

Тестирование гипотезы о зависимости массы электрических машин от мощности и частоты вращения

МАТВЕЕВ А.В.

Drive Constructor, Норвегия

Проводится тестирование гипотезы о пропорциональности массы любой вращающейся электрической машины ее мощности, взятой в степени 0,75, и обратной пропорциональности массы квадратному корню частоты вращения. Тестирование проводится на материале синхронных машин с постоянными магнитами. Исследуется влияние таких факторов, как напряжение, форма активных частей, охлаждение, уровень КПД, перегрузки, наличие несущих структур, частота питания и количество полюсов. Гипотеза тестируется посредством расчетов массы машин в максимально широком диапазоне мощности (от 0,03 Вт до 36 МВт) и частоты вращения (от 2 до 500000 об/мин). Точность предварительной оценки массы машины в пределах около 50% можно признать приемлемой, учитывая, что рассматривается масса машин как менее грамма, так и более 100 тонн. По результатам исследования предложена формулировка нового закона электромеханики, описывающего «предопределенность» массы машины именно через ее мощность и частоту вращения. Отношение мощности, взятой в степени 0,75, к квадратному корню частоты вращения в определенной степени представляет собой аналог «гравитации», которую проектировщики пытаются преодолеть, работая над снижением значений вышеупомянутых факторов влияния.

К л ю ч е в ы е с л о в а: машинная постоянная, законы электромеханики, синхронные машины с постоянными магнитами

Для оценки размеров электрических машин (ЭМ) многие десятилетия используется машинная постоянная Арнольда C_A и ее аналоги. В [1] предложена альтернатива – машинная постоянная C_M , выведенная на основании анализа графической информации с так называемой логарифмической карты (ЛК), на которой линии равной мощности и частоты вращения построены в системе координат удельных мощности и момента. Примечательно, что ЛК была составлена безотносительно типа машин, поскольку было сделано предположение, что в логарифмическом масштабе различия в удельных мощностях и моментах между различными типами машин будут незначительны. Информация, лежащая в основе ЛК из [1], может быть также представлена в системе координат мощности и частоты вращения (рис.1). С учетом того, что вариативность проектных решений в области ЭМ очень велика, положение линий весьма приблизительно. В то же время рис.1 верно отражает важный эффект – радикальное изменение удельных показателей при изменении номинальных мощности и частоты вращения ЭМ.

Машинная постоянная C_M определяется как

$$C_M = \frac{m}{P^{C_p} n^{C_n}}, \quad (1)$$

где C_p и C_n – коэффициенты, отражающие общую тенденцию изменения массы электрических машин при варьировании мощности и частоты вращения.

Сделано предположение, что C_p и C_n определяются «природой» электрических машин как класса

технических устройств. В [1] предложены значения $C_p = 0,69$, $C_n = -0,5$, при этом отмечено, что значения предварительные и требуют уточнения. В [2] обосновано более точное значение $C_p = 0,75$, при этом описан физический смысл значения данного коэффициента. Четкого логического объяснения $C_n = -0,5$ пока не предложено. Также в [2] сделано предположение, что электрические машины – класс устройств, в значительной степени подчиняющийся логарифмическим законам в том, что касается изменения массы в зависимости от мощности и частоты вращения. Эта формулировка, будучи, возможно, оригинальной, несколько неопределенная и не ясно, как ей практически воспользоваться.

В соответствии с (1) и приведенными выше значениями коэффициентов можно записать выражение для массы машины в общем виде:

$$m = C_M P^{0,75} n^{-0,5}, \quad (2)$$

где m – масса ЭМ, кг; P – номинальная мощность ЭМ, кВт; n – номинальная частота вращения ЭМ, об/мин.

Если зафиксировать значение машинной постоянной, например $C_M = 200$, то можно графически показать, как масса ЭМ изменяется в зависимости от мощности и частоты вращения (рис. 2). Примечательно, что линии равной массы – прямые, и расстояние между линиями, отличающимися на порядок, равно. При изменении значения C_M происходит смещение линий (рис. 3).

