

## Альтернативная машинная постоянная и оценка массы и габаритов электрических машин

МАТВЕЕВ А.В.

*Представлены формулы для оценки массы и габаритных размеров электрических машин, применимых в широком диапазоне значений мощности и частоты вращения. В качестве входных параметров используются тип машины, ее мощность, частота вращения, напряжение, способ охлаждения и требования к КПД. Ключом к получению результатов явилось одновременное рассмотрение удельных значений мощности и моментов широкого ряда машин на логарифмической шкале и анализ графической информации. Предложены коэффициенты, которые определяются «природой» электрических машин как класса технических устройств, и коэффициенты, зависящие от конструкции конкретной машины. Кроме того, вводится формула для масштабирования – оценки массы предлагаемой машины, исходя из параметров уже известных машин. Дается также критическая оценка машинной постоянной Арнольда, предложенной еще в 1896 г. и используемой до сих пор, и предлагается альтернативная машинная постоянная.*

**Ключевые слова:** электрические машины, оценка массы и габаритных размеров, альтернативная машинная постоянная, масштабирование

Оценка массы и габаритных размеров электрических машин является актуальной задачей как при их разработке, так и при проектировании систем, компонентами которых они являются. Проектирование электрической машины обычно начинается с выбора ее размеров, в первую очередь диаметра и длины ротора, а также материалов ее активных и конструктивных частей [1]. Размеры ротора машины оцениваются с помощью машинной постоянной или подобных ей констант. Например, в [2] ставится вопрос «каким должен быть размер двигателя, чтобы произвести требуемый момент?» и в качестве решения предлагается выражение  $M = kD_\delta^2 l_\delta$ , где  $M$  – момент;  $D_\delta$  – диаметр ротора;  $l_\delta$  – длина магнитопровода;  $k$  – константа. Предполагается, что знание 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:

$$k = \frac{M}{D_\delta^2 l_\delta} \approx \frac{M}{V_r}. \quad (1)$$

«Машинная постоянная механической мощности»  $C_{mec}$  в [3] соответствует по смыслу константе в (1):

$$C_{mec} = \frac{P_{mec}}{n_{syn} D_\delta^2 l_\delta}, \quad (2)$$

где  $n_{syn}$  – синхронная частота вращения.

В некоторых других источниках, например в [4], наряду с константой, представляющей собой удельный момент по объему ротора, предлагается альтернативная постоянная  $\sigma$ , представляющая собой удельный момент по площади поверхности ротора.

В [1] машинная постоянная определяется как

$$C_A = \frac{D_\delta^2 l_\delta \Omega}{S_p} \approx \frac{1}{B_{\delta H} A}, \quad (3)$$

где  $C_A$  – машинная постоянная Арнольда;  $\Omega$  – угловая скорость;  $S_p$  – полная мощность;  $B_{\delta H}$  – индукция в зазоре;  $A$  – линейная нагрузка.

Сравнивая (2) и (3), можно прийти к заключению, что  $C_A \approx 1/C_{mec}$ , таким образом физический смысл обеих постоянных соответствует либо удельному моменту по объему ротора, либо обратной величине.

Возвращаясь к (3), заметим, что, во-первых, в [1] 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 [1]

указывается, что индукция обычно варьируется от 0,7 до 0,95 Тл, а линейная нагрузка – в пределах 20–200 кА/м.

В [3, 4] предлагаются таблицы для машинных постоянных, в которых в зависимости от типа машины и системы охлаждения даются рекомендованные значения постоянных. Они могут отличаться на порядок, что неудивительно, учитывая вышеприведенные диапазоны изменения электромагнитных нагрузок. Таблицы, к сожалению, не охватывают все типы машин, которые указываются не всегда конкретно, например: «большие машины с водяным охлаждением», «машины для авиационных применений», «машины закрытого исполнения». Даже для одного и того же типа машин значение постоянной может сильно отличаться, как показано на рис. 1, взятом из [3], где машинная постоянная  $C_{mec}$  зависит от мощности и числа полюсов.

Итак, 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:

используя значение машинной постоянной из таблицы в одном из доступных источников, например [3] или [4], оценить объем ротора новой машины  $V_r$ , зная который, определить основные размеры новой машины;

использовать масштабирование известной машины, т.е. по объему ротора  $V_{r1}$  известной машины  $l$  и требуемому моменту  $M_2$  рассчитать объем ротора  $V_{r2}$  новой машины 2:  $V_{r2} \approx V_{r1} \frac{M_2}{M_1}$ .

