информации и т. д. Ресурсы обладают рядом свойств, приведенных ниже в порядке от более благоприятных для решения задачи к менее благоприятным:

- Ценность: бесплатный → недорогой → дорогой
- Качество: вредный → нейтральный → полезный

²⁵ Англ. Availability.

- Количество: неограниченный → достаточный → недостаточный
- Готовность к применению: готовый → изменяемый → создаваемый

Прокомментируем, что использование какого-либо вредного ресурса, когда вредный эффект исчезает, является идеальным решением.

Покажем подход к определению наличных ресурсов на примере задачи с подводным двигателем. Формулировка задачи, следующая: соединить обмотки сегментов статора двигателя в единую обмотку таким образом, чтобы «соединения» были надежны и долговечны под водой, при этом конструкция была разборной (Рис. 5.1) и ее производство роботизировано.

Таблица 5.1. Ресурсы системы подводного двигателя.

Системо-технические ресурсы	Системные	Относящиеся к общесистемным свойствам	Эффективность, производительность, надежность, безопасность, живучесть, долговечность и др.	Ничем из перечисленного пожертвовать нельзя
	Информационные	Относящиеся к передаче сигналов, несущих сообщения	Достоверность, помехоустойчивость, точность, полнота, методы и эффективность кодирования, способы и параметры сжатия данных и т.п.	Датчики температуры, влажности?
	Функциональные	Относящиеся к созданию функций	Назначение (главная полезная функция), вспомогательные функции, негативные функции, описание принципа действия (функциональная модель)	«++» движение «+» ... «-» нагрев, ...
	Структурные	Относящиеся к составу объекта	Перечень компонентов и связей между компонентами, виды структур (линейные, разветвляющиеся, параллельные замкнутые и т.п.)	В оперативной зоне: катушки, коннекторы,
Физико-технические ресурсы	Временные	Относящиеся к оценкам времени	Частота событий, длительность интервалов времени, упорядочение событий во времени, величина запаздывания/опережения	Последовательность сборки/разборки
	Пространственные	Относящиеся к геометрическим свойствам	Форма объекта, размеры – длина, ширина, высота, диаметр и т.д., особенности формы – наличие пустот, наличие выступов и т.д.	С размерами и особенностями формы можно «поиграть»
	Вещественные	Относящиеся к свойствам материалов	Химический состав, физические свойства, специальные инженерно-технические свойства	Масло и его состав
	Энергетические	Относящиеся к свойствам энергии и ее проявлений	Виды применяемой и учитываемой энергии, включая механические силы, гравитационные, тепловые, электромагнитные и т.д.	Магнитное поле, электрическое поле, движение воды и пропеллера, тепло от активных частей, электрический ток

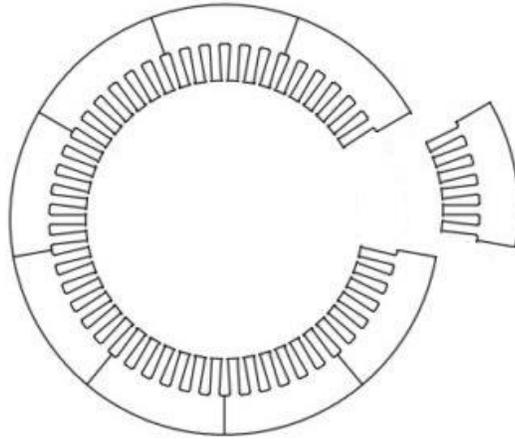


Рис. 5.1. Статор, состоящий из сегментов.

Пример работы с пространственным ресурсом рассматривается в [5.5] где описано создание улучшенного ротора синхронного двигателя с пусковой клеткой. Полюс ротора показан на Рис. 5.2. Ключевым моментом предлагаемого решения оказывается переход от пропитки лаком к пропитке эпоксидным компаундом.

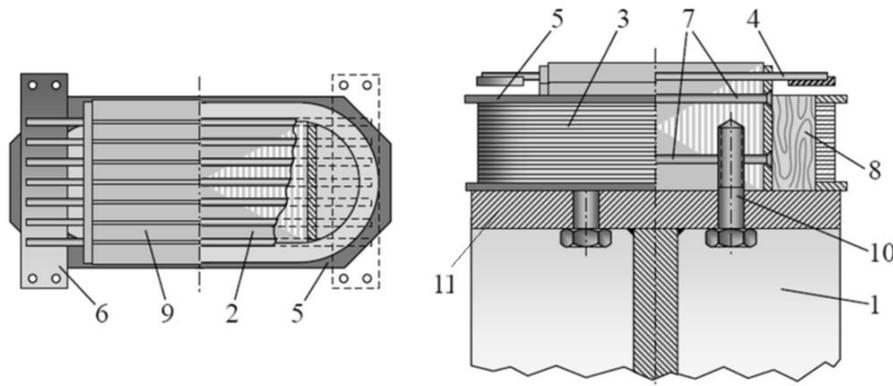


Рис. 5.2. Полюс ротора (1 – остов ротора, 2 – сердечник полюса, 3 – рабочая катушка, 4 – пусковая катушка, 5 – изоляционная шайба, 6 – сегмент, 7 – шпильки, 8 – клин, 9 – башмак, 10 – болт, 11 – обод магнитного колеса).

Эпоксидный компаунд по сравнению с лаком обладает повышенной механической и электрической прочностью, а также более высокой адгезией. Функция клина и обода «удерживать катушку» в новых условиях становится ненужной, т. к. катушка к сердечнику прочно приклеена компаундом. Благодаря пропитке катушка становится прочной и поддерживать ее нет необходимости. Поэтому обод с обеих сторон можно обрезать. Это значительно снижает его вес и затраты на материал. Клин можно не использовать. При устранении клина и части обода появляется ресурс: «пустое пространство» (Рис.5.3).

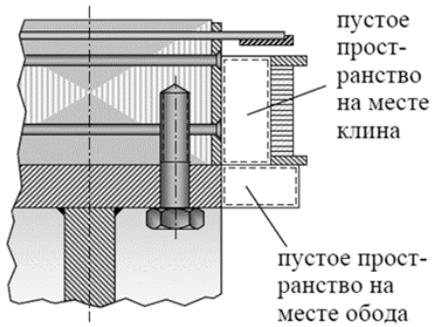


Рис. 5.3. Ресурс «пустое пространство».

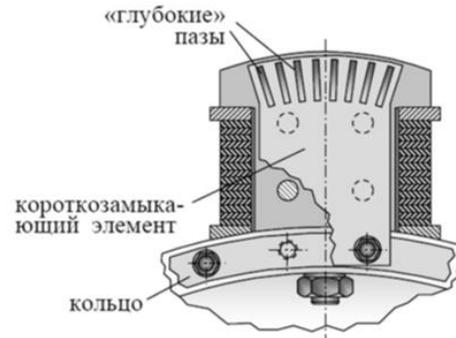


Рис. 5.4. Полюс с новыми элементами.

Образовавшийся сквозной канал – открывает внутреннюю поверхность рабочей катушки, что увеличивает ее обдуваемую площадь. Но самое главное, в канале можно разместить короткозамыкающие элементы пусковой обмотки (Рис. 5.4). В новом полюсе короткозамыкающие элементы размещены внутри рабочей обмотки, поэтому «глубокие» пазы впервые за время существования машин такого типа можно выполнять беспрепятственно. Пусковой момент при этом должен увеличиться не менее чем на 25%. На это решение было получено авторское свидетельство на изобретение SU1451802A.

Проанализируем использованный пространственный ресурс с точки зрения ранее упомянутых свойств:

- ценность: бесплатный (было достигнуто даже снижение использования материалов клина и обода),
- качество: нейтральный,
- количество: достаточный,
- готовность к применению: создаваемый (пространство было создано при устранении клина и части обода).

Физические и химические эффекты в ЭМ

В ТРИЗ использованию эффектов и явлений отводится особая роль. Считается, что их применение позволяет получить наиболее сильные решения. В большей степени в ЭМ могут использоваться физические и химические эффекты. Количество эффектов исчисляется тысячами. Под физическим эффектом понимается процесс, действие по преобразованию входной физической величины в выходную физическую величину. Физические изменения обратимы и не изменяют химических свойств данного объекта. Химические эффекты в ТРИЗ определяется следующим образом: изменяется только молекулярная структура веществ, а набор полей ограничен в основном полями концентрации, скорости и тепла. Химические изменения необратимы и изменяют химические свойства данного объекта.

В Приложении 7 собраны эффекты, которые имеют место (или могут иметь место) в ЭМ. Список не полный и рекомендуется изучить специальные справочники по физическим и химическим эффектам. Стоит заметить, что эффекты могут действовать совместно и одни эффекты (более фундаментальные) могут приводить к появлению других. Пример с рядом известных эффектов, являющихся производными от электромагнитной индукции показан на Рис. 5.5.

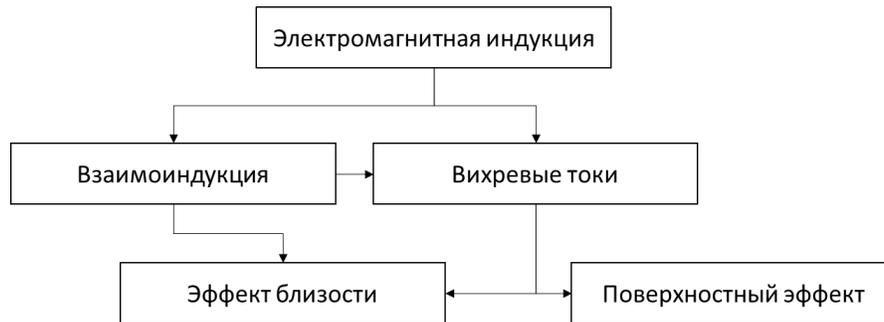


Рис. 5.5. Эффекты, производные от электромагнитной индукции.

Примечательно, что роль физических и химических эффектов в жизненном цикле ЭМ проявляется неравномерно. При производстве машины используются как физические эффекты, связанные в основном с изменением формы материалов (штамповка, резка, литье), так и химические (полимеризация компаундов при пропитке и консолидации обмотки), а также физико-химические (сварка, пайка). При эксплуатации машины в основном имеют место физические эффекты (электромагнитная индукция и ее производные, расширение при нагреве, теплопередача и т. д.). Предполагается, что в идеале химические эффекты вообще не должны присутствовать, но, к сожалению, процессы старения ЭМ имеют химическую природу (окисление, коррозия и пр.), и они имеют место, причем со временем их роль возрастает. По достижению предельного срока службы, если машина идет в переработку, то на этом этапе жизненного цикла будут использованы в основном физические эффекты (резка, плавление), если же машины просто выбрасывается, то – химические (коррозия, распад).

Математические (в первую очередь геометрические) и биологические эффекты, также используемые в ТРИЗ, вероятно менее применимы в области электромеханики, хотя некоторые примеры найти можно. На Рис. 5.6 показано решение для повышения заполнения паза статора медью. Используется специальная форма катушек обмотки – катушки разделены на две группы с разной формой, при этом поперечное сечение катушек независимо от формы – постоянное. Решение построено на использовании определенных геометрических пропорций.

Решением задачи может быть устранение какого-то эффекта.

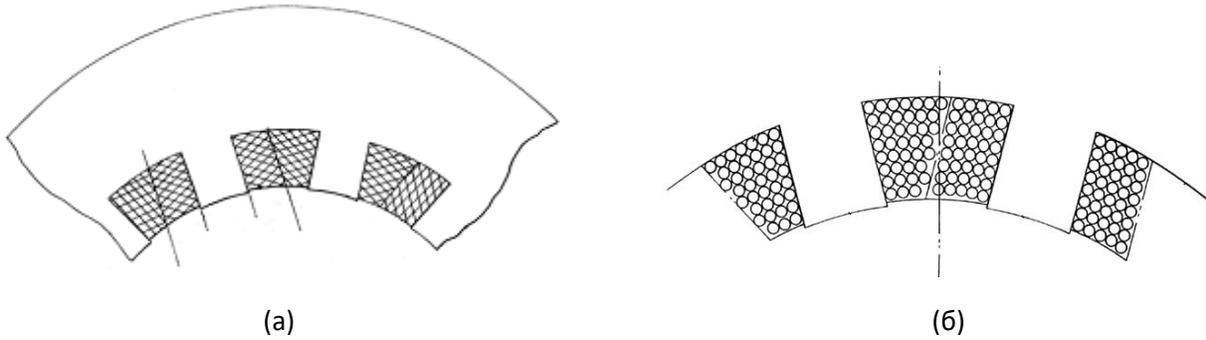


Рис. 5.6. Катушки разной формы в пазах статора: (а) общая форма, (б) детали расположения отдельных витков.

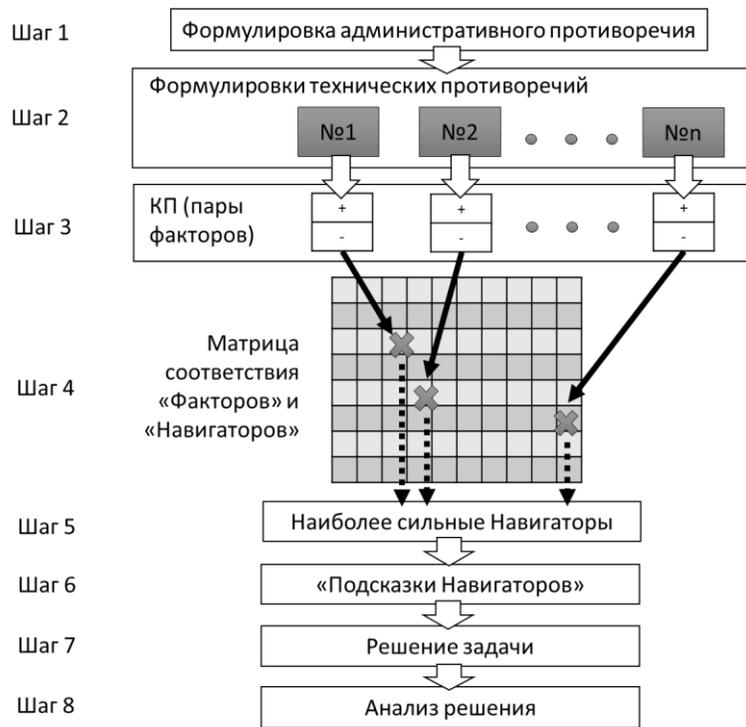


Рис.5.7. Алгоритм с использованием композиционных противоречий.

Применение метода композиционных противоречий ТРИЗ для поиска новых решений в области электрических машин

Следует также определить понятия *Факторов* и *Навигаторов*. Факторы – свойства или параметры системы, которые могут улучшаться или ухудшаться при изменениях системы. Навигаторы – указатели приемов решения задач (см. Приложение 6). Факторы и Навигаторы связаны «Матрицей соответствия» (см. Приложение 5). Числовые значения в Матрице соответствия приводятся по [5.4],

важно отметить, что в другой литературе по ТРИЗ числа в Матрице и нумерация Навигаторов могут отличаться.

Алгоритм применения метода композиционных противоречий ТРИЗ состоит из восьми шагов (Рис. 5.2):

- Шаг 1. Сформулировать административное противоречие (этот шаг можно пропустить, хотя попытка сформулировать задачу, особенно сформулировать по-разному – очень полезна для более глубокого понимания)
- Шаг 2. Дать несколько альтернативных формулировок ТП
- Шаг 3. Определить пары Факторов, соответствующих формулировкам Шага 2 (На шагах 2-3 формулируется КП)
- Шаг 4. Найти числа, указывающие на Навигаторы по Таблице 2
- Шаг 5. Выбрать наиболее сильные из найденных Навигаторов
- Шаг 6. Выписать «Подсказки Навигаторов»
- Шаг 7. Найти один или несколько вариантов решения задачи
- Шаг 8. Провести анализ решения с позиций ТРИЗ

Покажем применение метода на трех примерах.

Пример 1. Рассмотрим две задачи, относящиеся к электрической изоляции, имеющие одно и то же возможное решение:

Задача 1А. Изоляция силовых кабелей (Рис. 5.8) может изнашиваться по причине механических воздействий, что может привести к пробое изоляции и короткому замыканию, при этом, если увеличить толщину изоляции для снижения негативного эффекта механических воздействий это приводит к ухудшению отвода тепла, образующегося из-за потерь в меди кабеля.

Задача 1Б. Изоляция обмоток высоковольтных электрических машин – часто многослойная и толстая (Рис. 5.9), это приводит к ухудшению отвода тепла, образующегося из-за потерь в меди и, как следствие, к закладыванию увеличенных размеров машины на этапе проектирования для снижения потерь и улучшения теплоотвода.

На Рис. 5.8 показаны основные элементы структуры кабеля напряжением 110-220 кВ, где 1 – изоляция из сшитого полиэтилена, 2 – секционированная медная жила. На Рис. 5.4 представлено сечение пазовой части стержневой обмотки генератора на напряжение до 27 кВ, где 1, 2 – изолированные сплошные и полые элементарные проводники, 3 – поверхности изоляции, 4 – корпусная изоляция. Отметим, что полые прямоугольные шины в примере на Рис. 5.4 охлаждаются путём прокачивания хладагента через них, т.е. толщина наружной изоляции при таком типе внутреннего охлаждения решающего значения не имеет, в то время как для конструкций обмоток без прокачивания хладагента именно толщина изоляции будет определять тепловое состояние обмотки.

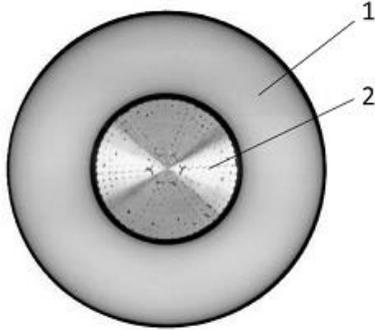


Рис. 5.8. Сечение кабеля.

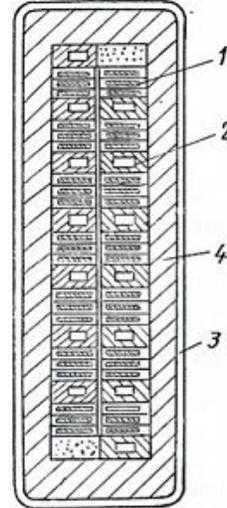


Рис. 5.9. Сечение обмотки ЭМ.

В соответствии с алгоритмом на Рис. 5.7 сначала приведем формулировку задачи в виде административного противоречия (АП) (*Шаг 1*):

Задача 1А. АП: требуется, чтобы кабель служил дольше, при этом потери в нем были бы ниже.

Задача 1Б. АП: требуется, чтобы обмотка ЭМ служила дольше, при этом потери в ней были бы ниже.

На следующих шагах (2, 3 и 4) приведем формулировки задачи в виде технических противоречий, а также выберем Факторы и Навигаторы. Пройдем шаги 2-4 столько раз, сколько будет формулировок.

Формулировка №1: (*Шаг 2*) требуется чтобы кабель (или обмотка), который подвергается механическим (электрическим) воздействиям, служил долго, но при этом в процессе работы не получается вовремя определять его износ и появляющиеся дефекты, которые могут привести к пробоям.

Шаг 3 – выбор пар факторов:

- Фактор, соответствующий и содействующий главной полезной функции системы («плюс-фактор»): время службы кабеля (или обмотки)
- Фактор, не соответствующий или противодействующий этой функции («минус-фактор»): невозможность проконтролировать путем измерений или как-либо еще состояние изоляции кабеля (или обмотки)

Шаг 4 - выбор Навигаторов по Приложению 5:

Наиболее подходящие Факторы ТРИЗ		Соответствующие Навигаторы
Плюс-фактор	24. Время действия неподвижного объекта	29 (Самообслуживание), 15 (Отброс и регенерация частей), 20 (Универсальность), 01 (Изменение агрегатное состояния)
Минус-фактор	08. Сложность контроля и измерения	

Дополнительно дадим трактовки Факторов ТРИЗ для применения в электромеханике, которые могут добавляться в «словарь ТРИЗ-Электромеханика»:

- Трактовки фактора 24 (Время действия неподвижного объекта) в контексте ЭМ: время службы, бесперебойной работы части/элемента/компонента ЭМ.
- Трактовки фактора 08 (Сложность контроля и измерения) в контексте ЭМ: сложность детектирования дефектов, в т. ч. механических повреждений, изоляции.

Продедаем аналогичные операции (*шаги 2-4*) для еще двух формулировок ТП:

Формулировка №2: можно попытаться повысить надежность изоляции, увеличивая ее толщину, но при этом ухудшается охлаждение, возрастает температура в меди и электрические потери.

- «Плюс-фактор»: надежность изоляции кабеля (или обмотки)
- «Минус-фактор»: дополнительные потери энергии в кабеле (или обмотке)

Наиболее подходящие Факторы ТРИЗ		Соответствующие Навигаторы
Плюс-фактор	4. Надежность	02 (Предварительное действие), 28 (Подложенная подушка), 01 (Изменение агрегатное состояния)
Минус-фактор	39. Потери энергии	

- Трактовки фактора 4 (Надежность) в контексте ЭМ: надежность работы части/элемента/компонента ЭМ.
- Трактовки фактора 39 (Потери энергии) в контексте ЭМ: потери (электрические и пр.) в элементах машины.

Формулировка №3: можно увеличить прочность изоляции, увеличивая ее толщину, но при этом ухудшается охлаждение, возрастает температура в меди и электрические потери.

- «Плюс-фактор»: электрическую и механическую прочность изоляции кабеля (или обмотки)
- «Минус-фактор»: дополнительные затраты энергии на потери в кабеле (или обмотке)

Наиболее подходящие Факторы ТРИЗ		Соответствующие Навигаторы
Плюс-фактор	28. Прочность	01 (Изменение агрегатное состояния)
Минус-фактор	38. Затраты энергии неподвижным объектом	

- Трактовки фактора 28 (Прочность) в контексте ЭМ: прочность изоляции
- Трактовки фактора 38 (Затраты энергии неподвижным объектом) в контексте ЭМ: снижение КПД, увеличение потерь (электрические и пр.) в элементах машины.

Итак, в итоге трех альтернативных формулировок мы получаем композиционное противоречие: {(+24/-08); (+04/-39); (+28/-38)}.

Шаг 5. Выберем наиболее сильные Навигаторы. Принцип выбора: либо количество появлений Навигатора в различных формулировках, либо порядок в ячейке из Приложения 5. В нашем случае получаем: 01 (три появления), 02, 29, 15, 28.

Шаг 6. Выпишем «Подсказки Навигаторов» таким образом, чтобы получалась, как бы рассказанная история о возможном решении:

- «29. Самообслуживание» – изоляция сама предотвращает пробой или ремонтирует дефекты
- «28. Заранее подложенная подушка» – в изоляции есть что-то, что срабатывает при эскалации проблемы и предотвращает пробой
- «01. Изменение агрегатное состояния» – в изоляции есть элемент (возможно, являющийся «заранее подложенной подушкой»), изменяющий свое агрегатное состояние при пробое
- «02. Предварительное действие» - следует разместить эту «подушку» заранее
- «15. Отброс и регенерация частей» - происходит регенерация поврежденных частей

Далее требуется только полет мысли, интуиция, озарение.

Шаг 7. Решение:

Основная идея решения состоит в том, чтобы начинать «самолечение» изоляции на стадии развития электрического пробоя или при механическом повреждении. Решение проиллюстрировано Рис. 5.10. В предпробойном состоянии в полимерной матрице изоляции появляются микро-каналы (3), разрастание которых из микропустот (2) в направлении электрического поля (1) в большинстве случаев приводит к быстрому электрическому пробое. В предложенном решении в матрицу предварительно внедряются микрокапсулы с заживляющим агентом (4), находящемся в жидком состоянии, и микрокапсулы с катализатором (5), при контакте с которым заживляющий агент переходит в твердое состояние. Предполагается, что тепла и механических сил, действующих на кончиках разрастающихся каналов, будет достаточно, чтобы расколоть (6) капсулу с заживляющим агентом, оказывающуюся на пути канала, и высвободить агент, который втекает в каналы и заполняет их. Внутри каналов при контакте с катализатором заживляющий агент начинает затвердевать, предотвращая разрастание каналов (7).

Реализация решения потребует исследований в области химии полимерных материалов. Существует, в частности патентная заявка Siemens [5.6], описывающая применение подобного решения в изоляции ЭМ.

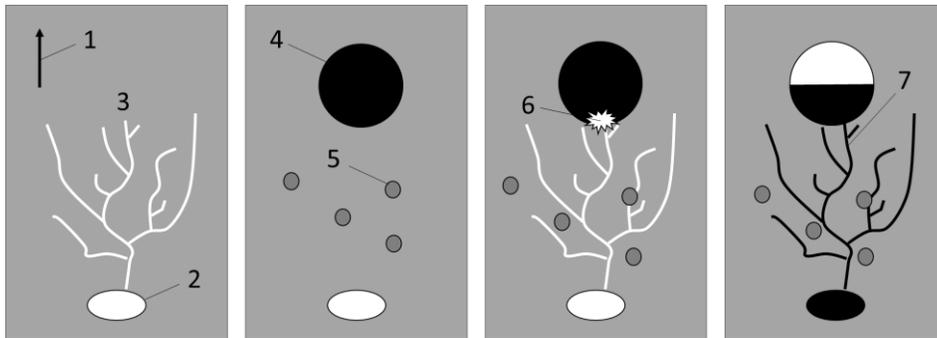


Рис. 5.10. Решение.

Шаг 8. Анализ решения с позиций ТРИЗ. На данном шаге даются ответы на ряд вопросов, помогающих понять, каким образом было получено решение и его адекватность и качество.

Важный вопроса анализа решения в ТРИЗ: какое *Физическое Противоречие* (ФП) устранено решением задачи? Дадим определение ФП: это совокупность противоположно направленных и взаимно исключающих системных требований к одному и тому же свойству системы. Можно

сформулировать ФП так: **«для улучшения системы какая-то её часть должна находиться в разных физических состояниях одновременно, что невозможно»**. В нашей задаче ФП следующее: **«изоляция должна быть толстой и тонкой одновременно»**. Именно это противоречие устранено в найденном решении.

Использованная фундаментальная трансформация (принцип)²⁶: разделение во времени и веществе.

Использованные стандарты ТРИЗ: Стандарт «Добавки»: введение в малых дозах особо активной добавки, введение вещества в химическом состоянии, из которого оно выделяется в нужное время.

Использованные эффекты: химические (реакция полимеризации, катализ), физические (электрические разряды, фазовые переходы, нагрев, ударные волны)

Использованные ресурсы: вещественные.

Отметим, что существуют и другие решения для предотвращения механического износа изоляции кабелей, предназначенных для эксплуатации в тяжелых условиях - например применение бронированных кабелей. Т. е. решение, к которому мы пришли с помощью данного алгоритма ТРИЗ не является единственно возможным.

Пример 2. Задача о расширении диапазонов рабочих моментов и частот вращения

В гибридном или полностью электрическом электромобиле требуется работа системы электропривода в очень широком диапазоне частот вращения, при этом на низких частотах вращения требуется высокий момент. Синхронная машина с постоянными магнитами (СМПМ) рассматривается как перспективный вариант из-за компактности, высокого КПД и относительно низких потерь в роторе. Однако, СМПМ на высоких частотах вращения генерируют высокую ЭДС, что требует применения стратегии управления с ослаблением поля (field weakening). ЭДС пропорциональна числу витков обмотки и частоте вращения, поэтому для работы на высоких частотах вращения желательно проектировать обмотку с малым числом витков, соединенных последовательно. Для создания высокого момента, напротив, желательно большое число витков обмотки, соединенных последовательно. Таким образом, существует противоречие по оптимальному числу витков обмотки машины для различных режимов работы. Получается либо машина для высоких частот вращения (характеристика 1 на Рис. 5.11) либо для высоких моментов (характеристика 2).

Можно решить проблему используя редуктор, который можно было бы подключать, когда требуется высокий момент и низкая частота вращения, тогда СМПМ можно было бы спроектировать с малым числом последовательно соединенных витков обмотки. Редуктор, однако, увеличивает массу и сложность системы. Еще одним возможным решением могла бы быть машина с малым числом витков, но с увеличенными размерами проводников и сердечников – т. е. более тяжелая и дорогая.

²⁶ См. эти и другие термины ТРИЗ приведенные ниже в [5.4] или другой литературе по ТРИЗ.

Пройдем те же шаги, что и в примере 1. Сформулируем задачу в виде административного противоречия: требуется, чтобы система работала в широком диапазоне, и при этом имела небольшой вес.

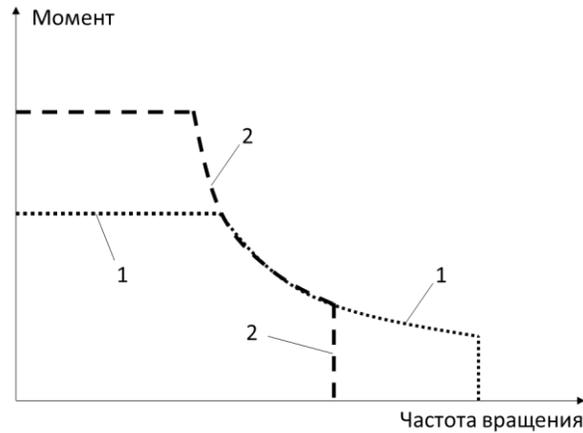


Рис. 5.11. Моментные характеристики.

На следующих шагах приведем формулировки технических противоречий с выбором Факторов и определением Навигаторов.

Формулировка №1: для увеличения мощности на низких и высоких частотах вращения приходится проектировать машину большего размера и веса, либо добавлять редуктор.

- «Плюс-фактор»: повышение мощности
- «Минус-фактор»: увеличение размера и веса

Наиболее подходящие Факторы ТРИЗ		Соответствующие Навигаторы
Плюс-фактор	36. Мощность	8 (Периодическое действие), 10 (Копирование), 19 (Переход в другое измерение), 13 (Дешевая недолговечность вместо дорогой долговечности)
Минус-фактор	33. Вес неподвижного объекта	

- Трактовки фактора 36 (Мощность) в контексте ЭМ: также как в ТРИЗ.
- Трактовки фактора 33 (Вес неподвижного объекта) в контексте ЭМ: вес машины.

Формулировка №2: для возможности работы на высоких частотах вращения приходится делать машину с малым числом витков, но тогда не удастся развить требуемый момент на низких частотах вращения.

- «Плюс-фактор»: расширить диапазон рабочих частот вращения
- «Минус-фактор»: момент

Наиболее подходящие Факторы ТРИЗ		Соответствующие Навигаторы
Плюс-фактор	2. Универсальность, адаптация	7 (Динамизация), 19 (Переход в другое измерение), 40 (Непрерывность полезного действия)
Минус-фактор	30. Сила	

- Трактовки фактора 2 (Универсальность, адаптация) в контексте ЭМ: работа в очень широком диапазоне частот вращения и/или моментов.
- Трактовки фактора 30 (Сила) в контексте ЭМ: момент на валу машины.

Формулировка №3: для возможности работы на высоких частотах вращения приходится делать машину с малым числом витков, но тогда не удастся развить требуемый момент на низких частотах вращения и необходимо использовать редуктор.

- «Плюс-фактор»: большая мощность во всех диапазонах
- «Минус-фактор»: увеличивается сложность системы

Наиболее подходящие Факторы ТРИЗ		Соответствующие Навигаторы
Плюс-фактор	36. Мощность	40 (Непрерывность полезного действия), 8 (Периодическое действие), 25 (Использование гибких оболочек и тонких пленок), 15 (Отброс и регенерация частей)
Минус-фактор	7. Сложность устройства	

- Трактовки фактора 36 (Мощность) в контексте ЭМ: также как в ТРИЗ.
- Трактовки фактора 7 (Сложность устройства) в контексте ЭМ: добавление дополнительных элементов, например, редуктора/мультипликатора.

Формулировка №4: для возможности работы на высоких частотах вращения приходится делать машину с малым числом витков, но тогда не удастся развить требуемый момент на низких частотах вращения и необходимо использовать редуктор.

- «Плюс-фактор»: работа во всех диапазонах
- «Минус-фактор»: вес

Наиболее подходящие Факторы ТРИЗ		Соответствующие Навигаторы
Плюс-фактор	24. Время действия неподвижного объекта	20 (Универсальность), 13 (Дешевая недолговечность вместо дорогой долговечности), 8 (Периодическое действие), 16
Минус-фактор	33. Вес неподвижного объекта	

- Трактовки фактора 24 (Время действия неподвижного объекта) в контексте ЭМ: непрерывная длительная работа в разных режимах.
- Трактовки фактора 33 (Вес неподвижного объекта) в контексте ЭМ: вес всей машины или статора машины.

Формулировка №5: для возможности работы на высоких частотах вращения приходится делать машину с малым числом витков, но тогда не удастся развить требуемый момент на низких частотах вращения и необходимо использовать редуктор или увеличивать размер и вес машины (ее статора и ротора).

- «Плюс-фактор»: работа во всех диапазонах
- «Минус-фактор»: вес ротора и редуктора

Наиболее подходящие Факторы ТРИЗ		Соответствующие Навигаторы
Плюс-фактор	2. Универсальность, адаптация	3 (Дробление), 20 (Универсальность), 7 (Динамизация), 32 (Антивес)
Минус-фактор	32. Вес подвижного объекта	

- Трактовки фактора 2 (Универсальность, адаптация) в контексте ЭМ: работа в очень широком диапазоне частот вращения и/или моментов.
- Трактовки фактора 32 (Вес подвижного объекта) в контексте ЭМ: вес ротора машины или других элементов, присоединенных к ротору (вала, редуктора).

Формулировка №6: для покрытия высоких частот вращения приходится делать машину с малым числом витков, но тогда не удастся развить требуемый момент на низких частотах вращения и необходимо использовать редуктор или увеличивать размер и вес машины (ее статора и ротора).

- «Плюс-фактор»: работа во всех диапазонах без добавления редуктора
- «Минус-фактор»: вес машины (ее статора и ротора).

Наиболее подходящие Факторы ТРИЗ		Соответствующие Навигаторы
Плюс-фактор	29. Устойчивость состава объекта	33 (Проскок), 1 (Изменение агрегатного состояния), 5 (Вынесение), 23 (Применение инертной среды)
Минус-фактор	32. Вес подвижного объекта	

- Трактовки фактора 29 (Устойчивость состава объекта) в контексте ЭМ: не требуется добавление дополнительных элементов, например, редуктора/мультипликатора.
- Трактовки фактора 32 (Вес подвижного объекта) в контексте ЭМ: вес ротора машины или других элементов, присоединенных к ротору.

Выберем наиболее сильные Навигаторы: 8 (3 появления), 7, 40, 20, 19 (по 2 появления), 3, 33 (на 1-м месте в ячейках Таблицы 2).

Выпишем «Подсказки Навигаторов»:

- «8. Периодическое действие» - перейти от непрерывного действия к периодическому
- «20. Универсальность» - объект выполняет несколько разных функций
- «7. Динамизация» - характеристика объекта должна меняться так, чтобы быть оптимальной на каждом шаге
- «40. Непрерывность полезного действия» - вести работу непрерывно
- «19. Переход в другое измерение»
- «3. Дробление» - разделить объект на независимые части
- «33. Проскок» - вести процесс или его отдельные этапы на большой скорости

Решение:

Разделить обмотку на секции [«Дробление»], вывести концы секций [«Переход в другое измерение»], таким образом, чтобы можно было менять схему включения секций между двумя состояниями [«Динамизация»]: (1) последовательное соединение секций/витков (для работы на

низких частотах вращения) (2) параллельное соединение секций/витков (для работы на высоких частотах вращения) [«Универсальность»]. Работать на той схеме соединения, которая оптимальна для данной частоты вращения [«Периодическое действие»]. Переключения между состояниями проводить не останавливая машину [«Проскок»].

Система QMET-II компании Yaskawa и их же патент [5.7] на похожее решение (для станков).

Проведем анализ решения, аналогично примеру 1:

Какое физическое противоречие устранено: много витков соединены последовательно и мало витков соединены последовательно.

Использованная фундаментальная трансформация (принцип): разделение во времени.

Использованные стандарты: управляемость (использовать возможность превратить часть объекта в управляемую систему), развертывание (использовать объединение объекта в другой системой в более сложную би- или поли-систему).

Использованные эффекты: не использовались

Использованные ресурсы: структурные, временные

Отметим, что также одним из вариантов является переключение соединения фаз из треугольника в звезду непосредственно в процессе разгона.

Пример 3. Задача об охлаждении ротора АД электромобиля.

При применении асинхронного двигателя (АД) в электромобиле (например, в модели Tesla S) ротор АД может перегреваться из-за высоких потерь в беличьей клетке при перегрузках по моменту. Порядка 20% всех потерь выделяется в роторе. От вращающегося ротора тепло отвести сложно. Ротор АД является своеобразным "теплоаккумулятором" - перегрузив его, например сделав динамичный разгон автомобиля, требуется обеспечить остывание, на некоторое время ограничив перегрузки.

Факторами, влияющими на потери, являются, в частности, поперечное сечение проводников/стержней беличьей клетки и температура ротора.

Если увеличить размеры ротора – его радиус и площадь поверхности, то увеличится сечение проводников и снизится их сопротивление и снизятся потери в клетке ротора, соответственно снизится температура²⁷. Т. е. получается, что для снижения температуры приходится увеличивать размеры ротора и, соответственно, его вес. Это не оптимально для габаритных размеров и веса электрической машины.

Потери в роторе можно несколько снизить, если организовать охлаждение поверхности ротора потоком охлаждающего агента (некой субстанции, вещества например, газа). Увеличение количества охлаждающего вещества снизит температуру материала беличьей клетки, снижая его сопротивление, и, соответственно, потери. Впрочем, расчеты показывают, что перемешивания

²⁷ В некоторых случаях увеличение размера ротора может привести и к увеличению его магнитных потерь.

воздуха внутри пространства двигателя недостаточно. Кроме того, алюминиевая обмотка ротора находится в глубоких пазах, поэтому температура в глубине паза при сильной и кратковременной по времени перегрузке превысит критическое значение, несмотря на интенсивность теплосъёма с поверхности.

Важно отметить, что изменения температуры в широком диапазоне и просто высокая температура может приводить к снижению срока службы и поломкам ротора, т. е. к снижению надежности машины.

Формулировка задачи в виде административного противоречия может быть следующей: *«требуется, чтобы ротор был компактен и при этом не перегревался».*

Попробуем формулировки технических противоречий:

Формулировка №1: если увеличить размеры ротора и его вес, то токовая нагрузка снизится и снизятся потери в клетке ротора, соответственно снизится температура. Т. е. получается, что для снижения температуры приходится увеличивать вес ротора.

- «Плюс-фактор»: снижение температуры.
- «Минус-фактор»: увеличение веса ротора.

Наиболее подходящие Факторы ТРИЗ		Соответствующие Навигаторы
Плюс-фактор	34. Температура	26, 21, 20, 30
Минус-фактор	32. Вес подвижного объекта	

- Трактовки фактора 34 (Температура) в контексте ЭМ: температура ротора, беличьей клетки
- Трактовки фактора 32 (Вес подвижного объекта) в контексте ЭМ: вес ротора.

Формулировка №2: для снижения тепловой нагрузки и увеличения надежности приходится увеличивать площадь поверхности ротора.

- «Плюс-фактор»: снижения тепловой нагрузки и увеличения надежности
- «Минус-фактор»: увеличивать площадь ротора

Наиболее подходящие Факторы ТРИЗ		Соответствующие Навигаторы
Плюс-фактор	04. Надежность	19, 2, 22, 16
Минус-фактор	17. Площадь подвижного объекта	

- Трактовки фактора 04 (Надежность) в контексте ЭМ: надежность.
- Трактовки фактора 17 (Площадь подвижного объекта) в контексте ЭМ: площадь поверхности ротора.

Формулировка №3: в роторе АД образуются потери, их можно несколько снизить, если организовать охлаждение поверхности ротора потоком охлаждающего агента (некой субстанции, вещества, например, газа). Увеличение количество охлаждающего вещества, снизит температуру материала беличьей клетки, снижая его сопротивление, и, соответственно, потери.

- «Плюс-фактор»: снижение потерь.
- «Минус-фактор»: увеличение количества охлаждающего вещества.

Наиболее подходящие Факторы ТРИЗ		Соответствующие Навигаторы
Плюс-фактор	39. Потери энергии	34, 6, 29
Минус-фактор	26. Количество вещества	

- Трактовки фактора 39 (Потери энергии) в контексте ЭМ: потери.
- Трактовки фактора 26 (Количество вещества) в контексте ЭМ: количество/расход охлаждающей субстанций.

Формулировка №4: площадь поверхности ротора можно уменьшить, но при этом увеличится токовая нагрузка, тепловая нагрузка и уменьшается надежность.

- «Плюс-фактор»: уменьшение площади поверхности ротора.
- «Минус-фактор»: уменьшается надежность.

Наиболее подходящие Факторы ТРИЗ		Соответствующие Навигаторы
Плюс-фактор	17. Площадь подвижного объекта	14, 39
Минус-фактор	04. Надежность	

- Трактовки фактора 17 (Площадь подвижного объекта) в контексте ЭМ: площадь поверхности ротора.
- Трактовки фактора 04 (Надежность) в контексте ЭМ: надежность.