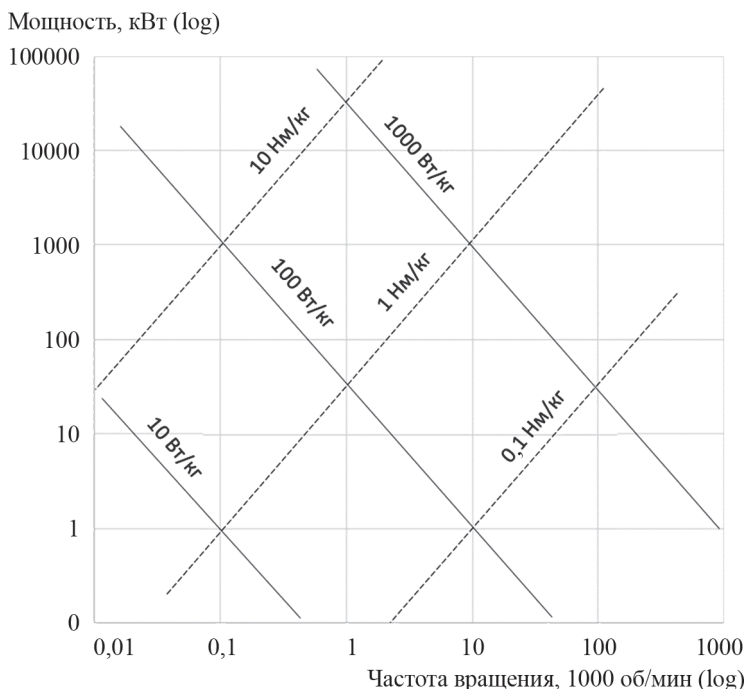


Рис. 1. Линии равных удельных мощности и момента

Fig. 1. Lines of equal power and torque densities

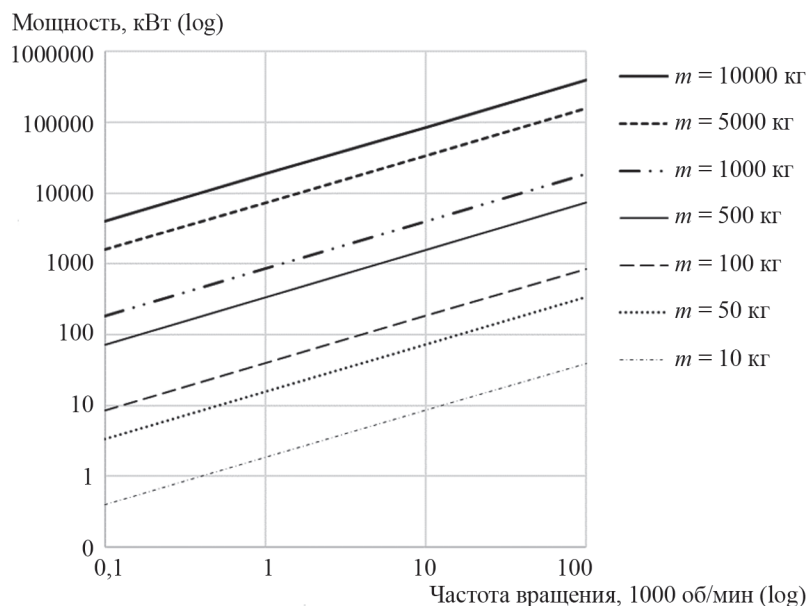


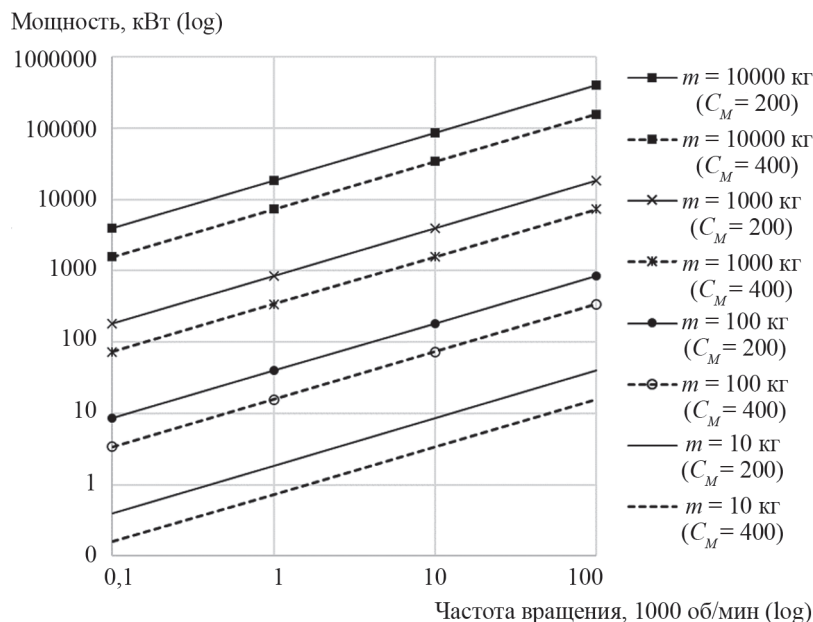
Рис. 2. Логарифмическая карта зависимости массы ЭМ от мощности и частоты вращения

Fig. 2. Logarithmic map of dependence of mass of EM on power and speed

На основе (2) может быть выдвинута Гипотеза, сформулированная следующим образом: **«масса любой вращающейся ЭМ пропорциональна ее мощности, взятой в степени 0,75, и обратно пропорциональна ее частоте вращения, взятой в степени 0,5»**. Мощность и частота вращения – это, естественно, не все параметры, определяющие массу машины, но уверенность в верности Гипотезы и точности предложенных значений 0,75 и 0,5 позволило бы более точно

определить другие факторы, влияющие на массу машины.

Следует отметить, что специалистам в области ЭМ очевидно, что при прочих равных параметрах машина с большей мощностью (или большим моментом) будет иметь большую массу, а машина с большей частотой вращения будет иметь меньшую массу. В то же время произведение $P^{0,75}n^{-0,5}$ далеко не так очевидно и впервые было предложено в [2]. Скорее можно предполо-

Рис. 3. «Сдвиг» значений массы при изменении C_M Fig. 3. «Shift» of mass for different values of C_M

жить, что специалист рассматривал бы выражение P_n^{-1} , поскольку оно соответствует электромагнитному моменту.

Одна из целей данного исследования, являющегося продолжением [1] и [2], – выведение простых выражений для оценки массы и размеров любой вращающейся ЭМ с достаточно высокой точностью без проведения сложных расчетов или моделирования. Кроме того, в данной работе ставится вопрос, сможет ли выдвинутая Гипотеза в случае подтверждения и обоснования трактоваться как один из законов электромеханики.

В [2] выбрано пять основных факторов, влияющих на массу машины, и машинная постоянная представлена следующим образом:

$$C_M = K_t K_e K_c K_u K_{fp}, \quad (3)$$

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.

В [2] тестирование применимости выражений (2) и (3) было успешно проведено на материале нескольких классов и серий асинхронных машин (АМ). Там же были предложены методы определения значений факторов K_t , K_e , K_c , K_u и K_{fp} . Следует отметить, что рассмотренные АМ были в основном со стандартными корпусами, стандартными номинальными напряжениями и диапазон их частот вращения был сравнительно ограничен.

Итак, задачи данной работы следующие:

1. Протестировать применимость выражения (2) для нового типа ЭМ – синхронных машин с постоянными магнитами (СМПМ), таким образом сделав заявку на то, что предлагаемый метод актуален для различных типов ЭМ.

2. Подтвердить адекватность значений коэффициентов $C_p = 0,75$, $C_n = 0,5$ в максимально широком диапазоне значений мощности и частоты вращения, что позволит подтвердить или опровергнуть выдвинутую Гипотезу.

3. Поскольку более поздние по сравнению с [2] исследования показали, что факторов, определяющих значение C_M , значительно больше, чем использовано в (3), то необходимо исследовать влияние новых факторов. Также имеет смысл уточнить значения уже известных из [2] факторов K_t , K_e , K_c , K_u и K_{fp} .

Примечательно, что для проверки работоспособности выражения (2) не понадобится проектирование машин, поскольку в настоящее время доступна информация о параметрах и характеристиках тысяч реальных машин, которую можно и следует использовать.

Рассмотрим основные 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 [2] 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 данной работе для СМПМ 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 и соответственно интенсивность теплоотвода в активных частях машины и, следовательно, ее размеры. В [2] 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.

Для включения в рассмотрение ЭМ с уровнем напряжения ниже 400 В на основе анализа серий СМПМ с низким напряжением предлагается более универсальное выражение, которое работает для всего возможного диапазона напряжений как ниже, так и выше 400 В:

$$K_u = 0,2 \ln(U^{0,8}). \tag{4}$$

Фактор охлаждения K_c . В [2] на основе анализа серий АМ были предложены значения факторов для различных типов охлаждения и степеней защиты (табл. 1). Таблицу можно и нужно 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, и для подобных случаев предлагается значение $K_c = 0,4$. Для естественного охлаждения машины закрытого исполнения без обдува воздухом ($IP55, IC400$) можно предложить $K_c = 1,1 - 1,2$. Следует учесть, что тип хладагента, его температура и интенсивность его прохождения через ЭМ могут сильно варьироваться, т.е. все предложенные здесь значения весьма приблизительны.

Таблица 1

Значения фактора типа охлаждения
Values of the factor of cooling

Охлаждение и степень защиты	Фактор K_c
<i>IP55, IC411</i>	1,00
<i>IP55, IC71W</i>	0,80
<i>IP55, IC611</i>	0,66
<i>IP55, IC81W</i>	0,55
<i>IP23, IC01</i>	0,53

Фактор уровня КПД K_e . Размер ЭМ, спроектированной на максимально высокий уровень КПД, может быть значительно больше размера машины, спроектированной с оптимизацией по массе с допустимым низким уровнем КПД. В [3] показан «фронт» оптимальных по Парето решений для СМПМ мощностью 1 МВт, полученный посредством автоматизированного электромагнитного расчета активных частей множества машин (рис. 4). Под кривой-«фронтом» располагается множество рассчитанных неоптимальных вариантов. Приемлемым компромиссом для проектировщика может быть точка 1 на «колене» кривой. На рис. 4 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.

Для практического использования предлагаются следующие значения факторов уровня КПД: $K_e = 1$ для среднего уровня КПД (приблизительно точка 1