В первом случае проблема может быть в том, что далеко не все типы машин представлены в таблицах доступных источников. 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 необходимо 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 – практически нерешаемой. Даже само название сильно изменяющегося коэффициента  $C_A$  «машинной постоянной» может сбивать с толку.

В итоге можно перечислить недостатки существующих подходов:

сложность определения машинной постоянной для «своего» типа машин;

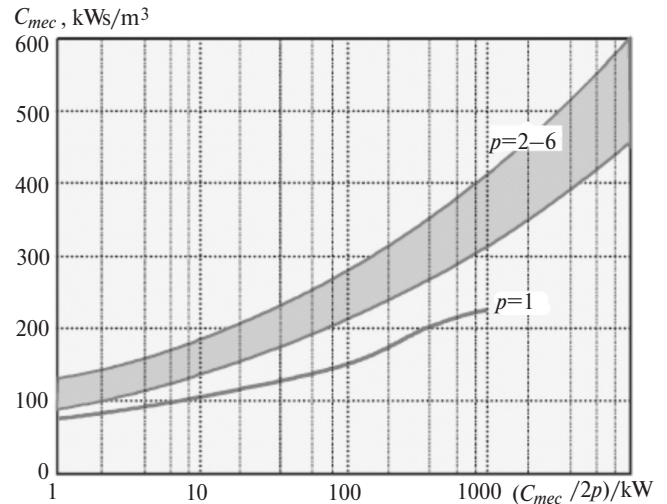


Рис. 1. Машинная постоянная асинхронных и синхронных машин закрытого исполнения как функция мощности на полюс

широкие диапазоны значений  $B_{\delta H}$ ,  $A$ ,  $C_{mec}$ ,  $\sigma$ , рекомендуемые в разных источниках;

неопределенный переход от объема ротора к основным размерам машин  $D_\delta$ ,  $l_\delta$ , в том числе габаритным размерам  $D$ ,  $L$  (рис. 2);

невозможность достаточно точной оценки массы новой машины;

ограничение возможностей масштабирования только для геометрически подобных машин.

Машинная постоянная была впервые предложена Э. Арнольдом в 1896 г. [5]. Учитывая интервал времени выхода монографий [1–4], а это с 1980 по 2014 гг., можно заключить, что использование постоянной Арнольда и схожих с ней констант – устоявшаяся общепринятая практика.

В данной работе предлагается совершенно другой подход, имеющий следующие особенности:

использование полной массы машины, а не ее размеров в качестве ключевой характеристики, поскольку именно масса определяет расход материалов, в первую очередь металлов, при производстве машины и, соответственно, ее стоимость. Известно, что масса несущих элементов конструкции ма-

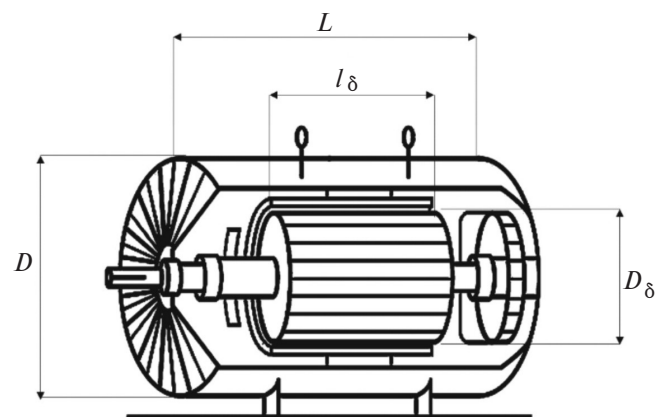


Рис. 2. Габаритные размеры электрической машины и размеры ее ротора

шины, таких как корпус, щиты, вал, система охлаждения, может составлять до половины ее массы и даже более, поэтому следует рассматривать не массу активных частей, а полную массу машины;

необходимость рассмотрения не активных частей машины, а машины в целом как готового изделия и оперировать, соответственно, не размерами активных частей, а габаритными размерами;

использование для первичного анализа сначала графической информации и только потом математических выражений, а не наоборот.

При анализе массы известных генераторов для ветряных турбин в [6] значения удельных мощностей и моментов ряда машин мощностью от 1 до 4 МВт рассматривались одновременно на логарифмической карте. Было замечено, что множество точек оказалось «растянуто» между углами диаграммы с координатами (1000, 1) и (10, 100) – рис. 3. При этом значения частоты вращения машин, представленные точками, лежали в диапазоне от 1500 (точки ближе к левому верхнему углу графика) до 15 об/мин (точки ближе к правому нижнему углу)<sup>1</sup>.