Выпишем «Подсказки Навигаторов»:

- «34. Матрешка» – один объект размещен внутри другого, один объект проходит сквозь полость в другом объекте.
- «19. Переход в другое измерение» – «многоэтажная» компоновка вместо «одноэтажной», использовать обратную сторону данной площади.
- «14. Использование пневмо- и гидро-конструкций» – вместо твердых частей объекта использовать газообразные или жидкие.
- «26. Применение фазовых переходов» – использовать явления, возникающие при фазовых переходах, например поглощение тепла.

Решение:

Вал ротора делается полым, в полости располагаются элементы системы охлаждения, например тепловая трубка или концентрические трубки, обеспечивающие подвод и отведение охлаждающего агента. Таким образом тепло снимается не только с внешней, но и с внутренней поверхности ротора. При использовании тепловой трубки используется фазовый переход (испарение), сопровождающийся поглощением тепла.

Подобным образом проблему с отводом тепла из ротора решили в компании Tesla в своей Model S (Рис. 5.12, а). В патенте [5.8] полученном Tesla (Рис. 5.12, б) описан вариант решения с тепловой трубкой. Следует отметить, что решение в патенте не обязательно является решением, реализованным в конкретном продукте. В частности, недостатком решения в [9] является увеличенная осевая длина за счёт развитого теплообменника тепловой трубы.

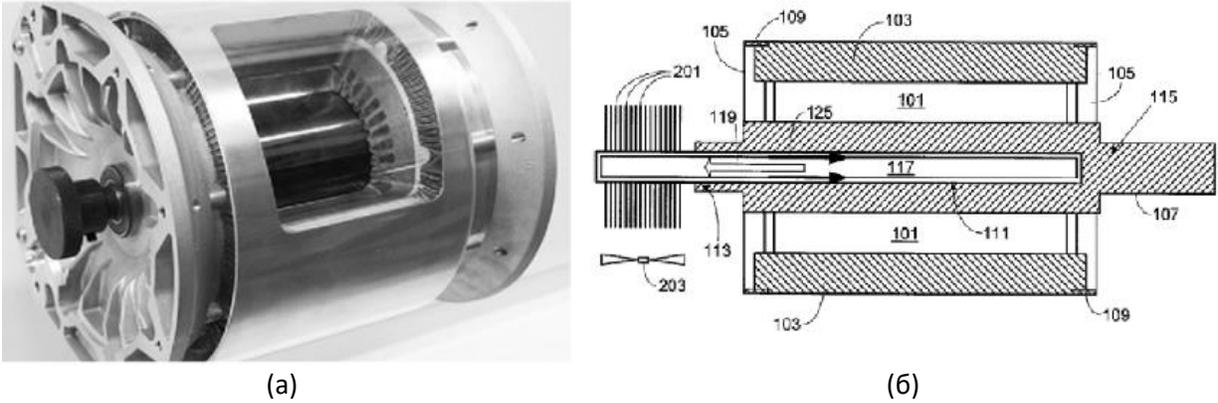


Fig. 5.12. (a) АД электромобиля Tesla Model S, (б) иллюстрация из патента [9].

Проведем анализ решения, аналогично примерам 1 и 2:

Какое физическое противоречие устранено: «ротор должен быть большим и маленьким».

Использованная фундаментальная трансформация (принцип): разделение в пространстве и веществе.

Использованные стандарты: развертывание и, возможно, свертывание (реализация функций системы на микроуровне – уровне вещества и полей).

Использованные эффекты: конвекция и/или фазовый переход.

Использованные ресурсы: пространство внутри ротора, вращение ротора, наличие системы охлаждения автомобиля (тосол, радиатор, шланги).

Отметим, что существуют и другие решения задачи. Например, одним из возможных способов компенсации увеличенных тепловыделений в роторе при перегрузке является временная интенсификация принудительного охлаждения.

На основе трех приведенных примеров можно попытаться составить фрагмент словаря соответствия терминов ТРИЗ в примеры из области электромеханики (Табл. 5.2). Важно отметить, что словарь может практически неограниченно дополняться различными трактовками из области ЭМ и систем, сосуществующих с ЭМ. Словарь, созданный в будущем на основе анализа многочисленных изобретений в области ЭМ, сможет являться элементом синтеза электромеханики и ТРИЗ.

ТРИЗ вполне надежно выводит изобретателя на расстояние «выстрела с высокой вероятностью попадания в цель». В данной главе и приложениях 4 и 5 содержатся все необходимые элементы, чтобы читатель мог попробовать самостоятельно найти решение какой-либо задачи. Т. е. изучать литературу по ТРИЗ – более чем желательно, но не обязательно для первых проб. Необходимо знать алгоритм, иметь навыки его практического использования, также желательно знать физические, химические и геометрические эффекты, уметь работать с ресурсами.

Таблица 5.2. Элементы словаря ТРИЗ-Электромеханика.

Некоторые термины ТРИЗ	Примеры трактовок понятий и параметров из ЭМ
Время действия неподвижного объекта	время службы, бесперебойной работы части/элемента/компонента ЭМ непрерывная длительная работа в разных режимах
Сложность контроля и измерения	сложность детектирования дефектов, в т. ч. механических повреждений, изоляции
Надежность	надежность работы части/элемента/компонента ЭМ
Потери энергии	потери (электрические и пр.) в элементах машины
Прочность	прочность изоляции
Затраты энергии неподвижным объектом	снижение КПД, увеличение потерь (электрические и пр.) в элементах машины
Вес неподвижного объекта	вес машины
Универсальность, адаптация	работа в очень широком диапазоне частот вращения и/или моментов
Сила	момент на валу машины
Сложность устройства	добавление дополнительных элементов, например, редуктора/мультипликатора
Вес подвижного объекта	вес ротора машины или других элементов, присоединенных к ротору (вала, редуктора)
Устойчивость состава объекта	не требуется добавление дополнительных элементов, например, редуктора/мультипликатора
Количество вещества	количество/расход охлаждающей субстанций
Температура	температура ротора, беличьей клетки
Площадь подвижного объекта	площадь поверхности ротора

Применение системного оператора ТРИЗ для прогнозирования развития ЭМ

Эволюцию систем в осях «Надсистема-Система-Подсистема» можно рассматривать, используя так называемые системный оператор (СО) с 9 «экранами» (Рис.5.13). В таблице 5.3. в ячейках таблицы вместо «экранов» помещена некоторая информация²⁸ которая может помочь прогнозированию развития ЭМ. Существует и более сложная структура - 27-экранный СО (Рис.5.14), в которой к 9-экранам системы добавляются еще две плоскости: антисистема и конкурирующая система. Таким образом, прогнозист или изобретатель может работать сразу с 27 экранами.

²⁸ Субъективная, представляющая взгляд автора.



Рис.5.13. Системный оператор с 9 экранами.

Таблица 5.3. «9-экранка» для ЭМ.

	ПРОШЛОЕ (30 лет назад)	НАСТОЯЩЕЕ	БУДУЩЕЕ (предположения)
НАДСИСТЕМА	Стартеры Датчики Автоматические выключатели (АВ) переменного тока	Преобразователи частоты Датчики Высокотемпературная электроника	GaN, SiC АВ постоянного тока Интернет вещей Интегрированные датчики Новые применения Ультравысокие температуры
СИСТЕМА	Прямой пуск асинхронных машин	Интегрированные ПЧ-ЭМ Компактность	Многофазные СП обмотки Кабели из углеродных нанотрубок Высокочастотные машины Цифровые двойники
ПОДСИСТЕМА	Сплошные проводники Постоянные магниты: ферриты, SmCo Механические подшипники	Литцендрат Сверхпроводники (СП) Постоянные магниты NdFeB Магнитные подшипники	Новые СП для комнатных температур СП переменного тока Углеродные нанотрубки Неродкоземельные более сильные магниты Компоненты на основе аддитивных технологий

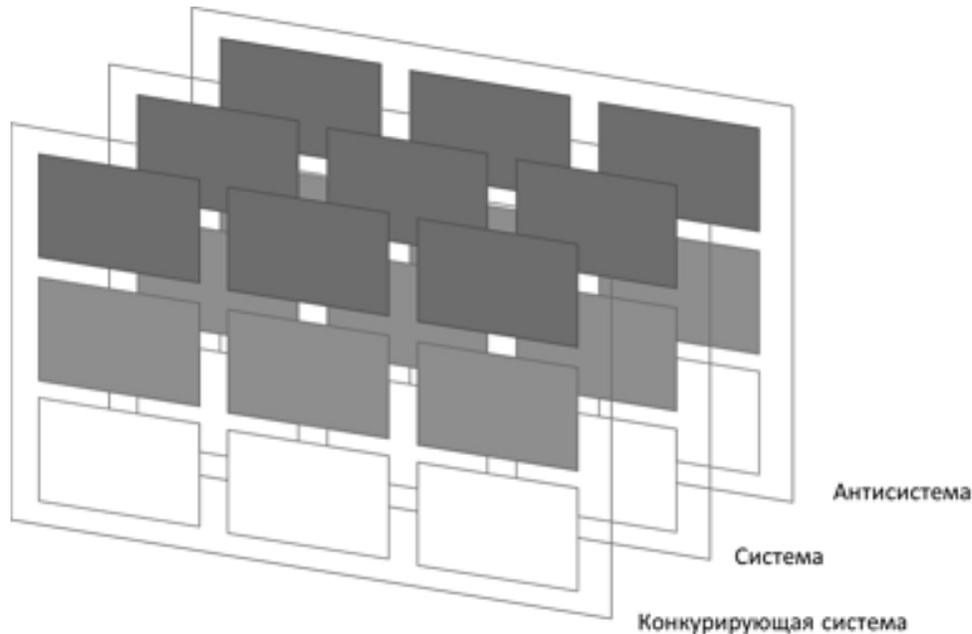


Рис.5.14. «27-экранка».

Начнем с понятия «Антисистемы». Антисистема (АС) – это система, которая выполняет функцию, противоположную функции рассматриваемой Системы. АС - нечто такое, что имеет внешнюю активность, противоположную по своим особенностям Главной Полезной Функции (ГПФ) рассматриваемой Системы. Например, система – карандаш, антисистема – ластик.

Попытаемся найти АС для ЭМ. Здесь есть пространство для нескольких альтернативных мнений.

ГПФ электродвигателя – создавать движение (например, вращательное или поступательное) из потребляемой им электроэнергии. Можно предположить, что АС электродвигателя может быть электрический генератор. Можно сформулировать ГПФ электродвигателя, как наиболее эффективное преобразование электрической энергии в механическую при минимуме тепловых потерь. В таком случае АС может быть электрический нагреватель, у которого задача – преобразование электроэнергии в тепло. Можно попытаться поработать с каждым из этих вариантов или предложить свои. Любые нестандартные варианты могут быть плодотворными.

АС – очень эффективное средство анализа и синтеза, причем, оно наиболее эффективно в том случае, если "запускать" при анализе все 9 окон АС как мы сделали выше для Системы (Табл. 5.1). Анализируя электронагреватель в качестве АС мы можем указать, например, на переход на уровне «надсистемы» от простого включения в сеть в недалеком прошлом к цифровому управлению, Интернету вещей, концепциям типа «Умный дом» и т.п. в настоящем. На уровне «подсистем» мы увидим переход от ламп, нихрома, радиаторов в прошлом, к инфракрасным элементам, керамике в настоящем. На уровне «системы» можно заметить переход от ламповые излучателей к конвекторам.

Рассмотрим понятие «Конкурирующая система». Под Конкурирующими Системами (КС) понимаются все технические системы с такой же ГПФ. Если ГПФ электродвигателя – создание движения, то на роль КС можно предложить двигатель внутреннего сгорания (ДВС). Могут быть и другие варианты КС.

Анализируя ДВС в качестве КС, мы можем указать, например, на переход на уровне «надсистемы» от механических систем управления в прошлом к электрическим в настоящем. На уровне «подсистем» мы видим переход от бензина и дизеля в прошлом, к биотопливу и водороду в настоящем. На уровне «системы» можно заметить тренд гибридизации ДВС с электрическими машинами.

Следует следить за новостями в развитие ДВС на уровне «надсистем» и «подсистем», чтобы заполнить экраны для «будущего». Например, проявляются тренды использования порошковой металлургии, аддитивных технологий.

Заключительные комментарии к главе 5

Инструментарий ТРИЗ не исчерпывается приведенными методиками. В ТРИЗ есть другие алгоритмы поиска решений, а также стандарты, вепольный анализ и многое другое.

Литература к главе 5

- [5.1] Альтшуллер Г. С., Шапиро Р. Б. О психологии изобретательского творчества // Вопросы психологии. — 1956. — № 6.
- [5.2] Альтшуллер Г. С. Алгоритм изобретения. — М.: Московский рабочий. — 1969 (1-е изд.); 1973 (2-е изд.).
- [5.3] https://ru.wikipedia.org/wiki/Теория_решения_изобретательских_задач
- [5.4] Орлов М. А. Основы классической ТРИЗ, М.: Солон-Пресс. 2006. - 432 с.
- [5.5] Герасимов В.М. Ротор синхронной явнополюсной электрической машины : изобретат. былль [Рукопись] / В. М. Герасимов. – 2005. – 25 с. – Рукопись деп. в ЧОУНБ 12.07.2005 № 3045. – [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.trizminsk.org/e/212008.htm>. – Загл. с экрана.
- [5.6] M. Brockschmidt, S. Kempen, F. Pohlmann, G. Schmidt, C. Staubach, Self-healing insulating layer for an electrical machine. Патентная заявка WO2013/117373A1, поданная компанией Siemens.
- [5.7] A. Kumagai et al, Switching device of winding for motor in machine tool. Патент Японии JP3596711B2, выданный компании Yaskawa
- [5.8] L. Fedoseyev, E.M. Pearce Jr, Rotor assembly with heat pipe cooling system. Патент США US9331552B2, выданный компании Tesla.

Глава 6. Философские основы управления эволюцией

В последние годы у электромехаников появились новые возможности – большие вычислительные мощности (в том числе распределенные), материалы с улучшенными свойствами, гибкие производственные методы, компактная силовая электроника и высокопроизводительная управляющая электроника, наконец, программные комплексы с элементами искусственного интеллекта. В совокупности это дает инструменты для создания новых поколений электрических машин (ЭМ). В то же время, проблемой можно признать то, что в рамках профессии не распространена практика обсуждения будущего. Это существенная проблема, поскольку электромеханики в массе своей не имеют четкого представления о направлении развития электромеханики. Это может приводить к неспособности встретить вызовы современного мира и внести свой вклад в необходимые изменения. Как результат может снижаться мотивация, приходиться разочарование в профессии, дело может доходить до оставления профессии.

Попытки осмысления электромеханики в контексте нового времени позволяют приходиться к самым разным вопросам, ряд из которых можно разделить на следующие группы:

Вопросы о направлении: В каком направлении идет эволюция электрических машин? Какое направление следовало бы считать правильным? Куда следовало бы направлять развитие?

Вопросы о точках отсчета и об источниках знания: С каких философских позиций (включая этические, эстетические) следует управлять эволюцией ЭМ и смежных систем? На основании чего выбирать стратегии управления эволюцией?

Вопросы об инструментах управления эволюцией: Существует ли возможность управления эволюцией ЭМ? Осуществляет ли кто-либо управление сегодня? Каковы могут быть инструменты управления?

Вопросы об уникальности: Заслуживает ли электромеханика свою отдельную философию? Почему можно выделить из ряда наук именно электромеханику? Имеет ли смысл рассматривать ЭМ отдельно от прочей техники?

Вопросы о сущности: Имеют ли ЭМ сущностные отличия от других технических объектов? В чем сущность электрических машин?

Вопросы о нейтральности: Являются ли ЭМ нейтральной техникой? Это «добрая», «злая» или «нейтральная» часть техносферы? Есть ли хорошие и плохие типы ЭМ? Можно ли в этом что-то исправить?

Вопросы о мотивации: Зачем заниматься электромеханикой? Если заниматься, то какими вопросами и с каких оснований?

Ответы на подобные вопросы могут лежать в области философии техники. Объект и предмет философии техники графически описаны и определены на Рис.1. В случае электромеханики под артефактами можно понимать ЭМ, под техническими действиями – процессы разработки и производства ЭМ, под техническим знанием – свод знаний электромеханики как науки с добавлением разделов других наук, таких, как физика, химия, материаловедение, и др.

Техническое сознание – это то, что предстоит развивать применительно к электромеханике. Именно в этом предмет данной работы.



Рис. 6.1. Объект и предмет философии техники.

В процессе поиска ответов на поставленные вопросы был проведен обзор ряда ключевых работ по философии техники (за всю историю этой науки), который предлагается читателю. В работе каждого из философов обращалось внимание на следующее:

- 1) Картина мира, предложенная данным философом (на время написания работ)
- 2) Как философ отвечает на вопрос что такое техника и в чем ее суть/сущность
- 3) Как философ видит человека по отношению к технике
- 4) Взгляд философа на техническое творчество, изобретательство
- 5) Примеры, имеющие отношение к электромеханике
- 6) Интересные нестандартные мысли, имеющие отношение к предмету нашего исследования

По результатам обзора информация была систематизирована, произведен синтез идей и сделана попытка дать элементы картины мира, которая может быть интересна и полезна электромеханикам.

Примечательно, что становление философии техники происходило практически одновременно со становлением электромеханики (в тот же исторический период). Пионерские работы Каппа (1877), Энгельмейера (1898), Бона (1898) в области философии техники появляются приблизительно в одно время с изобретением динамо-машины (Сименс, 1872) и асинхронной машины (Тесла и Доливо-Добровольский, 1888-1889).

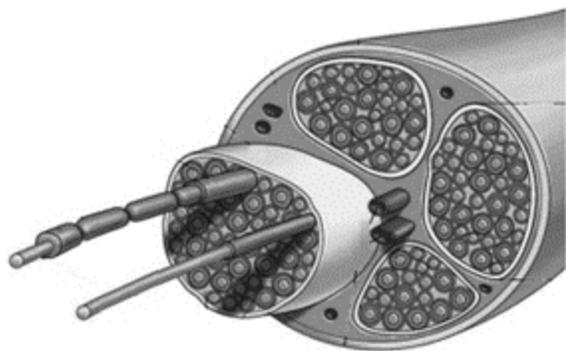


Рис. 6.2. Нерв.

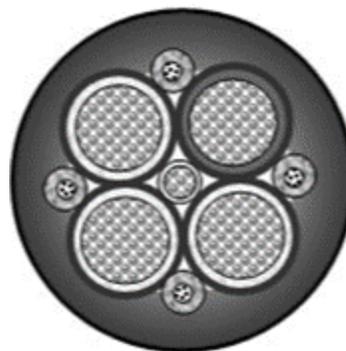


Рис. 6.3. Кабель.

Концепция органопроекции Э. Каппа. Немецкий ученый Эрнст Капп первым использовал понятие «философия техники». Его вклад в науку, который нам может быть полезен, – теория «органопроекции». Капп считал, что человек во всех своих созданиях бессознательно воспроизводит свои органы и сам познает себя, исходя из собственных созданий. Например, по его теории, сеть железных дорог соответствует системе кровообращения, телеграф – нервной системе. Теория Каппа много критиковалась ([6.1], [6.2]), но в электромеханике некоторые аналогии, построенные по логике Каппа могут показаться разумными. Поперечные сечения электрического кабеля и нерва (Рис. 6.2, 6.3), действительно поражают сходством. Также можно сопоставлять работу сердца (где для возбуждения ткани используются электрические импульсы) и магнитно-гидродинамического двигателя (насоса) или другого электромеханического преобразователя.

В целом таких аналогий немного, и в нашем поиске они нам многого не дадут. Тем не менее, изначальная тема органопроекции может быть преобразована в нечто иное. П. Флоренский, в какой-то степени находясь в пределах логики Каппа, утверждал, что «являясь средоточием Вселенной, ее целью и центром, человек повторяет ее устройство на уровне своего тела» [6.3]. Т. е. отправной точкой проекции уже является не человек, а Вселенная. В разработанной И.П. Копыловым теории [6.4] принцип устройства Вселенной – электромагнитный. Планеты ведут себя подобно электрическим машинам. Например, наша планета – как униполярная машина. Исходя из этой теории, можно сказать, что ЭМ является прямой проекцией электромагнитной Вселенной. Итак, можно заключить, что идея «проекции» может быть весьма плодотворной. Можно продолжить ряд аналогий, добавив, что при использовании ЭМ в экзоскелете для людей с ограниченными возможностями, происходит своего рода «обратная органопроекция». Тренд обратной «органопроекции» может сделать обычными киберорганизмы, и электромеханика может здесь сыграть свою роль.

Формула технической воли П.К. Энгельмейера. Одним из самых первых философов техники был русский инженер Петр Клементьевич Энгельмейер. Он не часто цитируется в западной философской литературе [6.1], хотя первым дал ряд формулировок и впервые поставил ряд вопросов, которые позже стали органичной частью философии техники. В частности, Энгельмейер писал: «человек благодаря технике освободился от необходимости приспособлять свой организм к окружающим природным условиям. Наоборот, человек эти окружающие условия прилаживает к своему организму, создавая вокруг себя искусственный микрокосмос». Также Энгельмейер дал

емкую формулу - «человек есть существо техническое» (в работе «Философия техники» 1912 года, цитируется по [6.1]). Только спустя два десятилетия к подобным концепциям («сверхприрода» - аналог «микрокосмоса») и терминам («человек-техник») придет выдающийся философ Ортега-и-Гассет.

Энгельмейер предлагал исследовать, что собой представляет техника, какие цели она преследует, какие методы она использует, где заканчивается ее территория, предлагал разработать полную картину техники. В [6.5] Энгельмейер ставит вопрос о связи между техникой и культурой, искусством, наукой. Там же он пишет: «Что бы человек ни начал делать, при всяком переходе от идеи к вещи, от цели к достижению, мы должны пройти через некоторую специальную технику. И все эти техники, ... имеют между собой много общего. Что же такое, это общее?». Таким образом еще в 1898 году Энгельмейер поставил вопрос о сути или сущности техники, на который, как мы увидим ниже, через 50 лет блестяще ответил великий философ Хайдеггер.

Энгельмейер, как и многие инженеры его времени, интересовался электротехникой, но сам электротехником не был [6.1]. Тем не менее одну идею электромеханики могут вполне у него позаимствовать. Энгельмейер считал, что при создании технических объектов следует руководствоваться не только пользой, но также истиной, добром и красотой, и предложил так называемую формулу технической воли (В):

$$В = И^m К^n Д^p П^o,$$

где И – истина, К – красота, Д – добро, П – польза. Формула имеет два бесконечных предела – божественную волю ($m=n=p=o=\infty$) и дьявольскую ($m=n=p=o=-\infty$). Отдельным случаем будет чисто утилитарная техника ($m=n=p=0$).

В приложении к электромеханике сегодняшнего дня *Польза* является безусловным критерием при создании ЭМ. Понятие *Красота* - относительно; можно говорить о красоте технических решений при проектировании ЭМ, но такая красота будет видна только разработчикам. *Красота* также рассматривается в такой дисциплине как «промышленный дизайн», где целью является улучшение внешних достоинств объектов, производимых в промышленности. *Добро* и *Истина* в классической электромеханике не рассматриваются, как и, вероятно, в других технических и инженерных дисциплинах.

Цели на пути к счастью и добру по Ф. Бону. В один год (1898) с работой Энгельмейера вышла книга еще одного философа техники Фреда Бона «О долге и добре», в которой он говорит, что цель техники - в стремлении к человеческому счастью, однако и эта цель подчиняется наивысшей цели – идее добра. Как мы видим, понятие добра было важно для мыслителей конца XIX века. Те, кто рассматривает счастье как общую и высшую цель стремлений, должен также провести исследование ведущих к этой цели средств, как высших и главнейших во всех технических задачах [6.1].

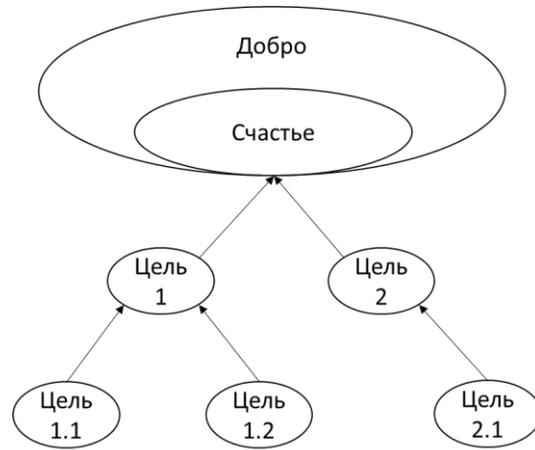


Рис. 6.4. Попытка визуализации концепции Бона.

У Бона - религиозная картина мира, что типично для того времени. В такой картине *Добро* может быть определено, например священными книгами. Далеко не все современные ученые готовы такую картину разделить. Нам, возможно, предстоит рассмотреть более широкий набор трактовок и взглядов на мир. Работа Бона интересна тем, что показывает пример иерархической структуры, как проиллюстрировано на Рис. 6.4, в которую мы можем попытаться вписать свою деятельность по созданию ЭМ.

Восприятие ЭМ во времена первых философов техники. Примечательно, что эстетическое, эмоциональное восприятие ЭМ на рубеже XIX/XX веков отличалась от современного. В то время в массовом сознании динамо-машина стала символом невидимой, неосязаемой, непостижимой силы электричества, одним из видов проявления распределенной в мироздании мощи. ЭМ было частью того «технологического возвышенного», которое заняло место природного возвышенного в культуре [6.6]. Возвышенный опыт – это взгляд за границу возможного, краткое пребывание там. Можно считать ощущение технологического возвышенного трансгрессивным (трансграничным) опытом. В художественной литературе того времени динамо-машина сравнивалась с храмом, божеством, описывалось преклонение перед динамо-машиной, служение ей. Это общее восприятие могло влиять и на философов, работающих особенно в первой четверти XX века.

Скрытые механизмы развития техники по Х. Ортега-и-Гассету. Испанец Хосе Ортега-и-Гассет – в отличие от вышеупомянутых предшественников – профессиональный философ. Разговор о технике Ортега-и-Гассет в своей известной работе 1935 года [6.7] начинается с противопоставления элементарных потребностей - еды, согревания, движения – и таких современных явлений, как системы обогрева, земледелие, производство автомобилей. Ортега аргументирует, что перечисленные современные явления не являются действиями, направленными на удовлетворение элементарных потребностей. Они, по Ортеге, подразумевают прямо противоположное: отмену вышеуказанных элементарных потребностей. Логика, следующая: если бы, всякий раз страдая от холода, человек тотчас же получал обогрев, он, очевидно, никогда бы не испытывал потребности в тепле, как обычно мы не испытываем потребности в дыхании. Мы просто дышим. Техника соединяет тепло с ощущением холода и тем самым практически уничтожает тепло как потребность, нужду, лишение и заботу.

По Ортеге, техника — это реакция человека на природу или обстоятельства, в результате которой между природой, с одной стороны, и человеком — с другой, возникает некий посредник — «сверхприрода», или новая природа, надстроенная над первичной. Творя новые, благоприятные обстоятельства, человек выделяет из себя сверхприроду, приспособлявая природу как таковую к собственным нуждам. Техника противоположна приспособлению субъекта к среде, как это происходит у животных, представляя собой, наоборот, приспособление среды к субъекту. Т. е. в случае техники мы сталкиваемся с действием, обратным биологическому.

Далее Ортега утверждает, что человеческая жажда жизни, его стремление пребывать в мире неразрывно связаны со страстью к хорошей и удобной жизни. В подтверждение своей гипотезы он пишет: «человек, который окончательно убедился, что он не сможет достичь благополучия, по крайней мере весьма относительного, и что ему придётся ограничиваться простым присутствием в мире, нередко заканчивает самоубийством. Благополучие, удобная жизнь, а не просто присутствие в мире как таковое и есть главная человеческая потребность». Далее дается следующая цепочка рассуждений: человеческое представление о том, что такое хорошая жизнь, благополучие — это величина изменчивая. Поскольку набор человеческих потребностей — функция от данной величины, то и сами потребности не в меньшей степени переменны; и раз сама техника представляет собой набор актов, порождённых для потребностей и вместе с тем осуществлённых в системе потребностей, то и она всегда выступает как постоянно изменяющаяся реальность. Таким образом — техника, это производная от представления человека о благополучии, которые складываются у нас в каждую историческую эпоху. Более четкая формулировка: «Техника — функция, переменной человеческой программы». Полное выполнение данной программы означает достижение «благополучия» и «счастья».

По сути, Ортега дал описание движущих сил развития техники. Можно попытаться проиллюстрировать этот механизм как показано на Рис. 6.5. Это, вероятно, открывает нам возможности управления развитием техники через управление потребностями людей, как, например, в концепции «Великого отказа» Г. Маркузе.

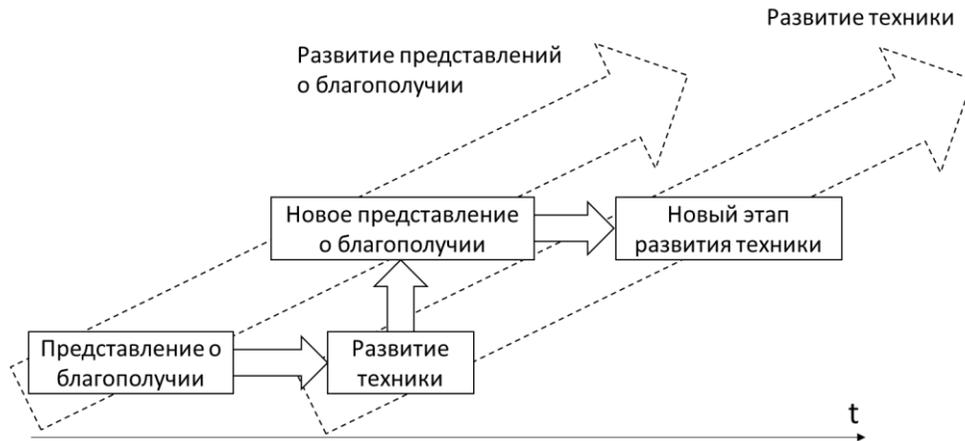


Рис. 6.5. Возможная иллюстрация концепции Ортеги-и-Гассета.

О том, что дает техника человеку Ортега пишет: «Человек обречён созидать, творить самого себя. Жить — значит в первую очередь прилагать максимальные усилия, чтобы возникло то, чего ещё нет, чтобы возник сам человек. Человек должен сберегать усилия, чтобы посвятить их избыток осуществлению невероятного предприятия — реализации своего бытия в мире. И смысл, и причина техники - в использовании человеком его избыточных, высвобожденных благодаря самой технике сил. Такова миссия техники — освобождение человека, дарующее ему возможность всецело быть самим собой».

Ортега предвидел колоссальные возможности техники: «машина, работающая сама по себе, отдельно, подводит к интуитивному пониманию, что техника — это обособленная от естественного человека функция, которая от него самого не зависит и вообще никак не принимает в расчёт предельные человеческие способности. Известно заранее, на что человек способен с его неизменным набором естественных, биологических действий. Его горизонт ограничен. А вот способности машины, которые может изобретать человек, в принципе безграничны». Инженеров Ортега называл «живым выражением техники». Риск Ортега видел в том, что сверхприрода может обрушиться и не сможет поддерживать существование человека.

Примечательно, что Ортега на пути гуманизации мира не делал различий между материальной и нематериальной (интеллектуальной) техникой. Он считал, что мир, возможно, станет чем-то вроде материализовавшейся души. Сложно сказать, в какой степени сегодняшние сетевые виртуальные пространства и искусственный интеллект (ИИ) являются приближением к видению Ортеги.

Приведем одну рекомендацию Ортеги, которая представляется весьма полезной: «Нужно научиться выходить за рамки своего занятия, внимательнее всматриваться в облик жизни - а он всегда целостен. Высшую жизненную способность не передадут ни профессия, ни наука, поскольку данная способность — это свод всех профессий и всех наук, а также многое другое».

Еще одна из мыслей Ортеги - механизировать как можно больше и высвободить ментальные усилия человека для управления нашими культурными сокровищами. Проецируя эту идею на электромеханику, можно представить упрощенную модель будущего электромеханики: проектированием занимается ИИ, производством – роботы, а электромеханики занимаются философскими вопросами.

Исторический контекст работы философов. Для лучшего понимания последовательности формирования идей на Рис. 6.6 показан исторический и технический контекст работы философов техники – на временной шкале показаны основные исторические события и технологические уклады. Прерывистыми линиями показаны годы жизни ученых-философов, точками – время выхода их основных работ. На основании данной визуализации контекста можно предположить, какие исторические события и изменения в мире техники могли повлиять на мировоззрение конкретного философа. Отметим, что III-й уклад, ключевым фактором которого является ЭМ, находился в фазе роста в первых двух третях XX века. В настоящее время данный уклад – в фазе зрелости. Аббревиатуры на части рисунка, описывающей уклады: ОР - основной ресурс, ГО - главная отрасль, КФ - ключевой фактор, ГП – гуманитарное преимущество.

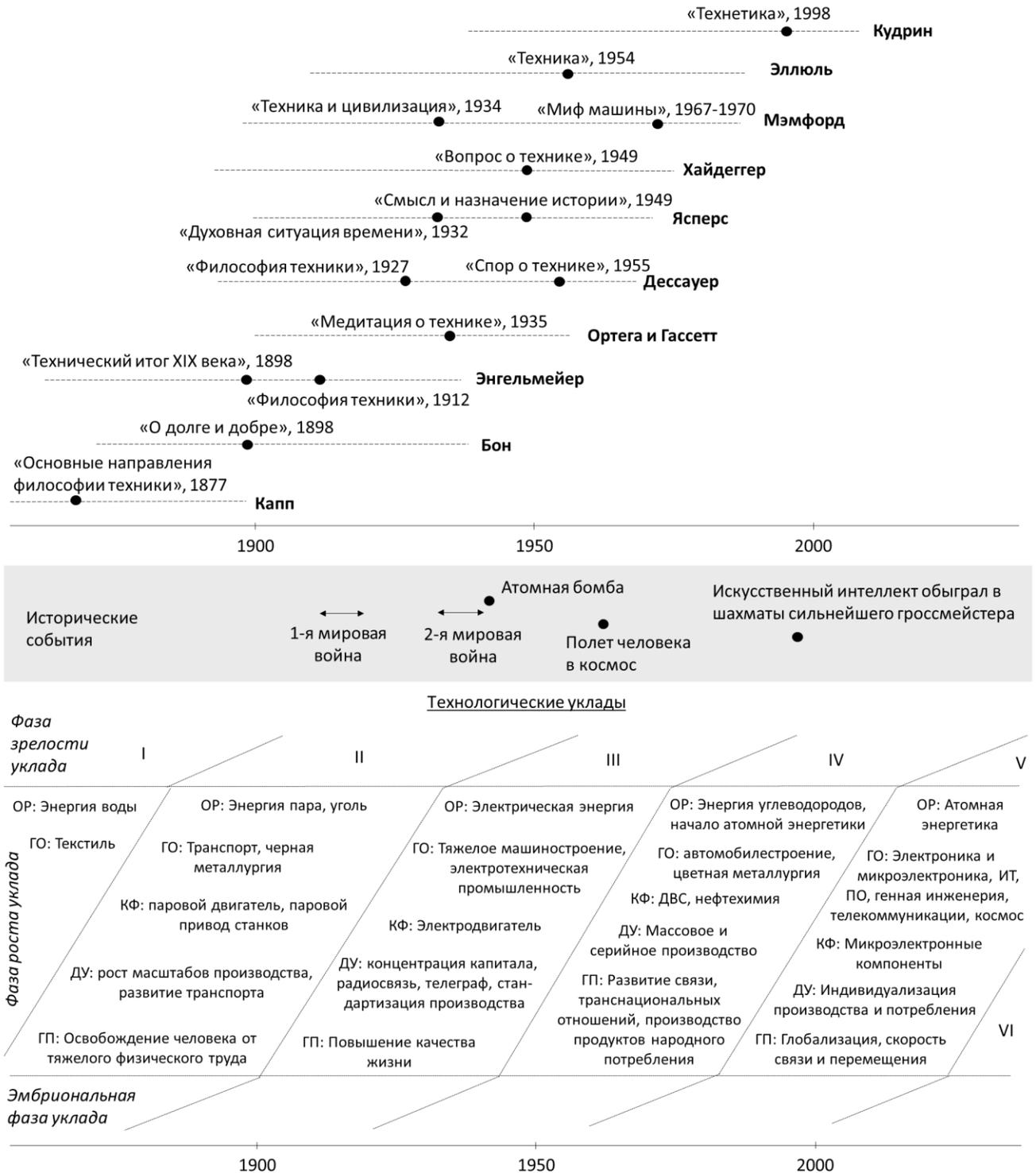


Рис. 6.6. Исторический контекст работы философов техники.

Технопессимизм К. Ясперса. Немецкий философ Карл Ясперс – один из первых и самых влиятельных технопессимистов. В книге “Духовная ситуация времени” (1932 год) [6.8] Ясперс пишет, что гигантский технический аппарат, созданный для удовлетворения элементарных потребностей человечества, сводит человека до уровня простой функции, люди в этом аппарате перемешиваются подобно песчинкам, занимая то одно то другое место. Человек уменьшен до уровня вещи и потерял свою человеческую суть. Аппарат же управляется бюрократией, которая сама является элементом аппарата.

Ученых и изобретателей, раздвигающих пределы технического мира, Ясперс называет вторыми великими архитекторами мира, подразумевая первым архитектором Бога, но в целом видит в технике опасность. Ясперс предупреждает, что мир техники разрушителен для природы. Также, интересно, что уже в то время Ясперс считал, что наука вышла за пределы, в которых человек еще был способен ее понимать.

После 2-й мировой войны в 1949 году Ясперс в книге «Смысл и назначение истории» [6.9] выступает еще более радикально чем в книге 1932 года. Период после войны он характеризует как время катастрофического падения к нищете духа, человечности, любви и созидательной энергии. Единственное, что, по его мнению, сохранило величие – наука и техника. Техника изменила тип работы в сторону массового производства, существование человека – в технически совершенный элемент машины, а планету – в грандиозную фабрику. Изобретателей Ясперс описывает уже не как «вторых великих архитекторов», а как анонимную массу функциональных компонентов в цепи некоего процесса, в котором каждое звено соединено с другим, и участники не действуют как отдельные люди. Ясперс указывает на различие великих изобретателей и предпринимателей XIX века и современного ему массового изобретателя. У Ясперса есть ощущение, что сам дух оказался затаен в технический процесс.

Одна из вещей, которая может частично примирить человека с техникой – красота технических изделий, которую Ясперс понимает как естественность - в том смысле, как тела животных и растений естественны для биологического мира. Эта мысль может быть интересным дополнением к формуле технической воли Энгельмейера.

Ясперс пишет, что одно можно сказать определенно: техника находится в процессе трансформации самого человека. Человек более не может извлечь себя из техники, которую сам породил. Человек сам становится одним из видов сырья, предназначенного к целевой переработке. То, что раньше было мерой всех вещей – человек – стало просто средством. Более того, Ясперс предсказывает появление из самого духа техники радикально новой среды, отличающейся от созданной человеком «второй природы». Предвидел ли в 1940-е годы Ясперс появление ИИ или что-то другое, мы можем только догадываться. Тем не менее Ясперс ставит вопрос: «Разве человек не обладает происхождением, которое ставит все технологическое в конечном счете в зависимость от него вместо того, чтобы человек стал рабом техники?» Он все же надеется, что истоки управления техникой будут находиться не в самой технике, а в сознании и этике человека.

Принимая картину мира, описанную Ясперсом, можно поставить следующие вопросы: в какой исторический период техносфера взяла верх над человеком и какова была роль электромеханики в этом процессе?

Предположение Ф. Дессауэра об общей силе технического. Немецкий ученый и философ техники Фридрих Дессауэр получил образование в области электротехники и физики [6.10]. Его образ мысли может быть близок и интересен электромеханикам. В личности Дессауэра переплелись увлечение техникой и глубокая вера в Бога. Он был уверен, что техникой все будет «хорошо» (был технооптимистом), потому что он верил в существование Всемогущего Бога, который по своей природе добр и поэтому нас не оставит [6.10]. В своей работе 1927 года «Философия техники» он пишет, что современная техника не должна восприниматься просто как облегчение состояния человека, вместо этого создание техники – это участие в творении, величайший опыт смертных (цитируется по [6.2]).

В [6.11] Дессауэр дает три определения сущности человека:

- homo investigator, человек исследующий, который изучает причину и следствие, оценивает пользу и вред,
- homo inventor, изобретающее, организующее существо. Человек несет в себе, наряду с изначальной потребностью в знании (потребностью в истине), потребность в комбинаторном формообразовании, организации, пробуждаемую и поддерживаемую факторами окружающей среды, природой и обстоятельствами, страхами и желаниями.
- homo faber, обрабатывающий человек, который способен, преимущественно с помощью рук (и инструментов), перенести, трансцендировать представленное из интраментального пространства, из мира представлений во внешний мир, в окружающую среду своего восприятия.