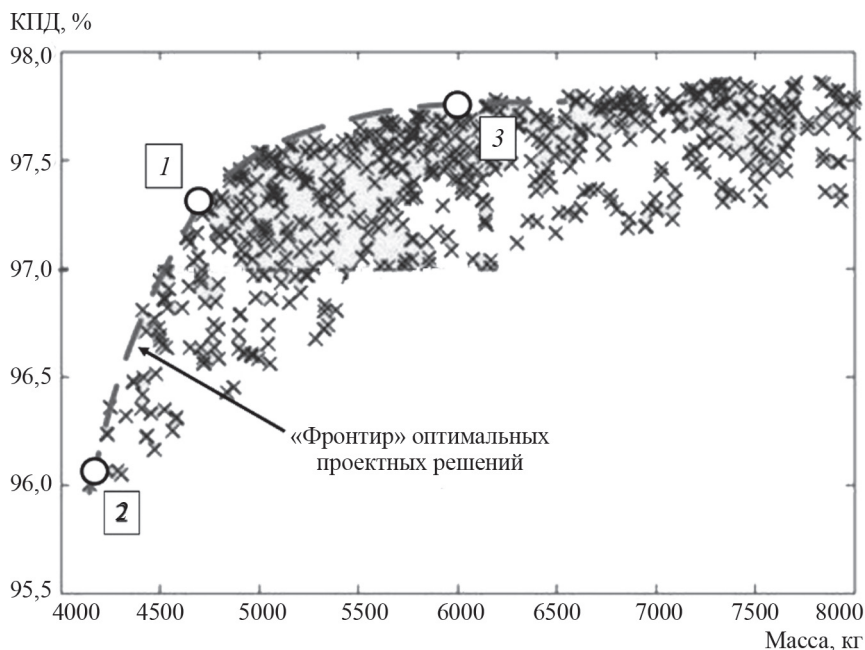


Рис. 4. «Фронт» оптимальных по Парето проектных решений

Fig. 4. «Frontier» of Pareto-optimal designs

на рис. 4), $K_e = 0,8-0,9$ для низкого уровня КПД (приблизительно точка 2), $K_e = 1,2-1,3$ 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 (так же, как для случая только активных частей); $K_e = 0,9-0,95$ для низкого уровня КПД; $K_e = 1,1-1,15$ 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 ЭМ. На рис. 5 схематично показаны топологии ЭМ с 4, 16 и 80 полюсами, при этом для машин (рис. 5, а и б) показаны силовые линии поля, но структура ротора не показана.

Очевидно, что в ЭМ с меньшим числом полюсов требуется большая толщина ярма как статора, так и ротора. С увеличением числа полюсов сердечники становятся тоньше и, соответственно, масса ЭМ 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.

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. 6 нижним рядом ЭМ. Альтернативой может быть подход с использованием значительно более высокой частоты, например в 10 раз, как проиллюстрировано верхним рядом машин на рис. 6. 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 факторов: $K_{fp} = 1$ 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 конструкционных 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% номинальной, для АМ – 200–300%, для беспазовых 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, $K_o = 1,4-2$ для случая значительного влияния перегрузок на массу. Также фактором K_o можно отразить работу машины в повторно-кратковременном режиме без перегрузок (тогда $K_o < 1$).

Фактор формы K_s . Масса активных частей машины зависит от их формы, т.е. от соотношения диаметра

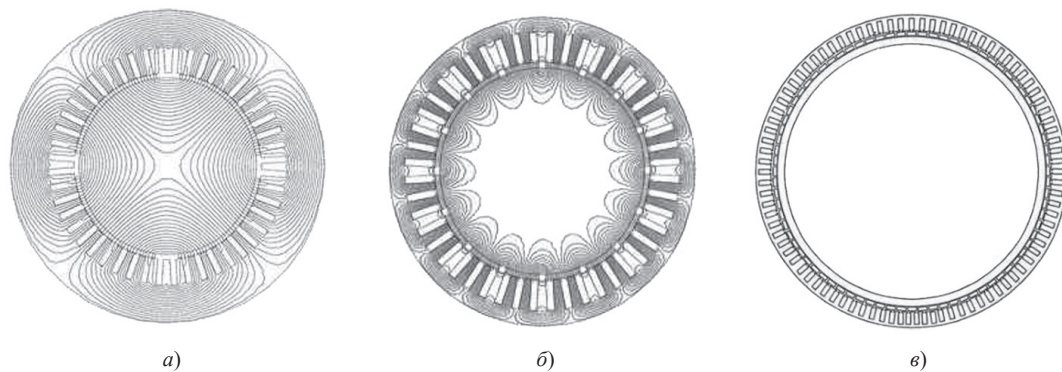


Рис. 5. Машины с различным числом полюсов: а – 4; б – 16; в – 80

Fig. 5. Machines with different pole numbers: a – 4; б – 16; в – 80

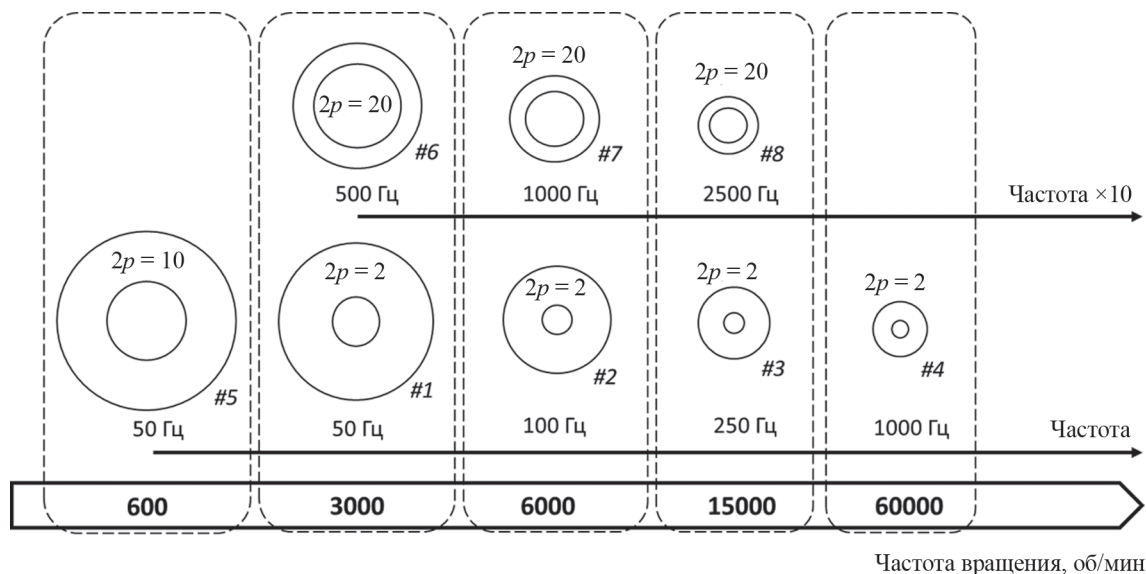


Рис. 6. Различные варианты реализации ЭМ для некоторых частот вращения

Fig. 6. Different variants of design of EM for some speeds

D и длины L . На рис. 7 показаны три варианта формы машин, где сохраняется тот же диаметр, но варьируется аксиальная длина. Если принять $D/L = 2$ за стандартное соотношение, соответствующее значению фактора $K_s = 1$, тогда варианты с $D/L > 2$ будут соответствовать $K_s < 1$, т.е. большей компактности, а варианты с $D/L < 2$ будут соответствовать $K_s > 1$, т.е. меньшей компактности (большей массе). Было проведено исследование серии машин *ETEL* [4], на основании которого предложено следующее выражение:

$$K_s = 1,1 - 0,052D/L. \quad (5)$$

Фактор наличия конструкционных частей K_r .

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, клеммную коробку и т.д. Между этими вариантами существует множество промежуточных вариантов. Например, показанный на рис. 8 двигатель *SP200D* (*Siemens*) для интеграции в

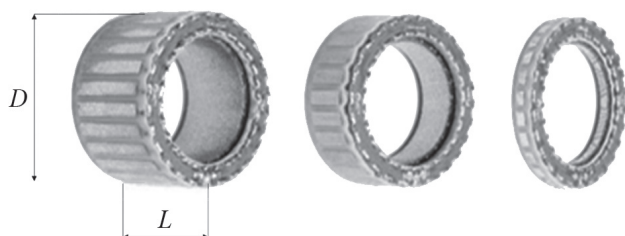


Рис. 7. Примеры различных соотношений диаметра и длины активных частей

Fig. 7. Examples of different relations of diameter and axial lengths of the active parts

корпус полностью электрического самолета не имеет вала и подшипниковых щитов. В случае мотор-колеса на рис. 9 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.

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.