Среди ветрогенераторов были представлены как асинхронные машины (АМ), так и синхронные с постоянными магнитами (СМПМ), в целом более компактные, чем АМ, и соответственно имеющие более высокие удельные значения момента и мощности – обычно от 20 до 50%, но на логарифмической шкале разница практически не заметна, что позволяет совместно рассматривать машины разных типов.

Была выдвинута гипотеза, что для машин приблизительно одной мощности, но с разными значениями частоты вращения точки, представляющие их удельные мощности и моменты, будут располагаться на логарифмической карте вдоль прямой линии. При этом точки более мощных машин – ближе к верхнему правому углу карты. На рис. 4 дан пример линий, вдоль которых расположены точки для мощностей 1 и 4 МВт.

Очевидно, отклонения от линии имеют место потому, что на карте представлены машины с разными системами охлаждения, значениями напряжения и других параметров. Кроме того, можно, вероятно, говорить о более или менее удачно спроектированных машинах. На основе визуального анализа карты можно заключить, что произведение любых удельных значений мощности и момента машины на прямой линии между углами (1000, 1) и (10, 100) будет равно 1000, т.е.

$$P'M' = 1000, \tag{4}$$

где  $P' = \frac{P}{m}$ , Вт/кг;  $M' = \frac{M}{m}$ , Н·м/кг.

<sup>1</sup> Следует отметить, что машины с более высокими значениями частоты вращения будут располагаться ближе к левому верхнему углу.

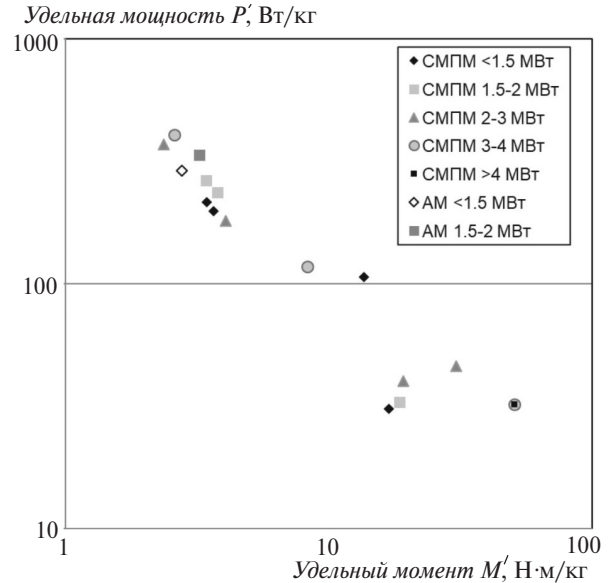


Рис. 3. Логарифмическая карта для генераторов ветряных турбин

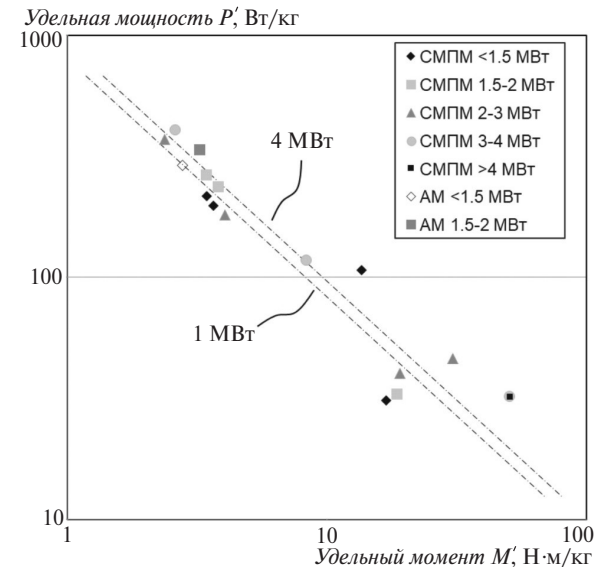


Рис. 4. Логарифмическая карта с линиями мощности 1 и 4 МВт

С учетом того, что  $M \approx 9,55 \frac{P}{n'}$ , где  $P$ , Вт;  $M$ , Н·м;  $n'$ , об/мин, получаем:

$$M' = \frac{M}{m} \approx \frac{9,55 P}{m n}. \tag{5}$$

Подставляя (5) в (4), находим:

$$m \approx 98 \frac{P}{\sqrt{n'}}, \tag{6}$$

где  $m$ , кг;  $P$  кВт;  $n$ , об/мин.