Дессауэр пишет, что в рамках «технэ» (гр. τέχνη, переводится как «мастерство») изучение, т.е. добывание знания, одновременно означает освоение истины и тем самым освоение мастерства.

В том что касается изобретательства, Дессауэр, как и многие великие философы до него говорит о невидимом людям мире идей. По Дессауэру, изобретатель может сказать, обращаясь к актуализированному им объекту: «Ты не мог бы появиться ранее ... пока не стал в моем видении именно таким, потому что ты мог быть только таким! И теперь ты в видимом мире. Но нашел я тебя в другом мире, и ты отказывался переходить в царство видимого до тех пор, пока я правильно не распознал твой подлинный образ в том, другом мире».

Касательно мотивации Дессауэр пишет, что достаточно мотивов к техническому творчеству дает экономика, но вероятно еще большим фактором является изначальное стремление человека к «формированию нового».

Дессауэр дал четкое определение техники: «Техника есть реальное бытие из идей посредством финалистского (целевого – пр. А.М.) формирования и обработки из данного природой инвентаря». Суть техники он видел не в массовом производстве и его продуктах, а в акте технического творчества.

Дессауэр вероятно один из первых понял силу мира вещей (техносферы): «Технические объекты и технологии становятся из идей, появляются исторически, однажды появившись, настойчиво пребывают и обладают каждый своей, свойственной ему специфической силой. Наконец, сила технического объекта способна соединяться с силами прочих технических объектов. Так существует

общая сила технического, насколько бы ни отличались объекты и их возможности. Эта общая сила судьбоносно велика. Она изменяет облик Земли».

Сущность техники и потаенность истины по М. Хайдеггеру. Немецкий философ Мартин Хайдеггер в работе 1949 года «Вопрос о технике» [6.12] заявил, что «сущность техники вовсе не есть что-то техническое». Он начинает аргументацию с рассмотрения известного с античности примера с серебряной чашей. В этом примере рассматривается «причинность» появления чаши. Первая причина - *causa materialis* – материал из которого делается чаша, вторая - *causa formalis* – замысел о форме и внешнем виде чаши, третья - *causa finalis* – назначение чаши (обряд). Серебряных дел мастер, разбираясь в трех названных видах «причинности», собирает их воедино. Три вышеназванных вида причинности благодаря *собирающей разборчивости* серебряных дел мастера проявляют себя и вступают во взаимосвязь, ведущую к возникновению готовой чаши. Сам мастер является четвертой причиной - *causa efficiens*. В качестве мыслительного эксперимента можно представить, как данный античный философский пример может быть интерпретирован в электромеханике, где объектом является ЭМ. (1) *causa materialis* - металлы (сталь, медь, ...), (2) *causa formalis* - проект (расчеты, модели, чертежи), (3) *causa finalis* - применение (спецификация), (4) *causa efficiens* - электромашиностроение.

Но вернемся к разворачивающейся аргументации Хайдеггера: четыре вида причинности позволяют вещи явиться. Благодаря им вещь оказывается *присутствующей*. Они выпускают ее из несуществования и тем самым ведут к полноте ее явления. Для описания совокупности причин появления вещи Хайдеггер вводит специальный термин – «*по-вод*»²⁹ (нем. «*Ver-an-lassen*»). Взаимосвязь четырех видов причины (повода) в том, что они дают чему-то еще не явленному прийти к присутствию. «*Всякий по-вод для перехода и выхода чего бы то ни было из несуществования к присутствию есть ποιήσις* (гр. «*пойезис*»), «*про-из-ведение*» (нем. «*Her-vor-bringen*»)). Как мы видим, Хайдеггеру приходится использовать новые слова, поскольку современного ему языка было недостаточно для передачи новых смыслов.

Итак, по Хайдеггеру техника не простое средство. «Техника — вид раскрытия потаенности. Это — область выведения из потаенности, осуществления истины. Сущность техники расположена в области, где имеют место открытие и его непотаенность, где сбывается ἀλήθεια (гр. истина)».

Современную технику Хайдеггер отделяет от «поэтической» техники мастеров античности и средневековья. Он пишет: «Она тоже раскрытие потаенного. Правда, то раскрытие, каким захвачена современная техника, разворачивается не про-из-ведением в смысле ποιήσις. Царящее в современной технике раскрытие потаенного есть производство, ставящее перед природой неслыханное требование быть поставщиком энергии, которую можно было бы добывать и запасать как таковую. Вместе с тем такое производство всегда с самого начала несет в себе установку на воспроизводство, на увеличение производительности в смысле извлечения максимальной выгоды при минимальных затратах». Хайдеггер приводит пример, близкий электромеханикам: «На Рейне поставлена гидроэлектростанция. Она ставит реку на создание гидравлического напора, заставляющего вращаться турбины, чье вращение приводит в действие машины, поставляющие электрический ток, для передачи которого установлены энергосистемы с их электросетью. В системе взаимосвязанных результатов поставки электрической энергии сам рейнский поток предстает чем-то предоставленным как раз для этого. Гидроэлектростанция не встроена в реку так,

²⁹ Примечание для редактора: знаки «-» внутри слов-терминов Хайдеггера имеют особый смысл – их не надо убирать! (Это не знак переноса и не разбивка на слоги).

как встроены старый деревянный мост, веками связывающий один берег с другим. Скорее река встроена в гидроэлектростанцию. Рейн есть то, что он теперь есть в качестве реки, а именно поставитель гидравлического напора, благодаря существованию гидроэлектростанции». И еще: «извлечение, переработка, накопление, распределение, преобразование — виды выведения из потаенности. Это выведение, однако, не просто идет своим ходом. Оно и не растекается в неопределенности. Техническое раскрытие потаенного раскрывает перед самим собой свои собственные сложно переплетенные процессы тем, что управляет ими. Управление со своей стороны стремится всесторонне обеспечить само себя. Управление и обеспечение делаются даже главными чертами *про-из-водящего раскрытия*».

Хайдеггер продолжает: «Какого рода открытость присуща тому, что вышло на свет в процессе *производящего предоставления*? Его во всех случаях заставляют установленным образом быть в распоряжении, а именно с установкой на дальнейшее поставляющее производство. Всё, что таким образом поставлено, стоит на особом положении. Назовем его *состоянием-в-наличии* (нем. «Bestand»). Этот оборот речи будет означать у нас нечто более весомое и существенное, чем просто «припасенность». Словосочетание «состояние-в-наличии» поднимается здесь до статуса принципиального понятия. Им характеризуется весь тот способ, каким наличествуют вещи, затронутые производяще-добывающим раскрытием. Состоящее-в-наличии уже не противостоит нам как предмет в его объективной реальности».

Попробуем перевести эти мысли в контекст электромеханики. Например электродвигатель, прошедший заводские испытания и доставленный на насосную станцию, где ему предстоит работать - просто предмет. Мы можем представлять себе двигатель таким образом. Однако тогда от нас будет скрыто его существо и его способ существования. Выведенный из своей потаенности, он стоит на насосной станции только в качестве «состоящего-в-наличии» и лишь постольку, поскольку поставлен на обеспечение возможности подачи воды. Для этого он во всём своем устройстве, в каждой своей составной части должен предоставлять возможность такого использования, т. е. должен быть готов к включению в электросеть и подсоединению к насосу. С точки зрения состояния-в-наличии двигатель совершенно несамостоятелен; ибо он держится только тем, что поставлен на предоставление поставляемого им крутящего момента, приложенного к валу насоса на определенной частоте вращения.

Хайдеггер ставит вопрос: кто осуществляет всё это поставляющее производство, через которое так называемая действительность выходит из потаенности для состояния в наличии? Вроде бы очевидно, что человек. Но до какой степени он своими силами способен на такое раскрытие потаенного? Есть ли другая, более мощная, сила? Хайдеггер вводит еще одну сущность — «*По-став*» (нем. «Ge-stell») — это «тот захватывающий вызов, который сосредоточивает человека на поставлении всего, что выходит из потаенности, в качестве состоящего-в-наличии, на извлечение природных энергий». Интересно, что открытие потаенного происходит не только в человеке и не главным образом *через* него. Захваченный поставляющим производством, человек стоит внутри сущностной сферы по-става. По-став — не антропологическая сущность. Дается еще одно, уточняющее определение по-става: это «собирающее начало той установки, которая ставит, т. е. заставляет человека выводить действительное из его потаенности способом поставления его как состоящего-в-наличии». По-став — имя для существа современной техники.

Миссия человека — раскрытие потаенности, тайны, поиск истины. Хайдеггер предупреждает, что когда эта миссия правит в образе по-става, она — крайняя опасность. Один из рисков — в том, что человек сам себя будет воспринимать как нечто состоящее в наличии. Господство по-става грозит

также той опасностью, что человек окажется уже не в состоянии вернуться к более исходному раскрытию потаенного и услышать голос более ранней истины. Чем больше человек захвачен тем, что открылось его мысли, тем меньше он успевает задуматься о природе и истоке своего озарения: чем полнее открывается бытие, тем глубже оно утаивается, отсылая от себя к вещам.

В то же время Хайдеггер видел и положительные стороны нашего нахождения в по-ставе: «захваченность поставлением действительного как состоящего в наличии — это в конечном итоге тоже миссия, посылающая человека на один из путей раскрытия потаенности. В качестве этой миссии существо техники дает человеку вступить в нечто такое, что сам по себе он не может ни изобрести, ни тем более устроить». Более того, «по-став в свою очередь осуществляется путем того *о-существования*, которое позволяет человеку пребывать в качестве требующегося для хранения существа истины». Получается, что человек – один из хранителей «существа истины».

Хайдеггер указал нам направления мышления только в общих чертах рядом метафор. Можно попытаться записать их своими словами и запомнить некоторые из них, возможно они пригодятся в наших собственных размышлениях:

- «Истина – открытость потаенного» (прямая цитата из Хайдеггера).
- Посреди правильного ускользнет истинное, мы должны, пробиваясь сквозь верное, искать истинного. Просто верное — это еще не истина. Настоящая истина прячется за мелкими «истинами».
- Когда-то про-из-ведение истины в красоту называлось «техне». Словом «техне» назывался и «пойесис» изящных искусств. Существом поэзии пронизано всякое искусство, всякое выведение существенного в непотаенность красоты.

Сакрализация техники и подчинение эффективности по Ж. Эллюлю. В 1954 году французский философ техники Жак Эллюль в книге «Техника. Ставка века» [б.13] писал, что техника изменила свой статус: она перестала быть «огромным набором средств, каждое из которых предназначено для определенной цели» и превратилась в «окружающую среду в ее собственном праве» и, более того, незаметно стала для человека «священной». Позже Эллюль более подробно объяснял этот процесс: поскольку человек не может не сделать свое окружение священным, он делает священным уже не природу, а то, чем он ее десакрализовал, осквернил и даже загрязнил - технику. И последствия этого «переноса» не только средовые, они также психологические и приводят к зависимому поведению человека по отношению к технике. Техника, постоянно совершенствуясь, заменяет своими ценностями, такими как работа, полезность, эффективность, экономический рост, прогресс и т. д., все ценности прошлого, будь то христианские (любовь к ближнему), гуманистические (мораль) или республиканские (свобода, равенство, братство). Эллюль утверждал, что технологическое общество считается священным, при этом нас поработает не техника, а перенесенное в технику сакральное.

Эллюль определял технику не только как совокупность машин и технологий, но скорее как «совокупность рационально достигнутых и обладающих абсолютной эффективностью (для данной ступени развития) методов во всех областях человеческой деятельности». Он считал, что в процессе всеобъемлющей погони за эффективностью техника захватила полный контроль над деятельностью человека, причем далеко не только деятельностью связанную с производством. Эллюль сформулировал семь характеристик современной техники, которые делают эффективность необходимостью: рациональность, искусственность, автоматизм технического выбора, само-

дополнение (само-расширение, само-возвышение), монизм (неделимость), универсализм и автономия (само-направление). Рациональность техники обеспечивает логическую и механическую организацию посредством разделения труда, установления производственных стандартов и т. д. Создается искусственная система, которая «устраняет или подчиняет себе природный мир». Решение проблем техники – всегда не «меньше техники», а «больше техники». Все становится предметом анализа по схемам «вход-выход», «затраты-приобретения» в поиске наилучшего пути достижения результата. Электромеханикам подобные подходы и критерии очень хорошо знакомы.

Современная техника и технологии стали всеобщим феноменом цивилизации, определяющей силой нового социального порядка, в котором эффективность больше не выбор, а необходимость, налагаемая на всю человеческую деятельность. Бесплезно, утверждал Эллюль, думать, что можно провести различие между техникой и ее использованием, поскольку техника как реализация совокупности методов эффективности имеет специфические социальные и психологические последствия, не зависящие от человеческих желаний. При этой реализации не может быть места моральным соображениям: даже моральное обращение техников не смогло бы изменить ситуацию. В лучшем случае они перестанут быть хорошими техниками. В конце концов, у техники есть только один принцип — эффективный порядок. Более того, техника сопротивляется попыткам инкорпорации в нее или попыткам поставить ее под контроль нетехнических отношений или методов мышления.

Эллюль предлагал ряд действий и решений для выхода из-под власти техники:

- Исследовать и осмыслить технику изнутри, чтобы осознать невозможность сосуществования с ней.
- Рассматривать технику как объекты, которые могут быть нам полезны, и признавать ее такой, какая она есть, просто еще одну вещь среди многих других вместо того, чтобы верить в технику ради нее самой или ради общества.
- Переходить к этике «не использования могущества», в соответствии с которой люди соглашаются не делать всего, что они становятся способны сделать.

Последнее решение, пожалуй, сложно реализовать с учетом экономической и военной конкуренции стран и корпораций.

Мегамшины Л. Мамфорда. Американский философ техники Луис Мамфорд рассматривал иерархические цивилизации как социотехнические системы — Мегамшины, в которых люди сведены к стандартизированным и взаимозаменяемым компонентам. Мегамшина - конвергенция науки, экономики, техники и политической власти как единое сообщество интерпретаций, или, более простыми словами: Мегамшина - это социальная, экономическая или политическая система, в которой винтики в машине состоят не из железа и стали, а из людей. Как во времена Мамфорда, так и сегодня Мегамшины создается и поддерживается крупными корпорациями и правительствами государств.

В своей книге [6.14] Мамфорд объясняет, что люди могут начать восстание против Мегамашин. Наиболее успешным способом этого было бы создание и поддержание небольших организаций, таких как университеты, общества или профсоюзы, которые могли бы «бунтовать» против неоглятности Мегамшины посредством действий, идей и принципов.

Как и Эллюль, Мамфорд считал, что техника перестала быть простым инструментом, но сама стала активным субъектом реальности, трансформирующим человека по своему образу и подобию. Мамфорд разделял технику на два вида: один в гармонии с человеческой природой, а другой – нет. Он также считал, что должны продвигаться те технологии, которые расширяют личностный аспект существования, а не те, которые ограничивают жизнь человека ради могущества.

Технетика Б.И. Кудрина. Российский ученый-электротехник и философ техники Борис Иванович Кудрин предложил новую парадигму исследования технической реальности. В этой парадигме технические изделия, технологии, оборудование, материалы, отходы - рассматриваются как общее в форме сообществ - техноценозов. Примеры больших техноценозов – завод, город, отрасль. Примеры сравнительно небольших автономных (на некотором временном промежутке) техноценозов - космические станции, подводные лодки.

Обычно техноценоз определяется как множество технических объектов (изделий) с отношениями и связями между ними, образующее определенную иерархически организованную целостность. Техноценоз как сообщество всех изделий характеризуется слабыми связями и слабым взаимодействием элементов, образующих систему. Количество элементов может достигать многих миллионов. Например, на крупном металлургическом заводе только электрических машин имеется порядка 10^5 , низковольтной аппаратуры – 10^6 , всего различных электротехнических изделий, узлов, блоков и деталей изделий – 10^{10} . Общее количество изделий и деталей, образующих современное крупное промышленное предприятие, может быть оценено в 10^{11} [6.15].

Изучение техноценозов возможно при выделении семейств изделий: например, электрические машины, транспорт, котельные установки, которые могут быть разбиты на конечное число видов. Путь анализа в таком случае может быть аналогичен методу биологического исследования.

В 1970е годы, исследуя статистику по поступающим в ремонт двигателям на нескольких сверхкрупных предприятиях, Кудрин обнаружил, что повторяемость ω по типоразмерам машин описывается зависимостью $\omega = 0.59a_i^{-1.84}$, где a_i – типоразмер машины (определенный как тип, например АИР, и мощность, например 15 кВт) [6.16]. На Рис. 6.7 часть кривой справа показывает много «редких» видов (типоразмеров) с малым количеством представителей (отдельных двигателей) в каждом типоразмере (т.е. много редких видов). Часть кривой слева – немногочисленные виды с большим количеством представителей в каждом.

Анализ статистики на протяжении многих лет привел к интереснейшим выводам: на предприятиях меняются поколения инженеров, которые принимают решения во закупке электродвигателей, меняются поколения и серии электродвигателей, но в плане «раскладки» по видам-типоразмерам на этих предприятиях электродвигатели попадают на ту же самую кривую (Рис.6.7). Зависимость оказалась устойчивой.

В дальнейшем Кудрин пришел к выводу, что как и природные системы – биологические и информационные, техноценозы имеют общее, системное содержание, что может быть описано распределением видов по повторяемости («Н-распределением»). Например, как показано выше, разнообразие видов в техноценозах описывается статистически устойчивой гиперболической зависимостью вида $\omega = ka_i^{-b}$, где k, b – параметры, a_i – вид.

Техноценоз находится в устойчивом состоянии, если при видовом его представлении 5-10% особей-изделий относится к уникальным, редким «кастам», что составляет 40-60% видового состава, а 40-60% всех особей-изделий попадает в массовые «касты», охватывающие 5-10% общего числа видов. Подобные пропорции характерны и для биологических систем.

Возвращаясь к электродвигателям, попадающим в техноценозы (на предприятия), отметим: вне зависимости от величины параметров электродвигателя, он обязательно проходит через редкую касту, а дальнейшее его положение на кривой, в том числе и в редкой касте, определяется не физическими размерами, а иными факторами. Достаточно проанализировать содержимое редких каст по любому из предприятий, и всегда, наряду с крупными двигателями, там обязательно обнаружатся уникальные, но не крупные (малой мощности).

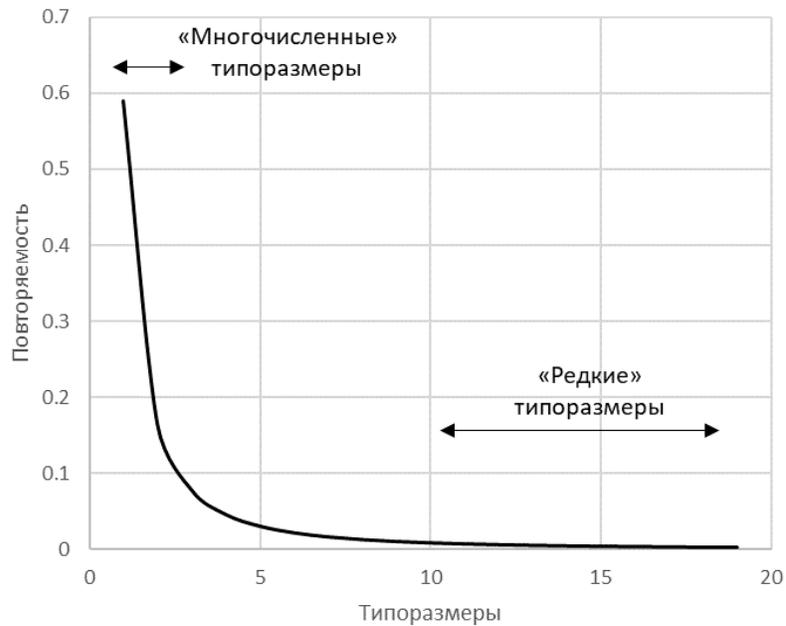


Рис. 6.7. Повторяемость ЭМ, попадающих в ремонт.

Техноэволюцию Кудрин определяет как направленное постепенное и закономерное изменение видов изделий в ряду поколений. Принципиальным отличием техноэволюции от биологической является «информационный отбор», вместо «естественного отбора» в живой природе. Информационный отбор подразумевает документальную запись информации при пространственно-временном разделении собственно документа, способа воспроизведения документа и способа воспроизведения изделия, предусмотренного этим документом.

Нынешнее поколение технического (а последующие - в ещё большей степени) существует лишь как частичка какого-то техноценоза, неизмеримо большая часть которого создана до рождения живущих. Вложенная иерархия множества техноценозов образует техносферу планеты. Каждая новая единица нынешней техники попадает в уже сложившуюся техническую среду - в конкретный техноценоз, увеличивая, что очевидно, его состав количественно и, что совсем не очевидно, обогащая разнообразие в соответствии с закономерностями гиперболического H -распределения.

Кудрин назвал свою теорию «технетика». Технетика - фундаментальная наука о технической форме существования материи, о наиболее общих законах техники, технической реальности и техноэволюции, а также о построении техноценозов и управлении ими. Технетика позволяет устанавливать законы техноэволюции, рассчитывать параметры технических популяций, прогнозировать ход техноэволюции.

Картину мира, соответствующую теории Кудрина, можно описать следующим образом:

- Техносфера наложилась на биосферу и трансформировала её. Техническая реальность стала всеобщей, и ее сущность представляет собой естественный процесс, где «вне желания человека техническое порождается техническим». Существует необратимость направленного развития изделий и их сообществ (техноценозов), которая диктуется собственными «техническими» законами. Человек при этом всего лишь необходимое субъективное условие становления технической реальности.
- Построение, обеспечение функционирования и развитие техноценозов опираются на собственные техноценологические постулаты. Технический мир описывается моделями Н-распределения, характерными особенностями которых являются неприменимость понятия "среднего" (отсутствием математического ожидания) и возможность сколь угодно большой ошибки (бесконечность дисперсии) при решении любого конкретного вопроса (решение в точке неопределённо).
- Глобальный эволюционизм технического диктует появление другого технического так, что каждая из единиц технетического как особь переделывает окружающее в направлении, благоприятном для себя (как для вида).

Кудрин ставит вопрос о возможной смене антропоцентризма как мировоззрения на техноцентризм как систему взглядов. Его, вероятно, можно отнести к технопессимистам.

Поскольку Кудрин – ученый-электротехник с огромным опытом, пришедший в философию техники из своей области, и не с пустыми руками, его работы могут быть исключительно полезны как дополнение к работам философов, пишущих о «технике в целом».

Отметим, что все выше рассмотренные выше философы работали до прохода 6-го технологического уклада. Важно зафиксировать картину, которую мы видим (или ее альтернативы, или их синтез) именно до прихода ИИ. ИИ, совершивший рывок в начале 2020-х видимо поменяет очень многое.

Современные философы техники. Среди современных отечественных философов техники можно назвать В.Г. Горохова и В.М. Розина. Среди иностранных философов выделяются большим количеством статей и монографий К. Митчем и Э. Финберг. Среди многочисленных трудов Карла Митчема можно выделить книги по этике (совместно с Бригглом) [6.17], также интересно интервью [6.18] в котором Митчем излагает свой философский взгляд на инженеров. Митчем весьма критичен. По его мнению, сообщества инженеров не существует в том виде, в каком это есть у ученых. Дело в том, что у ученых продуктом труда являются некоторые шаги в поисках универсальной «наднациональной» истины и производство общих знаний. У инженеров же результат труда – коммерческие продукты, товары. Инженеры одной страны, конкурируют со своими коллегами из других стран. Даже в рамках одной страны инженеры разных корпораций конкурируют между собой. Более того, часто инженеры механики конкурируют с инженерами

электриками. Таким образом, из-за конкуренции инженерное сообщество сильно фрагментировано.

Митчем утверждает, что инженеры в чем-то похожи на «солдат-наемников» («guns for hire»). Для иллюстрации он приводит пример: «когда в 1945 году советские войска заняли город с заводом Siemens, к ним сразу пришла делегация инженеров и рабочих с завода с вопросом «когда вы нам дадите работу». Сотрудников Siemens не интересовало, на кого они работают, они просто хотели работать». Еще один пример подобной этики можно найти в [6.17] - Вернер фон Браун, который сначала разрабатывал ракеты V-2 в Германии, а потом руководил Лунной программой в США, и был за это награжден медалью US National Medal of Science.

По словам Митчема инженеры называют себя «решателями проблем», не слишком заботясь о происхождении этих проблем. В принципе, инженеры не определяют задачи сами – их им дают. Также Митчему кажется, что инженеры не представляют просто технику, они представляют технику на службе капитала и в случае любого конфликта интересов они вынуждены выбирать сторону капитала. Митчем указывает на непропорционально большую силу корпораций. И здесь он ставит вопрос, могут ли инженеры в принципе освободить технику от власти капитала?

По мнению Митчема главная ценность инженерии – безопасность. Этика, которая может быть близка инженерам – этика долга и сотрудничества. Примечательно, что наибольшим вызовом современного мира для Митчема является скорость изменений - ее желательно снизить.

Эндрю Финберг – автор Критической Теории Техники (КТТ). Теория кратко представлена в [6.19]. Всестороннее обсуждение КТТ несколькими современными философами можно найти в [6.20]. По мнению самого Финберга, КТТ предлагает «платформу» для сближения позиций технопессимистов и технооптимистов, он говорит, что философия техники прошла большой путь со времен Хайдеггера и современные философы техники должны занимать активную позицию и искать свои собственные ответы на вызовы современности.

В КТТ Финберг вводит новые понятия: «Технический кодекс» (англ. «Technical code») и «демократизация техники».

Технический кодекс (ТК) – свод правил, по которым техника (технические системы и технологии) «реализуется» в социальном (общественном) контексте. ТК – реализация общественных интересов и идеологий при решении проблем «технически когерентными» средствами. ТК – критерий, выбирающий из ряда технически возможных решений для достижения какой-либо общественной цели. В кодексе цели должны «кодироваться» и «ранжироваться» как, например, этически допустимые или недопустимые, эстетически приемлемые, социально желательные и т.п. Здесь Финберг в какой-то мере возвращается к духу формулы технической воли Энгельмайера, в которую входят *Добро, Истина и Красота*.

Финберг считает, что сегодня «реализация» техники подвержена «искажениям» из-за неравного распределения власти в обществе. Сегодня техника конфигурируется так, чтобы воспроизводить власть «немногих над многими». Баланс между тем, что определяется технической эффективностью и что – «внешними» не техническими ценностями, - также нарушается неравномерностью распределения власти в обществе. По мнению Финберга, доступ к влиянию сегодня – только у технических экспертов и корпоративных и политических элит, которым эти

эксперты служат. Именно это следует исправить, «демократизировав» технику. Демократизация техники создает более адекватную «обратную связь» между разрушенными жизненными укладами и природой и принятием более адекватных технических решений.

Таблица 6.1. Десять парадоксов Финберга.

	Название парадокса	Определение	Трактовка в контексте электромеханики, примеры
1	Парадокс (П.) частей и целого	Очевидное происхождение сложного целого лежит в его частях, но, в реальности части имеют происхождение в этом же сложном целом	Машины постоянного тока (МПТ) используются как альтернатива АМ, потому что на предприятии есть сеть постоянного тока (ПТ). Но сеть ПТ используется потому, что не предприятии есть много МПТ
2	П. очевидного	То, что самое очевидное – самое спрятанное	Системы охлаждения используют естественную среду – воздух. А что делать в космосе или туннеле вакуумного поезда (Hyperloop), где воздуха нет?
3	П. происхождения	За всем рациональным есть забытая история	В некоторых применениях продолжают использоваться типы машин, которые уступают некоторым более современным типам. Так просто сложилось исторически и менять что-то представляется дорогим и сложным процессом
4	П. шаблона	Не эффективность определяет успех, а успех – эффективность	Ранний выход на рынок, даже с неоптимальной ЭМ позволяет использовать прибыль для существенной доработки и улучшения ЭМ и закрепления на рынке
5	П. действия	Действуя, мы становимся объектом действия	Занимаясь электромеханикой человек, становится электромехаником. Мы живем по законам техносферы, которую сами и создали
6	П. средств	Средства и есть цели	Человек хочет создавать ЭМ и с этой целью становится электромехаником, но именно быть электромехаником, вероятно, и есть его цель
7	П. ценности и факта	Ценности – факты будущего	Если ценностью является окружающая среда, появление «зеленых технологий», в том числе ветряных турбин и генераторов для них - просто вопрос времени
8	П. демократии	Общество соединено и объединено технологиями, но, в свою очередь, общество трансформирует эти технологии	Мы живем по законам техносферы, но в то же время мы изменяем ее. И можем воздействовать на нее еще более осознанно
9	П. сложности	Упрощение усложняет	Упрощение жизни человека благодаря электрификации очевидно. В то же время это усложняет все системы и приводит к не совсем ясным экологическим последствиям
10	П. завоевателя	Победитель принадлежит к трофеям	Человек – жертва последствий покорения природы. Например, отходы производства постоянных магнитов наносят зачастую непоправимый экологический ущерб.

КТТ, в частности, утверждает, что корни деградации труда, образования и окружающей среды лежат не в технике как таковой, а в культурных ценностях, воплощенных в ее конструкции. Технические системы, технологии и соответствующие стандарты, вошедшие в нашу жизнь, и присутствующие в ней сейчас, в свое время были сформулированы в виде неких ценностей. Современный ТК именно из этих ценностей и вырос. Итак, Финберг видит возможность и необходимость влияния на технику через законы и стандарты.

В качестве примера философского мышления можно привести данные Финбергом в [6.21] десять парадоксов. В качестве упражнения, в Табл. 6.1 показана попытка интерпретации данных парадоксов для ЭМ. Подобные упражнения могут помочь научиться мыслить сложно и парадоксально.

Заключение к главе 6. Произведя синтез работ философов, можно получить следующие элементы картины мира, имеющие непосредственное отношение к электромеханике:

- В природе действуют законы математики, физики, биологии, химии. В *сверхприроде* (в определении Ортеги-и-Гассета) кроме этих законов действуют какие-то еще, пока не открытые, либо открытые, но не общепризнанные, законы.
- Техносфера имеет некое, на сегодняшний день не изученное, поле, воздействующее на объекты техносферы и человечество. Это поле можно соотнести с *по-ставом* Хайдеггера.
- Любая ЭМ – всегда часть какого-либо техноценоза, приходящая в него, уходящая из него и существующая в нем по законам сверхприроды.
- Суть нашего времени – взаимодействие техноценозов (в определении Кудрина) с мегамашинами (в определении Мэмфорда). Как и все прочее, электромеханики и ЭМ являются объектами воздействия техносферы (вложенной иерархии техноценозов), государств и корпораций.

Также, основываясь на рассмотренных выше работах философов, можно попытаться ответить на поставленные в начале статьи вопросы.

О направлении: Основные направления эволюции ЭМ в современном нам мире обозначены, например, в [6.21], [6.22]: это увеличение максимально достижимых мощности и момента, повышение управляемости, повышение максимально достижимой частоты вращения, повышение эффективности преобразования энергии (повышение КПД), увеличение удельных мощности и момента (повышение компактности, снижение массы), повышение степени механической интеграции с окружающими структурами (интеграция в применение - надсистему). Следует, однако иметь в виду, что это касается только традиционных ЭМ, созданных человечеством для собственных потребностей. Если мы возьмем размер, как параметр, характеризующий объекты физического мира, то мы увидим, что традиционные ЭМ занимают очень небольшой участок на логарифмической шкале, на которой могут быть представлены размеры всех известных человечеству физических объектов. Известные современной физической науке предельные размеры - от 10^{-18} м (размера бозона Хиггса) до 10^{26} м (размера наблюдаемой вселенной – самого большого известного нам физического объекта). Фрагмент шкалы (от 10^{-8} до 10^8 м), имеющий более прямое отношение к ЭМ, представлен на Рис. 1.4 (в первой главе).

Очевидно, есть два направления эволюции – вправо и влево по шкале размеров. Движение вправо связано с освоением космоса. Как писал Дессауэр в 1955 году - «Космос содержит много больше того, о чем человек может мечтать». Не менее увлекательное направление влево по шкале. Как писал знаменитый физик Р. Фейнман [6.24] - «Внизу много места», имея в виду область техники, которая сегодня называется нанотехнологиями.

Естественно, есть направления эволюции, не связанные с размерами, можно упомянуть ряд из них:

- ЭМ для работы в радикально новых условиях, например в атмосферах других планет.
- Применение ИИ при создании ЭМ и на всем их жизненном цикле выглядит неизбежным. Здесь следует понимать, что техноценозы, «усиленные» роботами и ИИ, станут очередной надстройкой сверхприроды, по отношению к которой человек будет, вероятно, даже более слабым, чем древний человек по отношению к «первой природе».
- Если будет принято решение ограничить ресурсную базу техноценозов (можно назвать это стратегией «сжимающийся» техноценозов), особенно важным станет направление переработки ЭМ, отработавших свой ресурс, и использование полученных материалов в новых изделиях, а также разработки систем для автоматизированной переработки.

О точках отсчета: Основу и инструментарий для осмысления актуальных проблем и будущего электромеханики можно искать в первую очередь в философии техники, а также в классической философии. Важные смежные дисциплины показаны на Рис.6.8. В области этих дисциплин, а также в области философии техники и следует искать этические точки отсчета и источники знания. Каждый электромеханик может предложить свои точки отсчета, в том числе даже трансцендентные – это было бы особенно интересно.



Рис. 6.8. Научные дисциплины, связанные с философией техники.

Об инструментах: В условиях доминирования техносферы и Мегамашин набор инструментов влияния на эволюцию ограничен. Тем не менее, определенные возможности есть. В основе всего – мышление. Мышление – сильное, свободное, выходящее за пределы всех шаблонов,

парадоксальное. Точки входа в процесс влияния на эволюцию – идеи. Следует учиться мыслить и производить сильные идеи. Например, одна из методик нормативного (алгоритмизированного) мышления - ТРИЗ – может использоваться на начальном этапе для последующего перехода к свободному мышлению.

Можно не только открыть законы сверхприроды (в определении Ортеги-и-Гассета), но и написать и имплементировать свои правила для сверхприроды. Влияние на эволюцию будет возможно посредством имплементации новых правил для сверхприроды – для этого потребуются создание для начала небольших экспертных групп, построенных вокруг новых идей и ценностей. В качестве примера элемента нового Технического Кодекса (вероятно, осуществимого уже во второй половине XXI века) можно предложить следующее правило: *«Новая ЭМ на планете Земля может быть произведена только из материалов старой ЭМ»*.

В будущем возможно представить ИИ в качестве инструмента управления эволюцией. Например, станет возможно моделирование направлений эволюции: в частности, можно будет поставить опыт развития техноценозоы состоящих из цифровых двойников.

О нейтральности ЭМ: например, для Хайдеггера ЭМ, как и любые другие преобразователи энергии – негативны. По мнению автора, ЭМ – нейтральны. Можно рассматривать ЭМ как некую «функцию», «возможность». Но как насчет систем вокруг ЭМ? Могут ли они поменять «+» на «-» или наоборот? Приведем такой пример: один и тот же электродвигатель (ЭД) может быть установлен на боевой дрон и дрон, срочно доставляющий лекарства в отдаленные населенные пункты. Более того, в обоих случаях не только ЭД, но и конструкция дрона могут быть идентичны. Т. е. даже система верхнего уровня, которой по отношению к ЭД является дрон сам по себе не определяет этическую позитивность, нейтральность или негативность ЭД. Это определяется на еще более высоком уровне. Возможно, знак ЭМ определяется «намерением». В любом случае вопрос о нейтральности - большая и сложная этическая задача.

О сущности ЭМ: Можно предположить, что сущностные отличия ЭМ от других технических объектов могут быть связаны с электромагнитной природой вселенной. Это дало бы нам право выдвинуть гипотезу, что сущность ЭМ в ряду технических объектов – естественность, первозданность. ЭМ – один из архетипов вселенной. Основываясь на этой гипотезе, и соотнося ее с прозрениями Хайдеггера, можно сделать следующий шаг и предложить следующую метафору: создавая бесконечное множество ЭМ через *по-став*, вселенная всего лишь воспроизводит саму себя.

Об уникальности электромеханики: Уникальность электромеханики - не только в сущностных отличиях ЭМ. Можно назвать еще два аспекта: во-первых, ЭМ масштабируемы как объекты в уникально широкий предел (размеры – от молекул до звезд), во-вторых, в отличие от других типов преобразователей энергии, например ДВС, паровой машины, реактивного двигателя, ЭМ – обратимы. Потенциально это означает свободу потоков энергии (особенно, если в будущем устранить потери).

Уникальность позволяет поставить новый вопрос: достойна ли электромеханика иметь «свой» раздел философии техники? Автор считает, что достойна. Впрочем, было бы полезно разрабатывать подразделы философии техники и для других научных и инженерных дисциплин.

О мотивации: Уникальность электромеханики и уникальность задач (о которых ниже) может являться сильной мотивацией для инженеров и ученых электромехаников. Кроме того, ЭМ связаны через применения и смежные системы и подсистемы с большей частью техносферы. Это делает любую задачу электромеханики шире и интереснее.

В чем же роль или миссия электромеханика? Можно предложить четыре задачи:

1. Изучение законов сверхприроды и влияние на нее

- Следует изучать законы, по которым существует техносфера, силы, которые в нем действуют – на ЭМ и их надсистемы и подсистемы. Это, возможно, одна из наиважнейших научных задач.
- Можно не только открывать существующие законы сверхприроды, но и предлагать и устанавливать свои правила для сверхприроды, которые, например, могут балансировать существующие законы.
- Следует пытаться участвовать в управлении эволюцией, в разработке Технического Кодекса (в определении Финберга).
- Желательно иметь в виду, что не все, что современная наука и техника позволяют сделать следует реализовывать. Можно попытаться вписать это в новый Технический Кодекс.

2. Выход из-под власти Мегамашин

- Электромеханики находятся одновременно в нескольких сферах влияния: техносферы, государств, корпораций. Инженеру-электромеханику сотруднику корпорации практически невозможно выйти из Мегамашины (по крайней мере в рабочее время в рамках должностных инструкций), а вот ученый-электромеханик даже обязан попытаться это делать - в академической среде свободы несколько больше, поэтому именно от сотрудников университетов этого можно ожидать.
- Важна роль качественного и независимого экспертного сообщества, как один из инструментов баланса, противодействия Мегамашинам. Одним из инструментов может стать формирование малых групп философов техники, работающих в области электромеханики и смежных областях. История показала силу малых групп.

3. Осмысление реальности и поиски истины

- Электромеханик должен определить для себя, что такое добро, истина – это будут его собственные точки отсчета, его ценности. Он должен осмысливать свою деятельность и занимать осмысленную позицию в своей профессии, исходя из этих ценностей.
- Задача поиска истины – одна из основных. Если руководствоваться абстракциями Хайдеггера, надо двигаться «против течения», пытаться пройти «насквозь». Исходя из сущности своей науки, именно электромеханики могут решить эту задачу. На этом пути исследователь может найти не просто *новое*, но *иное*.

4. Самореализация

- Пожалуй, лучшим описанием этой миссии будут слова Ортеги-и-Гассета: «Существование означает прежде всего такое состояние, когда мы обречены осуществить проект, каковым мы являемся в данных обстоятельствах. Нам не суждено, не дано выбирать мир, или обстоятельства, в которых мы живём. Я — это драма, это борьба за то, чтобы стать тем, кем

я должен стать. И это стремление, и эта программа, которые составляют наше «Я», прорываются в мир, запечатлевая в нём себя, оставляя на нём свой особый отпечаток, а сам мир в свою очередь отвечает на моё воздействие, воспринимая или, наоборот, отвергая его».

В завершение можно кратко сформулировать тезисы, выносящиеся на обсуждение, предложенные для включения в специальный раздел философии техники – философию электромеханики:

- Техносфера имеет некое, на сегодняшний день не изученное, силовое поле, которое можно соотнести с *по-ставом* Хайдеггера.
- Создавая бесконечное множество ЭМ через *по-став*, вселенная всего-лишь воспроизводит саму себя.
- Сущность ЭМ как семейства технических объектов – естественность, первозданность. ЭМ – один из архетипов вселенной.
- Взаимодействие техноценозов и мегамашин является определяющей динамикой среды профессиональной деятельности электромехаников.
- Можно не только открывать законы сверхприроды, но и предлагать и устанавливать свои законы для сверхприроды.
- Электромеханика должна быть устремлена в будущее. Электромеханик будущего – «электромеханик-философ».