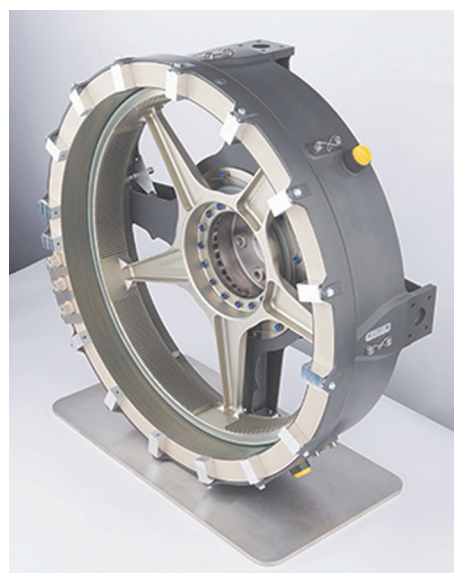


Рис. 8. Двигатель для интеграции в корпус полностью электрического самолета

Fig. 8. Motor for integration into All-Electric Aircraft

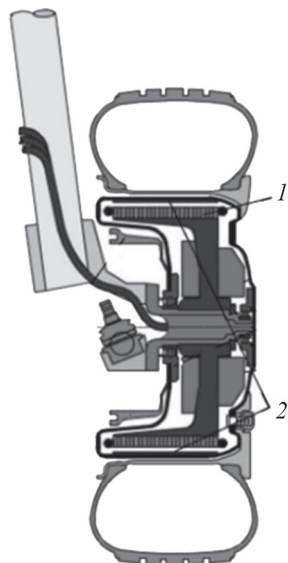


Рис. 9. Мотор-колесо: 1 – статор; 2 – ротор

Fig. 9. Wheel-motor: 1 – stator; 2 – rotor

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 ($K_x < 1$): конструкция с внешним ротором; использование дорогих материалов с повышенными характеристиками; машина, рассчитанная на работу при сравнительно низких температурах окружающей среды.

Можно также привести примеры ситуаций, когда масса машины будет несколько выше, чем обычно ($K_x > 1$): применение на большой высоте над уровнем моря, например в полностью электрическом самолете; высокая окружающая температура, например машина в глубокой нефтяной скважине; машины, заполненные жидкостью, имеющие высокие потери на трение в зазоре, например в погружной машине.

Приведем новое выражение для машинной постоянной с полным набором факторов:

$$C_M = K_i K_e K_c K_u K_{fp} K_s K_i K_o K_x. \quad (6)$$

Отметим, что факторы построены так, что наиболее стандартные исполнения машин соответствуют значениям факторов, равным единице. Это относится ко всем факторам, кроме K_x .

Взаимозависимость факторов. Некоторая уязвимость метода состоит в том, 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. 10, 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 D/L может приводить к снижению отклонения K_s от 1.

Описав влияющие факторы, вернемся к выдвинутой Гипотезе. В работе Гипотеза тестируется посредством анализа выбранных отдельных машин и серий СМПМ, представляющих максимально широкие диапазоны мощности (около 9 порядков) и частоты вращения (около 5–6 порядков). Предполагается, что если формулы (2) и (6) будут давать адекватные результаты в столь широких диапазонах, то выдвинутая Гипотеза скорее верна.

На рис. 11 показаны серии исследуемых машин из [4–20], выбранные таким образом, чтобы покрыть как максимальные, так и минимальные значения мощности и скорости, а также центральные области диаграммы на рис. 11.

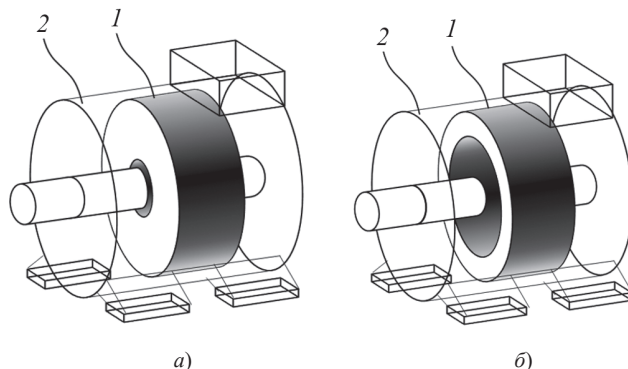


Рис. 10. Машины с малым количеством полюсов (а) и с большим количеством полюсов (б): 1 – активные части; 2 – несущие конструкции

Fig. 10. Machines with low pole number (a) and high pole number (b): 1 – active parts; 2 – carrying structures

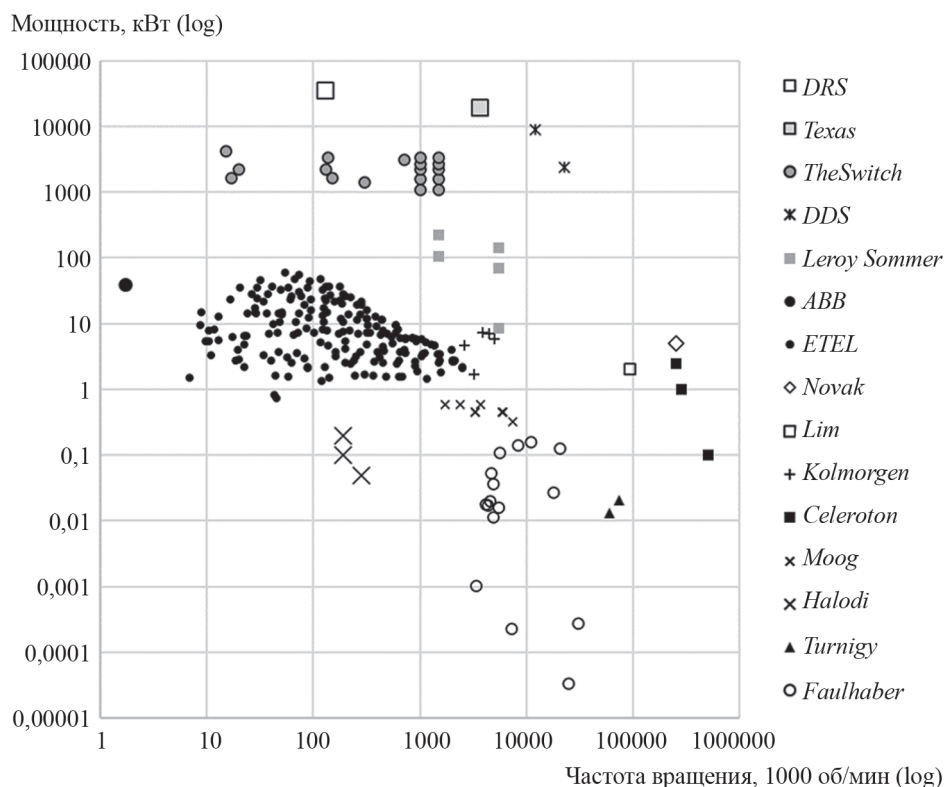


Рис. 11. Обзор анализируемых машин

Fig. 11. Overview of the analyzed machines

Начнем исследование с рассмотрения, насколько сильно влияет на массу фактор n^{C_n} , определяемый частотой вращения и коэффициентом $C_n = -0,5$.

Для того чтобы продемонстрировать чувствительность массы к значению C_n , зафиксируем значения $C_M = 200$ и $P = 1$ кВт и представим массу в зависимости от частоты вращения и значения C_n в табл. 2. Разницу в полученных значениях массы при различных C_n представим как

$$\Delta_1 = \frac{m_{(C_n=-0,5)}}{m_{(C_n=-0,45)}}; \tag{7a}$$

$$\Delta_2 = \frac{m_{(C_n=-0,55)}}{m_{(C_n=-0,5)}}. \tag{7б}$$

Можно прийти к выводу, что тестировать адекватность значения $C_n = 0,5$ следует на высоких частотах вращения, где отклонение C_n в 10% может привести к отклонению в оценке массы в 1,5–2 раза.