Можно выдвинуть предположение, что выражение (4) описывает границу экономически оправданных практически реализуемых конструкций (или исполнений) машин мощностью 1÷4 МВт. Практический смысл «границы» в том, что если за-

дачу проектирования машины с одной и той же спецификацией поставить перед несколькими группами профессиональных проектировщиков в разных странах мира, то ее решение даст очень близкие друг другу результаты. Например, генераторы, предлагаемые различными производителями для ветряных турбин «безредукторного» исполнения одной и той же мощности, будут иметь почти одинаковую массу. Отступление от «границы» вправо и вверх будет означать, что машина имеет меньшую массу. Примеры различных вариантов исполнений, в том числе «хорошо спроектированных», «не оптимальных», «не реальных» представлены на рис. 5.

Делаем следующий шаг: используя известные каталоги электрических машин, в частности АМ, СРМ<sup>2</sup> и СМПМ из [7], и спецификации, доступные в интернете, выбираем машины со значениями мощности, отличающимися на порядок (выбираем 6 рядов: 1, 10, 100, 1 000, 10 000, 100 000 кВт), и размещаем точки для этих машин на нашу логарифмическую карту (рис. 6).

Визуальная оценка расположения множества точек, безусловно, имеет некую закономерность, а именно, для каждого выбранного значения мощности точки «растянуты» слева направо и сверху вниз (см. рис. 3). Проведем линии, параллельные той, которая проходит через точки (1000, 1) и (10, 100). Разброс точек вокруг проведенных на рис. 6 линий – значительный. Это можно объяснить разницей в типах машин, а также различием в системах охлаждения, требованиями к КПД и др. Тем не менее принимаем как допущение (наше допущение № 1), что наклон линии – постоянный, как у «границы» на рис. 5. В таком случае каждая из линий описывается, как в (4):

$$\frac{P}{m} \frac{M}{m} = K_p, \tag{7}$$

где  $K_p$  – коэффициент, определяющий расположение прямой на карте.

Заметим, что промежуток между линиями незначительно увеличивается при переходе к более высоким значениям мощности, при этом промежуток увеличивается равномерно (это наше допущение № 2). Все дальнейшие результаты построены здесь на этих двух допущениях.

В качестве следующего шага для каждого выбранного значения мощности графически получаем значение  $K_p$ , которое в будущем можно будет уточнять, оперируя большими массами данных:

мощность, кВт	1	10	100	1000	10000	100000
значение $K_p$	10	42	130	700	3000	13000

<sup>2</sup> Синхронная реактивная машина.



Рис. 5. Граница экономически оправданных исполнений и отклонения от нее

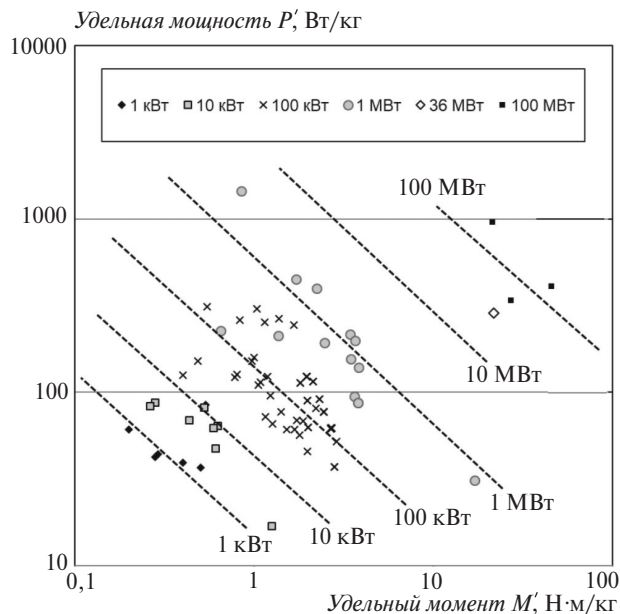


Рис. 6. Линии мощностей, отличающихся на порядок

Интерполируя вышеприведенные значения, получаем зависимость

$$K_p = 0,138 P^{0,62}. \tag{8}$$

Учитывая, что  $M \approx 9,55 \frac{P}{n}$ , и подставляя (8) в (7),

получаем выражение для массы:

$$m = \frac{8,32 P^{0,69}}{\sqrt{n}}, \tag{9}$$

где  $m$ , кг;  $P$ , Вт;  $n$ , об/мин, или

$$m = \frac{978 P^{0,69}}{\sqrt{n}}, \tag{10}$$

где  $P$ , кВт.