Список литературы к главе 6

- [6.1] В.Г. Горохов, В.М. Розин, Введение в философию техники: Учебное пособие, М.: ИНФРА-М, 1998. - 224 с.
- [6.2] C. Mitcham, Thinking through technology, the path between engineering and philosophy. The university of Chicago press, 1994, - 396 p.
- [6.3] О.М. Седых, М.А. Хаменков, Органопроекция: русский контекст, Философия науки и техники 2016. Т. 21. No 1. С. 132–151, УДК 167
- [6.4] И.П. Копылов, Электромагнитная вселенная, 2-е изд. перераб. и допол. М. Издательство МЭИ, 1999.
- [6.5] П.К. Энгельмейер, Технический итог XIX века. тип. К.А. Казначеева, Москва, 1898
- [6.6] Н.В. Никифорова, Эстетическое измерение техники: динамо-машина как технологическое возвышенное на рубеже XIX и XX вв., Философия науки и техники 2020. Т.25. №2. С.37-50 УДК 18+62.1
- [6.7] X. Ортéга-и-Гассёт, Размышления о технике. Журнал «Вопросы философии», № 5, 1993. С. 164–232. // Электронная публикация: Центр гуманитарных технологий. — 01.03.2010. URL: <https://gtmarket.ru/library/articles/5483>.
- [6.8] K. Jaspers, Die geistige Situation der Zeit. Berlin/Leipzig 1931; 5. Auflage 1932.
- [6.9] К. Ясперс, Смысл и назначение истории: Пер. с нем.- М.: Политиздат, 1991.-527 с.
- [6.10] Т.В. Филатов, Фридрих Дессауэр и неотомистская интерпретация философии техники, Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Философия, Номер: 1 (1), 2019 С. 108-119, УДК: 167.7.

- [6.11] Ф. Дессауэр, К философии техники. Что есть техника? – Термин и сущность. / Ф. Дессауэр, Пер. с нем. А.Ю. Нестерова // Онтология проектирования. – 2016. – Т. 6, №3(21). – С. 390-406. – DOI: 10.18287/223-9537-2016-6-3-390-406.
- [6.12] М. Хайдеггер, Вопрос о технике, 1949. Перевод на русский В. Бибихина, // Электронная публикация: 24.01.2023. URL: http://www.bibikhin.ru/vopros_o_tekhnike.
- [6.13] J. Ellul, La Technique: L'enjeu du siècle, Librairie Armand Colin, 1954.
- [6.14] Л. Мэмфорд, Миф машины. Техника и развитие человечества, 1967. Перевод, онлайн-ресурс <https://gtmarket.ru/library/basis/3115>
- [6.15] Б.И.Кудрин. Технетика: новая парадигма философии техники (третья научная картина мира). - Томск: Изд-во Том. ун-та, 1998. - 40с.
- [6.16] Б. И. Кудрин. Распределение электрических машин по повторяемости как некоторая закономерность // Электрификация металлургических предприятий Сибири. Вып. 2. — Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та, 1974. — С. 31-40.
- [6.17] A. Briggie, C. Mitcham, Ethics and science: an introduction, Cambridge University Press, 2012.
- [6.18] C. Mitcham, A.A. Kazakova, Let us now think engineering: an interview with Carl Mitcham, Философия науки и техники 25 (2), 26-36, 2020.
- [6.19] A. Feenberg, Critical Theory of Technology An Overview Andrew Feenberg. Tailoring Biotechnologies, 1, 47-64, 2005.
- [6.20] T. Veak, Democritizing technology: Andrew Feenberg's Critical Theory of Technology, State University of New York Press, 2006, 252 p.
- [6.21] A. Feenberg, Ten paradoxes of technology, Techné: Research in Philosophy and Technology, Volume 14, Issue 1, Winter 2010, pp 3-15, <https://doi.org/10.5840/techne20101412>.
- [6.22] А.В. Матвеев, Движущие силы и направления эволюции вращающихся электрических машин. Ч. 1, Электричество, №1, 2021, стр. 44-54.
- [6.23] А.В. Матвеев, Движущие силы и направления эволюции вращающихся электрических машин. Ч. 2, Электричество, №2, 2021, стр. 4-15.
- [6.24] Р. Фейнман, «Внизу много места: приглашение войти в новую область физики», https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D0%BD%D0%B8%D0%B7%D1%83_%D0%BC%D0%BD%D0%BE%D0%B3%D0%BE_%D0%BC%D0%B5%D1%81%D1%82%D0%B0

Заключение

Электротехническая промышленность и соответствующее научное сообщество были сформированы историей в определенную структуру с определенными законами существования и развития и со своим языком. Последние достижения в области материалов, элементной базы, компонентов, технологий производства и информационных технологий открывают возможности для трансформации этой структуры. Технический мир меняется, и кто-то обязательно совершит прорыв, создавая, по сути, новую техническую реальность в смежных с электромеханикой областях или самой электромеханике. Для компаний, производственных кластеров и даже стран неспособность последовать за лидерами изменений несет угрозы потери конкурентоспособности. Но можно не только следовать за лидерами, стараясь не отстать, но и пытаться самому стать агентом изменений. В книге показано, что эволюция ЭМ подчиняется конкретным известным законам и таким образом можно прогнозировать будущее в области ЭМ. Более того, основная идея книги в том, что можно даже участвовать в создании будущего – то есть процессом эволюции можно, до известной степени и в очень узком коридоре возможностей, управлять. Можно использовать основные движущие силы эволюции - появление новых применений и развитие существующих, новые материалы, новые технологии производства. Например, можно искать появляющиеся новые материалы и внедрять их при разработке новых ЭМ и систем электропривода, можно обозначать потребность в новых материалах — это может ускорять и направлять развитие. Также можно влиять на эволюцию ЭМ, разрабатывая решения с механической интеграцией ЭМ в различные применения. Следует также отслеживать события большой трансформирующей силы, которые обычно не поддаются прогнозированию (так называемые «джокеры») и пытаться использовать их.

Основа осознанного участия в эволюции – свободное мышление, которому учит философия. Через философию можно прийти к осознанию реальности и своего места в ней и начать использовать определенные инструменты для трансформации реальности.

Можно еще раз назвать основные инструменты для участия в управлении эволюцией, рассмотренные в книге:

Адаптация философского мышления поможет понять реальность, определиться со своей ролью в эволюции ЭМ.

Знание трендов, паттернов и линий эволюции позволит прогнозировать будущее ЭМ.

Предложенная новая классификация может помочь в поиске новых вариантов ЭМ. **Пентаграмма** – направлять процесс изучения ЭМ, быть навигатором для разработчика.

Работа с патентным фондом даст представление о том, что происходит в современной электромеханике, поможет понять уровень техники в конкретных областях.

Методы креативного мышления, в первую очередь богатый **инструментарий ТРИЗ**, можно использовать для решения изобретательских задач в области ЭМ и как тренажер для развития свободного инженерного мышления.

Наконец, один из новых инструментов - **постоянная C_M** - поможет быстро «прикидывать» массу и габариты новых ЭМ, оценивать качество существующих ЭМ.

Формирование осознанной активной позиции и реализация действий из этой позиции может стать возможной именно благодаря инструментам. При этом мотивациями электромеханика могут быть самореализация, деятельность на пользу профессионального сообщества, страны, человечества.

А.В. Матвеев, 2023 год

Приложение 1. Сопоставление постоянной C_M с машинной постоянной Арнольда

C_M – новая машинная постоянная, предложенная в 2019 году в [П1.1]. В то же время самая первая машинная постоянная была предложена Э. Арнольдом еще в 1896 году [П1.1]. Постоянная Арнольда и в разных вариациях и схожие с ней константы используются до сих пор – см. например монографии [П1.3]-[П1.6].

Проектирование электрической машины обычно начинается с выбора размеров и материалов ее активных и конструктивных частей и, в первую очередь, таких размеров как диаметр и длина ротора [П1.3]. Размеры ротора машины обычно оцениваются с помощью машинной постоянной или сходных с ней констант. Например, в [П1.4] ставится вопрос «каким должен быть размер двигателя, чтобы произвести требуемый момент?», и в качестве пути к решению предлагается выражение $M = kD_\delta^2 l_\delta$, где M – требуемый момент, D_δ - диаметр ротора, l_δ - длина магнитопровода, а k – константа. Предполагается, что знание величины константы k поможет определить объем ротора V_r , пропорциональный $D_\delta^2 l_\delta$, а затем основные размеры машины. Физический смысл константы k – удельный момент по объему ротора:

$$k = \frac{M}{D_\delta^2 l_\delta} \sim \frac{M}{V_r} \quad (\text{П1.1})$$

«Машинная постоянная механической мощности» C_{mec} в [П1.5] соответствует по смыслу константе k в выражении (П1.1):

$$C_{mec} = \frac{P_{mec}}{n_{syn} D_\delta^2 l_\delta'} \quad (\text{П1.2})$$

где n_{syn} – синхронная частота вращения.

В некоторых других источниках, например в [П1.6], наряду с константой, представляющей собой удельный момент по объему ротора, предлагается альтернативная константа σ , представляющая собой удельный момент по площади поверхности ротора.

В [П1.3] машинная постоянная определяется как

$$C_A = \frac{D_\delta^2 l_\delta \Omega}{S_p} \sim \frac{1}{B_{\delta H} A} \quad (\text{П1.3})$$

где C_A - машинная постоянная Арнольда, Ω – угловая скорость, S_p – полная мощность, $B_{\delta H}$ – индукция в зазоре, A - линейная нагрузка.

Сравнивая (П1.2) и (П1.3) можно прийти к заключению, что $C_A \sim 1/C_{mec}$, таким образом физический смысл обоих постоянных соответствует: это либо удельный момент по объему ротора, либо обратная величина.

Возвращаясь к выражению (П1.3), заметим, что, во-первых, в [П1.3] указывается, что использовать постоянную Арнольда можно только для масштабирования геометрически подобных машин, т.е. машин с одинаковой частотой питания и одинаковой угловой скоростью и, во-вторых, что для

оценки C_A требуется знать не только мощность и частоту вращения, но и электромагнитные нагрузки $B_{\delta H}$ и A .

Выбор значений электромагнитных нагрузок представляет собой отдельную проблему, поскольку они варьируются в очень широких пределах. В частности, на выбор электромагнитных нагрузок влияют не только тип машины, ее мощность и частота вращения, но и свойства материалов активных частей и конструкция систем охлаждения. В [П1.3] указывается, что индукция обычно варьируется от 0.7 до 0.95 Тл, а линейная нагрузка может варьироваться в пределах от 20 до 200 кА/м.

В [П1.5] и [П1.6] предлагаются таблицы для машинных постоянных, в которых в зависимости от типа машины и охлаждения даются рекомендованные диапазоны значений постоянных. Значения постоянных в таких таблицах могут отличаться на порядок, что не удивительно, с учетом вышеприведенных диапазонов варьирования электромагнитных нагрузок. Таблицы, к сожалению, содержат далеко не все типы машин, при этом типы машин определяются не всегда конкретно, например: «большие машины с водяным охлаждением», «машины для авиационных применений», «машины закрытого исполнения».

Даже для одного и того же типа машин машинная постоянная может сильно варьироваться, как показано на Рис. П1.1 взятом из [П1.5], где машинная постоянная C_{mec} зависит от мощности и количества полюсов.

Итак, все вышеупомянутые авторы используют в качестве ключевого элемента расчета объем ротора. Машинная постоянная представляет собой либо удельный момент по объему ротора, либо обратную величину. Для оценки размеров машин предлагаются два подхода:

- *Первый подход*: используя машинную постоянную из таблицы в одном из доступных источников, например [П1.5] или [П1.6], оценить объем ротора новой машины V_r , и затем, отталкиваясь от V_r , оценить основные размеры новой машины.
- *Второй подход*: использовать масштабирование известной машины, т.е. по объему ротора V_{r1} известной машины 1 и требуемому моменту M_2 рассчитать объем ротора V_{r2} новой машины 2: $V_{r2} \sim V_{r1} \frac{M_2}{M_1}$.

В первом случае проблемой может быть то, что далеко не все типы машин представлены в таблицах в доступных источниках. Во втором случае надо знать размеры ротора существующей машины, а эта информация не всегда доступна - например, в каталогах указываются только габаритные и присоединительные размеры. В обоих случаях требуется знать соответствие объема ротора и основных размеров машины.

С учетом вышесказанного для специалиста в области электрических машин адекватная оценка размеров новой машины является трудоемкой задачей, для неспециалиста же - практически нереальной. Даже само название сильно варьирующегося коэффициента C_A «машинной постоянной» - может сбить с толку.

Подводя итог состоянию дел, можно перечислить следующие недостатки существующих подходов:

- Сложно найти машинную постоянную для «своего» типа машин

- Широкие диапазоны значений $B_{\delta n}$, A , C_{mec} , σ рекомендуемые в разных источниках
- Не определенный переход от объема ротора к основным размерам машин (D_{δ} , l_{δ}), в том числе габаритным размерам (D , L) – Рис. П1.2.
- Невозможность оценки массы новой машины
- Ограничение возможности масштабирования только для геометрически подобных машин

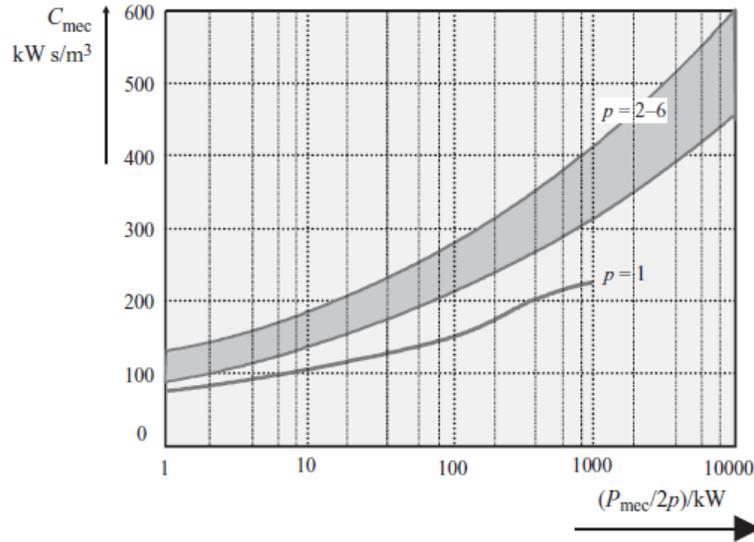


Рис. П1.1. Машинная постоянная (C_{mec} , кВт с/м³) асинхронных и синхронных машин закрытого исполнения как функция мощности на полюс ($P_{mec}/2p$, кВт).

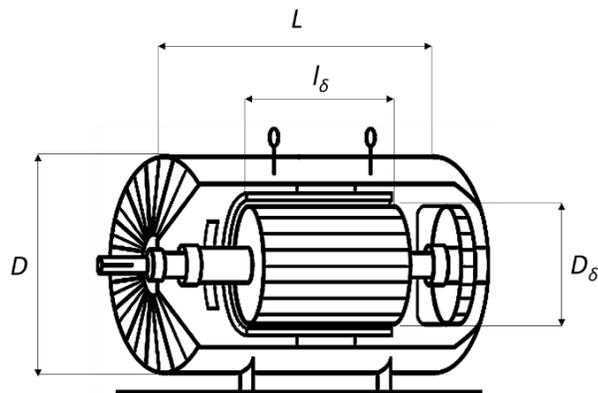


Рис. П1.2. Габаритные размеры электрической машины и размеры ее ротора.

Интересным моментом исследования может быть сравнение коэффициента C_M и классической постоянной Арнольда C_A . Для проведения такого сравнения следует привести выражение для C_M к форме (П1.3) из [П1.3]. В [П1.1] показано, что массу машины можно приблизительно принять

$$m = \frac{D^2 L \pi 1900 n^{0.09}}{4} \quad (\text{П1.4})$$

и с помощью (П1.4) и (1.76) прийти к выражению

$$C_M = \frac{D^2 L \pi 1900 n^{0.09}}{4} \frac{n^{0.5}}{P^{0.75}} \sim \frac{D^2 L n^{0.59}}{P^{0.75}}. \quad (\text{П1.5})$$

Таким образом, мы видим, что новая постоянная значительно отличается от классической:

- постоянная Арнольда:

$$C_A = \frac{D^2 l_\delta \Omega}{S_p}, \quad (\text{П1.6})$$

- предлагаемая новая машинная постоянная:

$$C_M \sim \frac{D^2 L n^{0.59}}{P^{0.75}}. \quad (\text{П1.7})$$

Очевидное отличие формул (П1.6) и (П1.7) – в показателях степеней у мощности (0.75) и частоты вращения (0.59). Важное отличие C_A от C_M состоит в том, что постоянная C_A имеет физический смысл – величина обратная удельному моменту по объему ротора, в то время как C_M такого смысла не имеет.

Литература по Приложению 1

[П1.1] А. В. Матвеев, Альтернативная машинная постоянная и оценка массы и габаритов электрических машин, Электричество, №11, 2019.

[П1.2] E. Arnold, Die Gleichstrommaschine, Zweite Band. – Springer, 1903.

[П1.3] А. В. Иванов-Смоленский, Электрические машины. - Энергия, 1980.

[П1.4] D. C. Hanselmann, Brushless permanent-magnet motor design. - First ed. New York: McGraw-Hill, Inc., 1994.

[П1.5] J. Pyrhönen, T. Jokinen, V. Hrabovová, Design of rotating electrical machines. - John Wiley & Sons, 2008.

[П1.6] J. R. Hendershot, T.J.E. Miller, Design of brushless permanent-magnet motors. - Magna Physics Pub., 1994.

Приложение 2. Примеры оценки размеров и масштабирования

Универсальные выражения для оценки размеров по массе

В [П2.1] были предложены формулы для оценки габаритных размеров ЭМ (машины упрощенно представляется цилиндром с диаметром D и длиной L , не учитывая выходной конец вала, клеммную коробку и прочее) по массе, которая в свою очередь оценивается по C_M :

$$\left\{ \begin{array}{l} m = C_M P^{0.75} n^{-0.5} \\ D \approx \left(\frac{4m}{\pi (A n^a) C n^x} \right)^{1/3} \\ L \approx \frac{4m}{\pi D^2 C n^x} \end{array} \right. \quad (\text{П2.1})$$

где D – внешний диаметр корпуса машины в м, L – длина корпуса машины в м, $A = 0.33$, $a = 0.22$, $C = 1900$, $x = 0.09$, C_M определяется с помощью (1.8).

Важно помнить, что C_M не является высокоточным инструментом предсказания массы. Также формулу (П2.1) следует использовать только для грубых оценок.

На точность оценки может повлиять то, что ЭМ могут иметь разную плотность компоновки (см. Рис. П2.1, в том числе из-за различной частоты вращения или интеграционных решений).

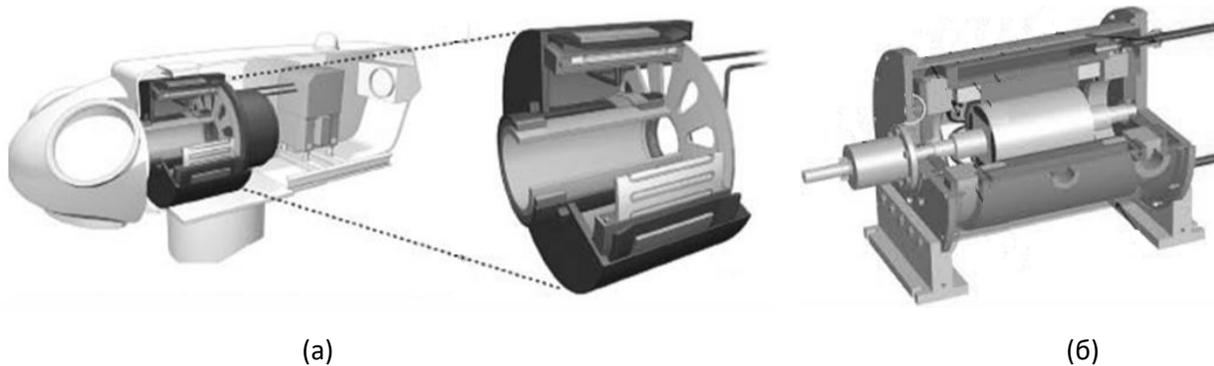


Рис. П2.1. Примеры ЭМ с различной плотностью компоновки: невысокой (а) и невысокой (б).

Масштабирование

Пожалуй, одна из потенциальных основных областей применения машинной постоянной C_M – масштабирование – оценка массы и габаритов новой машины, исходя из параметров известной машины.

Чтобы показать процесс масштабирования на примере, возьмем две машины того же типа, метода охлаждения, уровней напряжения и КПД. Запишем выражения для массы для известной машины - m_1 и для новой машины - m_2 :

$$m_1 = C_M P_1^{0.75} n_1^{-0.5}, \quad (\text{П2.2})$$

$$m_2 = C_M P_2^{0.75} n_2^{-0.5}. \quad (\text{П2.3})$$

Выразим C_M из (П2.2):

$$C_M = \frac{m_1}{P_1^{0.75} n_1^{-0.5}}. \quad (\text{П2.4})$$

Подставляя (П2.4) в (П2.3) получим:

$$m_2 = m_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{0.75} \sqrt{\frac{n_1}{n_2}} \quad (\text{П2.5})$$

Для машин с идентичными типом, напряжением, охлаждением и уровнем КПД массу новой машины m_2 можно рассчитать по массе исходной машины m_1 - по (П2.5).

Если стоит задача масштабирования не только на новую мощность и/или частоту вращения, но и на новое напряжение, охлаждение, уровень КПД, тогда следует сначала рассчитать C_{M1} и хотя бы приблизительно определить все коэффициенты, определяющие C_{M1} в выражении (1.8) для исходной машины, затем рассчитать C_{M2} для новой машины с коррекцией на изменяющиеся коэффициенты K_e , K_c или K_u , и наконец, рассчитать массу и габариты новой машины.

Литература к Приложению 2

[П2.1] А. В. Матвеев, Альтернативная машинная постоянная и оценка массы и габаритов электрических машин, Электричество, №11, 2019.

Приложение 3. Статистика по патентным заявкам

В данном приложении систематизированы результаты поиска количества патентных семей по отдельным типам ЭМ, а также даны цифры по странам и фирмам, где было подано наибольшее количество патентных заявок по данным типам ЭМ. Данные собраны с помощью открытой патентной базы www.espacenet.com.

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

Табл. ПЗ.1. H02K17. Asynchronous induction motors/generators

	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

Табл. ПЗ.1. H02K17. Asynchronous induction motors/generators (продолжение)

	1991-1995	1996-2000	2001-2005	2006-2010	2011-2015	2016-2020
Число семей	1247	1114	1258	1403	1935	1919
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	China - 1386, USA - 329, Japan - 210
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	Siemens - 39, Jiangsu Huanqiv - 36, Wolong Electric - 34

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

1. Поиск по классу H02K21 «Synchronous motors/generators having permanent magnets» - информация приведена в Таблице ПЗ.2.
2. Поиск по более широкому классу H02K и ключевым словам «Permanent magnet» - информация приведена в Таблице ПЗ.3. Исследовался только период с 1991 года.

Табл. ПЗ.2. H02K21. Synchronous motors/generators having permanent magnets

	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

Табл. ПЗ.2. H02K21. Synchronous motors/generators having permanent magnets (продолжение)

	1991-1995	1996-2000	2001-2005	2006-2010	2011-2015	2016-2020
Число семей	2492	3735	4888	5623	5482	7262
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	China - 4925, Japan - 2216, USA - 1975
Ведущие фирмы	Matsushita - 117, Sony - 81, Nihon - 73	Matsushita - 200, Nihon - 123, Hitachi - 92	Matsushita - 202, LG Electronics - 117, Mitsubushi - 116	Honda - 198, Mitsubishi - 141, Daikin - 135	Mitsubishi - 185, Denso - 149, Daikin - 64	Denso - 185, Mitsubishi - 163, Zhuhai Gree - 126

Табл. ПЗ.3. "Permanent magnet" + H02K.

	1991-1995	1996-2000	2001-2005	2006-2010	2011-2015	2016-2020
Число семей	2898	4068	5279	8121	11254	18473
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	China - 15408, USA - 2347, Japan - 1999
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	Zhuhai Gree - 380, Mitsubishi - 197, Harbin Inst Technology - 162

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 Таблице ПЗ.4.

Табл. ПЗ.4. H02K23. DC commutator motors or generators having mechanical commutator; Universal AC/DC commutator motors

	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 & Automatisation - 19	Siemens - 38, GE - 17, Bosch - 15	Hitachi - 73, Matsuhita - 52, Siemens - 34	Matsushita - 342, Hitachi - 130, Canon - 36	Matsushita - 212, Hitachi - 115, Mitsubishi - 59	Hitachi - 60, Matsushita - 58, Mitsubishi - 53

Табл. ПЗ.4. H02K23. DC commutator motors or generators having mechanical commutator; Universal AC/DC commutator motors (продолжение)

	1991-1995	1996-2000	2001-2005	2006-2010	2011-2015	2016-2020
Число семей	1339	1475	1738	1636	1167	1085
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	China - 740, Japan - 250, USA - 223
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	Mitsuba - 39, Denso - 32, Johnson - 11

По вентильно-индукторным машинам поиск был проведен по более широкому классу H02K и ключевым словам «Switched (or variable) reluctance» - информация приведена в Таблице ПЗ.5.

Табл. ПЗ.5. "Switched (or variable) reluctance" + H02K

	1986-1990	1991-1995	1996-2000	2001-2005	2006-2010	2011-2015	2016-2020
Число семей	88	201	332	249	275	558	852
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	China - 702, USA - 133, Japan - 69
Ведущие фирмы	Nidec SR Drives	Nidec SR Drives	Nidec SR Drives	LG Electronics	Mitsuba	Samsung	Shenzhen Huayin

Приложение 4. Пример методики патентного поиска

Существуют многочисленные бесплатные и платные онлайн-инструменты для поиска и организации патентной информации. Один из лучших - **бесплатная патентная база Espacenet** Европейского патентного ведомства (<https://worldwide.espacenet.com>)

Патентный поиск можно вести по ключевым словам, патентной классификации, именам изобретателей и правообладателей, временным промежуткам или комбинациям вышеперечисленного.

Следует хотя бы поверхностно изучить международную систему патентной классификации МПК, в которой изобретения делятся на пронумерованные классы и подклассы, каждый из которых имеет свой номер. Большинство патентных поисковых систем позволяют искать патенты в рамках определенных классов, что позволяет сузить результаты поиска.

При использовании в поиске ключевых слов, важно помнить про синонимы и альтернативные термины. Тот же самый тип машины может называться «вентильно-индукторная», просто «индукторная», «синхронно-реактивная», просто «реактивная». Аналогично, на английском языке этот же тип машины может называться «switched reluctance» и «variable reluctance».

Опишем процесс поиска с использованием базы Espacenet на примере. Предположим, что нашей целью является нахождения патентов по асинхронным машинам с массивным ротором. Начнем с выполнения булева поиска. При булевом поиске используются два или более ключевых слов или кодов, соединенных такими словами, как AND, OR или NOT. Возьмем одну комбинацию ключевых слов – «induction motor» и один код из МПК – «H02k», который соответствует классу «Электрические машины». Поля поиска в соответствующем окне Espacenet изображены на Рис. П.4.1. Эти поля соответствуют следующей поисковой строке: `ftxt all "induction motor" AND cl any "h02k"`. Запуск соответствующего поиска приносит 64417 найденных записей (патентных семей). Это слишком большое количество, которое физически невозможно просмотреть, поэтому следует попробовать сузить пространство поиска. Всегда имеет смысл в экспериментировании с поисковыми строками и булевыми операторами, чтобы найти более релевантные результаты.

AND ▾ + Field

All text fields ▾ all ▾ → Group

induction motor X

IPC or CPC ▾ any ▾ → Group

h02k X

Рис. П.4.1. Поиск по названию машины и коду H02K.

Постараемся сузить пространство поиска, выбрав более узкий подкласс (асинхронные машины) внутри класса «Электрические машины». На Рис. П.4.2. показано расположение соответствующего кода (H02K17/00) в МПК. Также используем более специфическое ключевое слово для определения массивного ротора – «solid». Поля поиска по типу ротора и коду H02K17/00 показаны на Рис. П.4.3, а окно результатов с 38 найденными записями - на Рис. П.4.4.

Отметим, что 38 записей – то количество, которое можно достаточно быстро просмотреть и сделать выводы о том, найдена ли релевантная информация, или поиски следует продолжить. В данном примере просмотр показывает, что в записях мало информации по асинхронным машинам с массивным ротором, т. е. результат поиска не достигнут.

Расширим пространство поиска перейдя от кода для подкласса - H02K17/00 к коду для класса - H02K, при этом конкретизируем, что слово «массивный» («solid») относится к ротору «solid rotor» (Рис. П.4.5) и запущен поиск. На Рис. П.4.6 показано окно результатов с 350 найденными записями. Уже первый беглый просмотр иллюстраций показывает, что найдена релевантная информация.

Использование большого количества вариантов ключевых слов важно потому, что некоторые патенты намеренно содержат неясные формулировки. Это попытка "спрятать" патент и может дать владельцу патента основания для последующего судебного иска против конкурентов, которые патент не нашли и нарушили права его владельца.

Еще один способ поиска патентов - по ссылкам. В патентах часто делаются ссылки на другие похожие патенты. Когда вы найдете интересующий вас патент, поищите в нем ссылки на другие патенты. Это может привести к нахождению новых изобретений, имеющих отношение к вашему поиску.

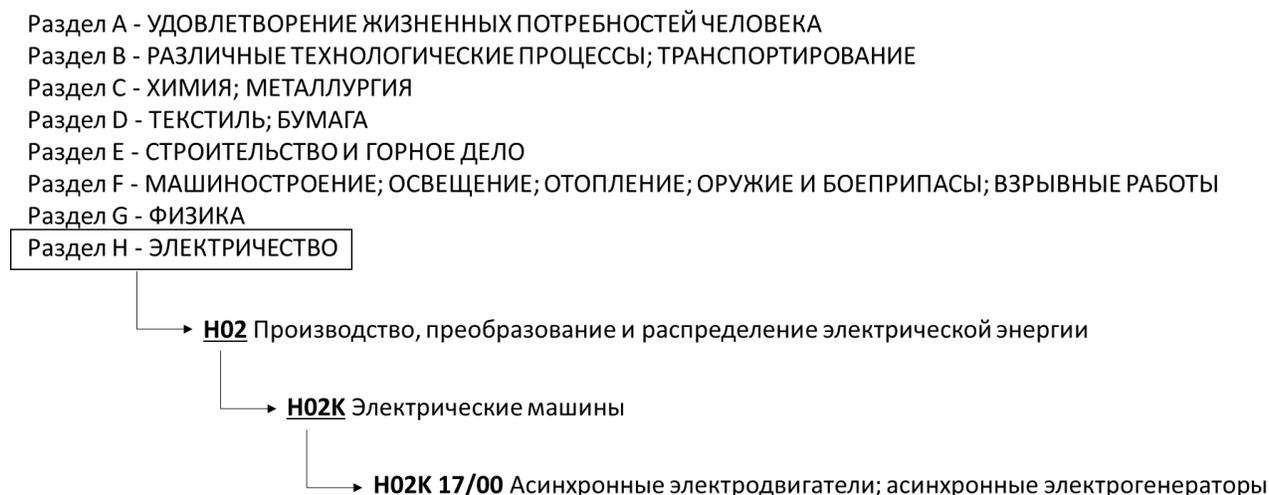


Рис. П.4.2. Патентная классификация МПК и выбор одного из кодов.

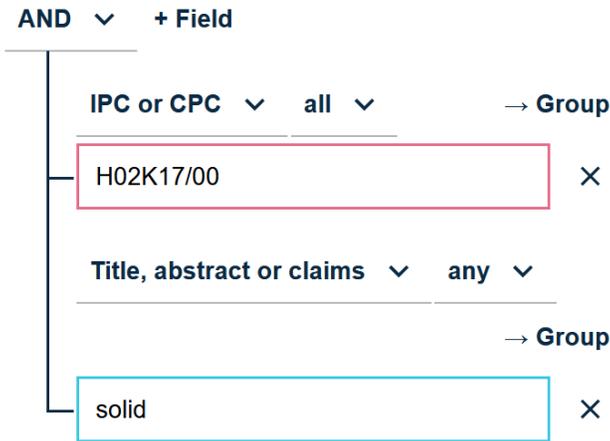


Рис. П.4.3. Поиск по типу ротора и коду H02K17/00.

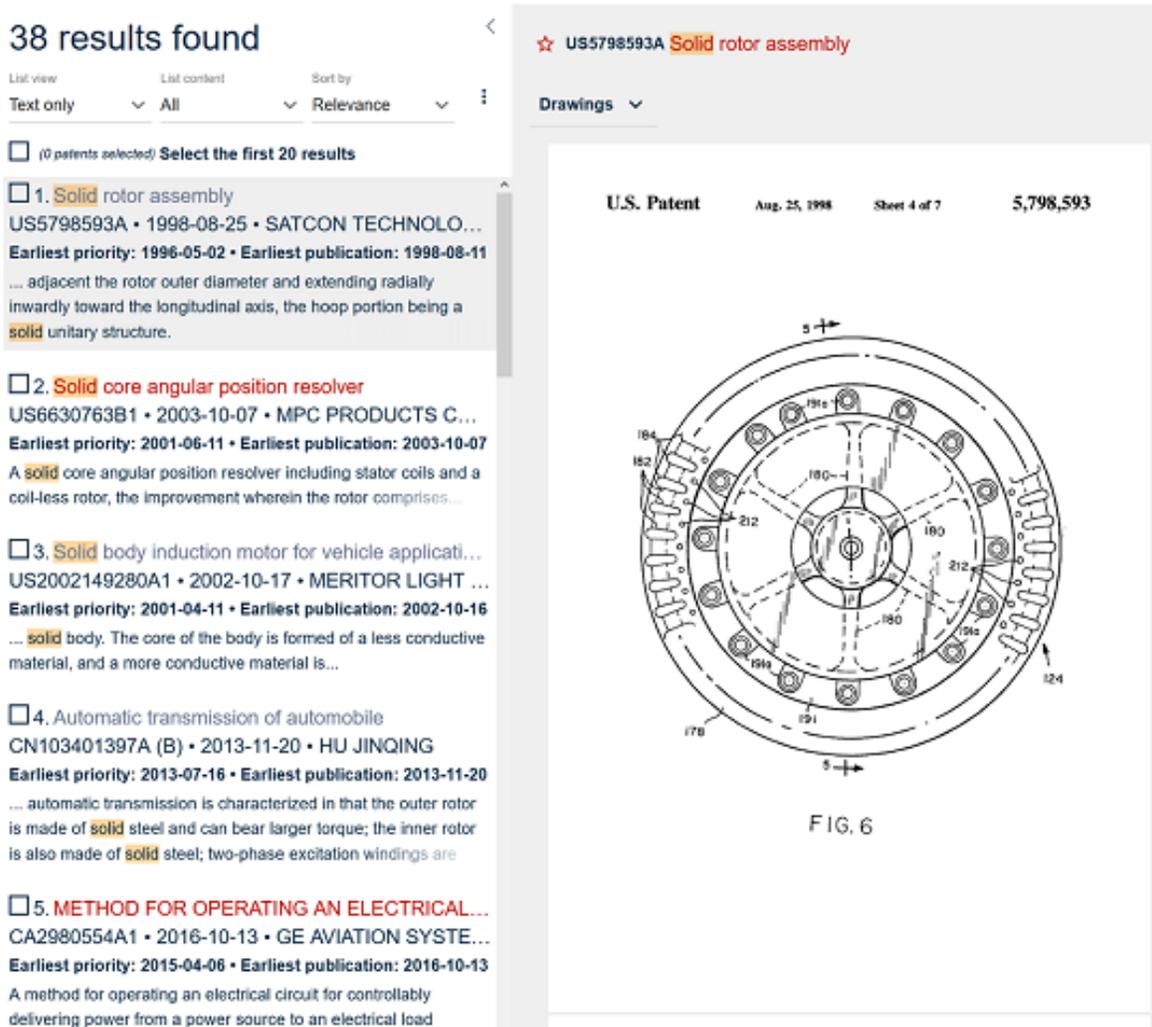


Рис. П.4.4. Окно результатов поиска по типу ротора и коду H02K17/00.

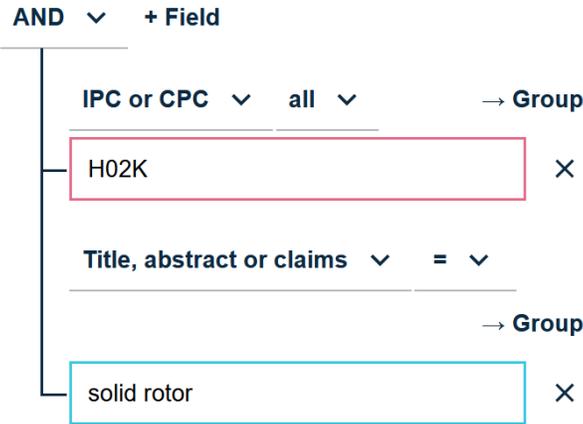


Рис. П.4.5. Поиск по типу ротора и коду H02K.

350 results found

List view: Text only | List content: All | Sort by: Relevance

(0 patents selected) Select the first 20 results

1. **SLOTTED SOLID ROTOR**
 WO2005078895A1 • 2005-08-25 • ROTATEK FINLA...
 Earliest priority: 2004-02-13 • Earliest publication: 2005-08-25
 ...This specification describes a slotted **solid rotor** of an electronic machine which rotor has slotting, and the holes of slots... electric characteristics of the rotor, and in addition, the rotor gains good
2. **SOLID ROTOR FOR MOTOR**
 JPH10174391A • 1998-06-26 • TOKYO SEIKO CO ...
 Earliest priority: 1996-12-17 • Earliest publication: 1998-06-26
 ... element. A motor incorporating such **solid rotor** thereinto is excellent in hysteresis characteristic.
3. **SOLID ROTOR TYPE INDUCTION MOTOR**
 JPS58163253A • 1983-09-28 • HITACHI LTD
 Earliest priority: 1982-03-23 • Earliest publication: 1983-09-28
 ... on both ends of the **solid rotor** in such a manner that the both ends will be formed to have the diameter smaller than that of the center part, thereby enabling to reduce the gap leakage flux of
4. **SOLID ROTOR**
 SU1636931A1 • 1991-03-23 • INST ELEKTRODINA...
 Earliest priority: 1987-08-27 • Earliest publication: 1991-03-23
 Изобретение относится к электромашиностроению. Цель - повышение надежности работы за счет снижения нагрева торцевых зон, в пусковых режимах. Для этого торцевая
5. **Solid rotor iron core structure**
 CN203554101U • 2014-04-16 • SHANXI NORTH M...
 Earliest priority: 2013-11-12 • Earliest publication: 2014-04-16

☆ WO2005078895A1 **SLOTTED SOLID ROTOR**

Drawings

Рис. П.4.6. Окно результатов поиска по типу ротора и коду H02K17/00.

Еще один способ поиска – по имени изобретателя. Например, на Рис. П.4.7 показаны поля поиска по имени Nikola Tesla. Результаты данного поиска помогут найти большинство изобретений Н. Теслы, по которым были поданы патентные заявки. В базе Espacenet их находится 88.



Рис. П.4.7. Поиск по имени изобретателя.

Возможен поиск по владельцу патента. Если вы знаете, кто является вашими основными конкурентами в бизнесе или научных разработках, найдите патенты, которыми они владеют. Вы сможете увидеть, что они делают, и провести сравнение с вашими собственными идеями. Это также поможет вам предсказать, может ли ваша инновация стать основанием для возможного иска о нарушении авторских прав.

Наконец, возможен прямой поиск по номеру патентной заявки или патента, если номер известен.

Несколько практических советов:

- После того как вы нашли несколько релевантных патентных результатов с помощью одного метода поиска, попробуйте другой метод, снова расширив поиск. Если посмотреть на поиск под другим углом, можно получить ценную информацию, которую вы могли упустить в первый раз.
- По возможности используйте несколько баз данных.
- Создайте документ, в котором сохраняется история поиска, или, как минимум, ссылки на интересные патенты.

В завершение стоит сказать, что после проведения предварительного патентного поиска, в зависимости от его результатов можно воспользоваться услугами профессионального патентаведа для проведения более глубокого поиска.

Приложение 5. 40 приемов с примерами из ЭМ

1	Изменение агрегатного состояния (изменение физико-химических параметров объекта)
	а) Изменить агрегатное состояние объекта. б) Изменить концентрацию или консистенцию. в) Изменить степень гибкости. г) Изменить температуру.

Пример 1.1. Способ пропитки обмотки в вакууме и под давлением состоит в том, что статор с обмоткой помещают в автоклав, создают в нем вакуум (для удаления воздуха) и, не снимая его, подают в автоклав пропиточный лак. Когда уровень лака покрывает весь статор, снимают вакуум и создают давление (для лучшего проникновения лака в обмотку). После снятия давления удаляют лак, еще раз создают вакуум и только после этого извлекают статор из автоклава. После пропитки производят сушку обмотки при повышенной температуре, чтобы удалить растворитель, ускорить затвердение лака и запечь лаковую пленку. Таким образом в процессе пропитки меняются как давление, так и температура.

Пример 1.2. На Рис. П5.1.1 показан прототип шагового двигателя, использующий проволоки из сплава с памятью формы (СПФ). При поочередном пропускании тока через проволоки они поочередно нагреваются и охлаждаются. Изменение температуры вызывает фазовые переходы в СПФ. В результате проволоки поочередно удлиняются и укорачиваются, приводя в движение эпицикл, находящийся во внутреннем зацеплении со стационарной центральной шестерней. Прототип продемонстрировал момент 2.6 мНм и частоту вращения 11 об/мин.