Также рассмотрим, насколько сильно влияет на массу фактор P^{C_p} , определяемый мощностью и коэффициентом C_p . Для этого зафиксируем значения: 1000 об/мин, $C_M = 200$. Разницу в полученных значениях массы при различных C_p представим как

$$\Delta_1 = \frac{m_{(C_p=0,7)}}{m_{(C_p=0,75)}}; \tag{8a}$$

Таблица 2

Масса ЭМ при $C_M = 200, P = 1$ кВт
Mass of EM at $C_M = 200, P = 1$ kW

n, об/мин	Масса, кг, при C_n			$\Delta_1 = \Delta_2$
	0,45	0,5	0,55	
1	200,0	200,0	200,0	1,0
10	71,0	63,2	56,4	1,1
100	25,2	20,0	15,9	1,3
1000	8,9	6,32	4,5	1,4
10000	3,17	2,00	1,26	1,6
100000	1,12	0,63	0,36	1,8
1000000	0,40	0,20	0,10	2,0

$$\Delta_2 = \frac{m_{(C_p=0,75)}}{m_{(C_p=0,8)}}. \tag{8б}$$

Можно прийти к выводу, что тестировать адекватность значения $C_p = 0,75$ следует либо на очень низких мощностях, либо на очень высоких.

Зависимость произведения $P^{0,75}n^{-0,5}$, входящего в выражение для массы (2), от различных комбинаций мощности и частоты вращения показана в табл. 4. Отметим, что разброс возможных значений данного произведения очень большой – около 9 порядков.

Проведем тестирование Гипотезы путем сравнения реальных масс машин из [4–20], и масс, предсказанных

Таблица 3

Масса ЭМ при $C_M = 200, 1000$ об/мин
Mass of EM at $C_M = 200, 1000$ rpm

P, кВт	Масса, кг, при C_n			$\Delta_1 = \Delta_2$
	0,7	0,75	0,8	
0,001	0,05	0,04	0,03	1,4
0,01	0,25	0,20	0,16	1,3
0,1	1,26	1,12	1,00	1,1
1	6,3	6,3	6,3	1,0
10	31,7	36	40	0,9
100	158,9	200	252	0,8
1000	796,2	1125	1589	0,7
10000	3991	6325	10024	0,6
100000	20000	35566	63246	0,6
1000000	100237	200000	399052	0,5

Таблица 4

Значения произведения $P^{0,75}n^{-0,5}$
Values of $P^{0,75}n^{-0,5}$

Частота вращения, об/мин	Мощность, кВт				
	0,0001	1	1000	10000	100000
10	0,000316	0,316	56	316	1778
100	0,00010	0,100	18	100	562
10000	0,00001	0,010	1,8	10	56
1000000	0,000001	0,001	0,18	1,0	5,6

с помощью методики, основанной на выдвинутой Гипотезе. Рассмотрим сначала «экстремальные» случаи: сверхскоростные машины (> 50000 об/мин), машины большой мощности (> 20 МВт), сверхнизко-скоростные машины (< 2 об/мин) и микромашины ($< 0,5$ Вт).

Сверхскоростные машины. Анализ машин с частотами вращения от 92500 до 500000 об/мин, приведенный в табл. 5, позволяет сравнить реальную массу машины и массу, рассчитанную по (2), т.е. по машинной постоянной C_M . Также можно сравнить C_M , рассчитанные по факторам и формуле (6) и по реальной массе. Таким образом можно оценить точность предложенной методики в области высоких частот вращения. Общие факторы для всех машин в табл. 5 следующие: форма машин – обычная ($K_s = 1$), топология – 2-полусная ($K_p = 1$), нет никакой информации о перегрузках ($K_o = 1$), а также указаний на какие-либо специальные условия работы ($K_x = 1$). Все машины имеют корпус, подшипники, вал и щиты, при этом корпус – алюминиевый ($K_i = 0,8$).

Различия между машинами в табл. 5, следующие:

Машины *Celeroton* [5] имеют водяное охлаждение ($K_c = 0,8$). Прототипы в [6, 7] имеют естественное воздушное охлаждение ($K_c = 1,1$) (рис. 12).

КПД машины СМ-25-280 *Celeroton* около 94% [8] – достаточно высокий для машин такой мощности и частоты вращения (можно принять $K_e = 1,1$). Предположим, что такой же уровень КПД имеет и машина СМ-95-250. В то же время машина СМ-2-500 слишком

Таблица 5

Сверхскоростные машины
Ultra-high-speed machines

Данные	Продукты <i>Celeroton</i> [5]			Прототипы	
	СМ-95-250	СМ-2-500	СМ-25-280	[7]	[6]
Мощность, кВт	2,5	0,10	1	5	2
Частота вращения, об/мин	250000	500000	280000	250000	92500
Масса, кг	1,00	0,036	0,38	2,0	1,4
Напряжение, В	310	69	96	150	30
K_i – фактор типа машины	500	500	500	500	500
K_e – фактор требования к КПД	1,1	1	1,1	1	0,8
K_c – фактор типа охлаждения	0,8	0,8	0,8	1,1	1,1
K_n – фактор уровня напряжения	0,92	0,68	0,73	0,80	0,54
K_{pp} – фактор частоты и полюсов	1	1	1	1	1
K_s – фактор формы	1	1	1	1	1
K_i – фактор конструкц. частей	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
K_o – фактор перегрузки	1	1	1	1	1
K_x – прочие факторы	1	1	1	1	1
C_M расчет по (6)	323	217	257	353	192
C_M расчет по (1)	251	143	201	299	253
Произведение $P^{0,75}n^{-0,5}$	0,0040	0,00025	0,0019	0,007	0,006
Масса, рассчитанная по (2)	1.28	0.055	0.49	2.4	1.1
Ошибка в расчете массы, %	28%	51%	28%	18%	-24%

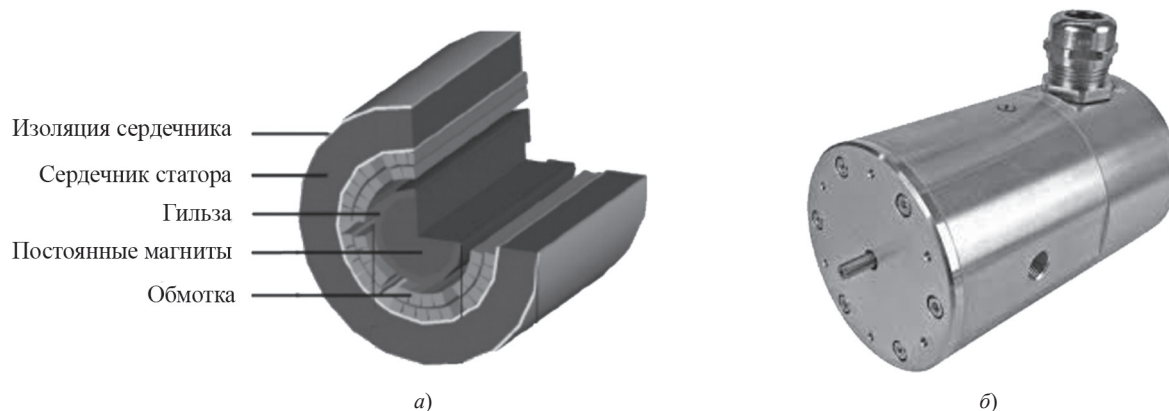


Рис. 12. Машина Celeroton: структура (а) и внешний вид (б)
 Fig. 12. Machine of Celeroton: inner structure (a) and exterior view (б)

отличается по мощности и размеру, и на нее вывод из [8] применить нельзя. Прототип в [6] имеет достаточно низкий КПД – около 70% (можно принять $K_e = 0,8$). Данных по прототипу в [7] не представлено.