Выражение (10) можно записать в общей форме:

$$m = C_M P^{C_p} n^{C_n}, \quad (11)$$

где  $C_p = 0,69$ ;  $C_n = -0,5$ ;  $C_M$  – некий коэффициент.

Можно предположить, что коэффициенты  $C_p$  и  $C_n$  отражают общую тенденцию изменения массы электрических машин при изменении мощности и частоты вращения; они, можно сказать, определяются самой «природой» электрических машин как вида технических устройств. Также очевидно, что полученное значение коэффициента  $C_p$  зависит от значений  $K_p$ , определенных графически и приведенных выше. Значение коэффициента  $C_n$  является следствием нашего допущения о наклоне «границы» на рис. 4–6. Следующая гипотеза заключается в том, что коэффициент  $C_M$  из (11) зависит от типа и конструкции машин. Проектировщикам машин известно, что при прочих равных условиях:

машина с постоянными магнитами может быть на 30–50% компактнее асинхронной машины или синхронной машины с электромагнитным возбуждением;

машина с водяным охлаждением может быть на 30–50% компактнее машины с воздушным охлаждением;

машины с уровнем напряжения питания 400–700 В будет на 10–30% компактнее машины с напряжением питания 3300–11000 В;

машина, спроектированная на высокий уровень КПД, может быть вдвое больше машины, спроектированной с оптимизацией по массе и допустимо низким требованием к КПД.

С учетом вышесказанного мы можем представить коэффициент  $C_M$  в виде

$$C_M = K_1 K_2 K_3 K_4, \quad (12)$$

где  $K_1$  – коэффициент типа машины;  $K_2$  – коэффициент требования к КПД;  $K_3$  – коэффициент

системы охлаждения;  $K_4$  – коэффициент уровня напряжения.

Предварительные значения коэффициентов представлены в табл. 1. С помощью (11), (12) и табл. 1 можно оценить массу большинства традиционных асинхронных и синхронных машин, в том числе машин с постоянными магнитами и синхронных реактивных.

По массе и номинальной частоте вращения машины можно приблизительно оценить ее габаритные размеры. Для оценки необходимо оперировать удельной массой машины, определяемой, естественно, как отношение массы машины к ее объему. Значение удельной массы не постоянно и зависит в значительной степени от номинальной частоты вращения машины. Проектировщикам известно, что машины с низкими значениями частоты вращения (<100 об/мин) имеют относительно большой диаметр и относительно малую длину, при этом активные части имеют форму кольца, поэтому между валом и активными частями остается больше не заполненного металлом пространства, чем в машинах с небольшим диаметром.

Предлагается оценивать удельную массу машины по упрощенной формуле:

$$\rho = 1900n^{0,09}, \quad (13)$$

где  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup>;  $n$ , об/мин.

Объем машины

$$V = m / \rho, \quad (14)$$

где  $V$ , м<sup>3</sup>.

Анализируя доступные каталоги машин [7], можно предложить формулу для соотношения длины машины к ее диаметру:

$$L / D = 0,33n^{0,22} + 0,2P^{0,2}, \quad (15)$$

где  $n$ , об/мин;  $P$ , кВт.

Таблица 1

Коэффициент	Значение	Предназначение
$K_1$	1600	для асинхронных машин с короткозамкнутым ротором и синхронных машин с электромагнитным возбуждением
	1100	для машин с постоянными магнитами
	1300	для синхронных реактивных машин
$K_2$	1	для среднего уровня значения КПД
	0,7–0,8	для низкого уровня значения КПД
	1,2–1,3	для высокого уровня значения КПД
$K_3$	1	для воздушного охлаждения
	0,6	для водяного охлаждения
$K_4$	1	для низкого напряжения
	1,1	для высокого напряжения

Тогда диаметр и длина машины:

$$D = \left( \frac{4V}{\pi(L/D)} \right)^{1/3}; \quad (16)$$

$$L = \frac{4V}{\pi D^2}, \quad (17)$$

где  $D$  и  $L$ , м.

Знание габаритных размеров позволяет оценить размеры активных частей машины.