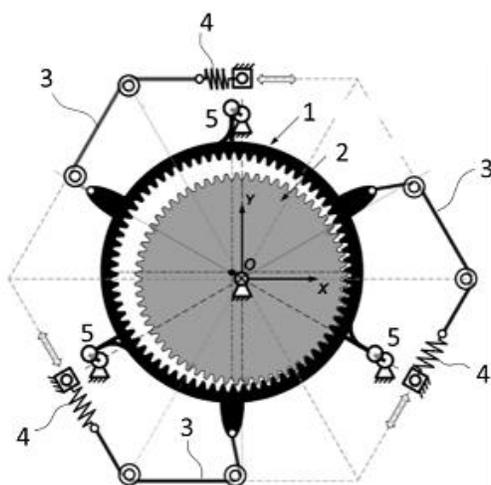


Рис. П5.1.1. Шаговый двигатель (1 - коронная шестерня или эпицикл, 2 - центральная шестерня, 3 - проволоки из сплава с памятью формы, 4 – пружины, 5 - коленчатые валы).

Пример 1.3. Двигатели скваженных и шельфовых электроцентробежных насосов работающие при высоком давлении обычно заполнены маслом (жидким диэлектриком). При высокой частоте вращения ротора в масле возникают значительные потери на трение. При частотах вращения выше 5-10 тысяч об/мин уровень потерь обычно становится неприемлемо высоким. Одним из решений может быть использование сжатого газа вместо масла.

Пример 1.4. В патенте US8940825B2 описан электродвигатель привода жесткого диска компьютера с использованием герметизирующего состава в области терминалов, где состав включает уретан-метакрилат, метакрилат и акриловую кислоту, взятые в определенных пропорциях. Пропорции компонентов выбирают таким образом, чтобы точка кипения метакрилата была выше 150 °С, чтобы исключить образование газа.

Пример 1.5. В патенте US6664705B2 описан генератор с естественной защитой от перегрева, часть магнитопровода статора которого изготовлена из материала с низкой температурой Кюри. При перегреве данная часть статора теряет свои магнитные свойства и магнитный поток, создаваемый ротором, не достигает обмоток статора, таким образом генератор перестает работать и охлаждается.

2	Предварительное действие
	а) Заранее выполнить требуемое изменение объекта (полностью или хотя бы частично). б) Заранее расставить объекты так, чтобы они могли вступить в действие с наиболее удобного места и без затрат времени на доставку.

Пример 2.1. Для устранения конденсата после простоя или хранения при отрицательной температуре двигатель прогревают перед пуском. При прогреве двигателя используются только две фазы, в то время как третья фаза отключена (электронными ключами). В результате этого ток поступает только на одну обмотку, нагревая ее, но не позволяя ротору вращаться. Чтобы электродвигатель прогревался равномерно, каждые несколько секунд обмотка, на которую подается ток, меняется.

Пример 2.2. Перед тем, как включать генератор большой мощности на нагрузку ему дают поработать на холостом ходу, чтобы вошли в штатный режим система циркуляции масла в подшипниках и система охлаждения.

Пример 2.3. В асинхронном электроприводе, если пуск двигателя должен быть синхронизирован с освобождением механического тормоза или если требуется максимально возможный пусковой момент, возможно использовать режим предварительного намагничивания машины с выбором времени намагничивания (данная функция реализована в современных преобразователях частоты).

Пример 2.4. Для более точного выполнения задания (по времени и положению) электроприводом можно выбрать зазоры в редукторе перед пуском или реверсом (данная функция реализована в современных преобразователях частоты).

Пример 2.5. Для устойчивости энергосистемы к аварийному отключению энергоблоков создается так называемый «вращающийся резерв» — энергоблоки, на которых турбина и генератор вращаются, но они не загружены на полную мощность.

Пример 2.6. В патенте US8664817B2 описан погружной маслозаполненный двигатель для работы в глубоких скважинах с температурой выше 180 °С. В изоляции двигателя используются полиамидные пленка и эпоксидная смола. При высокой температуре эпоксидная смола выделяет аминокислоту, которая может разрушать полиамидную пленку. Для предотвращения проблемы, масло, которым заполнен двигатель, включает в себя специальные добавки для разложения аминокислоты.

3	Дробление
	а) Разделить объект на независимые части. б) Выполнить объект разборным. в) Увеличить степень дробления объекта.

Пример 3.1. При конструкции сердечника статора с минимальным открытием пазов и сосредоточенной обмоткой, укладка обмотки в пазы может быть очень трудоемкой и достижение высокого фактора заполнения паза медью практически невозможно. Решением может быть изготовление сердечника статора из сегментов, как показано на Рис. П5.3.1. Намотки катушек производится на отдельные сегменты, а затем сегменты собираются в кольцо и катушки соединяются в общую обмотку.



Рис. П5.3.1. Сердечники статора и ротора и один отделенный сегмент статора.

Пример 3.2. В машинах большой мощности с воздушным охлаждением сердечник статора делится на аксиальные пакеты, между которыми оставляют небольшие зазоры, которые используются как каналы для потоков охлаждающего воздуха. Таким образом реализуется так называемая радиальная системы вентиляции Рис. П5.3.2.

Пример 3.3. В корпусе судна ниже ватерлинии ближе к килю пространство ограничено (вертикально и в стороны от вала), поэтому один большой электродвигатель не поместится. Решением является пропульсивная система с двумя электродвигателями в тандеме (Рис. П5.3.3). В качестве дополнительного преимущества получаем систему с резервированием.

Пример 3.4. Для снижения потерь в магнитах из-за вихревых токов магниты делят на сегменты (Рис. П5.3.4). Количество сегментов и направление сегментирования зависит от частоты питания, наличия высших гармоник и частоты вращения машины.

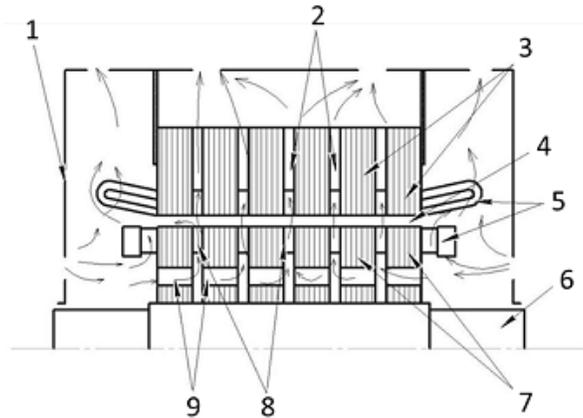


Рис. П5.3.2. Радиальная системы вентиляции (1 - корпус, 2 – радиальные каналы статора, 3 – пакеты статора, 4 – зазор, 5 – лобовые части, 6 – вал, 7 - пакеты ротора, 8 - радиальные каналы ротора, 9 – аксиальные каналы ротора).

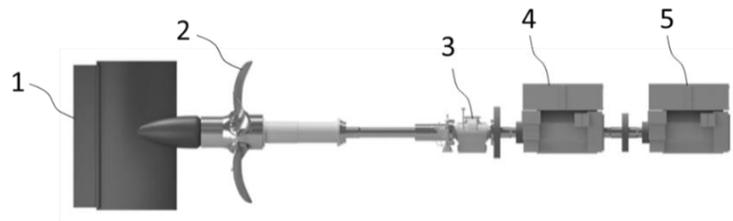


Рис. П5.3.3. Пропульсивная система (1 - руль, 2 – винт, 3 – упорный подшипник, 4,5 – двигатели).

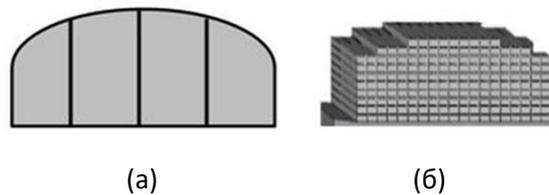


Рис. П5.3.4. Некоторые варианты сегментирования магнитов: (а) магнит из 4 сегментов с сохранением аркообразной формы, (б) магнит, состоящий из множества сегментов, сегментированный как в тангенциальном, так и радиальном направлении.

Пример 3.5. В некоторых случаях преобразователи частоты (ПЧ) низкого напряжения и малой мощности, которые можно полностью реализовать на одной печатной плате, изготавливаются из двух соединяемых плат - отдельно силовая и управляющая части. Это делается для удобства тестирования и ремонта.

Пример 3.6. Для обеспечения сохранения работоспособности системы электропривода при неисправности в одной части обмотки, обмотку делят на электрически независимые части, каждая из которых является 3-фазной обмоткой и питается от отдельного преобразователя частоты (ПЧ). Получается система с резервированием (Рис. П5.3.5.).

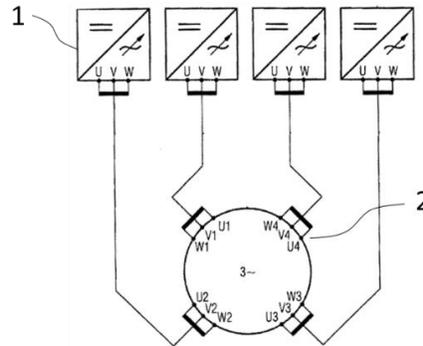


Рис. П5.3.5. Система с резервированием (1 - ПЧ, 2 – отдельная 3-фазная обмотка в двигателе).

4	Замена механической среды
	<p>а) Заменить механическую систему оптической, акустической или "запаховой".</p> <p>б) Использовать электрические, магнитные и электромагнитные поля для взаимодействия с объектом.</p> <p>в) Перейти от неподвижных полей к движущимся, от фиксированных - к меняющимся по времени, от неструктурных - к имеющим определенную структуру.</p> <p>г) Использовать поля в сочетании с ферромагнитными частицами.</p>

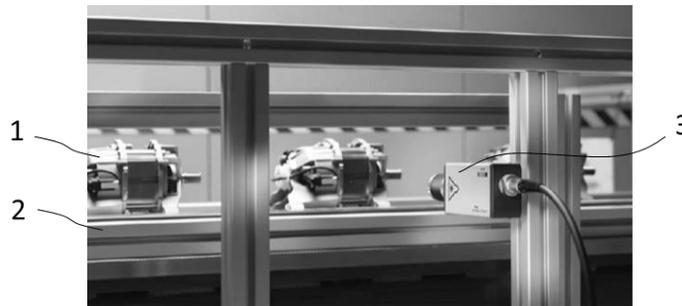


Рис. П5.4.1. ЛДВ на конвейере (1 - ЭМ, 2 – конвейер, 3 - ЛДВ).

Пример 4.1. В лазерном доплеровском виброметре (ЛДВ) используется эффект Дóплера — изменение частоты и, соответственно, длины волны излучения, воспринимаемой наблюдателем

(приёмником), вследствие движения источника излучения относительно наблюдателя (приёмника). ЛДВ может использоваться, например, для определения неисправностей в подшипниках, посредством измерения вибраций. На Рис. П5.4.1 показано бесконтактное измерение вибраций электродвигателей на выходных испытаниях.

Пример 4.2. В магнитных муфтах (Рис. П5.4.2) и магнитных редукторах вместо механического сцепления зубцов передачи используется магнитное поле.

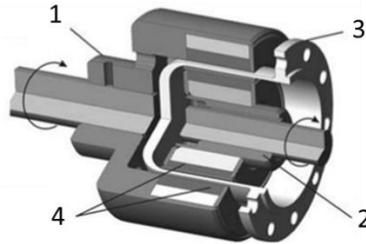


Рис. П5.4.2. Магнитная муфта (1 – внешняя полумуфта, 2 – внутренняя полумуфта, 3 – герметичный экран, 4 – постоянные магниты).

Пример 4.3. В пассивных магнитных подшипниках (Рис. П5.4.3) опора на силы отталкивания магнитов.

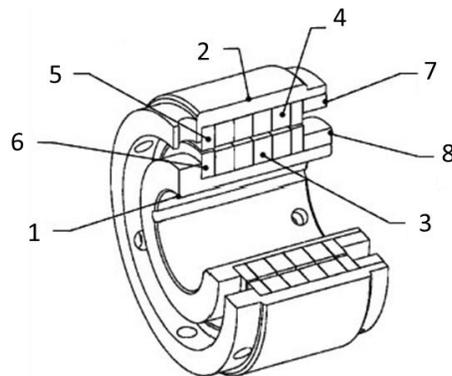


Рис. П5.4.3. Магнитный подшипник (1 – подвижная втулка, 2 – неподвижная втулка, 3 – подвижный магнит, 4 – неподвижный магнит, 5, 6 – изолирующие шайбы, 7, 8 – торцевые кольцевые втулки).

Пример 4.4. В ряде применений происходит переход от коллекторных машин постоянного тока с неподвижным полем к бесколлекторным машинам переменного тока с вращающимся полем.

Пример 4.5. Электромагнитные порошковые муфты позволяют осуществлять как жесткое соединение валов, так и скольжение между полумуфтами. Принцип действия порошковых муфт основан на использовании электромагнитных и механических сил, действующих в зазоре, заполненном ферро порошком. Эти силы изменяют вязкость наполнителя и тем самым изменяют связь между ведущими и ведомыми элементами муфты. Муфты с сухим наполнителем называются

ферро порошковыми, с жидким – магнитоэмульсионными. При отсутствии магнитного поля частицы ферромагнитного порошка не связаны между собой и момент от одной полумуфты к другой не передается. При включении обмотки в зазоре создается магнитное поле, между частицами порошка и полумуфтами возникают силы притяжения, которые обеспечивают передачу момента. Чем сильнее магнитное поле, тем больше передаваемый момент.

5	Вынесение
	Отделить от объекта "мешающую" часть ("мешающее" свойство) или, наоборот, выделить единственно нужную часть (нужное свойство).

Пример 5.1. В туннельном движителе (для подруливающего устройства) с интегрированным синхронным двигателем с постоянными магнитами (Рис. П5.5.1) используются только активные части двигателя: статор интегрирован в кольцевое крыло, ротор – на периферию винта, представленного пятью лопастями. У интегрированной ЭМ нет вала, механических подшипников, торцевых несущих конструкций, корпуса. Есть только единственно необходимое – активные части.

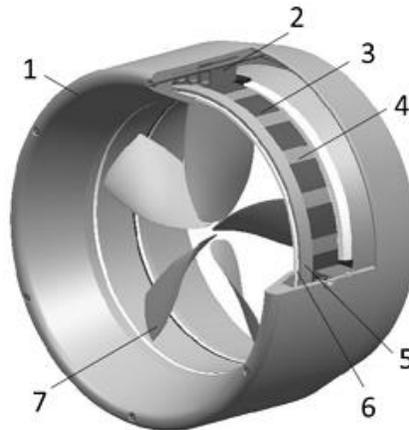


Рис. П5.5.1. Туннельный движитель (1 – кольцевое крыло, 2 – статор, 3 – магниты ротора, 4 – ярмо ротора, 5 – вкладыш подшипника, 6 – водоподшипник, 7 - винт).

Пример 5.2. В ЭМ с обмоткой ротора из высокотемпературных сверхпроводников (ВСП) локально на роторе создается зона низкой температуры, окруженная/изолированная вакуумом (Рис. П5.5.2).

Пример 5.3. Обычно в системе АЭП как у ЭМ, так и у управляющей электроники (преобразователя частоты - ПЧ) есть клеммы для подключения силового кабеля, соединяющего эти устройства. В системах малой мощности с небольшим расстоянием между ЭМ и ПЧ, где отсоединение кабеля не предусмотрено, можно отказаться от клемм и припаивать выходные концы обмотки непосредственно на печатную плату ПЧ.

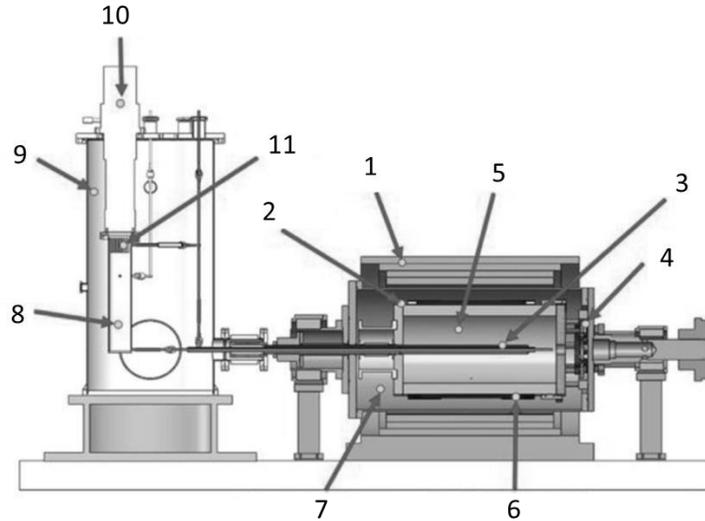


Рис. П5.5.2. СП-машина и крио-система (1 – статор , 2 – ВСП ротор, 3 – канал подачи неона, 4 – ВСП-ПМ возбудитель, 5 – камера, охлаждаемая газом, 6 – обмотки ВСП ротора, 7 – пространство заполненное вакуумом, 8 – резервуар с неоном, 9 – криостат, 10 – крио-кулер, 11 – теплообменник).

Пример 5.4. При использовании с управляющей электроникой (ПЧ) на больших глубинах (1-5 км) где давление достигает 100-500 атм, ПЧ отделяют от ЭМ и помещают в герметичную капсулу, часто сферообразную, где поддерживается нормальное атмосферное давление.

6	Использование механических колебаний
	<p>а) Привести объект в колебательное движение.</p> <p>б) Если такое движение уже совершается, увеличить его частоту (вплоть до ультразвуковой).</p> <p>в) Использовать резонансную частоту.</p> <p>г) Применить вместо механических вибраторов пьезовибраторы.</p> <p>д) Использовать ультразвуковые колебания в сочетании с электромагнитными полями.</p>

Пример 6.1. В патенте RU2382477C2 описывается машина для создания значительных пульсирующих осевых сил (импульсов). На полом кольцевом корпусе (статоре) расположены кольцевые катушки, на поршне - кольцевые постоянные магниты (Рис. П5.6.1). Поршень представляет собой бегун линейной машины, совершающий возвратно-поступательные колебания внутри корпуса. С двух сторон поршня образованы непроницаемые полости, заполненные газом, которые при сжатии газа работают как «газовые пружины». Поршень и газовые пружины составляют механическую систему с определенной резонансной частотой. Именно с этой частотой приводится в движение бегун линейной машины, чтобы войти в резонанс и получить значительно большие осевые импульсы.

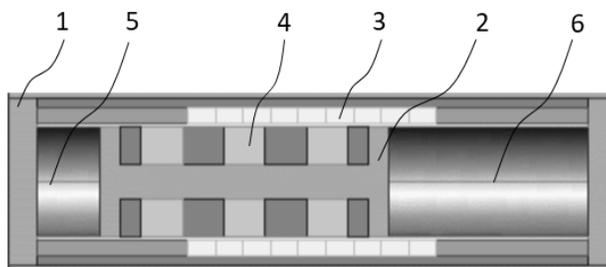


Рис. П5.6.1. Машина-резонатор (1 – корпус, 2 – поршень, 3 – кольцевые катушки, 4 – кольцевые магниты, 5, 6 – полости с газом).

Пример 6.2. В патенте EP0294591B1 представлено решение для измерения температуры в обмотках электрических машин на основе температурной зависимости скорости распространения ультразвука в определенных средах. Стекловолоконный кабель проложен вдоль обмотки и подключен к источнику ультразвука. Из-за изменения температуры вдоль обмотки изменение времени прохождения или изменение фазового сдвига ультразвука могут быть измерены электронными средствами и интерпретированы в качестве значения температуры.

Пример 6.3. В патентной заявке EP0100474A1 представлен способ пропитки или покрытия обмоток электрических машин структурно-вязкими или тиксотропными реактивными смолами, не содержащими растворителей, в процессе погружения, отличающийся тем, что реакционная смола подвергается воздействию ультразвука во время погружения.

Пример 6.4. В патентной заявке CN101404442A представлена комбинация обычного электродвигателя и ультразвукового двигателя, в котором используется обратный пьезоэлектрический эффект и ультразвуковая вибрация пьезоэлектрической керамики для преобразования микроскопической деформации эластичного материала в движение ротора за счет резонансного усиления и фрикционной связи.

Пример 6.5. В патенте FR 2645367B1 описан способ изготовления сердечников электрических машин из магнитного материала, включающий покрытие слоем частиц электростатическим способом, согласно которому детали обезжиривают перед нанесением на них слоя изолирующих частиц, отличающийся тем, что детали размагничивают перед обезжириванием, а размагниченные детали подвергают механическим вибрациям (встряхивают) для удаления частиц опилок, которые могут осесть на деталях.

Пример 6.6. В патентной заявке DE3634421A1 для контроля смещений ротора относительно статора электрической машины ширина воздушного зазора измеряется с помощью акустических сигналов в ультразвуковом диапазоне. Непрерывное измерение можно проводить как при неподвижном роторе, так и при вращающемся (Рис. П5.6.2). Два измерительных устройства установлены под определенным углом по окружности внутри корпуса машины, чтобы идентифицировать изменения радиального расстояния между ротором и статором (s_1 , s_2 , s_3), вызванные эксцентриситетом вращения или статическим эксцентриситетом в любом направлении.

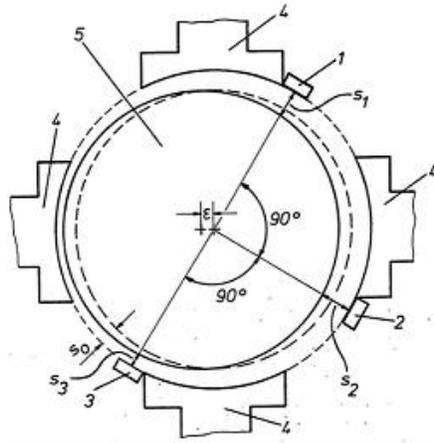


Рис. П5.6.2. Принцип измерительной системы (1, 2, 3 – измерительные устройства, 4 – полюса статора, 5 - ротор).

7	Динамизация
	<p>а) Характеристики объекта (или внешней среды) должны меняться так, чтобы быть оптимальными на каждом этапе работы.</p> <p>б) Разделить объект на части, способные перемещаться относительно друг друга.</p>

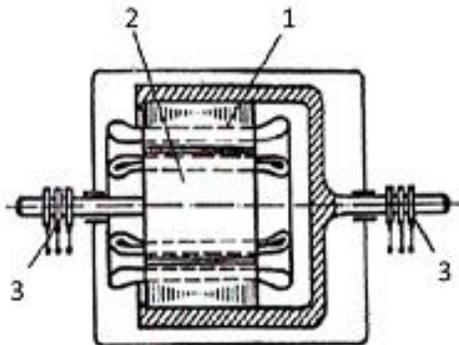


Рис. П5.7.1. Биротативная машина (1 – первый ротор, 2 – второй ротор, 3 – контактные кольца).

Пример 7.1. Обычная ЭМ имеет использует две активные части: стационарную – статор и вращающуюся – ротор. В биротативной машине (Рис. П5.7.1) вращаются обе активные части, т.е. статора нет, а есть два ротора. Можно сказать, что статор стал вращаться и стал одним из роторов. Энергия передается на обмотки роторов через контактные кольца.

Пример 7.2. Управляющая электроника традиционно стационарна. Однако, в некоторых синхронных машинах диодные выпрямители, питающие обмотку возбуждения, располагаются на роторе, получая питание от вращающегося трансформатора.

Пример 7.3. В патенте US6492753B3 ротор может смещаться в аксиальном направлении, снижая наведенную в обмотках статора ЭДС. Смещение используется в режиме ослабления поля на высоких частотах вращения.

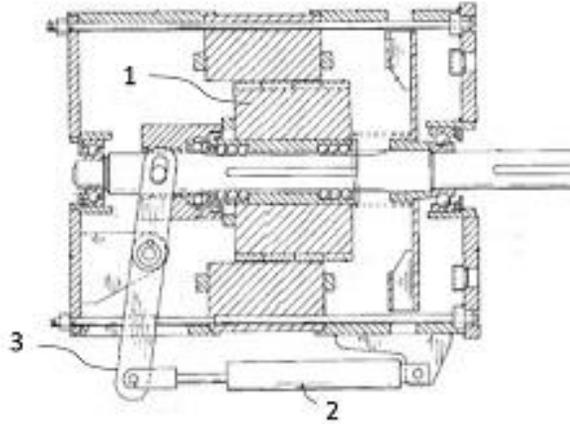


Рис. П5.7.2. ЭМ с механизмом смещения ротора (1 – ротор, 2 – актюатор, 3 – рычаг).

Пример 7.4. При управлении СМПМ в широком диапазоне частот вращения могут использоваться адаптивные алгоритмы (патент EP2497266B1). Например, синусоидальное питание на низких частотах и трапециевидное – на высоких. В другом примере несущая частота ШИМ может меняться в зависимости от частоты вращения.

Пример 7.5. Для снижения пульсаций момента используют так называемый «скос пазов» - для этого ротор аксиально делится на несколько пакетов (Рис. П5.7.3).

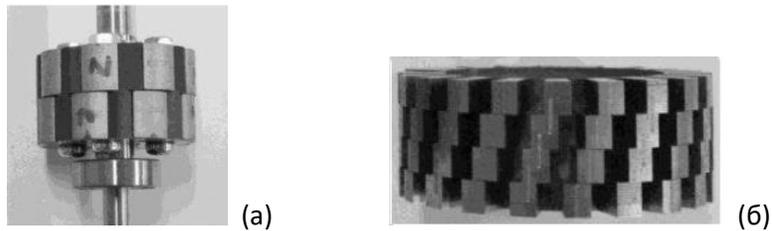


Рис. П5.7.3. «Скос пазов».

8	Периодическое действие
	а) Перейти от непрерывного действия к периодическому (импульсному). б) Если действие уже осуществляется периодически - изменить периодичность. в) Использовать паузы между импульсами для другого действия.

Пример 8.1. В вентильно-индукторной машине в каждый момент времени часть катушек обмотки не используется в процессе создания момента. В эти неактивные катушки могут подаваться слаботочные импульсы для определения углового положения ротора (с использованием неравномерной магнитной проводимости). Измерения производятся периодически, с частотой изменения активности катушек.

Пример 8.2. В СМППМ можно перейти на конструкцию с кратно большим количеством полюсов и увеличить фундаментальную частоту в соответствующее количество раз.

Пример 8.3. На специализированных морских судах (Рис. П5.8.1) используются системы электропривода лебедок с активной компенсацией вертикальной качки (АКВК). В такой системе с электрической лебедкой движение волны компенсируется автоматическим движением троса лебедки в противоположном направлении с той же линейной скоростью (соответственно периодически меняется направление вращения лебедки и приводного двигателя). Таким образом, крюк лебедки будет сохранять свое положение относительно морского дна. Лебедки с АКВК используются в системах с подводными аппаратами и для подъема оборудования, которое должно работать вблизи или на морском дне. АКВК может включать в себя контроль натяжения троса.

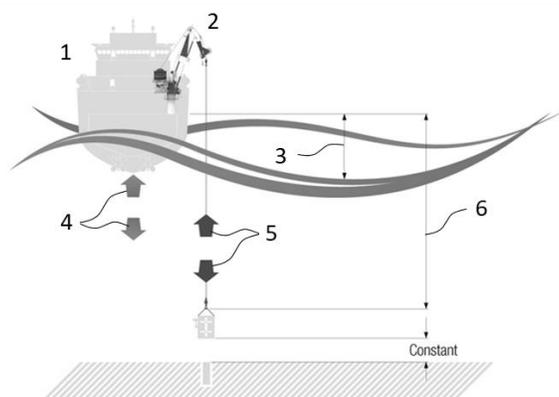


Рис. П5.8.1. Иллюстрация АКВК (1 – морское судно, 2 – лебедка, 3 – высота волны, 4 – вертикальные перемещения судна относительно дна, 5 – вертикальные перемещения троса относительно судна, 6 – расстояние груза от судна).

Электрическая часть системы АКВК (непосредственно привод лебедки, (Рис. П5.8.2) подразумевает накопление энергии в батарее при разматывании троса при движении судна вверх и использование накопленной энергии при наматывании троса на барабан лебедки при движении судна вниз. Для управления потоками энергии используется группа инверторов с общим звеном постоянного тока.

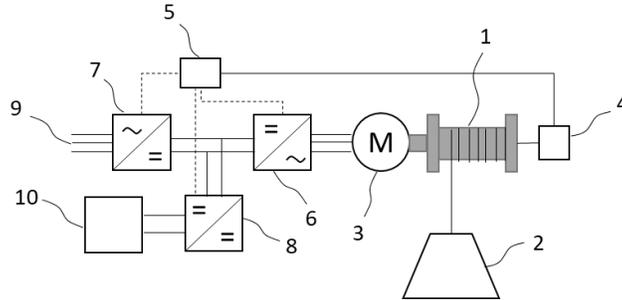


Рис. П5.8.2. Привод лебедки (1 – барабан, 2 – груз, 3 – ЭМ, 4 – датчик положения ротора, 5 – система управления, 6 – инвертор управления ЭМ, 7 – инвертор на стороне сети, 8 – преобразователь постоянного тока, 9 – электросеть судна, 10 – накопитель энергии).

Пример 8.4. В системах электропривода микропроцессор может периодически переключаться между различными задачами.

9	Изменение окраски
	<p>а) Изменить окраску объекта или внешней среды.</p> <p>б) Изменить степень прозрачности объекта или внешней среды.</p> <p>в) Для наблюдения за плохо видимыми объектами или процессами использовать красящие добавки.</p> <p>г) Если такие добавки уже применяются, использовать меченые атомы.</p>

Пример 9.1. Тип материала поверхности или ее покрытие определяют интенсивность охлаждения поверхности. Например, белая органическая пигментированная краска имеет как высокую отражательную способность, так и высокую излучательную способность. Исследуются наноструктурные покрытия, которые смогут отводить тепло в четыре раза быстрее, чем это было возможно ранее.

Пример 9.2. В заявке на полезную модель [CN202713047U](#) двигатель имеет прозрачную клеммную коробку. Коробка герметична и обеспечивает электрическую изоляцию. Через прозрачные стенки можно визуально контролировать состояние электрических соединений. В патентных заявках [JP2000224796A](#) и [GB713608A](#) применяется «окно» из прозрачного материала в корпусе машины, напротив узла, который требуется визуально контролировать. В патентной заявке [GB204499A](#) используется плата из материала, изменяющего цвет при изменении температуры. Таким образом можно визуально оценить температуру машины.

Пример 9.3. В патентной заявке [GB2450758A](#) («Устройство для снижения влажности во вращающейся электрической машине») предлагается использовать внутри корпуса машины осушительный агент, меняющий цвет в зависимости от уровня влажности внутри машины, и прозрачное окно для визуального контроля за цветом осушительного агента.

10	Копирование
	<p>а) Вместо недоступного, сложного, дорогостоящего, неудобного или хрупкого объекта использовать его упрощенные и дешевые копии.</p> <p>б) Заменить объект или систему объектов их оптическими копиями (изображениями). Использовать при этом изменение масштаба (увеличить или уменьшить копии).</p> <p>в) Если используются видимые оптические копии, перейти к копиям инфракрасным или ультрафиолетовым.</p>

Пример 10.1. При проектировании и вводе в эксплуатацию электропривода, как правило проводятся испытания, что требует больших временных и материальных затрат. Для решения этой проблемы можно использовать симуляторы оборудования на базе программируемых пользователем вентильных матриц (ППВМ, англ. field-programmable gate array, FPGA) — полупроводниковых устройств, которые могут быть сконфигурированы производителем или разработчиком после изготовления. Задачей ППВМ является моделирование в реальном времени силовой части электропривода, включающей в себя ПЧ, двигатель и приводной механизм.

Пример 10.2. Для выставок используются «пустые» двигатели – без активных частей. Это снижает их массу и упрощают транспортировку и установку на выставочный стенд. Визуально такой двигатель, естественно не отличается от двигателя с активными частями.

Пример 10.3. С распространением аддитивных технологий, в частности 3D-печати, появилась возможность «печати» элементов конструкции ЭМ из относительно дешевого материала (пластика). Такие «напечатанные» элементы могут быть полезны, например, для тестирования процесса сборки ЭМ. Также, например, можно «напечатать» каналы системы охлаждения и протестировать их эффективность.

Пример 10.4. Использование цифрового двойника вместо натуральных испытаний. Благодаря все более развитым мультидисциплинарным моделям и росту вычислительных мощностей, на все больших этапах разработки ЭМ можно использовать моделирование: это не только проектирование, но и производство, сборка, испытания, в том числе испытания в составе системы верхнего уровня.

Пример 10.5. Для поддержания равномерного натяжения листа металла на прокатном стане или листа бумаги на целлюлозно-бумажном производстве применяется система ведущий-ведомый (Рис. П5.10.1), в которой в зависимости от ряда параметров производства может поддерживаться одинаковый момент на валках. Момент одного двигателя «копируется» в другой посредством уставки, передающейся между инверторам двигателей, например, по оптоволоконной связи.

Пример 10.6. Для измерения и контроля температуры вместо интегрированных датчиков и системы визуальной презентации информации используется тепловизор.

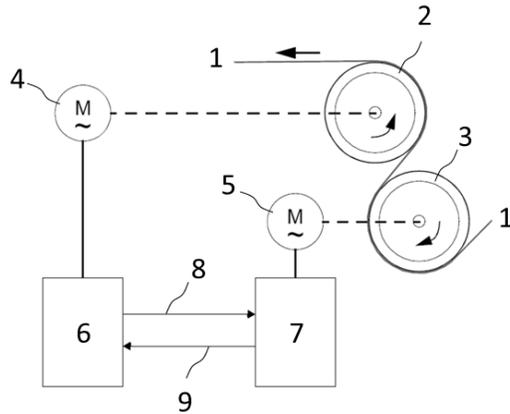


Рис. П5.10.1. Структура системы ведущий-ведомый (1 – лист/полотно, 2 – валок №1, 3 – валок №2, 4 – двигатель №1, 5 – двигатель №2, 6 – инвертор двигателя №1, 7 – инвертор двигателя №2, 8 – уставка момента, 9 – обратная связь,).

11	Наоборот
	<p>а) Вместо действия, диктуемого условиями задачи, осуществить обратное действие (например, не охлаждать объект, а нагревать).</p> <p>б) Сделать движущуюся часть объекта (или внешней среды) неподвижной, а неподвижную - движущейся.</p> <p>в) Перевернуть объект "вверх ногами".</p>

Пример 11.1. Обычно в СМПМ магниты расположены на роторе. В СМПМ с переключаемым потоком (flux-switching PMSM) магниты расположены на статоре, а не на роторе (Рис. П5.11.1).

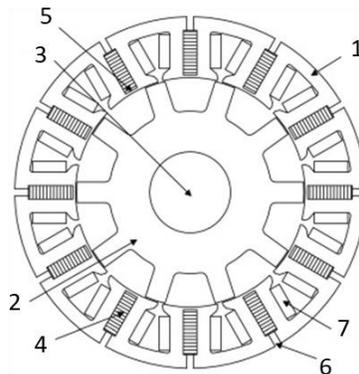


Рис. П5.11.1. Структура СМПМ с переключаемым потоком (1 – сердечник статора, 2 – ротор, 3 – вал, 4 – постоянные магниты, 5, 6 – зазоры).

Пример 11.2. Статор по определению является стационарным компонентом, однако в биротативной машин статор вращается.

Пример 11.3. В большинстве электрических машин ротор находится внутри статора, но в ряде случаев (например, двигатели дронов, ВЭУ) оправдано использование топологии с внешним ротором

Пример 11.4. Посадка ротора на вал обычно осуществляется путем нагревания ротора перед посадкой для создания необходимого зазора. Альтернативным решением может быть охлаждение вала перед посадкой. Охлаждение и сжатие вала может достигаться, например, погружением вала в ванну с жидким азотом. После сборки вал нагревается и, расширяясь, образует плотную посадку с натягом без деформации.

12	Местное качество
	<p>а) Перейти от одной структуры объекта (или внешней среды, внешнего воздействия) к неоднородной.</p> <p>б) Разные части объекта должны иметь (выполнять) различные функции.</p> <p>в) Каждая часть объекта должна находиться в условиях, наиболее благоприятных для ее работы.</p>

Пример 12.1. В система управления насосной станцией (Рис. П5.12.1) всего один ПЧ используется для поочередного пуска нескольких двигателей с последующим переключением двигателя, достигнувшего 50 Гц, напрямую на сеть. См. также Прием 20 «Универсальность».

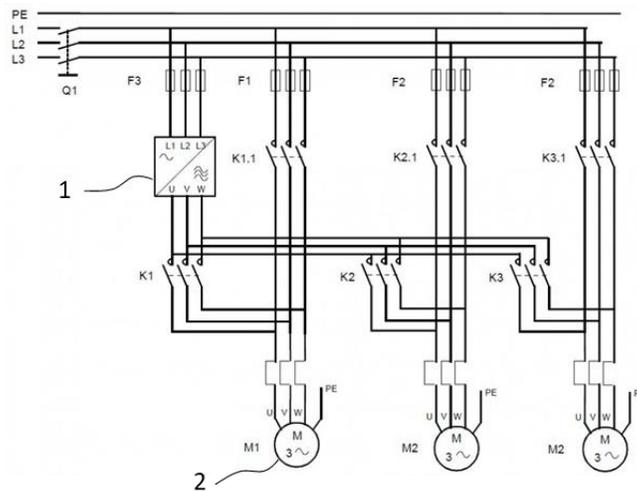


Рис. П5.12.1. Система управления насосной станцией: 1 – ПЧ, 2 – ЭМ.

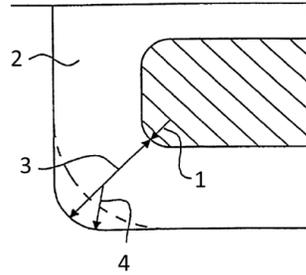


Рис. П5.12.2. Структура изоляции (1 – радиус закругления угла проводника, 2 – изоляция, 3 – толщина изоляции, 4 – радиус закругления изоляции).

Пример 12.2. В машинах со сверхпроводящими обмотками охлаждаются до критической температуры только непосредственно сверхпроводящие обмотки, а не вся машина. См. также пример 5.2.

Пример 12.3. В патенте SU1575058 предложено для охлаждения ротора использовать интегрированные тепловые трубки с зоной испарения, зоной конденсации и конденсаторопроводом - все элементы системы размещены локально на роторе. См. также пример 26.1.

Пример 12.4. В высоковольтных машинах с проводниками с прямоугольным поперечным сечением в районе углов проводников напряженность электрического поля выше, чем в районе их сторон. Для надежности работы изоляции ее толщину в районе углов проводников делают большей, чем в районе их сторон (Рис. П5.12.1).

13	Дешевая недолговечность вместо дорогой долговечности
	Заменить дорогой объект набором дешевых объектов, поступившись при этом некоторыми качествами (например, долговечностью).

Пример 13.1. В применениях с невысокой частотой вращения часто используется так называемый прямой привод с низкоскоростным электродвигателем. Вместо прямого привода можно использовать систему, состоящую из редуктора и высокоскоростного двигателя. Такая система совокупно будем иметь более низкую ненадежность и более короткий срок службы, но будет дешевле.

Пример 13.2. В применениях, где обычно оправдан плавный пуск, реализуемый посредством ПЧ или софтстартеров, например привод насосов можно отказаться от плавного пуска, а использовать пуск включением напрямую в сеть, что приведет и увеличению износа двигателя и механизма, но поможет сократить капитальные затраты на электронные устройства.

Пример 13.3. В целях экономии средств при установке системы электропривода можно использовать в качестве устройств защиты не автоматический выключатель, а «одноразовые» плавкие предохранители.

Пример 13.4. Можно сэкономить на фильтрах между ПЧ и ЭМ в случае системы с длинным кабелем, хотя, вероятно, это приведет к преждевременной деградации изоляции ЭМ.

Пример 13.5. Системы изоляции варьируются по структуре, типу материалов, добавок и допустимой температуре. Изоляция, рассчитанная на срок службы 100,000 часов отличается от изоляции, рассчитанная на срок службы 10,000 часов.

14	Использование пневмо- и гидроконструкций
	Вместо твердых частей объекта использовать газообразные и жидкие: надувные и гидронаполняемые, воздушную подушку, гидростатические и гидрореактивные.

Пример 14.1. В патентной заявке US2011148229A1 представлена система жидкостного охлаждения с принудительной циркуляцией, включающая зумпф для сбора жидкости, насос и форсунки. Система обеспечивает непосредственное охлаждения как статора и ротора со стороны зазора, так и охлаждение лобовых частей.