Отметим также, что машины Celeroton и прототип из [7] – с беспазовой обмоткой, в то время как прототип из [6] – с обмоткой в пазах, хотя эти особенности не отражены в текущей версии предложенной методики.

Машины большой мощности. СМПМ большой мощности из [9, 10], данные по которым приведены в табл. 6, имеют жидкостное охлаждение ($K_c = 0,8$), фор-

ма машин обычная ($K_s = 1$), машины многополюсные, но по косвенным данным число полюсов не превышает 20 ($K_{fp} = 1$), нет информации о перегрузках ($K_o = 1$), а также указаний на какие-либо специальные условия работы ($K_x = 1$), машины имеют корпус, подшипники, вал и щиты, при этом корпус чугунный или стальной ($K_i = 1$), КПД машин вполне типичен для такого уровня мощности: можно принять $K_e = 1$.

Микромашины. Микромашины Faulhaber [11] из табл. 6 имеют беспазовую обмотку, как и машины Celeroton. Охлаждение – естественное воздушное

Таблица 6

Сверхскоростные машины
Ultra-high-speed machines

Данные	Мощные машины		ABB [12]	Микромашины Faulhaber [11]		
	DRS [9]	Texas [10]		Тип 308	Тип 515	Тип 620
Мощность, кВт	36000	20000	40	0.00003	0.00027	0.00023
Частота вращения, об/мин	127	3600	1,7	24820	30800	7290
Масса, кг	127000	13000	15155	0.00035	0.002	0.003
Напряжение, В	1450	3000	400	3	6	12
КПД, %	97,5	97,0	–	–	–	–
K_i – фактор типа машины	500	500	500	500	500	500
K_e – фактор требования к КПД	1	1	1.2	1	1	1
K_c – фактор типа охлаждения	0,8	0,8	1	1	1	1
K_u – фактор уровня напряжения	1,16	1,16	0,96	0,18	0,29	0,40
K_{fp} – фактор частоты и полюсов	1	1	1	1	1	1
K_s – фактор формы	1	1	1	1	1	1
K_i – фактор конструкц. частей	1	1	1	0,8	0,8	0,8
K_o – фактор перегрузки	1	1	2	1	1	1
K_x – прочие факторы	1	1	1	1	1	1
C_M расчет по (6)	466	460	1150	70	115	159
C_M расчет по (1)	548	464	1242	124	133	115
Произведение $P^{0,75}n^{0,5}$	231,91	28,0	12,20	0,0000028	0,000012	0,000022
Масса, рассчитанная по (2)	108043	12900	14033	0,00020	0,0014	0,0035
Ошибка в расчете массы, %	-15%	-1%	-7%	-43%	-14%	39%

($K_c = 1$). Все машины имеют корпус, подшипники, вал и щиты, при этом корпус – алюминиевый ($K_i = 0,8$).

Сверхнизко-скоростная машина. В табл. 6 дан пример высокомоментного синхронного генератора с ПМ со встроенным магнитным редуктором разработки АВВ [12]. Генератор предназначен для работы в установке преобразования энергии морских волн. Генератор – погружной, маслозаполненный ($K_c = 1$). Можно предположить, что генератор спроектирован на максимальный КПД ($K_e = 1,2$). Поскольку момент на валу в подобных установках может достигать трехкратного от номинального, то соответствующая перегрузочная способность может быть отражена значением фактора $K_o = 2$.

Отметим, что вероятно изоляция во всех трех машинах *Faulhaber* (табл. 6) рассчитана как минимум на 12 В, поэтому значения K_u для машин 308 и 515 вероятно занижены и точность расчета массы могла бы быть выше, чем показано в табл. 6.

В целом, учитывая, что делается оценка массы машин, в одних случаях – менее грамма, в других – более 100 тонн, точность в пределах около 50% можно признать приемлемой.

Рассмотрим серии машин, занимающие центр диаграммы на рис. 11. Более подробно исследуем серию *TMB ETEL* [4], включающую большое количество машин (рис. 13). Особенность серии в том, что спецификации машин не включают валов, подшипников и щитов. Присутствуют только элементы охлаждения на внешней стороне статора. Машины предназначены для интеграции в различные механизмы. Если представить C_M как функцию частоты вращения (рис. 14,а) и мощности (рис. 14,б), то очевиден достаточно большой разброс, который количественно может быть выражен через среднее значение $C_M = 150,9$ и среднеквадратическое отклонение $\sigma = 41,41$ (27%). Подобный разброс не является чем-то неестественным, показывая разно-



Рис. 13. Машина *ETEL*

Fig. 13. Machine from *ETEL*

образии вариантов проектов машины даже в рамках одной серии.

В качестве примера, как велика может быть вариативность проектных решений, приведем варианты расчетов СМММ с мощностью около 9 МВт и частотой вращения 12000 об/мин для компрессора из [13]. Варианты представлены в табл. 7. В [13] указан только объем вариантов машин, поэтому для расчета машинной постоянной принимаем среднюю плотность машины 4000 кг/м³. Тогда среднее значение рассчитанной машинной постоянной $C_M = 338$ со среднеквадратическим отклонением $\sigma = 122$ (33%). Можно видеть, что разброс сопоставим с разбросом для серии *TMB ETEL*. В будущем подобные проектные вариации можно попытаться отразить в K_x .

Если принять выдвинутую Гипотезу, то опираясь на (2), можно утверждать, что если C_M достаточно точно посчитана, то и масса тоже будет точно посчитана, поэтому в табл. 8 сравниваются только значения C_M . Для случаев, когда в используемом источнике содержится информация не более чем о трех машинах, среднеквадратическое отклонение не рассчитывается [15, 16, 20].

Таблица 7

Варианты проектов СМММ для компрессора

Design variants of PMSM for compressor

Параметры	Вар. 1	Вар. 2	Вар. 3	Вар. 4	Вар. 5	Вар. 6	Вар. 7
Мощность на валу, кВт	9005	9024	8977	8989	9069	9032	9006
Напряжение, В	5745	5680	5241	5253	6018	5521	6571
Частота, Гц	200	200	200	200	400	400	400
Фазный ток, А	1103	1103	1104	1095	1096	1096	866
Электрические потери, кВт	130	180	92	104	82	85	75
Зазор, мм	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9
Потери на трение в зазоре, кВт	40	40	37	37	24	23	27
КПД, %	98,1	97,6	98,6	98,4	98,8	98,8	98,9
cosφ	0,836	0,852	0,909	0,916	0,803	0,872	0,924
Объем, м ³	1,049	0,905	0,844	0,844	0,441	0,415	0,489
Масса (оценка), кг	4196	3620	3376	3376	1764	1660	1956
Машинная постоянная C_M	497	428	401	401	208	196	232