Однако следует учесть, что существуют специальные конструкции машин, разработанные для встраивания в механизмы, для них формулы для  $D$  и  $L$  не будут справедливы.

Интересно сравнить значения коэффициента  $C_M$  и классической постоянной Арнольда  $C_A$ . Для этого приведем выражение для  $C_M$  к форме (3) из [1]. С учетом  $D^2 L = \frac{4}{\pi} V$ , используя (13) и (14), получаем:

$$D^2 L = \frac{4m}{\pi 1900n^{0,09}}, \quad (18)$$

тогда

$$m = \frac{D^2 L \pi 1900n^{0,09}}{4} \quad (19)$$

и с помощью (19) и (11)

$$C_M = \frac{D^2 L \pi 1900n^{0,09}}{4} \frac{n^{0,5}}{P^{0,69}} \approx \frac{D^2 L n^{0,59}}{P^{0,69}}. \quad (20)$$

Таким образом, видим, что новая постоянная значительно отличается от классической:

постоянная Арнольда

$$C_A = \frac{D^2 l_\delta \Omega}{S_p}; \quad (21)$$

предлагаемая машинная постоянная:

$$C_M \approx \frac{D^2 L n^{0,59}}{P^{0,69}}. \quad (22)$$

Очевидное отличие формул (21) и (22) – в показателях степеней у мощности (0,69) и частоты вращения (0,59). Важное отличие  $C_A$  от  $C_M$  в том, что  $C_A$  имеет физический смысл как величина, обратная удельному моменту по объему ротора, в то время как  $C_M$  такого смысла не имеет.

Вопросом, требующим конкретного ответа, является точность предлагаемой методики оценки по (11), (12) и табл. 1. Методика была опробована на машинах из нескольких каталогов одного из ведущих производителей (ABB) и одной из компаний, специализирующейся на генераторах для ветряных

турбин (TheSwitch). Благодаря тому, что рассматривается продукция ведущих производителей, можно заключить, что уровень технологии и проектирования – практически тот же самый. Результаты оценки приведены в табл. 2. Удельные показатели и масса стандартных машин в каталогах изменяются не линейно с изменением мощности, а «скачкообразно», что связано с использованием стандартных размеров корпуса и высоты оси вала. В результате получаем разброс результатов. Можно заключить, что точность оценки – не высокая, но вполне приемлемая, особенно с учетом простоты предложенных выражений.

Пожалуй, основная область применения машинной постоянной – масштабирование. Рассмотрим процесс масштабирования с помощью новой машинной постоянной  $C_M$ . Возьмем две одинаковые машины по типу, методу охлаждения, уровням напряжения и КПД. Запишем выражения для массы известной машины  $m_1$  и новой машины  $m_2$ :

$$m_1 = C_M P_1^{0,69} n_1^{-0,5}; \quad (23a)$$

$$m_2 = C_M P_2^{0,69} n_2^{-0,5}. \quad (23b)$$

Из (23a)

$$C_M = \frac{m_1}{P_1^{0,69} n_1^{-0,5}}. \quad (24)$$

Подставляя (24) в (23b), получаем:

$$m_2 = m_1 \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{0,69} \sqrt{\frac{n_1}{n_2}}. \quad (25)$$

Проверка точности масштабирования по (25) была проведена по тем же каталогам, что указаны в табл. 2, результаты приведены в табл. 3.

В целом точность масштабирования приемлема для оценочных расчетов. Очевидно, чем ближе значения  $P_1$  и  $P_2$  или  $n_1$  и  $n_2$ , тем точнее оценка.

Еще одним важным вопросом является область применения предложенных формул. Известно, например, что асинхронные машины с короткозамкнутым ротором обычно не выпускаются на номинальные частоты вращения ниже 500 об/мин. Таким образом, нет смысла оценивать массу их для низких номинальных значений частоты вращения. Для указания области применения выражений на логарифмической карте необходимо нанести на нее не только линии равной мощности, но и линии равной частоты вращения. Для определения этих линий воспроизведем выражение (5):

$$\frac{P}{m} \approx \frac{n}{9,55} \frac{M}{m}.$$

Очевидно, в координатах  $P/M'$  оно представляет уравнение прямой, проходящей через нуль, где  $n/9,55$  – коэффициент наклона прямой. На логарифмической карте