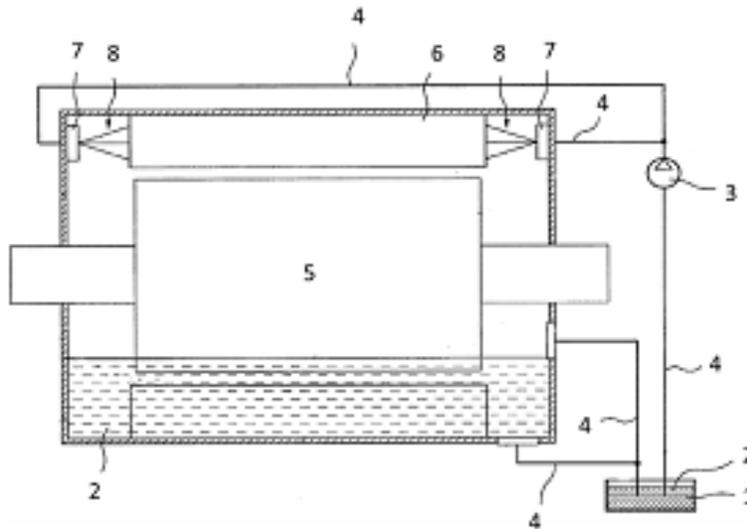


Рис. П5.14.1. Система охлаждения ЭМ (1 – резервуар с охлаждающей жидкостью, 2 – охлаждающая жидкость, 3 - насос, 4 – трубки, 5 – ротор, 6 – статор, 7 - форсунка, 8 – струи распыляемой жидкости).

Пример 14.2. В примере 6.1 газовые пружины используются для обеспечения возвратно-поступательные колебания бегуна внутри корпуса линейной машины.

Пример 14.3. Для обеспечения долгой работы подшипников машины на высоких частотах вращения используются газовые подшипники. См. также пример 31.2.

Пример 14.4. В патентной заявке US20080296909A1 для предотвращения высоких пусковых токов при запуске асинхронного электродвигателя используется пневмо-двигатель – «турбо-пневматический ассистент» (Рис. П5.14.2). Ток на статор подается только после разгона ротора.

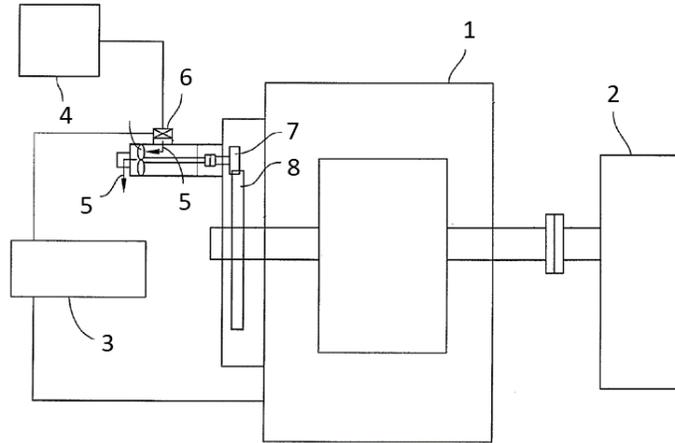


Рис. П5.14.2. Система турбопневматического пуска ЭМ (1 – ЭМ, 2 – нагрузка, 3 – система управления, 4 – подача воздуха, 5 – поток воздуха, 6 – клапан, 7, 8 – шестерни редуктора).

15	Отброс и регенерация частей
	<p>а) Выполнившая свое назначение или ставшая ненужной часть объекта должна быть отброшена (растворена, испарена и т. д.) или видоизменена непосредственно в ходе работы.</p> <p>б) Расходуемые части объекта должны быть восстановлены непосредственно в ходе работы.</p>

Пример 15.1. Для пуска АД может использоваться ПЧ или софтстартер (устройство плавного пуска), которые после пуска отключаются, а АД переключается напрямую на сеть, используя обходной контактор. См. также пример 12.1.

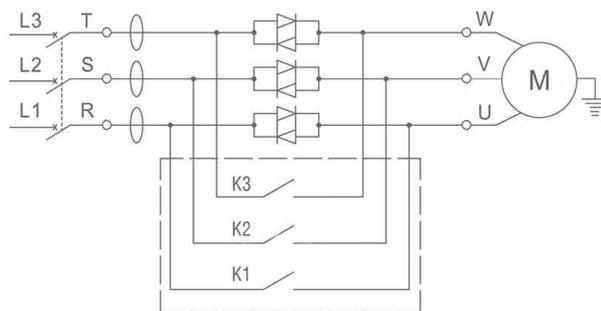


Рис. П5.15.1. Софтстартер с обходным контактором.

Пример 15.2. Регенерация/рекуперация энергии: энергия торможения вместо того, чтобы превращаться в тепло, может сохраняться в накопителях (батареи, конденсаторы, маховики) и использоваться по новой.

Пример 15.3. см. пример «Самолечащаяся изоляция» в главе 5.

Пример 15.4. Постоянные магниты, потерявшие часть магнитных свойств, например из-за высокой температуры, могут быть повторно намагничены в специальных установках импульсного намагничивания.

Пример 15.5. В машине, статор которой выполнен из сегментов с независимыми секциями обмотки, при неисправности обмотки в одном из сегментов, данный сегмент отключается, и машина может продолжать работу с пониженной нагрузкой.

16	Частичное или избыточное действие
	Если трудно получить 100% требуемого эффекта, надо получить "чуть меньше" или "чуть больше". Задача при этом может существенно упроститься.

Пример 16.1. Если в применении требуется момент и частота вращения, которые требуют разработки специальной новой ЭМ, а это неприемлемо по временным или экономическим причинам, то можно использовать имеющийся в наличии стандартный двигатель большей мощности.

Пример 16.2. При производстве обмотки с заполнением компаундом формы, в которую помещается обмотка, сложно отмерить нужный объем компаунда для заливки, поэтому заливают «с запасом», в после затвердевания избыточный компаунд просто счищается с формы.

Пример 16.3. Бессердечниковые машины имеют низкую индуктивность и для оптимальной работы желательно использовать высокую частоту ШИМ для снижения пульсаций тока. В некоторых применениях возможно использовать сниженную частоту ШИМ – при этом двигатель будет работать с более низким КПД, а ПЧ – с более высоким, т. е. КПД всей системы сильно не изменится.

Пример 16.4. Если охлаждение больших частей машины проблематично, можно охлаждать некоторые элементы локально.

17	Применение композиционных материалов
	Перейти от однородных материалов к композиционным.

Пример 17.1. Корпус двигателя может быть изготовлен из полимерного материала, армированного волокном, с интегрированными каналами охлаждения.

Пример 17.2. В роторах высокоскоростных машин с постоянными магнитами, расположенными на поверхности ротора, используются удерживающие экраны/гильзы из углеволокна.

Пример 17.3. Обмотки бессердечниковых машин могут состоять из меди проводников, эмали (изоляция на проводниках), стекловолокна (переплетенного с проводниками для придания механической прочности) и затвердевшей эпоксидной смолы, таким образом представлять собой композитный материал.

Пример 17.4. В машинах с высокой частотой питания и высокой частотой вращения для снижения потерь в меди используют не сплошные проводники, а литцендрат, представляющий собой многожильный провод, каждая жила которого покрыта изолирующим лаком.

Пример 17.5. Используемые в сердечниках машин (шихта) тонкие стальные листы, разделенные тонкими слоями изоляции являются композитным материалом.

Пример 17.6. Для снижения массы ЭМ, несущие структуры можно изготовить из композитных материалов.

18	Посредник
	Использовать промежуточный объект-переносчик. а) Использовать промежуточный объект, переносящий или передающий действие. б) На время присоединить к объекту другой (легко удаляемый) объект.

Пример 18.1. Для согласования уровня напряжения сети и ЭМ используются трансформаторы.

Пример 18.2. Для согласования частоты вращения имеющейся в наличии ЭМ и требуемой частоты вращения приводного механизма используются редукторы или мультипликаторы.

Пример 18.3. Для удобства присоединения многофазного кабеля к ЭМ небольшой мощности концы ее обмотки припаиваются к небольшой печатной плате, которая имеет дорожки, соединяющие обмотку в требуемую структуру, и которая служит интерфейсом для кабеля.

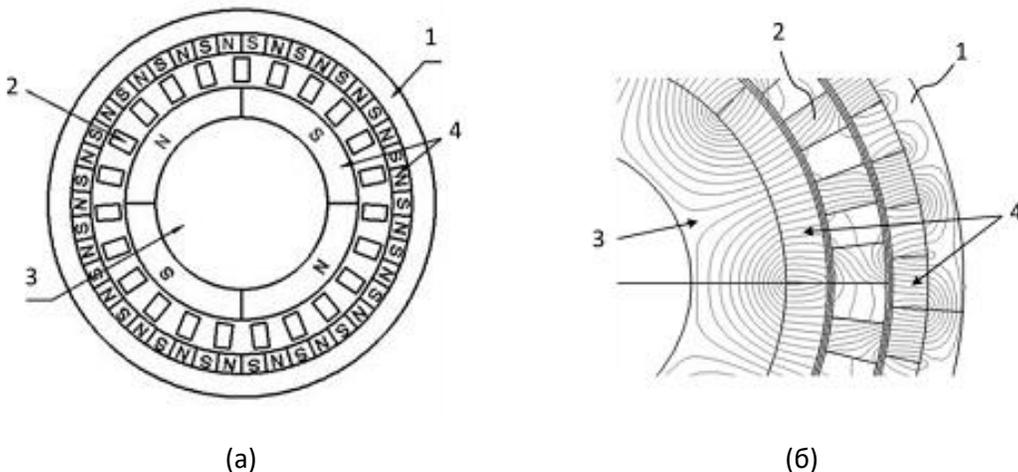


Рис. П5.18.1. Основные элементы магнитного редуктора (а) и магнитное поле (б): 1 – ядро внешнего кольца, 2 – «пальцы», 3 – ядро внутреннего кольца, 4 – постоянные магниты.

Пример 18.4. Для соединения валов ЭМ и механизма и для защиты от рывков и вибраций используются гибкие муфты.

Пример 18.5. В магнитных редукторах (Рис. П5.18.1) между внешним и внутренним кольцами находятся «пальцы» - ферромагнитные элементы, переносящие и конфигурирующие магнитное поле.

19	<p>Переход в другое измерение</p> <p>а) Трудности, связанные с движением (или размещением) объекта по линии, устраняются, если объект приобретает возможность перемещаться в двух измерениях (то есть на плоскости). Соответственно, задачи, связанные с движением (или размещением) объектов в одной плоскости, устраняются при переходе к пространству трех измерений.</p> <p>б) Многоэтажная компоновка объектов вместо одноэтажной.</p> <p>в) Наклонить объект или положить его "набок".</p> <p>г) Использовать обратную сторону данной площади.</p> <p>д) Использовать оптические потоки, падающие на соседнюю площадь или на обратную сторону имеющейся площади.</p>
-----------	---

Пример 19.1. Многослойные машины (Рис. П5.19.1) имеют несколько роторов и статоров.

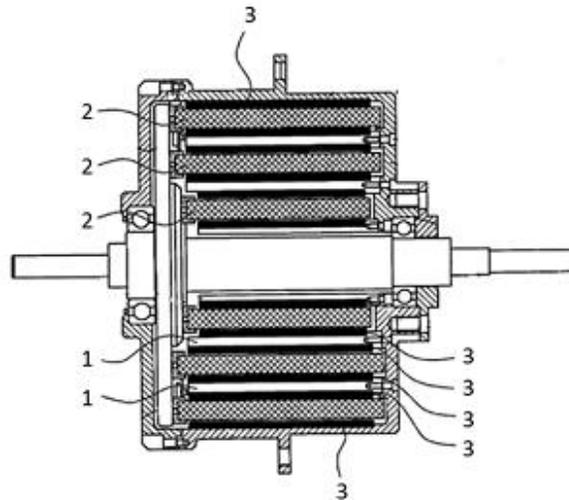


Рис. П5.19.1. Многослойная ЭМ (1 – роторы, 2 – статоры, 3 – магниты на роторе).

Пример 19.2. В системах механической обработки и измерения трехмерных геометрий может использоваться система вращательного движения в сочетании с механизмом линейного движения, приводимым в движение магнитострикционным приводом (Рис. П5.19.2).

Пример 19.3. Во вращательно-линейном актюаторе индукторного типа (Рис. П5.19.3) вращение создается по принципу вентильно-индукторного двигателя, а линейное движение – активацией определенных пар статоров и роторов-бегунов.

Пример 19.4. В печатных платах преобразователей частоты для управления двигателями можно использовать для монтажа компонентов обе поверхности.

Пример 19.5. В патенте DE2558405B2 ребра охлаждения как снаружи, так и внутри корпуса ЭМ (Рис. П5.19.3).

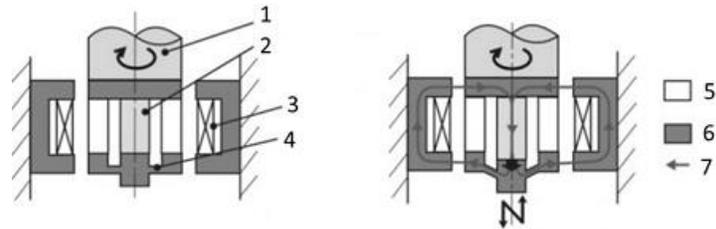


Рис. П5.19.2. Вращательно-линейный актюатор (1 – шпindelь, 2 – магнестрикционный актюатор, 3 – катушка, 4 – предварительно нагруженная диафрагма, 5 – немагнитный материал, 6 – магнитный материал, 7 – магнитный поток, 8 – линейные перемещения).

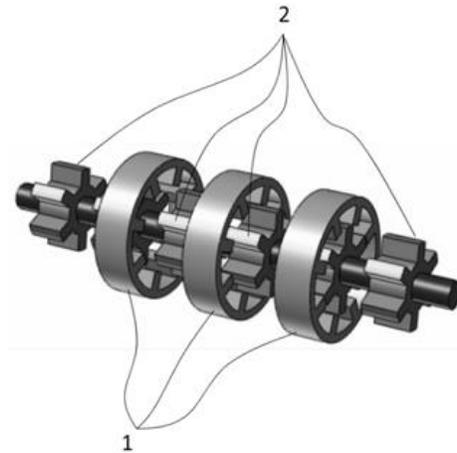


Рис. П5.19.3. Вращательно-линейный актюатор индукторного типа (1 – статоры, 2 – роторы/бегуны).

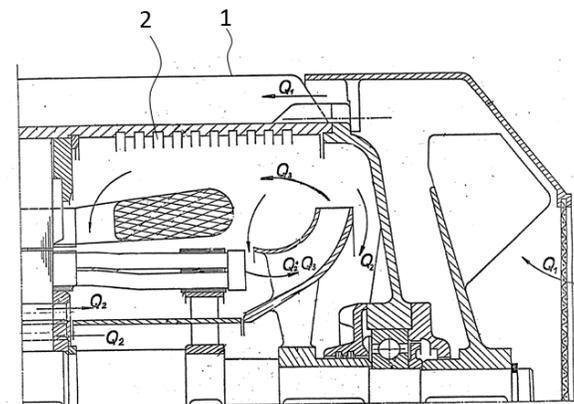


Рис. П5.19.4. Система охлаждения ЭМ (1 – ребра на внешней стороне корпуса, 2 – внутри корпуса).

20	Универсальность
	Объект выполняет несколько разных функций, благодаря чему отпадает необходимость в других объектах.

Пример 20.1. Стартер-генератор автомобиля выполняет две функции – разгон ДВС и, затем, генерация энергии в электросеть автомобиля.

Пример 20.2. В системе ВЭУ с машиной двойного питания, для передачи энергии в сеть как с обмоток статора, так и обмоток ротора используется один трехобмоточный трансформатор.

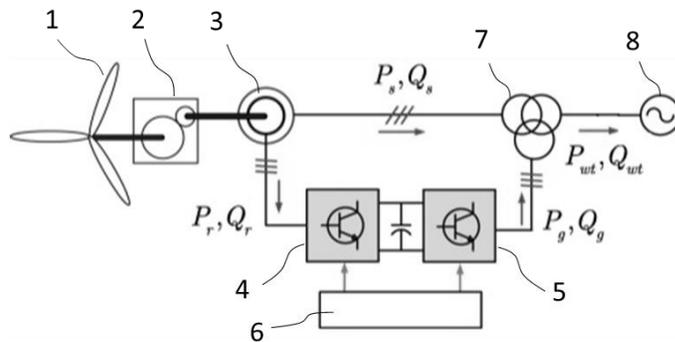


Рис. П5.20.1. Схема электрической части ВЭУ.

Пример 20.3. Оболочка кабеля, сделанная из магнитного материала, увеличивает индуктивность кабеля и, таким образом является фильтром для высокочастотных колебаний тока и помех в кабеле.

Пример 20.4. В некоторых ПЧ встроенный контроллер выполняет не только функции управления ЭМ, защиты и интерфейса, но и может быть запрограммирован на решение локальных задач автоматизации.

Пример 20.5. На одном и том же валу машины могут располагаться ротор, возбудитель и вентилятор охлаждения.

Пример 20.6. Магнитные пазовые клинья (Рис. П5.20.2) и удерживают обмотку в пазу, и обеспечивают требуемые магнитные свойства пространства в открытии паза. Применение магнитных клиньев улучшает основные электрические характеристики электродвигателей за счет уменьшения магнитного сопротивления воздушного зазора и потерь, снижения температуры обмотки и активной стали статора и повышения КПД. Магнитный клин может состоять, например, из смеси железного порошка и эпоксидного компаунда.

Пример 20.7. См. пример 12.1.

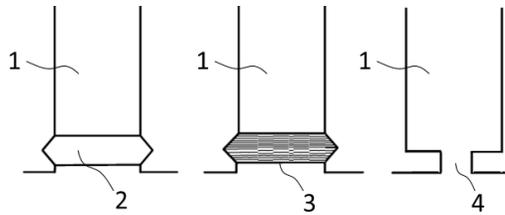


Рис. П5.20.2. Пазы (1): с обычным клином (2), с магнитным клином (3), с малым открытием паза (4).

21	Обратить вред в пользу
	<p>а) Использовать вредные факторы (в частности, вредное воздействие среды) для получения положительного эффекта.</p> <p>б) Устранить вредный фактор за счет сложения с другим вредным фактором.</p> <p>в) Усилить вредный фактор до такой степени, чтобы он перестал быть вредным.</p>

Пример 21.1. В обычных машинах гармоники выше 1-й рассматриваются как нежелательные. СМПМ с сосредоточенными обмотками с дробным числом пазов на полюс и фазу q (пример электромагнитной структуры такой машины показан на Рис. П5.21.1) может использовать для преобразования энергии не 1-ю гармонику, как в большинстве машин, а одну из высших гармоник, например 5-ю или 11-ю.

Пример 21.2. В погружных маслозаполненных машинах трение вращающихся частей о масло приводит к потерям. Движение масла можно использовать для перемещения тепла от наиболее нагретых частей машины в области, которые легче охлаждать. Для этого могут создаваться каналы и элементы конструкции, приводящие масло в организованное движение по заданным контурам циркуляции.

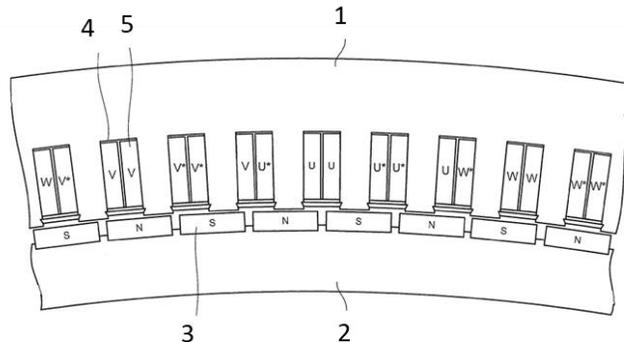


Рис. П5.21.1. Активная зона СМПМ с $q < 1$ (1 – ядро статора, 2 – ядро ротора, 3 – постоянный магнит, 4 паз, 5 – катушка).

Пример 21.3. Тепло, генерируемое в машине из-за потерь, может преобразовываться в электричество (термоэлектрический эффект или Эффект Зеебека) и использоваться, например, для питания датчиков.

Пример 21.4. Вышедшие из строя постоянные магниты (ПМ) часто утилизируют, что требует определенных затрат. В последнее время появились технологии повторного использования старых ПМ, основанные на повторном намагничивании с предварительной дезинтеграции до состояния порошка или без дезинтеграции.

Пример 21.5. Энергию вибрации корпуса машины можно использовать для генерации энергии, которую можно использовать, например, для питания датчиков вибрации, которые в таком случае могут быть полностью автономными и беспроводными. Известны генераторы основанные на электромагнитном, электростатическом, пьезоэлектрическом и трибоэлектрическом принципах действия.

См. также Пример 2.1 (Использовать сопротивление обмоток для прогрева машины постоянным током).

См. также Пример 35.6 (звезда и 3 гармоника).

22	Сфероидальность
	<p>а) Перейти от прямолинейных частей объекта к криволинейным, от плоских поверхностей к сферическим, от частей, выполненных в виде куба или параллелепипеда, к шаровым конструкциям.</p> <p>б) Использовать ролики, шарики, спирали.</p> <p>в) Перейти к вращательному движению, использовать центробежную силу.</p>

Пример 22.1. Для снижения сопротивления потоку хладагента каналы охлаждения могут иметь скругленные углы.

Пример 22.2. Для снижения местных перенапряжений в изоляции ЭМ, вызванных высокой концентрацией электрического поля в области острых углов зубцов, пазов и проводников, что может приводить к старению и пробое изоляции, углы зубцов, пазов и проводников выполняются закругленными.

Пример 22.3. Известны системы охлаждения ЭМ основанные на отбрасывании воздуха крыльчаткой, смонтированной на валу, в радиальном направлении.

Пример 22.4. Для актуаторов с высоким числом степеней свободы можно использовать шарообразные машины – см главу 4.

Пример 22.5. Линейный актуатор (Рис. П5.22.1) приводится в движение вращающимся электродвигателем. Это движение преобразуется в линейное благодаря шарико-винтовой передаче (ШВП).

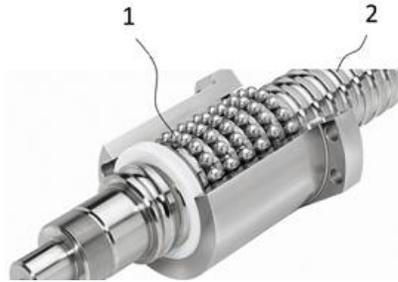


Рис. П5.22.1. Актюатор с ШВП (1 – шарики, 2 – вал со спиральными дорожками качения).

23	Применение инертной среды
	а) Заменить обычную среду инертной. б) Вести процесс в вакууме.

Пример 23.1. Взрывозащита электрических машин может обеспечиваться процессом продува корпуса машины инертным газом перед вводом в эксплуатацию или заполнением корпуса инертным газом под избыточным давлением по отношению к окружающей атмосфере.

Пример 23.2. Вакуум используется при пропитке обмоток – см. Пример 1.1.

Пример 23.3. В ЭМ со сверхпроводящей обмоткой для создания в области обмотки сверхнизких температур используется сжиженный газ азот.

Пример 23.4. В ряде случаев электроника производится в инертной среде (азоте, азот – чистый и сухой газ), для предотвращения окисления.

24	Асимметрия
	а) Перейти от симметричной формы объекта к асимметричной. б) Если объект асимметричен, увеличить степень асимметрии. Машины рождаются симметричными. Это их традиционная форма. Поэтому многие задачи, трудные по отношению к симметричным объектам, легко решаются нарушением симметрии.

Пример 24.1. В самотормозящемся двигателе с коническим ротором при отключенном двигателе пружина стремится вытолкнуть ротор из статора, при этом ротор смещается влево по своей оси и тормозные колодки прижимаются за счет усилия пружины к подшипниковому щиту, создавая тормозной момент.

Пример 24.2. В отличие от машин с вращающимся ротором машины с катящимися ротором несимметричны в каждый момент времени их работы – ротор смещен относительно центра машины.

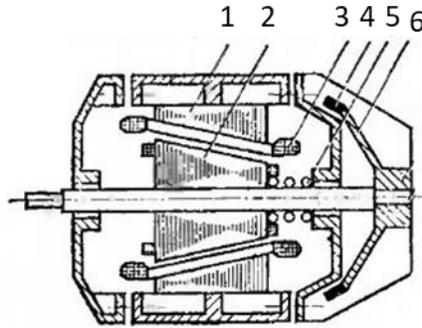


Рис. П5.24.1. Самотормозящийся двигатель с коническим ротором (1 – статор, 2 – ротор, 3 – обмотка, 4 - колодка тормоза, 5 – пружина, 6 - тормоз).

Пример 24.3. Структура роторов некоторых машин может быть ассиметричной. В патентной заявке US4074160A представлен ротор (Рис. П5.24.2) с несимметричными барьерами для потока. В патентной заявке WO2018188755A1 представлен ротор с несимметричным расположением магнитов (Рис. П5.24.3).

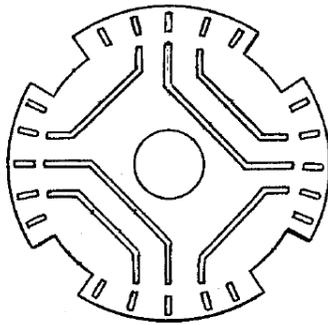


Рис. П5.24.2. Ротор с несимметричными барьерами для потока.

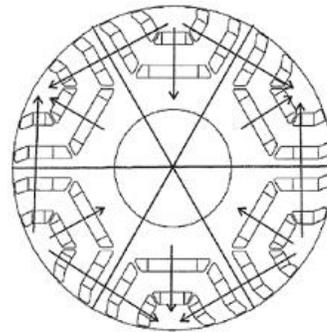


Рис. П5.24.3. Ротор с несимметричным расположением магнитов.

25	Использование гибких оболочек и тонких пленок
	а) Вместо обычных конструкций использовать гибкие оболочки и тонкие пленки. б) Изолировать объект от внешней среды с помощью гибких оболочек и тонких пленок.

Пример 25.1. В высокоскоростных СМПК для удержания постоянных магнитов на роторе используются бандажные оболочки из металла или углеродного волокна.

Пример 25.2. Для предотвращения подшипниковых токов в системах электропривода с ПЧ используют подшипники с электроизолирующим покрытием на внешней поверхности подшипника.

Покрытие может быть, например, на основе оксидной керамики и наноситься термическим напылением.

Пример 25.3. Для того чтобы предотвратить повреждение и деформацию плат устройств силовой электроники или защитить их от внешних воздействий применяются различные покрытия, например полиуретановые и акриловые покрытия, представляющие собой полимерную пленку толщиной в доли миллиметра.

Пример 25.4. Для электрической изоляции шихтованого сердечника может использоваться электростатическое покрытие эпоксидной смолой.

26	Применение фазовых переходов
	Использовать явления, возникающие при фазовых переходах, например изменение объема, выделение или поглощение тепла и т. д.

Пример 26.1. В патенте EP2637176B1 предлагается способ повышения способности трансформатора работать на пиковых нагрузках. В соответствии с изобретением в трансформатор с литой изоляцией в литейную смолу внедрен материал (в капсулах) с фазовым переходом, который отличается от литой смолы, при этом материал с фазовым переходом имеет температуру фазового перехода от 40°C до 200°C. Когда при пиковых нагрузках материал с фазовым переходом нагревается выше температуры фазового перехода, он поглощает тепло, произведенное потерями без повышения температуры обмотки. Только когда все количество материала с фазовым переходом завершило фазовый переход, происходит дальнейшее повышение температуры.

Пример 26.2. В двигателях с частым пуском и остановом использование материала с фазовым переходом (МФП) для охлаждения позволяет снизить средние температуры сердечника статора и обмотки статора на несколько градусов. Эффект предлагаемого способа значительно больше при более высоких значениях теплопроводности и объемной теплоты плавления ПКМ.

Пример 26.3. В патентной заявке WO2014063982A2 предложено использовать комбинации из нескольких различных МФП с различными критическими температурами для обеспечения охлаждения в несколько этапов (на нескольких уровнях). Также, детектирование начала фазового перехода может использоваться для контроля температуры в машине.

Пример 26.4. Для охлаждения электрической машины электромобиля можно использовать хладагент из системы кондиционирования воздуха. Хладагент, проходя через машину, испаряется, обеспечивая значительно более интенсивное охлаждение, чем обычное водяное охлаждение.

27	Применение теплового расширения
	а) Использовать термическое расширение (или сжатие) материалов. б) Если термическое расширение уже используется, применить несколько материалов с разными коэффициентами термического расширения.

Пример 27.1. Соединение деталей ЭМ (например, монтаж подшипников на вал) может осуществляться, например, посадкой при помощи нагрева охватывающей детали, посадкой путем охлаждения охватываемой детали, комбинированной посадкой нагревом охватывающей и охлаждением охватываемой деталей.

Пример 27.2. В патентной заявке US2014070634A1 представлена структура ротора с постоянными магнитами, расположенными на поверхности ротора, и удерживающим магниты бандажем, где соотношение коэффициентов теплового расширения материала магнитов и материала бандаж не должно превышать 1.15.

Пример 27.3. В специальных линейных актюаторах могут использоваться сплавы с памятью формы (СПФ). При проведении через СПФ тока генерируется тепло, нагревающее СПФ. При нагревании выше температуры перехода атомы материала перестраиваются в другую кристаллическую структуру. Это приводит к сжатию материала при нагревании и повторному удлинению при охлаждении, что, в свою очередь, приводит к линейному движению.

Пример 27.4. В электрогенераторе с вертикальным валом часто возникает проблема дифференциального теплового расширения сердечника статора и корпуса статора. В патенте CA1290011C предложено решение, где температуры корпуса статора и сердечника статора определяются датчиками, расположенными на корпусе и в сердечнике статора. Температуры корпуса и сердечника сравниваются, и когда температура корпуса становится ниже температуры сердечника, активируются нагреватели, расположенные вокруг корпуса, для поддержания температуры корпуса близкой температуре сердечника.

28	Заранее подложенная подушка
	Компенсировать относительно невысокую надежность объекта заранее подготовленными аварийными средствами.

Пример 28.1. В системе «ведущий-ведомый», описанной в Примере X, при выходе ведущего ПЧ из строя, один из «ведомых» ПЧ принимает управление системой на себя.

Пример 28.2. В система пуска и управления АД к ПЧ добавляется обходной контактор, чтобы иметь возможность включить АД напрямую в сеть при выходе ПЧ из строя.

Пример 28.3. Самолечущаяся изоляция с интегрированными капсулами с «заживляющим» материалом, описанная в примере в главе 5.

Пример 28.4. Два двигателя в тандеме (См. Пример 3.3.) – система с резервированием. При выходе из строя одного из двигателей второй может продолжать обеспечивать половину нагрузки.

Пример 28.5. В для обеспечения бесперебойной работы электромеханической системы в схему может быть включен накопитель энергии.

29	Самообслуживание
	<p>а) Объект должен сам себя обслуживать, выполняя вспомогательные и ремонтные операции.</p> <p>б) Использовать отходы (энергии, вещества).</p>

Пример 29.1. Энергия вибрации корпуса двигателя может рекуперироваться и использоваться для питания микро-датчиков. Например, в патентной заявке CN104104204A представлено устройство рекуперации энергии вибрации с функцией самоадаптивного управления ультразвуковой пьезоэлектрической актюацией (также в Прием 29 «Использование механических колебаний»).

Пример 29.2. Самолечущаяся изоляция с интегрированными капсулами с «заживляющим» материалом, описанная в примере в главе 5.

Пример 29.3. В системе охлаждения ЭМ на Рис. П5.29.1 распыление охлаждающей жидкости на лобовые части обмоток происходит под действием центробежных сил.

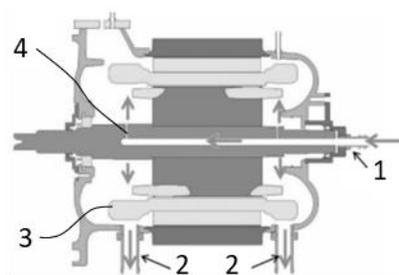


Рис. П5.29.1. Система охлаждения лобовых частей (1, 2 – вход и выход охлаждающей жидкости, 3 - лобовые части, 4 – канал для распыления).

Пример 29.4. Самоцентрирующиеся подшипники могут работать при значительной угловой несоосности вала с корпусом, которая возникает при изгибах и перекосах вала из-за подвижности или недостаточной жесткости конструкции, благодаря сферической поверхности качения или скольжения (Рис. П5.29.2).

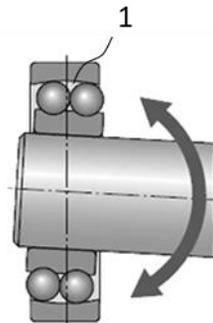


Рис. П5.29.2. Самоцентрирующийся подшипник качения (1 – сферическая поверхность).

Пример 29.5. Токовый способ сушки изоляции после пропитки заключается в подключении обмотки к переменному напряжению, в результате чего протекающий по обмотке ток нагревает стальные детали за счет потоков рассеивания и проводники за счет активных потерь. При подключении к обмотке постоянного тока нагрев будет осуществляться только за счет активных потерь.

30	Применение сильных окислителей
	<ul style="list-style-type: none"> а) Заменить обычный воздух обогащенным. б) Заменить обогащенный воздух кислородом. в) Воздействовать на воздух или кислород ионизирующими излучениями. г) Использовать озонированный кислород. д) Заменить озонированный (или ионизированный) кислород озоном.

Пример 30.1. В патентной заявке EP0511409A1 на шейке вала, на которую устанавливается подшипник, для обеспечения долговечности создается твердый нитритный слой.

Пример 30.2. Пленки, образующиеся при взаимодействии с коррозионной средой, и затрудняющие протекание процесса коррозии называются оксидными (окисными) **защитными пленками**. Такие пленки можно использовать для защиты корпуса машины и элементов внутри машины.

Пример 30.3. В патенте US7806991B2 описывается технология производства порошка для постоянных магнитов с низкими потерями на вихревые токи, где определенным образом нормируется использование, по концентрации и температурной обработке, таких окислителей как кислород и фтор.

Пример 30.4. В патентной заявке JPH0386036A для предотвращения эрозии каналов охлаждения предлагается контролировать концентрацию растворенного кислорода в охлаждающей воде путем инъекций дополнительных объемов кислорода или водорода.

31	Применение пористых материалов
	<ul style="list-style-type: none"> а) Выполнить объект пористым или использовать дополнительные пористые элементы (вставки, покрытия и т. п.) б) Если объект уже выполнен пористым, предварительно заполнить поры каким-то веществом.

Пример 31.1. Авторское свидетельство № 187135. Система испарительного охлаждения электрических машин, отличающаяся тем, что, с целью исключения необходимости подвода охлаждающего агента к машине, активные части и отдельные конструктивные элементы ее выполнены из пористых материалов, например пористых порошковых сталей, пропитанных жидким охлаждающим агентом, который при работе машины испаряется и таким образом обеспечивает кратковременное, интенсивное и равномерное ее охлаждение.

Пример 31.2. Газостатический подшипник (Рис. П5.31.1), применяемый для опор с малыми нагрузками и высокими скоростями скольжения, состоит из камеры, пористых вставок, подводящей магистрали, корпуса и газонепроницаемой втулки. Вкладыш состоит из втулки и пористых вставок. В цилиндрический зазор между цапфой (не показанной на Рис. П5.31.1) и вкладышем в нескольких точках, через пористые вставки под давлением подается газ и возникает газовая смазка. Поверхности вала и цапфы в установившемся режиме не контактируют.

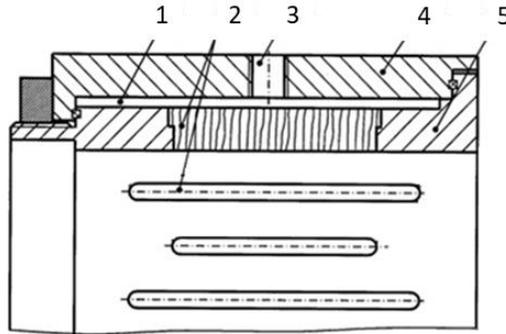


Рис. П5.31.1. Газостатический подшипник (1 - камера, 2 - пористые вставки, 3 – подводящая магистраль, 4 - корпус, 5 - газонепроницаемая втулка).

Пример 31.3. В патенте US5164256 и патентной заявке EP0416120A1 представлены различные варианты решений с подшипниками скольжения имеющим вкладыш из пористого материала, который заполняется смазкой, которая постепенно поступает из пор в зазор между вкладышем и валом, обеспечивая скольжение с низким трением.

Пример 31.4. Полый вал позволяет не только снизить вес машины, но и открывает возможности использования канала, проходящего через центр машины, для различных целей.

Пример 31.5. Для снижения веса ротор выполняется полым («пустым»). Рис. П5.31.2 показан ротор с «облегченной» несущей конструкцией.



Рис. П5.31.2. Машина с полым ротором.



Рис. П5.31.3. Компьютерная модель ротора машины с большим диаметром.

Пример 31.6. Для повышения электрической прочности, а также механической прочности и гибкости изоляции она может выполняться многослойной, при этом некоторые слои могут содержать поры с газом. Подобное решение приведено, например, в патентной заявке US2020/0126694.

32	Антивес
	а) Компенсировать вес объекта соединением с другими объектами, обладающими подъемной силой. б) Компенсировать вес объекта взаимодействием со средой (за счет аэро-, гидродинамических и других сил).

Пример 32.1. Для предотвращения вибраций ротора производится его балансировка. Для устранения дисбаланса балансировочный груз, например болт, крепится ближе к периферии ротора, например на кольцо короткозамкнутой обмотки в АДКЗ (Рис. П5.32.4).

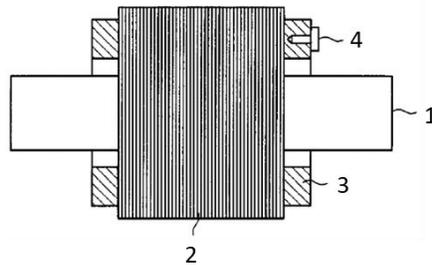


Рис. П5.32.1. Ротор АДКЗ (1 – вал, 2 – пакет, 3 – кольцо КЗ обмотки, 4 – балансировочный груз).

Пример 32.2. В транспортных системах типа маглева (пример на Рис. П5.32.1) используется компенсация веса поезда за счет магнитного поля – магнитная левитация.

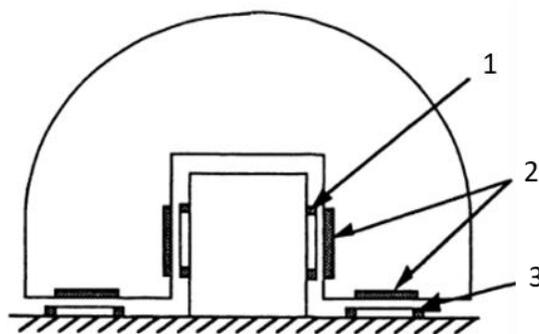


Рис. П5.32.2. Концепт маглева (1 – пропульсивные катушки, 2 – сверхпроводящие магниты, 3 – катушки левитации).

Пример 32.3. В подшипниковых опорах высокоскоростных машин используются активные магнитные подвесы (подшипники).

Пример 32.4. В современных крупных вертикальных гидроагрегатах осевые нагрузки очень велики. Для восприятия осевой нагрузки от веса ротора гидроагрегата и осевого давления воды и для передачи этих нагрузок через опорные детали на фундамент машинного здания используются подпятники скольжения. Схематично подпятник скольжения представляет собой конструкцию из двух трущихся поверхностей, размещенных в масляной ванне.

33	Проскок
	Вести процесс или отдельные его этапы (например, вредные или опасные) на большой скорости.

Пример 33.1. Частота вращения машины пропорциональна частоте питания. При работе в широком диапазоне частот вращения, на некоторых частотах в системе машина-нагрузка возможны нежелательные резонансные колебания. Функция исключения областей резонанса реализована в современных ПЧ: если уставка оказывается в пределах «запрещенной» полосы частот, частота вращения будет изменяться только до тех пор, пока не встретится верхняя или нижняя полоса «запрещенных» частот. Затем выходная частота ПЧ будет оставаться на том же уровне до тех пор, пока уставка не станет выше или ниже диапазона «запрещенных» частот. Принцип проиллюстрирован на Рис. П5.33.1.

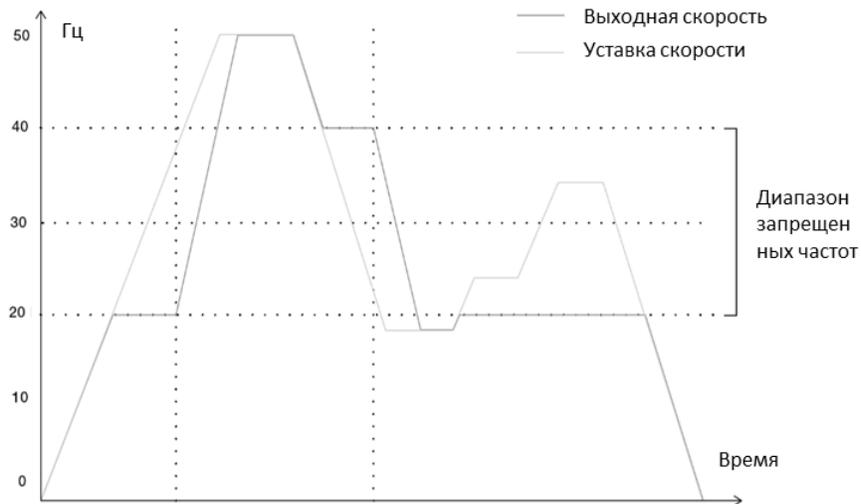


Рис. П5.33.1. Иллюстрация различия уставки и реального выходного значения частоты вращения при проскоке полосы запрещенных частот.