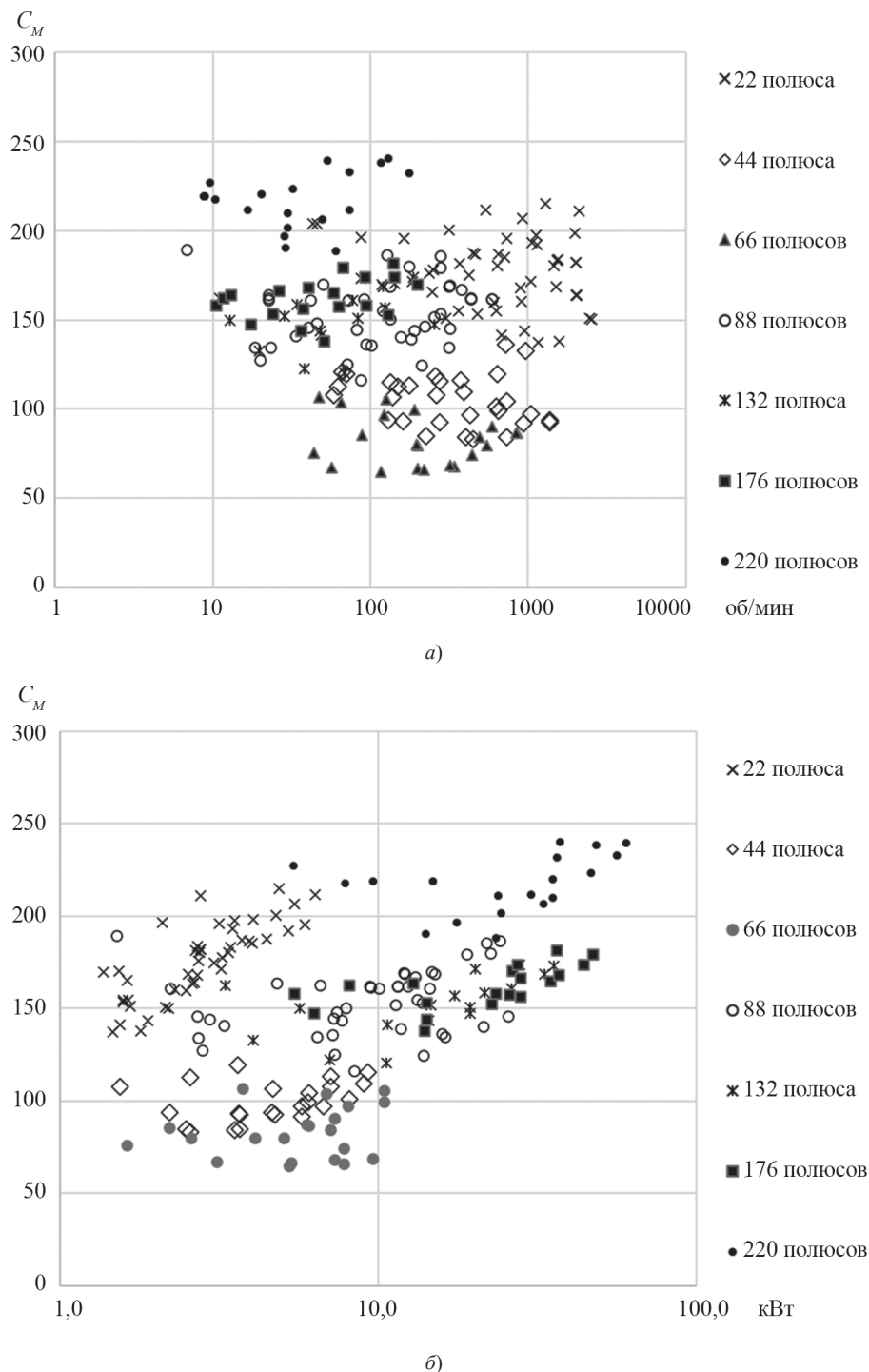


Рис. 14. Серия TMB ETEL
 Fig. 14. Series TMB from ETEL

Факторы проставлены в табл. 8 по субъективному мнению автора.

Таблицы 5, 6 и 8 дают достаточное представление о точности, которой можно ожидать от методики.

В формуле (2) 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).

Именно в доказательстве адекватности использования произведения $P^{0,75}n^{-0,5}$ и значений коэффициентов C_p и C_n состоит основная научная новизна работы.

В работе продемонстрирована большая вариативность возможных проектных решений для ЭМ. С те-

Расчет C_M для различных машин с диаграммы рис. 11
Calculation of C_M for the different machines from Fig.11

Факторы и C_M	Отдельные машины или серии машин						
	<i>TheSwitch</i> [14]	<i>DDS</i> [15]	<i>Halodi</i> [16]	<i>Kollmorgen</i> [17]	<i>Leroy</i> [18]	<i>Moog</i> [19]	<i>Turnigy</i> [20]
K_r	500	500	500	500	500	500	500
K_e	1,2	0,9	1	0,9	0,9	0,9	0,7
K_c	0,8	0,8	1	0,8	0,8	0,8	0,4
K_u	1	1,13	0,4–0,47	0,96	0,96	0,96	0,32
$K_{\text{лр}}$	1	1	0,5	1	1	1	0,5
K_s	1,2	1	0,7–1	1	1	1	1
K_l	1	1	0,5	1	1	1	0,7
K_o	1	1	1	1	1	1	1
K_x	1	1	1	1	0,9	1	0,8
C_M расчет по (6)	576	408	32–51	345	311	345	13
C_M по каталогам	725±21%	307	41–47	342±9%	264±13%	372±24%	9–12

кущей точностью определения влияющих факторов претендовать на более точное предсказание массы любой машины, чем 50%, пока нельзя. Для использования выражений (2) и (6) на практике для оценки с более высокой точностью потребуются провести значительную работу по уточнению значений влияющих факторов. Вероятно, придется ввести дополнительные факторы. Кроме того, будет необходимо провести исследование взаимозависимости факторов. Также следует искать логическое объяснение значения коэффициента $C_n = -0,5$. Все эти исследования, вероятно, потребуют времени и усилий многих специалистов.

В то время выдвинутая Гипотеза в значительной степени подтверждена приведенными выше расчетами. В настоящее время сформулированы три закона электромеханики [21]:

1-й закон: Электромеханическое преобразование энергии не может осуществляться без потерь, его КПД всегда меньше 100 %.

2-й закон: Все электрические машины обратимы, одна и та же машина может работать как в режиме двигателя, так и в режиме генератора.

3-й закон: Электромеханическое преобразование энергии осуществляется неподвижными друг относительно друга полями.

Если Гипотеза будет доказана и ее доказательство будет принято научным сообществом, то **4-й закон** электромеханики может быть сформулирован следующим образом: «Масса любой вращающейся ЭМ пропорциональна ее мощности, взятой в степени 0,75, и обратно пропорциональна ее частоте вращения, взятой в степени 0,5». Соответствующее выражение:

$$m \equiv P^{0,75}/n^{0,5}.$$

В какой-то степени закон может представлять собой аналог гравитации, которую проектировщики пы-

таются преодолеть, работая над снижением значения машинной постоянной C_M .

Практическое применение выражений (2) и (6) для прикидочных расчетов, масштабирования, сравнения и оценки технологий показано в [1, 2].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Матвеев А.В.** Альтернативная машинная постоянная и оценка массы и габаритов электрических машин. – *Электричество*, 2019, №11, с.45–53.
2. **Матвеев А.В.** Анализ типов и серий асинхронных машин с помощью альтернативной машинной постоянной. – *Электричество*, 2020, №7, с.41–56.
3. **Matveev A., Røkke A.** Power take-off for tidal turbines providing lowest cost of energy. – 10th European Wave and Tidal Energy Conference EWTEC-2013, Aalborg, Denmark, 2013.
4. **Сайт компании ETEL** Раздел каталогов электрических машин [Электрон. ресурс] URL: www.etel.ch (дата обращения 02.09.2020).
5. **Сайт компании Celeroton**. Раздел каталогов электрических машин [Электрон. ресурс] URL: www.celeroton.com (дата обращения 03.09.2020).
6. **Lim Myung-Seop, Chai Seung-Hee, Yang Jae-Sik, Hong J.P.** Design and verification of 150-krpm PMSM based on experiment results of prototype. – *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, vol. 62, No. 12, DOI:10.1109/TIE.2015.2409804.
7. **Novák M., Novák Z.** Construction of high-speed permanent magnet synchronous machine. – 17th International Conference on Electrical Drives and Power Electronics, Dubrovnik, Croatia, 2013.
8. **Tuysuz A., Meyer F., Steichen M., Zwysig C., Kolar J.W.** Advanced Cooling Methods for High-Speed Electrical Machines. – *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2017, vol. 53, No. 3, pp. 2077–2087, DOI: 10.1109/TIA.2017.2672921.
9. **Сайт компании Leonardo DRS**. Раздел каталогов электрических машин [Электрон. ресурс] URL: www.leonardodrs.com (дата обращения 03.09.2020).
10. **Beno J.H., Flynn M.M., Hayes R.J., et al.** Design and analysis of a 20 MW propulsion power train. – *Proceedings of 7th International Naval Engineering Conference and Exhibition (INEC)*, Amsterdam, The Netherlands, 2004, pp. 409–414.
11. **Сайт компании Faulhaber**. Раздел каталогов электрических машин [Электрон. ресурс] URL: www.faulhaber.com (дата обращения 03.09.2020).