Пример 33.2. В системе с двигателем, работающем на высокой скорости, при пропадании питания сети можно сохранить питание контроллера ПЧ и его функциональность и контроль над ситуацией благодаря регенерации энергии вращения.

Пример 33.3. В главе 5 в задаче о расширении диапазонов рабочих моментов и частот вращения в гибридном или полностью электрическом электромобиле описывается система переключения обмоток. Подобная система реализована в продукте QMET-II компании Yaskawa и описана в патенте JP3596711B2.

34	Матрешка
	а) Один объект размещен внутри другого объекта, который, в свою очередь, находится внутри третьего и т. Д.;
	б) Один объект проходит сквозь полость в другом объекте.

Пример 34.1. В пропульсивной системе летательного аппарата (Рис. П5.34.1) можно использовать концентрические валы (один вал проходит в полости другого).

Пример 34.2. В патенте US11211854B2 предложено совместить обычную активную зону с обмоткой в пазах с безпазовой обмоткой, как показано на Рис. П5.34.3.

Пример 34.3. В СМ с возбудителем на валу для экономии аксиального пространства возбудитель располагается внутри ротора, как показано на Рис. П5.34.4

Пример 34.4. В машинах высокого напряжения, таких как турбогенераторы и гидрогенераторы, изоляция – многослойная/многоуровневая (Рис. П5.34.3). Высоковольтные кабели также многослойны.

Пример 34.5. Машины с двумя и более зазорами, как показано в примере 19.1

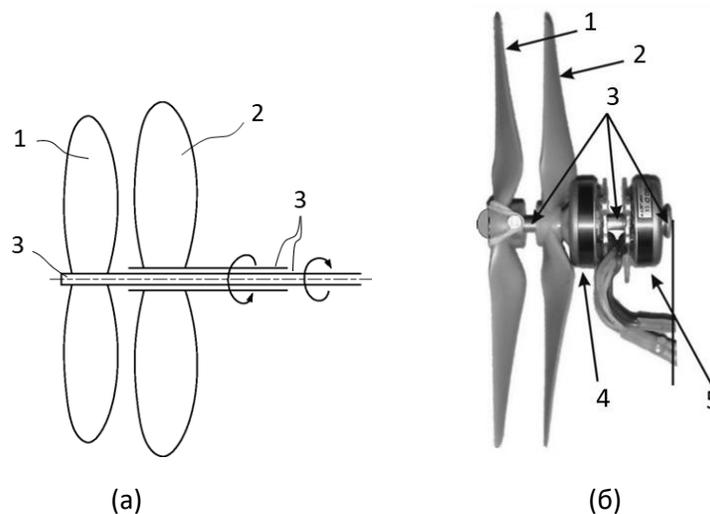


Рис. П5.34.1. Концентрические валы (1 – 1-й пропеллер, 2 – 2-й пропеллер, 3 – валы, 4 - 1-й двигатель, 5 – 2-й двигатель).

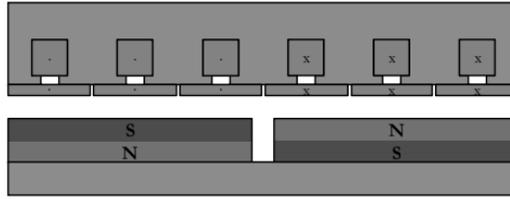


Рис. П5.34.2. Гибридная машина.

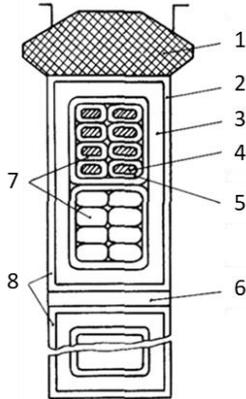


Рис. П5.34.3. Система изоляции (1 – клин, 2 – изоляционные прокладки, 3 – корпусная изоляция, 4 – проводник, 5 – витковая изоляция, 6 – межслоевая изоляция, 7 – стержни, 8 – катушки).

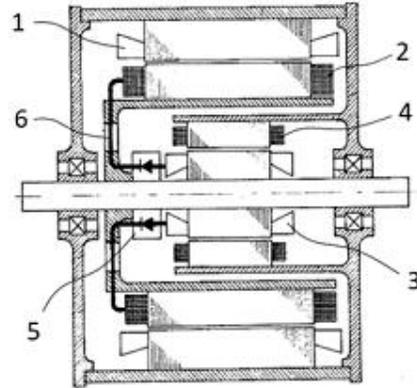


Рис. П5.34.4. Машины с интегрированным возбудителем (1 – обмотка статора, 2 – обмотка возбудителя, 3 – обмотка ротора возбудителя, 4 – обмотка статора возбудителя, 5 – диодный выпрямитель, 6 – кабель питания ОВ от выпрямителя).

35	Объединение
	а) Соединить однородные или предназначенные для смежных операций объекты. б) Объединить во времени однородные или смежные операции.

Пример 35.1. В роторе СМПМ для замыкания потока между ПМ различной полярности используется ферромагнитное ярмо. В Халбах-структуре (Рис. 35.1) сами магниты замыкают поток, не создавая потоков рассеяния – магнитное поле идет только вовне – в сторону статора.

Пример 35.2. Обычные высоковольтные генераторы рассчитаны на напряжения до 30 кВ. Для включения таких генераторов в сети с напряжениями в несколько сотен кВ требуются повышающие трансформаторы, что ведет к дополнительным потерям, затратам на обслуживание, и дополнительному пространству для установки. В 1980е годы были предложены генераторы (Рис. П5.35.2) с кабельными обмотками с полимерной изоляцией, выдерживающие напряжения порядка 500 кВ. Такие генераторы могут включаться напрямую в сеть.

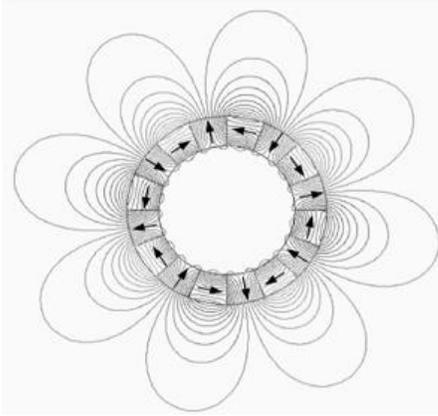


Рис. П5.35.1. Кольцо из ПМ с Халбах-структурой и магнитное поле.

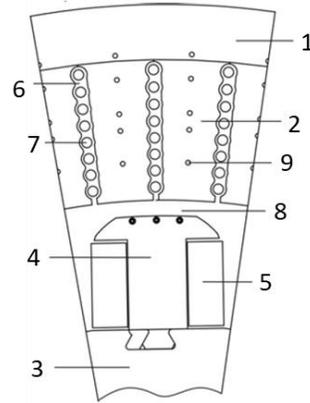


Рис. П5.35.2. Структура сегмента генератора с кабельной обмоткой (1 – ярмо статора, 2 – зубцы, 3 – ярмо ротора, 4 – полюс ротора, 5 – обмотка возбуждения, 6 – паз, 7 – кабельная обмотка, 8 – зазор, 9 – каналы охлаждения).

Пример 35.3. В псевдо-прямом приводе объединены в единое целое ЭМ и магнитный редуктор.

Пример 35.4. В погружном маслозаполненном двигателе то же самое масло можно использовать и для смазки подшипников, причем полости машины и подшипников могут напрямую сообщаться.

Пример 35.5. В патенте NO343796B1 представлен интегрированный судовой движитель (азимутальная винто-рулевая колонка), представляющий собой комбинацию движителя с гондолой и движителя с двигателем, интегрированным в насадку (Рис. П5.35.3). Винты вращаются в противоположном направлении.

См. также Пример 34.6.

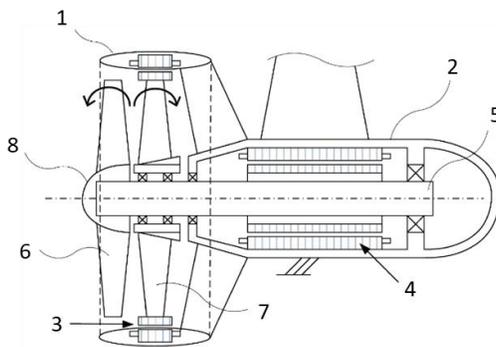


Рис. П5.35.3. Азимутальная винто-рулевая колонка (1 – насадка, 2 – гондола, 3 – электродвигатель интегрированный в насадку, 4 – электродвигатель в гондоле, 5 – вал, 6 – винт-2, 7 – винт-1).

36	Обратная связь
	а) Ввести обратную связь. б) Если обратная часть есть - изменить ее.

Пример 36.1. В патентной заявке TW201815025A предлагается система управления качеством при намотке катушек с автоматической регулировкой обратной связи, которая включает автоматическую намоточную машину (АНМ), измерительную систему (ИС) и платформу управления (ПУ). По результатам электрического испытания посредством ИС данные передаются в ПУ для анализа. ПУ может изменять параметры управления, основанные на результатах анализа, в АНМ, для повышения качества катушек.

Пример 36.2. В ряде случаев, для повышения качества движения системы АЭП можно переходить от более простых датчиков к более сложным, например от датчиков Холла к инкрементальным или абсолютным энкодерам (Рис. П5.36.1).

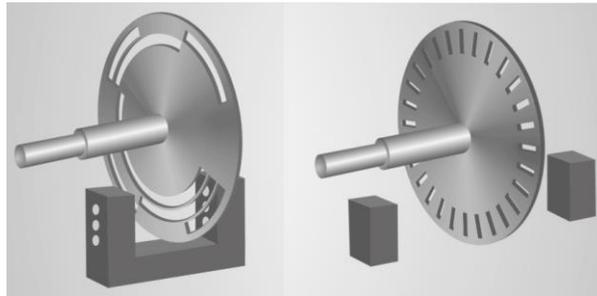


Рис. П5.36.1. Абсолютный и инкрементальный энкодеры.

Пример 36.3. Система «Ведущий-ведомый» из примера 10.5.

Пример 36.4. Использовать методы предсказания неисправности для бизнес-модели.

37	Эквипотенциальность
	Изменить условия работы так, чтобы не приходилось поднимать или опускать объект.

Пример 37.1. Конструкция ветрогенератора из сегментов позволяет производить ремонт ветрогенератора прямо в гондоле, без опускания на землю, посредством замены вышедшего из строя сегмента.

Пример 37.2. Способ выемки роторов из машины таким образом, чтобы не повредить сердечники, показан на Рис. П5.37.1. Данный способ не предполагает перемещения в вертикальной плоскости.

Пример 37.3. Гигантские гидрогенераторы собираются из сегментов прямо на гидростанции.

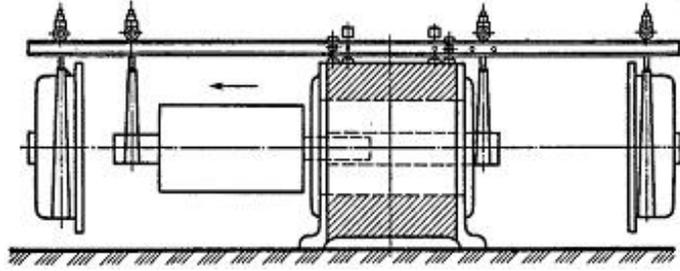


Рис. П5.37.1. Механизм для извлечения ротора из машины.

38	Однородность
	Объекты, взаимодействующие с данным объектом, должны быть сделаны из того же материала (или близкого ему по свойствам).

Пример 38.1. Если ротор изготовлен из материала с более высоким коэффициентом теплового расширения, чем у материала статора, расширение может уменьшить воздушный зазор до недопустимой величины в процессе работы, когда детали разогреваются потерями. Чтобы избежать этого, коэффициентом теплового расширения ротора не должен значительно превышать коэффициентом теплового расширения статора.

Пример 38.2. В электрических соединениях желетельно использовать те же самые материалы, или совместимые материалы. Например, соединение медных и алюминиевых проводников или клемм может привести, через определенное время, к окислению алюминиевой части контакта.

Пример 38.3. В крупных ветрогенераторах неравномерное распределение скоростей в каналах охлаждения статора может привести к большому перепаду температур в обмотке или сердечнике статора в аксиальном направлении. Существуют способы повышения равномерности аксиального распределения температуры статора, например предложенное в патентной заявке WO2021037193A1.

39	Предварительное антидействие
	Заранее придать объекту напряжения, противоположные недопустимым или нежелательным рабочим напряжениям.

Пример 39.1. В роторах высокоскоростных машин с постоянными магнитами нить из углеродного волокна наматывается на внешнюю поверхность магнитов (формируя бондаж) с определенным усилием, для формирования предварительного натяжения, которое позволит надежно удерживать магниты на высоких частотах вращения.

Пример 39.2. Системы шарикоподшипников могут быть предварительно нагружены с помощью пружины (Рис. П5.39.1). Это делается для устранения радиального и осевого люфта, снижения рабочего шума за счет стабилизации вращающейся массы, уменьшения повторяющееся и

неповторяющееся биение оси вращения, уменьшения вероятности повреждения из-за вибрационной нагрузки, увеличения жесткости.

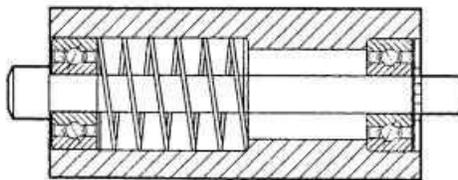


Рис. П5.39.1. Подшипник с предварительной нагрузкой.

Пример 39.3. Перед использованием машины необычно длительное время под высокой нагрузкой, для предотвращения перегрева, машину можно охладить до более низкой чем обычно температуры.

Пример 39.4. По принципу предварительного напряжения трубы составного вала машины могут быть заранее скручены в направлении, противоположном рабочему моменту.

40	Непрерывность полезного действия
	а) Вести работу непрерывно (все части объекта должны все время работать с полной нагрузкой). б) Устранить холостые и промежуточные ходы.

Пример 40.1. При работе систем электропривода в широком диапазоне частот вращения может быть целесообразно реализовать переключение секций фаз обмоток с параллельного соединения на последовательное и обратно. В патенте NO343095B1 система переключения секций фаз обмоток реализована для двух или более 3-фазных групп обмоток (Рис. П5.40.1). Фазные группы переключаются поочередно, таким образом обеспечивается непрерывная генерация момента. См. также прием 7.

Пример 40.2. В патенте US9553489B2 предложена система генерации энергии морских волн, в которой два буйка обеспечивают возвратнопоступательное движение тросов двух барабанов лебедки, приводящей в движение электрогенератор. В данном решении обеспечивается генерация энергии не только при подъеме волны, но и при опускании.

Пример 40.3. В полезной модели CN207382083U (Рис. П5.40.2) обмотка на каждом из зубцов разделена на изолированные друг от друга части, чтобы при выходе из строя одной из частей обмотки, машина смогла сохранить работоспособность.

Пример 40.4. Для индукторных машин (ИМ) характерны пульсации момента. В патенте CN113285571B предложена многопакетная ИМ (Рис. П5.40.3), в которой за счет смещения пакетов высокий момент создается практически непрерывно. Данное решение также может относиться к приемам «Динамизация», «Матрешка».

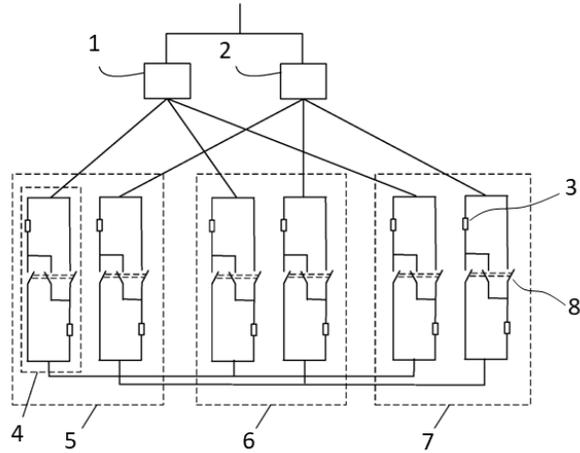


Рис. П5.40.1. Схема с переключением обмотки (1 – 1-й инвертер, 2 – 2-й инвертер, 3 – часть фазной обмотки, 4 – секция обмотки, 5 – фаза А обмотки, 6 – фаза В обмотки, 7 – фаза С обмотки, 8 – переключатель).

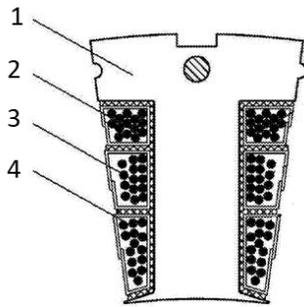


Рис. П5.40.2. Обмотка из трех изолированных частей (1 – сердечник, 2, 3, 4 – части обмотки).

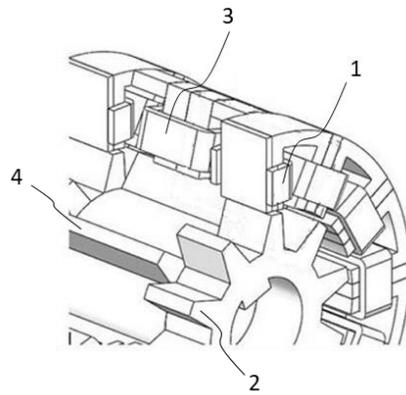


Рис. П5.40.3. Структура многопакетной индукторной машины (1 – катушки 1-го пакета, 2 – зубцы 1-го пакета, 3 – катушки 2-го пакета, 4 – зубцы 2-го пакета).

Пример 40.5. В судовой пропульсивной установке вал может вращаться с постоянной частотой, а тяга регулироваться посредством изменения угла поворота лопастей винта.

Пример 40.6. Газотурбинная установка с электрогенератором в гибридном автомобиле или самолете работает с постоянной нагрузкой в оптимальном режиме все время, пока она включена. Колебания нагрузки проходятся благодаря накопителям энергии, таким как батареи, конденсаторы, маховики.

Приложение 6. Ас-матрица навигаторов 39x39

Что ухудшается при изменении ---->	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	Производительность	Адаптация, универсальность	Степень автоматизации	Надежность	Точность изготовления	Точность измерения	Сложность устройства	Сложность контроля и измерения	Удобство изготовления	Удобство эксплуатации	Удобство ремонта	Потери информации	Вредные факторы, действующие на объект	Вредные факторы самого объекта	Длина подвижного объекта	Длина неподвижного объекта	Площадь подвижного объекта	Площадь неподвижного объекта	Объем подвижного объекта	Объем неподвижного объекта
Что нужно изменить по условиям задачи:																				
01. Производительность		03, 01, 04, 27	35, 37, 01, 10	03, 01, 01, 11, 32, 18	09, 03, 06, 02	03, 02, 15, 04	37, 19, 04, 18	01, 06, 13, 05	01, 04, 04, 18	03, 04, 34, 38	03, 09, 02, 29	11, 07, 11, 08	21, 01, 06, 23	01, 12, 04, 30	06, 24, 04, 30	25, 34, 22, 10	02, 10, 15, 31	02, 01, 19, 34	05, 20, 15, 02	01, 27, 02, 05
02. Адаптация, универсальность	01, 04, 20, 27		13, 15, 01	01, 11, 32, 18	-	01, 35, 03, 02	07, 14, 27, 04	03, 0	03, 11, 31	07, 15, 03, 16	03, 16, 34, 24	-	01, 28, 09, 31	-	01, 03, 14, 05	03, 01, 14, 34	01, 25, 14, 34	07, 01, 14, 16	07, 31, 16, 12	
03. Степень автоматизации	35, 37, 01, 10	13, 24, 03, 01		28, 13, 09	04, 10, 06, 36	04, 10, 02, 15	07, 18, 02	15, 13, 29	03, 10, 11	03, 37, 15, 12	03, 01, 11	01, 38	05, 38	05	22, 11, 04, 19	36, 19, 22, 11	19, 22, 11	01, 11, 16	10, 11, 16, 18, 31	
04. Надежность	03, 01, 14, 30	11, 01, 32, 18	28, 11, 13		28, 09, 03	09, 12, 28, 36	11, 01, 03	13, 17, 04	-	13, 19, 17	03, 28, 17	02, 04	13, 01, 05, 17	01, 05, 17, 10	07, 39, 22, 24	07, 14, 04, 28	19, 02, 22, 16	09, 01, 17, 24	12, 02, 22, 18	05, 01, 18
05. Точность изготовления	02, 06, 09, 23	-	10, 04, 06, 36	03	-	-	10, 05, 06	-	-	03, 09, 01, 36	29, 02	-	10, 04, 02, 26	24, 19, 15, 10	02, 04, 05, 09	05, 09, 04, 38	04, 38, 14, 09	05, 14, 06, 26	09, 04, 05, 01	29, 02, 05
06. Точность измерения	02, 15, 04, 09	11, 01, 05	04, 05, 02, 15	35, 28, 03, 36	-	-	13, 10, 02, 15	10, 18, 20, 01	03, 11, 19, 15	03, 09, 11, 28	-	04, 18, 21, 10	12, 38, 35, 16	04, 10, 12, 16	09, 04, 10, 12	10, 04, 09, 12	10, 04, 09, 12	09, 11, 10, 18	10, 18, 11, 31	
07. Сложность устройства	37, 19, 04, 27	14, 07, 04	07, 03, 03	11, 01, 03	10, 18, 09	05, 10, 02, 15		07, 02, 27, 04	13, 10, 03, 11	13, 39, 10, 18	03, 11	-	21, 08, 14, 17	08, 03, 10, 18	03, 08, 10, 18	10	22, 03, 11, 16	20, 26, 15, 10	03, 16, 20	
08. Сложность контроля и измерения	01, 06	03, 07	15, 33	13, 17, 04, 32	-	10, 18, 09, 04	07, 02, 27, 04		35, 04, 28, 14	05, 35, 11, 16	37, 10	01, 38, 13, 21	21, 08, 14, 04	05, 33	16, 19, 10, 18	10	05, 11, 06, 19	05, 23, 25, 16	14, 03, 24, 16	05, 06, 10, 31
09. Удобство изготовления	01, 03, 02, 04	05, 11, 03	32, 04, 03	39, 04, 13, 38	-	03, 01, 37, 06	13, 10, 03, 28, 03	20, 04, 28, 03	-	05, 35, 11, 16	01, 03, 28, 39	09, 18, 06, 16	18, 05	-	03, 14, 11, 19	07, 19, 13	11, 03, 10, 37	16, 17, 03, 17	01, 01	
10. Удобство эксплуатации	07, 03, 04	07, 15, 03, 16	03, 15, 37, 12	19, 13, 32, 17	03, 09, 01, 36	05, 15, 37, 19	29, 11, 37, 19	-	05, 35, 37	37, 10, 03, 09	24, 02, 03, 21	05, 29, 13, 21	02, 04, 04, 23	05, 29, 13, 21	03, 19, 11, 37	03, 24, 11, 16	09, 16, 07, 23	06, 16, 01, 07	24, 06, 23, 31	
11. Удобство ремонта	03, 09, 02	34, 03, 24, 16	15, 01, 34, 11	28, 02, 03, 16	29, 02	02, 05, 11	01, 03, 11, 28	-	03, 01, 28, 02	03, 37, 10, 07		-	01, 02, 05, 16	-	03, 04, 02, 29	12, 06, 31	07, 11, 09	16, 29, 05, 01, 28	03, 03	
12. Потери информации	11, 36, 07	-	01	02, 04, 36	-	-	-	01, 38	09, 0	13, 21	-		21, 02, 03	02, 33, 03	03, 10	10, 0	25, 10	25, 16	5, 21	
13. Вредные факторы, действующие на объект	21, 01, 11, 18	01, 28, 21, 31	38, 12, 15	13, 18, 05, 17	10, 04, 02, 06	04, 38, 36, 10	21, 08, 14, 17	21, 08, 14, 17	05, 29, 04, 23	01, 02, 05	21, 02, 05	-	-	-	19, 03, 23, 24	03, 06, 23, 24	21, 03, 23, 01	13, 05, 27, 01	21, 36, 08, 13	
14. Вредные факторы самого объекта	21, 01, 06, 23	-	05	18, 05, 17, 23	24, 19, 15	12, 38, 10	08, 03, 31	05, 33, 13, 03	-	-	-	02, 33, 14	-	-	19, 07, 16, 21	-	19, 05, 06, 23	21, 03, 17	19, 05, 25, 06	01, 24
15. Длина подвижного объекта	22, 24, 04, 14	03, 16	19, 18, 10, 16	02, 22, 14, 17	02, 04, 24	04, 09, 24	03, 08, 10, 18	01, 03, 10, 18	03, 14, 19	07, 14, 01, 24	03, 04, 12	03, 18	03, 07, 19, 18	19, 07	-	-	07, 19, 24	34, 19, 04, 01	-	
16. Длина неподвижного объекта	25, 22, 34, 10	03, 01	-	07, 14, 04	05, 09, 02	09, 04, 12	03, 10, 10	07, 19, 03, 10	05, 29, 13	05, 29, 12	18, 10	03, 06	-	-	-	-	-	19, 34, 02, 17	25, 34, 07	01, 32, 05, 22
17. Площадь подвижного объекта	02, 10, 15, 05	07, 25	22, 25, 04, 36	14, 39	05, 09	10, 04, 09, 12	22, 03, 11	05, 26, 10, 06	11, 03, 10, 18	07, 19, 11, 16	07, 11, 02, 03	25, 10	31, 38, 04, 03	19, 05, 06, 23	22, 07, 06, 24	-	-	-	34, 22, 19, 24	-
18. Площадь неподвижного объекта	02, 07, 19, 34	07, 16	36	09, 01, 17, 24	05, 14, 06, 26	10, 04, 09, 12	03, 05, 26, 05	06, 21, 25, 06	17, 16	16, 24	16	25, 16	13, 05, 23, 01	21, 03, 17	-	10, 34, 39, 23	-	-	-	
19. Объем подвижного объекта	02, 20, 05, 15	07, 14	01, 15, 16, 18	22, 03, 17, 28	29, 04, 05, 16	29, 10, 04	10, 03, 24	14, 10, 24	14, 03, 17	07, 11, 25, 37	02	05, 21	21, 33, 13, 01	19, 05, 06, 23	03, 34, 01, 04	34, 24, 24	03, 34, 24, 19	22, 34, 31	-	
20. Объем неподвижного объекта	01, 27, 02, 05	-	-	05, 01, 16	01, 02, 29	-	03, 31	05, 19, 10	01	-	03	-	15, 23, 08, 13	25, 06, 01, 24	08, 22	01, 32, 05, 22	-	-	-	
21. Форма	19, 10, 15, 02	03, 07, 14, 09	07, 03, 02, 16	02, 17, 16	09, 25, 17	04, 09, 03	16, 14, 03, 04	07, 11, 23	03, 09, 19, 04	09, 07, 10	05, 11, 03	-	21, 03, 05, 01	01, 03	14, 15, 35, 24	11, 22, 24, 02	35, 15, 24, 02	-	22, 24, 07, 21	34, 05, 01
22. Скорость	-	07, 04, 10	02, 06	28, 01, 13, 04	02, 04, 09, 29	02, 04, 03, 18	12, 15, 13, 16	01, 11, 32, 03	09, 04, 11, 37	15, 05, 04, 13	11, 10	03, 04, 04, 13	05, 18, 01, 36	11, 22, 01, 33	-	-	14, 25, 15	-	34, 14, 15	
23. Время действия подвижного объекта	01, 19, 22, 08	03, 01, 11	20, 02	28, 05, 11	12, 13, 16, 17	12	02, 24, 14, 07	13, 03, 23, 01	08, 14, 24	37, 13, 24	14, 02, 13	02	21, 07, 38, 04	33, 23, 16, 21	05, 08, 39	-	12, 19, 08	02, 05, 08, 25		
24. Время действия неподвижного объекта	40, 02, 16, 30	05	03	15, 13, 20, 17	-	02, 10, 18	-	29, 15, 20, 01	01, 02	03	03	02	19, 03, 17, 38	21	-	03, 17, 01	-	-	01, 15, 30	
25. Потери времени	-	01, 04	18, 04, 04, 17	02, 25, 04, 17	18, 10, 04, 09	18, 15, 04, 09	20, 14	06, 04, 02	01, 04, 15, 24	24, 02, 05	09, 03, 01	18, 10	01, 06, 06, 23	01, 21, 14	07, 05, 25, 18	25, 18, 35, 16	10, 24, 19, 24	02, 01, 23, 31	05, 35, 15, 02	01, 16, 09, 06
26. Количество вещества	11, 14, 12, 13	07, 12, 14	32, 01	06, 12, 04, 17	38, 25	12, 05, 13, 02	12, 11, 14, 06	12, 13, 14, 06	14, 03, 01, 13	01, 14, 02, 29	05, 09, 02, 29	18, 04, 01	01, 38, 14, 31	12, 01, 17, 23	14, 22, 01, 06	-	07, 22, 14, 17	05, 06, 27, 40	14, 14	
27. Потери вещества	04, 01, 02, 36	07, 02, 05	01, 02, 06	02, 14, 23, 01	01, 02, 18, 31	16, 15, 01, 04	01, 02, 04, 18	01, 06, 02, 11	07, 15, 38	09, 04, 05, 18	05, 01, 15, 13	-	38, 21, 25, 17	02, 03, 15, 14	22, 14, 02, 23	02, 04, 18	01, 05, 02, 31	02, 06, 23, 31	03, 14, 25, 26	12, 23, 06, 31
28. Прочность	14, 01, 02, 22	07, 12, 09	07, 0	28, 12	12, 13	12, 13, 16	05, 11, 04	13, 12, 07, 21	28, 12, 02, 09	09, 17, 04, 05	13, 28, 12	-	06, 01, 27, 03	07, 01, 21, 05	03, 07, 32, 01	07, 22, 04, 10	12, 15, 17, 14	39, 17, 24	02, 07, 22, 34	
29. Устойчивость состава объекта	36, 01, 17, 12	01, 25, 15, 05	03, 32, 01	-	06	11	05, 01, 21, 10	01, 21, 23, 36	09, 01, 25	05, 01, 25	05, 01, 25	01, 05, 01	01, 18, 06, 25	01, 17, 13, 23	11, 07, 03, 04	27, 0	05, 28, 11	04, 02, 08, 23	15, 04, 01, 17	
30. Сила	12, 04, 01, 27	07, 19, 06, 40	05, 01	12, 01, 11, 33	04, 14, 27, 26	01, 02, 36, 18	01, 02, 02, 06	26, 27, 02, 08	07, 27, 06, 03	03, 04, 12, 29	07, 03, 28	-	03, 01, 17, 06	11, 12, 26, 18	19, 08, 39, 26	04, 02	08, 07, 26, 27	03, 06, 37, 27	07, 39, 06, 27	
31. Напряжение, давление	02, 22, 01, 27	01	01, 18	02, 11, 08, 01	12, 01, 20, 04	20, 04, 29	08, 03, 27	05, 26, 16	03, 01, 16	01, 28, 05	-	-	21, 05, 27	05, 38, 13, 06	01, 02, 22, 16	01, 03, 22, 16	02, 07, 26, 27	02, 07, 26, 27	20, 01, 02	01, 18
32. Вес подвижного объекта	01, 12, 18, 27	14, 35, 07, 32	10, 01, 06, 08	12, 28, 03, 13	04, 01, 10, 06	04, 13, 01, 10	10, 25, 26, 15	04, 14, 10, 09	31, 04, 06, 18	01, 12, 05, 18	05, 13, 04, 28	02, 18, 01	21, 33, 06, 13	31, 01, 31, 23	07, 32, 14, 15	-	14, 19, 30, 15	-	14, 05, 17, 04	17, 05, 24, 34
33. Вес неподвижного объекта	03, 04, 07, 14	08, 07, 01	05, 10, 01	02, 04, 32, 12	02, 03, 01, 19	06, 10, 04	03, 02, 10, 23	29, 04, 19, 07	04, 03, 03, 09	20, 11, 04, 28	05, 13, 04, 28	02, 07, 01	05, 08, 21, 27	01, 21, 03, 23	-	02, 03, 14, 01	-	01, 25, 11, 05	-	35, 01, 22, 05
34. Температура	07, 04, 05, 13	05, 06, 08, 16	10, 05, 08, 16	12, 02	18	09, 08, 18	05, 19, 16	12, 13, 01, 31	10, 13	10, 13	24, 02, 16	-	21, 38, 01, 05	21, 01, 31, 23	07, 08, 39	07, 08, 39	12, 01, 23, 06	01, 30	15, 23, 17, 06	01, 20, 24
35. Освещенность	05, 29, 05, 16	03, 08	05, 10	-	12, 09	28, 07, 09	20, 09, 11	09, 07	08, 01, 10	04, 10, 08	07, 19, 11, 16	03, 20	07, 08, 01, 05	01, 08, 09, 23	08, 09, 16	-	08, 09, 10	-	05, 11, 02	-
36. Мощность	04, 01, 08, 15	08, 19, 15	04, 05, 19	08, 18, 10, 31	09, 05	09, 07, 05	40, 08, 25, 15	08, 01, 16	01, 02, 15	10, 01, 02, 15	01, 05, 02, 15	02, 08	08, 21, 31, 05	05, 01, 01, 27	03, 02, 01, 27	-				

Что ухудшается при изменении ---->	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	
	Форма	Скорость	Время действия подвижного объекта	Время действия неподвижного объекта	Потери времени	Количество вещества	Потери вещества	Прочность	Устойчивость состава объекта	Сила	Напряжение, давление	Вес подвижного объекта	Вес неподвижного объекта	Температура	Освещенность	Мощность	Затраты энергии подвижным объектом	Затраты энергии неподвижным объектом	Потери энергии	
Что нужно изменить по условиям задачи:																				
01. Производительность	22, 02, 15, 17	-	01, 02, 05, 06	40, 02, 16, 30	-	01, 30	04, 02, 01, 36	01, 04, 02, 06	01, 12, 21, 23	04, 07, 02, 26	02, 27, 22	01, 10, 18, 27	04, 13, 07, 12	01, 33, 04, 02	10, 19, 08, 03	01, 40, 02	01, 02, 30, 08	03,	04, 02, 14, 01	
02. Адаптация, универсальность	07, 27, 03, 32	01, 02, 22	11, 03, 01	05, 16	01, 04	12, 01, 07	07, 02, 05, 11	01, 12, 09, 20	01, 25, 22	07, 19, 40	01, 16	03, 20, 07, 32	08, 07, 14, 16	13, 05, 12, 01	20, 21, 10, 03	08, 03, 14, 11	08, 01, 14, 11	-	06, 07, 03	
03. Степень автоматизации	07, 09, 03, 11	04, 02	20, 39	-	18, 04, 01, 25	01, 11	01, 02, 06, 35	29, 11	06, 03	05, 01	11, 01	04, 10, 06, 01	04, 10, 01, 02	10, 05, 08	32, 09, 08	04, 05, 13	05, 09, 11	-	36, 04	
04. Надежность	01, 03, 16, 28	33, 01, 28, 04	05, 01, 12, 29	15, 13, 20, 17	02, 25, 24	33, 04, 17, 12	02, 01, 14, 23	28, 04	-	32, 04, 02, 12	02, 18, 01, 08	12, 32, 02, 17	12, 02, 32, 04	12, 01, 11	28, 09, 11	33, 28, 10, 31	33, 28, 13, 08	26, 36	02, 28, 01	
05. Точность изготовления	09, 25, 17	02, 04, 09	12, 13, 17	-	09, 10, 04, 06	09, 25	01, 31, 02, 18	12, 13	25, 06	04, 08, 15, 26	12, 01	04, 09, 11, 06	10, 01, 13, 39	08, 10	12, 09, 09	12, 20, 09	12, 20, 09	-	11, 09, 05	
06. Точность измерения	20, 04, 09	04, 11, 09, 18	04, 20, 09	02, 10, 18	18, 15, 04, 09	05, 20, 09	02, 16, 31, 04	04, 20, 09	09, 01, 11	09, 05, 09	20, 04, 09	09, 01, 10, 04	04, 01, 29, 10	20, 08, 04, 18	20, 03, 09	12, 20, 09	12, 20, 09	-	10, 09, 13	
07. Сложность устройства	14, 11, 04, 07	15, 02, 04	02, 24, 04	-	20, 14	11, 12, 13, 02	01, 02, 04, 14	05, 11, 19, 08	05, 21, 19, 08	10, 16	08, 03, 01	10, 25, 15, 26	05, 10, 01, 23	05, 19, 11	18, 19, 09, 11	40, 08, 25, 15	13, 05, 14, 04	-	02, 01, 11, 05	
08. Сложность контроля и измерения	13, 11, 03, 23	12, 24, 16, 01	08, 14, 29, 23	29, 15, 20, 01	06, 04, 09, 39	12, 13, 14, 06	03, 06, 02, 18	13, 12, 07, 04	28, 21, 23, 25	26, 04, 17, 08	01, 26, 27, 09	13, 10, 04, 11	20, 11, 04, 03	12, 13, 01, 16	05, 18, 10	08, 03, 16, 02	01, 30	08, 01, 16	01, 12, 07, 08	
09. Удобство изготовления	03, 04, 11, 13	01, 11, 32, 03	13, 03, 24	01, 16	01, 04, 15, 24	01, 36, 03, 18	07, 15, 02, 09	03, 12, 02	28, 11, 09	01, 37	01, 08, 03, 27	04, 14, 07, 16	03, 13, 26, 11	13, 10, 06	04, 18, 13, 03	13, 03, 03, 24	04, 10, 13, 03	03, 24	08, 01	
10. Удобство эксплуатации	07, 15, 14, 04	06, 11, 15, 39	14, 12, 32, 29	03, 16, 29	24, 04, 02, 15	37, 01	04, 09, 05, 18	09, 17, 12	09, 01, 25	04, 11, 01	05, 09, 37	29, 05, 11, 07	20, 11, 03, 29	10, 13, 11	11, 19, 03, 18	01, 15, 05, 02	03, 11, 18	-	05, 08, 11	
11. Удобство ремонта	03, 11, 05, 24	15, 39	28, 14, 04, 13	03, 03, 02, 29	09, 03, 02, 29	05, 04, 15, 13	05, 01, 15, 13	03, 28, 05, 39	05, 01, 05, 39	03, 28, 02	11, 02	05, 13, 01, 28	05, 13, 01, 28	24, 02, 11	07, 03, 09, 05	07, 02, 04, 16	07, 03, 04, 16	-	07, 03, 09, 08	
12. Потери информации	-	10, 09	02, 02	18, 10, 04, 09	18, 04, 01	-	-	-	-	-	-	02, 18, 01	02, 01, 35	-	08, 0	02, 08	-	-	08, 02	
13. Вредные факторы, действующие на объект	21, 03, 12, 01	33, 21, 01, 04	21, 07, 38, 04	19, 03, 17, 38	01, 06, 17, 38	01, 38, 14, 31	38, 21, 08, 17	06, 01, 27, 03	01, 18, 25, 06	11, 01, 23, 06	21, 05, 27	21, 33, 11, 18	05, 21, 01, 05	21, 38, 01, 05	03, 08, 09, 11	08, 21, 31, 05	03, 18, 20, 13	02, 05, 21, 27	33, 21, 01, 05	
14. Вредные факторы самого объекта	01, 03, 12, 36	01, 04, 12, 36	07, 21, 38, 31	33, 23, 16, 21	03, 21	12, 18, 23, 03	02, 03, 23, 03	07, 01, 21, 05	01, 17, 13, 23	01, 04, 03, 17	05, 38, 07, 23	08, 21, 03, 23	01, 21, 05, 18	21, 01, 23, 09	08, 18, 06	05, 01, 06	05, 20, 06	08, 21, 06	33, 01, 05, 21	
15. Длина подвижного объекта	03, 32, 02, 14	11, 24, 32	08, -	-	07, 05, 14	14, 01	24, 14, 36, 02	32, 01, 14, 15	03, 32, 07, 15	19, 02, 24	03, 32, 01	-	03, 19, 07, 24	02, 07, 08	09, 0	03, 01, 32, 01, 18	32, 01, 18	-	34, 05, 01, 23	
16. Длина неподвижного объекта	11, 22, 07, 34	-	-	03, 17, 22	25, 14	-	02, 04, 18, 01	07, 22, 04, 10	23, 27, 01	04, 02, 01	03, 22, 01	25, 31, 32, 17	01, 04, 17, 14	12, 01, 30, 06	12, 29, 30, 06	37, 32	-	-	20, 04	
17. Площадь подвижного объекта	35, 15, 14, 24	14, 25, 24, 15	20, 12	-	10, 24	14, 25, 20, 11	02, 01, 05, 23	12, 07, 17, 22	28, 05, 11, 23	08, 25, 01, 05	02, 07, 26, 04	05, 19, 14, 04	12, 31, 05	05, 07, 16	07, 09, 08, 11	08, 02, 09, 06	08, 09	-	07, 19, 25, 10	
18. Площадь неподвижного объекта	-	-	-	05, 02, 08, 25	02, 01, 24, 06	05, 06, 17, 24	02, 22, 06, 23	17, 06, 23	05, 30	03, 06, 01, 26	02, 07, 26, 27	-	25, 05, 22, 06	01, 23, 30	03, 18, 01, 09	19, 09	-	-	19, 34, 25	
19. Объем подвижного объекта	03, 07, 14, 24	14, 24, 30, 15	20, 01, 24	-	05, 20, 15, 02	14, 25, 34	26, 23, 15, 02	39, 22, 07, 34	04, 02, 03, 23	07, 01, 26, 27	20, 01, 26, 27	05, 10, 14, 17	31, 17, 02, 06	15, 23, 05	02, 11, 01	01, 20, 11, 06	01, -	-	34, 07, 11, 16	
20. Объем неподвижного объекта	34, 05, 01	-	-	01, 15, 30	01, 16, 30	01, 12	02, 23, 01, 15	39, 22, 19, 07	18, 04, 01, 17	05, 06, 27	18, 01, 27	31, 25, 24, 08	01, 02, 08, 22	01, 20, 24	01, 18, 25, 20	-	-	-	-	
21. Форма	01, 07, 06, 15	01, 07, 15, 06	22, 10, 39, 29	-	22, 02, 15, 19	26, 21	01, 14, 12, 35	25, 22, 02, 17	38, 03, 06, 24	01, 02, 27, 17	15, 07, 02, 22	32, 02, 14, 17	07, 02, 10, 12	21, 22, 10, 12	11, 07, 09	24, 20, 05	05, 20, 15, 22	-	22,	
22. Скорость	01, 07, 06, 15	12, 08, 01, 35	-	-	02, 08, 14, 30	02, 11, 04, 30	32, 12, 10, 22	04, 38, 03, 06	11, 04, 20, 06	20, 06, 07, 08	05, 04, 11, 30	-	04, 25, 26, 05	02, 11, 08	02, 11, 30, 05	32, 07, 01, 30	-	-	22, 40, 08, 01	
23. Время действия подвижного объекта	22, 10, 04, 29	12, 01, 35	-	-	40, 02, 04, 06	12, 01, 02, 17	04, 13, 12, 06	13, 12, 02	11, 12, 01	08, 05, 16	08, 12, 13	08, 35, 15, 31	-	08, 01, 23	05, 08, 24, 01	08, 02, 01, 30	04, 20, 01, 06	-	-	
24. Время действия неподвижного объекта	-	14, 24, 22, 11	-	-	04, 40, 02, 16	12, 01, 13, 16, 06, 30	-	23, 12, 01, 36	-	19, 24, 17	31, 24, 07	20, 13, 08, 16, 26, 17	08, 06, 26, 17	-	16,	-	-	-	-	
25. Потери времени	24, 02, 15, 19	04, 11, 02, 24	40, 02, 04, 06	04, 40, 02, 16	01, 30, 06, 16	01, 06, 06, 16	14, 12, 04, 06	01, 12, 21, 35	02, 27, 26, 35	02, 27, 24	27, 26, 27, 01	02, 40, 10, 35	02, 40, 33, 06	01, 14, 10, 35	03, 08, 10, 19	01, 40, 10, 19	01, 30, 08, 06	03,	02, 35, 06, 09	
26. Количество вещества	01, 22	01, 14, 15, 04	12, 01, 02, 17	12, 01, 31	01, 30, 06, 16	20, 12, 02, 18	22, 01, 15, 02	07, 05, 19, 17	01, 22, 12	02, 26, 12	01, 20, 06, 31	13, 10, 06, 01	12, 19, 23	01, 04, 25, 31	01, 0	15, 14, 16, 06	12, 01, 31	34, 06, 29		
27. Потери вещества	14, 01, 12, 35	02, 11, 04, 30	04, 13, 12, 06	13, 16, 06, 30	07, 06, 01, 02	20, 12, 02, 18	01, 04, 31, 17	05, 22, 25, 17	22, 07, 25, 17	12, 26, 06, 17	01, 20, 27, 02	01, 20, 21, 09	33, 26, 23, 31	03, 20, 11	04, 13, 06, 30	01, 06, 18, 35	04, 13, 37, 31	01, 13, 05, 31		
28. Прочность	02, 25, 01, 17	32, 11, 10, 22	13, 12, 10	-	14, 12, 04, 02	14, 02, 13	01, 04, 31, 17	11, 19, 01	02, 06, 12, 22	02, 12, 06, 17	03, 32, 17, 07	17, 10, 13, 03	25, 02, 17, 03	01, 08, 17	02, 10, 01, 04	01, 01, 02	-	-	01,	
29. Устойчивость состава объекта	21, 03, 06, 24	38, 07, 04, 06	11, 13, 02, 01	23, 12, 01, 36	01, 13	07, 09, 01	05, 22, 25, 17	19, 39, 07	-	02, 01, 33, 16	05, 01, 17	33, 01, 03, 17	10, 23, 03, 17	01, 03, 13, 07	09, 12, 13, 07	09, 01, 13, 31	11, 08, 14, 06	13, 24, 14, 06	22, 05, 23, 20	
30. Сила	02, 01, 17, 15	11, 04, 07, 37	08, 05	-	02, 27, 26	22, 14, 06, 26	32, 01, 17, 35	01, 02, 22, 13	01, 02, 33	06, 33, 28	32, 03, 27, 06	06, 11, 03, 04	01, 02, 33	-	08, 01, 06, 27	08, 19, 26, 27	03, 16, 26, 27	-	22, 07	
31. Напряжение, давление	01, 24, 07, 02	20, 01, 26	08, 12, -	-	27, 26, 24	02, 22, 26	02, 26, 12, 27	39, 06, 12, 17	01, 38, 05, 17	26, 01, 33	-	02, 26, 27, 17	11, 14, 02, 06	01, 23, 08, 05	-	02, 01, 22, 22	22, 18, 02, 27	-	05, 26, 29	
32. Вес подвижного объекта	07, 22, 01, 17	05, 32, 07, 30	35, 15, 31, 01	-	02, 01, 40, 04	12, 10, 06, 31	35, 01, 12, 31	04, 13, 08, 23	32, 02, 08, 23	32, 02, 06, 27	02, 26, 27, 17	-	20, 14, 24, 30	08, 03, 09	37, 26, 06, 31	01, 37, 15, 31	-	-	20, 05, 15, 08	
33. Вес неподвижного объекта	11, 02, 14, 22	01, 19, 25	-	05, 13, 08, 20	02, 40, 01, 10	08, 20, 06, 10	35, 32, 11, 25	04, 05, 02, 13	10, 23, 03, 17	32, 02, 03, 17	11, 14, 02, 06	17, 31, 03	04, 08, 09, 21	01, 08, 09	07, 08, 06, 21	-	06, 08, 04, 03	06, 08, 04, 07		
34. Температура	22, 21, 08, 08	05, 04, 26, 25	08, 11, 23	08, 06, 26, 17	01, 10, 33, 06	12, 19, 25, 23	33, 26, 14, 31	02, 25, 21, 17	03, 01, 09	01, 02, 12, 33	01, 23, 08, 05	26, 21, 20, 30	21, 01, 09	-	09, 25, 33, 16	08, 07, 19, 29	08, 07, 12, 19	-	33, 19, 01, 30	
35. Освещенность	09, 25	02, 11, 08	05, 08, -	-	08, 03, 10, 19	03, 08	11, 03	01, 08, 13	01, 08, 13	10, 08, 20	25, 01, 37	08, 03, 09	05, 01, 08	09, 01, 08	-	09, 0	09, 03, 07, 08	09, 01, 03, 20	08, 16, 03, 20	
36. Мощность	14, 22, 05, 17	07, 01, 05	08, 01, 02, 30	16,	01, 40, 02, 20	24, 15, 06, 30	04, 13, 07, 31	10, 02, 26, 01	01, 09,											

Приложение 7. Физические и химические эффекты имеющие место в электрических машинах

Физические эффекты

Ферромагнетизм

Ф. — появление в некоторых материалах спонтанной намагниченности вследствие упорядочения магнитных моментов, при котором большая их часть параллельна друг другу. Это основной механизм, с помощью которого определённые материалы образуют постоянные магниты или притягиваются к магнитам. Вещества, в которых возникает ферромагнитное упорядочение магнитных моментов, называются ферромагнетиками.

При повышении температуры выше температуры Кюри ферромагнетик теряет ферромагнитные свойства.

Примеры проявления³⁰:

- Постоянный магнит — изделие, изготовленное из ферромагнетика, способного сохранять остаточную намагниченность после выключения внешнего магнитного поля.
- Притяжение разноименных полюсов постоянных магнитов и электромагнитов.
- Отталкивание одноименных полюсов постоянных магнитов и электромагнитов³¹.
- Притяжение ферромагнитных зубцов ротора к зубцам статора с возбужденной обмоткой, представляющим собой электромагниты, как например, в ВИД

Во всех вышеприведенных примерах сила притяжения полезна, когда участвует в создании полезного момента или линейной силы и вредна, когда, например приводит к вибрации.

Силовое воздействие на токонесущий проводник со стороны магнитного поля

При помещении проводника, по которому течёт электрический ток, в магнитное поле, каждый из движущихся зарядов, составляющих ток, испытывает воздействие силы Лоренца, и вместе они создают макроскопическую силу действующую на проводник - силу Лапласа. Величина силы Лапласа определяется законом Ампера. Сила Лапласа линейно зависит как от тока, так и от магнитной индукции.

Пример использования эффекта - создание крутящего момента или линейной силы во многих ЭМ.

Примеры негативных проявлений:

³⁰ Здесь и далее приводятся примеры из области ЭМ или из смежных областей (где есть теоретическая возможность применения в ЭМ)

³¹ Притяжение или отталкивание постоянных магнитов от возбужденных зубцов (в зависимости от направления тока вокруг зубцов) – принцип действия синхронных машин с постоянными магнитами.

- Электродинамическая деформация шин (токопроводов) трёхфазного переменного тока на подстанциях при воздействии токов короткого замыкания.
- Раздвигание токопроводов рельсотронов (линейных ЭМ) при выстреле.

Электромагнитная индукция

Э.И. — явление возникновения электрического тока, электрического поля или электрической поляризации при изменении магнитного поля в материальной среде во времени или при движении этой среды в магнитном поле.

При изменении магнитного поля в контуре (через поверхность, ограниченную этим контуром), созданном замкнутым проводником в проводнике возникает электродвижущая сила (ЭДС) индукции. ЭДС пропорциональна скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром. ЭДС создает индукционный ток в проводнике. Индукционный ток создает поле, препятствующее изменению магнитного потока, вызывающего индукцию.

Частный случай электромагнитной индукции – взаимная индукция (взаимная индукция) — явление возникновения ЭДС индукции в одном контуре при изменении силы тока во втором контуре и наоборот.

Примеры использования:

- Наведение токов в беличьей клетке ротора вращающимся магнитным полем статора в асинхронном двигателе.
- Передача энергии между обмотками трансформатора.

Примеры негативного проявления:

- Вихревые токи (см. ниже)
- Эффект вытеснения тока (см. ниже)
- Эффект близости (см. ниже)

Вихревые токи (Токи Фуко)

При изменении магнитного потока пронизывающего массивный проводник в нем возникают вихревые замкнутые электрические токи. Вихревые токи являются индукционными токами и образуются в проводящем теле либо вследствие изменения во времени магнитного поля, в котором находится тело, либо вследствие движения тела в магнитном поле, приводящего к изменению магнитного потока через тело или какую-либо его часть. Величина токов Фуко тем больше, чем быстрее меняется магнитный поток. В отличие от электрического тока в проводах, текущего по точно определённым путям, вихревые токи замыкаются непосредственно в проводящей массе, образуя вихреобразные контуры. Эти контуры тока взаимодействуют с породившим их магнитным потоком. Согласно правилу Ленца, магнитное поле \mathbf{V} т. направлено так, чтобы противодействовать изменению магнитного потока, индуцирующего эти \mathbf{V} т.

Примеры использования:

- Асинхронные машины с массивным ротором.

Примеры негативного проявления

- Потери в стали
- Эффект вытеснения тока

Эффект вытеснения тока (скин-эффект или поверхностный эффект)

Переменный ток (I) в проводнике на Рис. 1 порождает переменное вихревое магнитное поле, силовые линии которого (H) перпендикулярны к оси проводника. За счёт электромагнитной индукции переменное магнитное поле порождает вихревое электрическое поле, вызывающее протекание вихревых токов (I_w), причём на поверхности проводника вихревые токи направлены по направлению тока проводника, а внутри проводника — противоположно. Это явление снижает ток в сердцевине проводника и увеличивает поверхностный ток. Эффект вытеснения проявляется сильнее для токов высокой частоты.

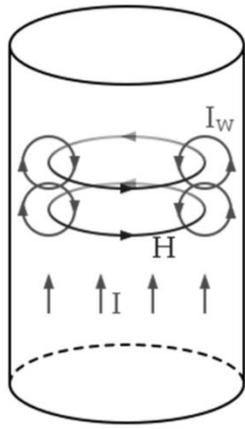


Рис. П7.1. Скин-эффект.

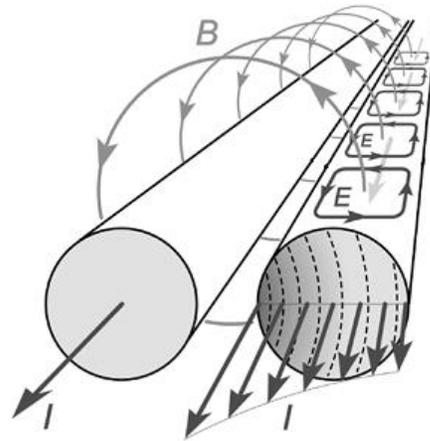


Рис. П7.2. Эффект близости.

Применения:

- При радиочастотах порядка сотен килогерц поверхностный эффект в медных проводах сказывается настолько сильно, что применять сплошные провода оказывается нецелесообразно. Это не даст никакого увеличения проводимости, вот почему в этом случае используются полые тонкостенные проводники (трубки).
- Тонкое покрытие высокочастотного волновода серебром дает больший прирост проводимости, чем покрытие проводника для постоянного тока.

Негативное проявление: повышение электрического сопротивления и, как следствие, потерь и нагрева проводников.

Эффект близости

В пучке проводников, идущих параллельно, например, внутри тесно намотанной катушки провода распределение тока в проводниках будет неравномерным. Сосредоточение тока дает увеличение эффективного сопротивления цепи, которое увеличивается с частотой. Принцип иллюстрируется Рис. 2, где показаны два проводника с токами, текущими в одном направлении. Первый проводник, посредством переменного магнитного поля наводит ЭДС (E) во втором проводнике (явление взаимной индукции) (B), которая снижает ток в области дальше от первого проводника и повышает в области ближе к первому проводнику

Негативные проявления: повышение электрического сопротивления и, как следствие, потерь и нагрева проводников.

Теплопередача

Т. — физический процесс передачи тепловой энергии от более горячего тела к менее горячему, либо непосредственно (при контакте), либо через посредника из какого-либо материала.

Всего существует три простых (элементарных) механизма передачи тепла:

- теплопроводность,
- конвекция,
- тепловое излучение.

Основные виды переноса тепла которые используются во многих ЭМ с целью охлаждения активных частей, и которые являются сочетанием элементарных видов:

- Конвективный теплообмен между потоками жидкости или газа и поверхностью твёрдого тела - «теплоотдача»
- Теплообмен от горячей среды (жидкость, газ или твердое тело) к холодной через разделяющую их стенку - «теплопередача»
- Совместный перенос тепла излучением и конвекцией - «конвективно-лучистый перенос тепла»

Тепловое расширение и сжатие

Т.Р. - изменение размеров тел под действием теплового поля (при нагреве и охлаждении). Может сопровождаться возникновением значительных усилий.

Применение с пользой :

- Посадка ротора на вал

Негативные проявления:

- Деламинация

Инерция

И. — свойство тела оставаться в состоянии покоя или равномерного прямолинейного движения в отсутствие внешних воздействий, а также препятствовать изменению своей скорости при наличии внешних сил за счёт своей инертной массы.

Примеры использования:

- Рекуперация кинетической энергии ЭМ при торможении
- Продолжение работы вращающейся машины при кратковременной потере напряжения за счёт инерции (запасенной кинетической энергии)

Негативные проявления:

- Ограниченная динамика машины
- Тяжелый пуск
- Длительный выбег

Выделение тепловой энергии при прохождении тока

При прохождении электрического тока по проводящей среде выделяется тепловая энергия. Величина тепловой энергии обратно пропорциональна проводимости материала среды. Количественную оценку теплового действия электрического тока дает Закон Джоуля- Ленца

Примеры использования: системы прогрева обмоток двигателя для удаления конденсата.

Примеры негативных проявлений: потери в обмотках (меди, алюминии) и сердечниках (стали).

Трение

Т. представляет собой силу, возникающую при относительном перемещении двух соприкасающихся тел в плоскости их касания. Различают силы трения качения (сопротивление перекатыванию), трения скольжения и трения покоя. Также обычно различают два основных вида трения скольжения: трение сухое (или трение несмазанных поверхностей) и трение жидкостное (или трение смазанных поверхностей).

Полезное применение: взаимное удержание элементов конструкции благодаря силе трения покоя (посадки с натягом, гладкие соединения деталей).

Примеры негативных проявлений: снижение момента на валу из-за силы трения в подшипниках (качения или скольжения) или трения ротора высокоскоростной машины о воздух или жидкость.

Гравитация

Г. - силовое взаимодействие масс на расстоянии.

Негативные проявления:

- Провисание и деформация вала в машинах большой мощности
- Воздействие массы и инерции ротора на подшипники

Центробежная сила

Ц.С. - сила, с которой движущаяся материальная точка действует на тело (связь), стесняющее свободу движения точки и вынуждающее её двигаться криволинейно. Ц.С. направлена по главной нормали к траектории от центра кривизны (от центра окружности при движении точки по окружности).

Примеры применений:

- Центробежные выключатели, регуляторы
- Удержание постоянных магнитов на роторе, расположенном ввне статора в ЭМ обращенной конфигурации

Примеры негативных проявлений:

- Усилия на вращающиеся части машины, возрастающие с ростом частоты вращения.
- Необходимость удержания постоянных магнитов на роторе, например, посредством бандажа

Сверхпроводимость

С. - значительное увеличение проводимости некоторых материалов при определенных значениях температуры, магнитного поля и плотности тока.

Пример применения - обмотки машин из сверхпроводящих материалов.

Магнитострикция и эффект Виллари

М. – изменение объёма и линейных размеров тела при изменении состояния его намагничённости.

Примеры применения:

- Генерирование механических колебаний заданных параметров
- Актюаторы малых перемещений

Негативные проявления: вибрации и шум.

Э.В. или магнитоупругий эффект — явление обратное магнитострикции, заключающееся в изменении намагниченности магнетика под действием механических деформаций.

Пример применения: магнитострикционные генераторы энергии.

Эффект Пельтье и эффект Зеебека

Э.П. - явление переноса энергии при прохождении электрического тока в месте контакта (спая) двух разнородных проводников, от одного проводника к другому. В зависимости от направления протекающего тока, помимо джоулева тепла выделяется или поглощается дополнительное тепло.

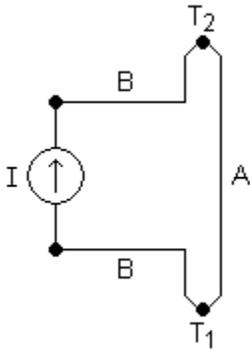


Рис. П7.3. Схема эффекта Пельтье.

Пример применения Э.П.: термоэлектрический преобразователь

Эффект Зеебека «обратен» эффекту Пельтье.

Пример применения Э.З.: термоэлектродгенератор - устройство, предназначенное для прямого преобразования тепловой энергии в электричество.

Электрострикция и пьезо-электрический эффект (пьезоэффектом)

Э. - упругое обратимое увеличение размеров тела (деформация) в электрическом поле любого знака. Э. - это свойство всех непроводников, или диэлектриков. Деформация твердого тела под действием электрического поля, зависит от знака поля.

Примеры применения:

- Электрострикционный двигатель
- Актюаторы
- Детекторы перемещений
- Генерирование механических колебаний заданных параметров

Негативные проявления: вибрации и шум.

П-Э.Э. - образование зарядов на поверхности твердого тела под воздействием механических напряжений (упругих деформациях) в отсутствие внешнего электрического поля (возникновению электрического напряжения между поверхностями деформируемого твердого тела).

Примеры применения:

- Электрострикционные генераторы энергии
- Датчики механических напряжений, сжимаемости

Э. Также называют обратным пьезоэффектом.

Эффект Томсона

Выделение или поглощение тепла (в дополнение к теплоте Джоуля) в объеме проводника при прохождении постоянного электрического тока по неравномерно нагретому однородному проводнику или полупроводнику (при наличии градиента температур вдоль проводника).

Механические колебания

М.К. делят на свободные и вынужденные. Свободные колебания – это собственные затухающие колебания при выводе системы из равновесного положения. Вынужденные колебания - колебания под действием периодической силы, как правило, внешней.

Вибрации и акустический шум в ЭМ – комбинация обоих типов колебаний.

Акустические колебания

Распространение в среде звуковых волн. Характер воздействия зависит от частоты и интенсивности колебаний.

Негативное проявление – акустический шум, в результате вибраций частей машины.

Резонанс

Резкое возрастание амплитуды колебаний при совпадении вынужденных и собственных частот.

Пример негативного проявления – увеличение механических вибраций частей машины, при совпадении частоты питания и собственной частоты ротора машины с просоединенной механической нагрузкой.

Эффект Холла

Возникновение разности потенциалов электрического поля (напряжения Холла) в электрическом проводнике или полупроводнике в направлении, перпендикулярном направлению магнитного поля и направлению тока. Напряжение Холла пропорционально магнитному полю и силе тока.

Примеры использования:

- Датчик Холла — измерительный преобразователь для измерения присутствия и величины магнитного поля. Принцип работы датчика основан на эффекте Холла и его выходное напряжение прямо пропорционально напряжённости магнитного поля.
- Измерение тока.
- Измерение мощности, рассеиваемой устройством.

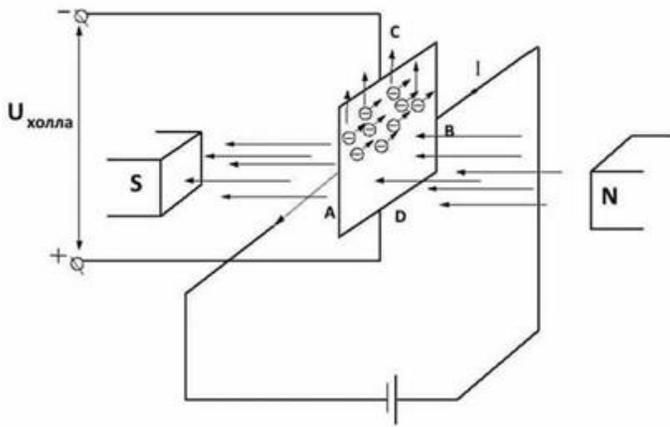


Рис. П7.4. Схема эффекта Холла.

Влияние температуры на электрические и магнитные свойства

Электрические и магнитные свойства веществ вблизи определенной температуры (точки Кюри) резко меняются. Выше точки Кюри Ферромагнетик переходит в парамагнетик.

Сегнетоэлектрики имеют две точки Кюри, в которых наблюдаются или магнитные, или электрические аномалии. Антиферромагнетики теряют свои свойства при температуре, названной точкой Нееля.

Примеры негативных проявлений: размагничивание ПМ?

Магнитный гистерезис

М.Г. — явление зависимости вектора намагниченности M и вектора магнитной индукции B в веществе не только от напряжённости H приложенного внешнего поля, но и от предыстории данного образца. Магнитный гистерезис обычно проявляется в ферромагнетиках — Fe, Co, Ni и сплавах на их основе.

Полезное применение:

1. Гистерезисный двигатель
2. Магнитным гистерезисом объясняется существование постоянных магнитов

Негативные проявления: потери на гистерезис (см ниже).

Потери на гистерезис

Работа, совершаемая силой намагничивания против внутреннего трения молекул магнита, производит тепло. Эта энергия, которая теряется в виде тепла из-за гистерезиса, называется потерями на гистерезис.

Ламинарность и турбулентность

Ламинарность - упорядоченное движение вязкой жидкости (или газа) без междуслойного перемешивания с убывающей от центра трубы к стенкам скоростью потока. Турбулентность - хаотическое движение жидкости (или газа) с беспорядочным движением частиц по сложным траекториям и почти постоянной по сечению скоростью потока.

Примеры использования: системы охлаждения.

Закон Паскаля

Давление в жидкостях и газах передается равномерно во всех направлениях.

Примеры применения с пользой:

- Системы охлаждения
- Гидрозащита погружных двигателей с использованием барьерной жидкости

Гироскопический эффект

Вращающиеся с большой скоростью тела способны сохранять неизменным положение своей оси вращения. Силовое воздействие со стороны с целью изменить направление оси вращения приводит к прецессии гироскопа, пропорциональной силе.

Пример применения - ротор ЭМ может быть элементом гироскопа.

Пример негативного влияния - усложнение системы поддержания стабильного положения ротора с электромагнитными подшипниками.

Капиллярность

Самопроизвольное течение жидкости под действием капиллярных сил в капиллярах и полукрытых каналах (микротрещинах и царапинах).

Примеры применения:

- Охлаждение активных частей ЭМ
- Пропитка обмоток
- Капиллярный контроль подшипников скольжения

Пример негативного проявления - проникновение влаги в изоляцию.

Жидкости, твердеющие в магнитном поле

Вязкие жидкости (масла) в смеси с ферромагнитными частицами твердеют при помещении в магнитное поле.

Пример применения - муфты для соединения вала ЭМ и нагрузки.

Электрические разряды в газах и пробой диэлектриков

Диэлектриками могут быть вещества во всех агрегатных состояниях: в газообразном, жидком и твердом. Например, в качестве газообразных диэлектриков в практике используются воздух, углекислота, водород как в нормальном, так и в сжатом состояниях. Э.Р. могут возникать в любых диэлектриках. Они могут быть частичными или приводить к пробую диэлектрика.

Э.Р. в газе - возникновение электрического тока в газе в результате его ионизации и под действием электрического поля. Внешние проявления и характеристики разрядов зависят от управляющих факторов (состава и давления газа, конфигурации пространства, частоты электрического поля, силы тока).

Частичным разрядом называется локальный электрический разряд, который шунтирует только часть изоляции в электроизоляционной системе. Частичные разряды возникают в пустотах в твердой изоляции (бумажной или полиэтиленовой), в многослойных системах электродов/проводников, имеющих несколько слоев твердой изоляции, а также в пузырьках газа (в случае жидкой изоляции) или вокруг электродов в газе (коронный разряд) и в большинстве случаев представляют собой воздушные или масляные промежутки в изоляции.

Пробой диэлектрика - падение электрического сопротивления и термическое разрушение материала из-за разогрева участка диэлектрика под действием сильного электрического поля.

Примеры негативных проявлений:

- Пробой изоляции обмотки двигателя из-за повышенной влажности или скачка напряжения.
- Пробой трансформаторного масла в трансформаторе при попадании в масло примесей, например воды.

Электризация

Появление на поверхности веществ электрических зарядов. Может вызываться и в отсутствии внешнего электрического поля (для пьезоэлектриков и сегнетоэлектриков при смене температуры). При воздействии на вещество сильным электрическим полем с охлаждением или освещением получаются электреты, создающие вокруг себя электрическое поле.

Пример негативного проявления: в двигателях, работающих в взрывоопасных средах, существует риск электростатического разряда – краска, которой покрыты поверхности двигателя может привлекать заряды, которые находятся во взвешенном состоянии в воздухе, заряжаясь таким образом статическим электричеством.

Фазовые переходы 1-го рода

Изменение агрегатного состояния веществ при определенной температуре, сопровождающееся выделением или поглощением энергии. Переходы первого рода реализуются как при переходе системы из одного агрегатного состояния в другое, так и в пределах одного агрегатного состояния.

Примеры применения:

- Охлаждение испарением (с последующей конденсацией)
- Охлаждение с использованием материалов с фазовым переходом

Примеры негативных проявлений:

- Замерзание смазки в подшипниках
- Расплавление обмоток при токах короткого замыкания

Фазовые переходы 2-го рода

Скачкообразное изменение теплоемкости, теплопроводности, магнитных свойств, текучести (сверхтекучесть), пластичности (сверхпластичность), электропроводности (сверхпроводимость) при достижении определенной температуры и без энергообмена.

Пример применения - сверхпроводниковые обмотки (при сверхнизких температурах).

Пример негативного проявления - потеря магнитных свойств при достижении определенной температуры (точки Кюри).

Магнитное насыщение ферромагнетиков

Магнитное насыщение - состояние ферромагнетика, при котором его намагниченность достигает предельного значения - намагниченности насыщения, не меняющейся при дальнейшем увеличении напряжённости намагничивающего поля.

Пример применения - насыщающиеся трансформаторы тока используемые в дифференциальной токовой защите.

Пример негативного проявления - насыщение стали магнитопровода.

Сплавы с памятью

Деформированные с помощью механических сил детали из некоторых сплавов (титан-никель и др.) после нагрева восстанавливают в точности свою первоначальную форму и способны при этом создавать значительные силовые воздействия.

Пример применения: нитиноловый двигатель — двигатель, основанный на способности сплава с эффектом «памяти» нитинола (сплава титана и никеля) восстанавливать свою форму, которую он получил при температуре красного каления.

Диэлектрик в электромагнитном поле

В диэлектрике, помещенном в электромагнитное поле, часть энергии переходит в тепловую. Тепло в диэлектрике выделяется как в постоянном, так и в переменном электрическом поле. Особенно сильно диэлектрики могут нагреваться в полях высокой частоты. Величина потерь зависит от структуры диэлектрика, вида поляризации, наличия дефектов, примесей, температуры.

Пример негативного проявления – потери в изоляции ЭМ.

Клетка Фарадея

Устройство, изобретённое английским физиком и химиком Майклом Фарадеем в 1836 году для экранирования аппаратуры от внешних электромагнитных полей. Обычно представляет собой клетку, выполненную из хорошо токопроводящего материала.

Примеры применения: корпус машины является ФК, экранируя объекты вокруг машины от электромагнитных полей, создаваемых обмоткой машины. Это обеспечивает, по крайней мере частично, электромагнитную совместимость.

Ферро-магнитный резонанс

Избирательное (по частоте) поглощение энергии электромагнитного поля. Частота меняется в зависимости от интенсивности поля и при смене температуры.

Пример негативного проявления - трансформатор напряжения и линия электропередачи с в электроэнергетической системе могут образовывать резонансный контур, который вызывает феррорезонанс и ставит под угрозу безопасность и стабильность электроэнергетической системы.

Электроосмос

Движение жидкостей или газов через капилляры, твердые пористые диафрагмы и мембраны, а также через силы очень мелких частиц под действием внешнего электрического поля.

Пример применения: электроосмотическая сушка изоляции обмоток.

Трибоэлектричество

Электризация тел при трении. Величина и знак заряда определяются состоянием поверхностей, их составом, плотностью и диэлектрической проницаемостью.

Пример применения: трибоэлектрические наногенераторы для зарядки портативной электроники энергией, получаемой от повседневных механических движений тела человека.

Прочие эффекты, которые могут иметь место в ЭМ

Эффект Эттингсгаузена - возникновение разности температур в направлении, перпендикулярном магнитному полю и току.

Эффект Нернста - возникновение электрического поля при поперечном намагничивании проводника перпендикулярно направлению магнитного поля и градиенту температур.

Индукцированные заряды - возникновение зарядов на проводнике под действием электрического поля.

Эффект Томсона (магниторезистивный эффект) - изменение проводимости ферромагнитного проводника в сильном магнитном поле.

Эффект Баркгаузена - ступенчатый ход кривой намагничивания образца вблизи точки Кюри при изменении температуры, упругих напряжений или внешнего магнитного поля.

Эффект Мейснера - вытеснение магнитного поля из объема сверхпроводника при его переходе в сверхпроводящее состояние.

Контактная разность потенциалов (закон Вольты) - возникновение разности потенциалов при контакте двух разных металлов. Величина зависит от химического состава материалов и их температуры.

Пьезо-магнетизм - возникновение магнитного момента при наложении упругих напряжений.

Эффект Гопкинса - возрастание магнитной восприимчивости при приближении к температуре Кюри.

Электрокалорический эффект - увеличение температуры вещества при создании в нём электрического поля и соответствующего уменьшения температуры при выключении этого поля в адиабатических условиях.

Некоторые химические эффекты

Полимеризация

Процесс образования высокомолекулярного вещества (полимера) путём многократного присоединения молекул низкомолекулярного вещества (мономера, олигомера) к активным центрам в растущей молекуле полимера.

Отверждение

Процесс, в результате которого происходит необратимое превращение жидких реакционноспособных олигомеров и (или) мономеров в твердые неплавкие и нерастворимые сетчатые полимеры.

Пример применения полимеризации и отверждения: пропитка и заливка обмоток ЭМ для получения высокой механической и электрической прочности, влагостойкости, малые термические коэффициенты расширения и теплопроводности.

Коррозия

Самопроизвольное разрушение металлов и сплавов в результате химического, электрохимического или физико-химического взаимодействия с окружающей средой. Ржавчиной, как правило, называют продукт коррозии только железа и его сплавов, таких как сталь, хотя многие другие металлы тоже подвергаются коррозии.

Пример негативного проявления: ржавление корпуса ЭМ.

Окисление

Химическая реакция соединения какого-нибудь вещества с кислородом.

Пример негативного проявления: окисление клеммных соединений.

Старение изоляции

Необратимый процесс изменения структуры и химического состава изоляции под воздействием вибраций, трения, температуры, влажности и других факторов. С.и. характеризуется уменьшением сопротивления изоляции, ростом диэлектрических потерь, снижением электрической прочности.

Старение смазки в подшипниках

В процессе трения и окисления механические и химические свойства пластичной смазки изменяются. Тип окисления зависит от условий работы – физическое старение преобладает при меньших температурах и высоких скоростях, а химическое старение преобладает при высоких температурах. Физическое старение приводит к изменению реологических свойств, и, в результате, к утечкам, ухудшению характеристик маслоотделения и ухудшению способности пополнения смазки в зоне контакта. Химическое старение в основном является результатом окисления. Антиоксиданты замедляют этот процесс, но когда они заканчиваются, окисление приводит к потере смазочного материала в результате превращения в летучие продукты и лак, который не может смазывать подшипник.

Некоторые физико-химические эффекты

Горение

Процесс превращения исходных веществ в продукты сгорания в ходе экзотермических реакций, сопровождающийся интенсивным выделением тепла.

Пример негативного проявления: воспорание ЭМ как последствие пробоя изоляции.

Явление взрыва

Воспламенение веществ вследствие мгновенного их химического разложения и образование сильно нагретых газов, сопровождающееся сильным звуком, выделением значительной энергии (тепловой, механической), световой вспышкой.

Пример применения: плакирование взрывом (нанесения покрытий).

Электролиз

Процесс, состоящий в выделении на электродах составных частей растворённых веществ или других веществ, являющихся результатом вторичных реакций на электродах, который возникает при прохождении электрического тока через раствор либо расплав электролита.

Пример применения: контроль изоляции при сушке.

Приложение 8. Словарь некоторых использованных терминов

Техносфера - часть биосферы, преобразуемая с помощью технических средств в социально-экономических целях.

Электромеханика - раздел электротехники, в котором рассматриваются общие принципы электромеханического преобразования энергии и их практическое применение для проектирования и эксплуатации электрических машин.

Инженерия (инженерное дело, инженерное искусство) - область технической деятельности, включающая в себя целый ряд специализированных областей и дисциплин, направленная на практическое приложение и применение научных, экономических, социальных и практических знаний с целью обращения природных ресурсов на пользу человека.

Техника - обобщающее наименование сложных устройств, механизмов, систем. Также может употребляться для обозначения методов, процессов и технологий упорядоченной искусной деятельности.

Технология - совокупность методов и инструментов для достижения желаемого результата, в широком смысле — применение научного знания для решения практических задач.

Парадигма – набор концепций и шаблонов мышления.

Концепция (набор определений) - умозрительная система, выражающая определенный способ представления, понимания, трактовки каких-либо предметов, явлений, процессов; комплекс взглядов на что-либо, связанных между собой и образующих единую систему; идея, ведущий замысел, конструктивный принцип, система путей решения задачи.

Метафизика – раздел философии, занимающийся исследованием первоначальной природы реальности, мира и бытия как таковых.

Реальность – объективно явленный мир; фрагмент универсума, составляющий предметную область соответствующей науки; объективно существующие явления, факты.

Бытие – существование.

Мир (= вселенная) – (1) материальная (доступная наблюдениям), (2) умозрительная (философская).

Истина - мысль, соответствующая объективной (независимой от познающего субъекта) действительности. В науке категория истины обладает двойственной характеристикой. С одной стороны, истина есть в традиционном понимании цель научного познания, а с другой — это самостоятельная ценность, обеспечивающая принципиальную возможность научного знания совпадать с объективной реальностью, как минимум быть комплексом базовых решений теоретических и практических задач.

Идея - мысленный прообраз какого-либо действия, предмета, явления, принципа, выделяющий его основные, главные и существенные черты.

Концепция - абстрактная идея.

Инновация (нововведение) - введённый в употребление новый или значительно улучшенный продукт (товар, услуга) или процесс.

Понятие — отображённое в мышлении единство существенных свойств и отношений предметов.

Список символов и аббревиатур

A - доступность

a – себестоимость перевозок

C_{tm} - затраты времени и средств на удовлетворение потребностей

C_{ey} – стоимость затраченной электроэнергии в год

C_{Σ} – все затраты

C_e – стоимость потребленной энергии

C_M – машинная постоянная

C_p – степенной коэффициент машинной постоянной при мощности

C_n - степенной коэффициент машинной постоянной при частоте вращения

CO_2 – количество выбросов углекислого газа за год

CoE - нормированная стоимость электроэнергии

D – диаметр

D_{δ} - диаметр ротора

D_{tr} – расстояние, на которое перевезены пассажиры

E_{Σ} – вся произведенная электроэнергия

E_t - производство электроэнергии в год t

H - вредные действия («факторы расплаты»)

I - степень идеальности потребностей

IC - инвестиционные затраты

IC_t - инвестиционные затраты в год t

i, j, k, l - порядковые номера переменных

$k, k_1, k_2, k_3, k_4, k_5$ – коэффициенты

K_t – фактор типа машины

K_e – фактор требования к КПД

K_c – фактор типа охлаждения

K_u – фактор уровня напряжения

K_{fp} - фактор частоты и полюсов

K_s - фактор формы

K_i - фактор наличия конструкционных частей

K_o - фактор перегрузок

K_x - прочие факторы

L – длина

l - базисный размер

l_δ - длина магнитопровода

M – момент

M' - нормализованный момент

$M_{уд}$ - удельный момент

M_{max} - максимальный момент

m – масса

N – количество рейсов в год

N_p – количество перевезенных пассажиров

lt - жизненный цикл системы

n – частота вращения

n_{max} – максимальная частота вращения

n' - нормализованная частота вращения

$OpEx$ - операционные затраты за жизненный цикл насоса

$OpEx_t$ - операционные затраты и затраты на содержание в год t

P – мощность

P' - нормализованная мощность

$P_{уд}$ – удельная мощность

Qn - количество потребностей

Ql - качество потребностей

r - ставка дисконтирования

T_w - время, в течение которого система полностью функционирует и работает по своему назначению

T_s - время, в течение которого система недоступна или не работает по своему назначению

U – напряжение

V – объем

α, β - коэффициенты согласования

ϵ – цена

α - коэффициент

Аббревиатуры:

ЭМ – электрическая машина

ТС – техническая система

ВЧ СМПМ – высокочастотная синхронная машина с постоянными магнитами

ВТСП – высокотемпературные сверхпроводники

АДКЗ – асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором

АДФР – асинхронный двигатель с фазным ротором

Сведения об авторе

Матвеев Алексей Вячеславович. Выпускник кафедры Электромеханики МЭИ 1998 года, защитивший диссертацию в Нидерландах (TU Eindhoven) в 2006 году, в разные периоды своей 25-летней карьеры (на момент написания книги) работавший как в больших компаниях, в том числе ABB и Rolls-Royce, так и менее известных компаниях и стартапах. Энтузиаст онлайн-образования, создатель открытого курса DriveConstructor, исследователь в области Электромеханики, автор нескольких десятков статей и патентов в области электрических машин и электропривода.

Обратная связь

Автор будет благодарен за конструктивную критику, указание на возможные ошибки, неточности и прочие недостатки. Связаться с автором можно по электронной почте avmatveev@inbox.ru.

Ссылки на книгу

Автор просит ссылаться на книгу, если такая потребность возникнет, следующим образом:

А.В. Матвеев, Управление эволюцией электрических машин, DriveConstructor, 2024 - 262 стр.

Копирование и распространение

Копирование и распространение разрешается исключительно в образовательных целях.