12. **Englebretson S., Ouyang W., Tschida C., Carr J., et al.** Advanced direct-drive generator for improved availability of oscillating wave surge converter power generation systems. Final technical report. ABB Inc., Cary, NC, United States, 2017.

13. **Saban D., Artinian H.** Permanent-magnet motors for sub-sea applications, 2008, 8 p. [Электрон. ресурс] URL: <http://www.directdrivesystems.net/tech-papers> (дата обращения 02.09.2012).

14. **Сайт компании TheSwitch.** Раздел каталогов электрических машин [Электрон. ресурс] URL: <https://theswitch.com/> (дата обращения 03.09.2020).

15. **Shade N.** Enormous power in a small package: Direct Drive Systems introduces high-speed motor for compression applications, CompressorTech2, Jan-Feb 2006.

16. **Сайт компании Halodi Robotics.** Раздел каталогов электрических двигателей [Электрон. ресурс] URL: www.halodi.com (дата обращения 03.09.2020).

17. **Сайт компании Kollmorgen.** Раздел каталогов электрических двигателей [Электрон. ресурс] URL: www.kollmorgen.com (дата обращения 03.09.2020).

18. **Сайт компании Leroy Somer.** Раздел каталогов электрических двигателей [Электрон. ресурс] URL: <https://acim.nidec.com/motors/leroy-somer> (дата обращения 03.09.2020).

19. **Сайт компании Moog.** Раздел каталогов электрических двигателей [Электрон. ресурс] URL: www.moog.com (дата обращения 03.09.2020).

20. **Сайт компании Turnigy.** Раздел каталогов электрических двигателей [Электрон. ресурс] URL: www.turnigy.com (дата обращения 03.09.2020).

21. **Копылов И.П.** Математическое моделирование электрических машин. Учебник для вузов. 3-е изд., М.: Высшая школа, 2001, 327 с.

[13.09.2020]



Автор: **Матвеев Алексей Вячеславович** – доктор электротехники, директор DriveConstructor; <https://driveconstructor.com>.

Elektrichestvo, 2021, No. 7, pp. 4–18

DOI:10.24160/0013-5380-2021-7-4-18

Testing the Hypothesis about the Dependence of the Mass of Electric Machines on the Power and Speed

MATVEEV Alexey V. (*DriveConstructor, Norway*) – director; PHD.

The hypothesis stating that the mass of any rotating electric machine is proportional to its power capacity taken to a power of 0.75 and is inversely proportional to the square root of its rotation frequency is tested. The testing is carried out on the material of permanent magnet synchronous machines. The influence of such factors as voltage, shape of active parts, cooling, efficiency level, overloads, presence of supporting structures, power supply frequency, and number of poles is studied. The hypothesis is tested by predicting the mass of machines in the widest possible range of power capacities (from 0.03 W to 36 MW) and rotation frequencies (from 2 to 500 000 rpm). The accuracy of the preliminary estimate of the machine mass within about 50% can be considered acceptable, given that the masses of the machines being estimated range from less than a gram to more than 100 t. Based on the study results, the formulation of a new law of electromechanics is proposed, which describes how the machine mass is predetermined in terms of its power capacity and rotation frequency. The ratio of machine power capacity taken to a power of 0.75 to the square root of its rotation frequency is to some extent similar to the “gravity” which the designers try to overcome working on weakening the effect of the above-mentioned influencing factors.

К е y w o r d s: machine constant, laws of electromechanics, permanent magnet synchronous machines

REFERENCES

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

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

3. **Matveev A., Røkke A.** Power take-off for tidal turbines providing lowest cost of energy. – 10th European Wave and Tidal Energy Conference EWTEC-2013, Aalborg, Denmark, 2013.

4. **ETEL website.** Catalog section of electric machines [Electron. resource] URL: www.etel.ch (Date of appeal 02.09.2020).

5. **Celeroton website.** Catalog section of electric machines [Electron. resource] URL: www.celeroton.com (Date of appeal 03.09.2020).

6. **Lim Myung-Seop, Chai Seung-Hee, Yang Jae-Sik, Hong J.P.** Design and verification of 150-krpm PMSM based on experiment

results of prototype. – IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, vol. 62, No. 12, DOI:10.1109/TIE.2015.2409804.

7. **Novák M., Novák Z.** Construction of high-speed permanent magnet synchronous machine. – 17th International Conference on Electrical Drives and Power Electronics, Dubrovnik, Croatia, 2013.

8. **Tuysuz A., Meyer F., Steichen M., Zwysig C., Kolar J.W.** Advanced Cooling Methods for High-Speed Electrical Machines. – IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, vol. 53, No. 3, pp. 2077–2087, DOI: 10.1109/TIA.2017.2672921.

9. **Leonardo DRS website.** Catalog section of electric machines [Electron. resource] URL: www.leonardodrs.com (Date of appeal 03.09.2020).

10. **Beno J.H., Flynn M.M., Hayes R.J., et al.** Design and analysis of a 20 MW propulsion power train. – Proceedings of 7th International

Naval Engineering Conference and Exhibition (INEC), Amsterdam, The Netherlands, 2004, pp. 409–414.

11. **Faulhaber website.** Catalog section of electric machines [Electron. resource] URL: www.faulhaber.com (Date of appeal 03.09.2020).

12. **Englebretson S., Ouyang W., Tschida C., Carr J., et al.** Advanced direct-drive generator for improved availability of oscillating wave surge converter power generation systems. Final technical report. ABB Inc., Cary, NC, United States, 2017.

13. **Saban D., Artinian H.** Permanent-magnet motors for sub-sea applications, 2008, 8 p. [Electron. resource] URL: <http://www.directdrivesystems.net/tech-papers> (Date of appeal 02.09.2012).

14. **TheSwitch website.** Catalog section of electric machines [Electron. resource] URL: <https://theswitch.com> (Date of appeal 03.09.2020).

15. **Shade N.** Enormous power in a small package: Direct Drive Systems introduces high-speed motor for compression applications, CompressorTech2, Jan-Feb 2006.

16. **Halodi Robotics website.** Catalog section of electric machines [Electron. resource] URL: www.halodi.com (Date of appeal 03.09.2020).

17. **Kollmorgen website.** Catalog section of electric machines [Electron. resource] URL: www.kollmorgen.com (Date of appeal 03.09.2020).

18. **Leroy Somer website.** Catalog section of electric machines [Electron. resource] URL: <https://acim.nidec.com/motors/leroy-somer> (Date of appeal 03.09.2020).

19. **Moog website.** Catalog section of electric machines [Electron. resource] URL: www.moog.com (Date of appeal 03.09.2020).

20. **Turnigy website.** Catalog section of electric machines [Electron. resource] URL: www.turnigy.com (Date of appeal 03.09.2020).

21. **Kopylov I.P.** Matematicheskoe modelirovanie elektricheskikh mashin. Ucheb. dlya vuzov, 3-e izd. (Mathematical modelling of electric machines. 3rd issue). M.: Vysshaya shkola, 2001, 327 p.

[13.09.2020]