Таблица 2

Тип машин и название каталога	Диапазоны мощности, кВт / частоты вращения, об/мин	Средняя точность оценки (разброс точности)
Асинхронные машины с короткозамкнутым ротором низкого напряжения с воздушным охлаждением из каталога АBB «Low voltage process performance motors according to EU MEPS» [7]	0,09—1000/500—3000	-13%(±50 %)
Асинхронные машины с короткозамкнутым ротором низкого напряжения с водяным охлаждением из каталога АBB «Low voltage water cooled motors» [7]	55—630/750—3000	-15%(-30 ... +15%)
Синхронные реактивные машины с воздушным охлаждением из каталога АBB «Synchronous reluctance motor drive package for machine builders» [7]	11—200/1000—3000	7%(±30%)
Асинхронные машины с короткозамкнутым ротором среднего напряжения из каталога АBB «High voltage induction motors» [7]	132—560/1000—3000	11%(-25 ... +45%)
Синхронные машины с постоянными магнитами низкого напряжения с воздушным охлаждением из каталога АBB «Permanent magnet motors» [7]	1100—2500/220—742	-13%(-30 ... +5%)
Синхронные машины с постоянными магнитами низкого напряжения с воздушным охлаждением из брошюр TheSwitch [8]	1100—4250/15—1000	-6%(-30 ... +10%)

Таблица 3

Частота вращения	Точность масштабирования по (25)	
	Близкие значения мощности (до 20—30%), например 110 и 132 кВт	Разница между значениями мощности — примерно одного порядка (10 раз), например 11 и 110 кВт
Практически одинаковая	1% (до 20%)	5% (до 30%)
Разница меньше 50%, например 1500 и 1000 об/мин	7% (до 30%)	35% (до 50%)
Разница больше 50%, например 3000 и 1000 об/мин	24% (до 40%)	50% (до 70%)

рифмической шкале, однако, линии равной частоты вращения будут выглядеть практически как параллельные линии. Для более высоких значений частоты вращения линии будут располагаться на карте выше (рис. 7).

Ориентировочные границы применения формул, предложенных в данной работе, для нескольких типов машин показаны на логарифмической карте на рис. 8.

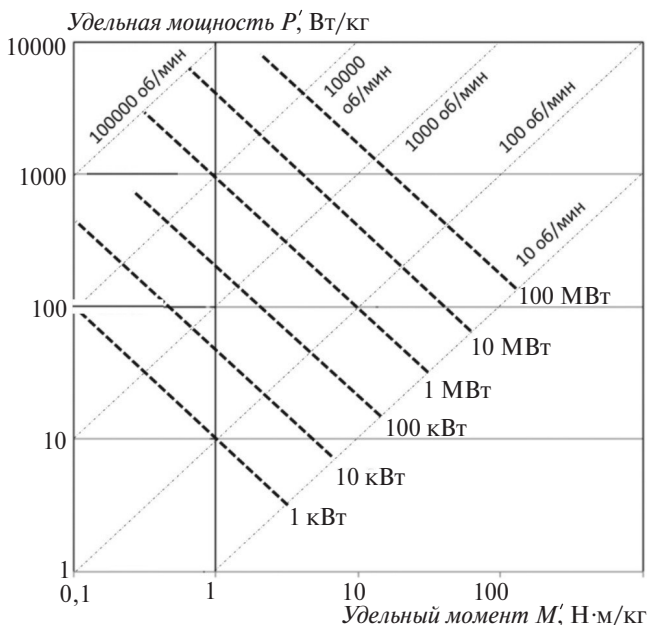


Рис. 7. Линии равной мощности и равной частоты вращения

Кроме того, следует отметить, что специальные высокоскоростные синхронные машины с большим числом полюсов (обычно более 10), питаемые напряжениями высоких частот (500÷1000 Гц и выше), представляют собой отдельный случай, когда использовать предложенные выражения не рекомендуется.

Подводя итоги, приведем полную систему формул для совместной оценки массы и габаритных размеров электрических машин:

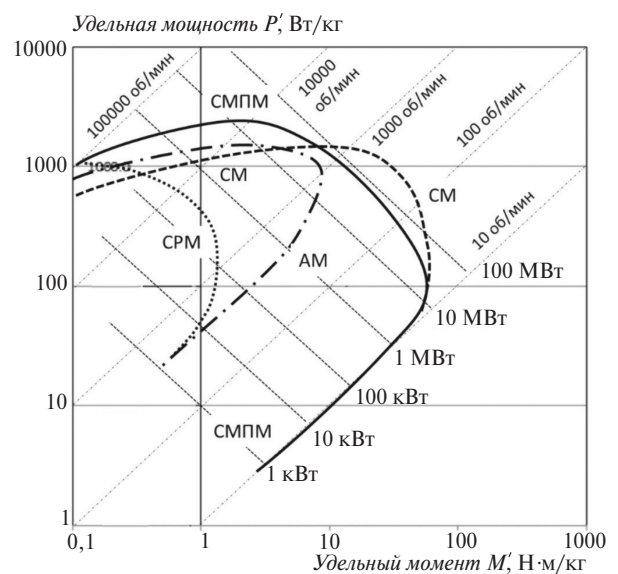


Рис. 8. Границы применения формул для разных типов машин

$$m = C_M P^{C_p} n^{C_n};$$

$$D = \left( \frac{4m}{\pi(A n^a + B P^b) C_n^x} \right)^{1/3}; \quad (25)$$

$$L = \frac{4m}{\pi D^2 C_n^x}.$$

Объем данных, использованный при подготовке представленной здесь работы, позволил предложить следующие значения коэффициентов (25):

$$C_p = 0,69; C_n = -0,5; A = 0,33; a = 0,22; B = 0,2; b = 0,2; C = 1900; x = 0,09,$$

$C_M$  определяется с помощью (12) и табл. 1.

В будущем при анализе большего объема данных значения коэффициентов могут быть уточнены.

В заключение отметим, что ключом к получению представленных результатов явилось одновременное рассмотрение удельных мощностей и моментов широкого ряда машин на логарифмической шкале. Анализ графической информации позволил выдвинуть гипотезу о форме зависимости удельных показателей от мощности и частоты вращения и с учетом ряда допущений прийти к выражению (11). Были выявлены факторы ( $C_p$  и  $C_n$ ), которые определяются «природой» электрических машин как вида технических устройств, и фактор ( $C_M = K_1 K_2 K_3 K_4$ ), зависящий от конструкции конкретной машины. Все коэффициенты могут быть названы «машинными постоянными или константами», если следовать традиции наименований.

В какой-то степени было бы правильно назвать машинными постоянными именно факторы  $C_p$  и  $C_n$ , поскольку они действительно постоянны, в то время как, например, постоянная Арнольда  $C_A$  изменяется в зависимости от большого числа параметров. Коэффициент  $C_p$  можно назвать, например, «постоянной для мощности», а  $C_n$  — «постоянной для частоты вращения». Коэффициент  $C_M$  также может претендовать на роль машинной постоянной, при этом его роль в определенной степени соответствует роли классической машинной постоянной из (2) и (3).

Результаты, представленные в статье, могут использоваться как для первичной оценки массы и габаритов машины с известными значениями мощности и частоты вращения, типом охлаждения,

уровнем напряжения и требованием к КПД, так и для масштабирования существующей машины для других (новых) значений мощности и частоты вращения. Наконец, поскольку данный подход использует понятие «границы экономически целесообразных исполнений машин», то выведенные формулы могут применяться для качественной оценки новых машин. Если масса машины, определенная по формуле, оказывается значительно меньше массы какой-либо существующей или проектируемой машины, это может означать, что существующая или проектируемая машина не оптимальна и может быть улучшена.

Ожидается, что предложенные формулы окажутся более простыми в использовании и во многих случаях будут давать более точные результаты, чем традиционные способы оценки. В дальнейшем актуальной задачей может быть уточнение коэффициентов  $C_p$  и  $C_n$ , а также поиск их возможного физического смысла. Еще одной задачей может быть уточнение значений коэффициентов  $K_1 \div K_4$  для различных типов машин.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. М.: Энергия, 1980, 927 с.
2. Hanselmann D.C. Brushless permanent-magnet motor design. New York: McGraw-Hill, Inc., 1994.
3. Pyrhonen J., Jokinen T., Hrabovov V. Design of rotating electrical machines. — John Wiley & Sons, 2008.
4. Hendershot J.R., Miller T.J.E. Design of brushless permanent-magnet motors. Magna Physics Pub., 1994.
5. Arnold E. Die Gleichstrommaschine, Zweite Band. Springer, 1903.
6. Zhang Z., Matveev A., Швребн S., Nilssen R., Nysveen A. State of the art on generator technology for offshore wind energy conversion system. International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC 2011) at Niagara Falls, USA, 15–18 May 2011. IEEE International, 2011, pp. 1131–1136.
7. Раздел каталогов электрических машин компании ABB [Электрон. ресурс] www.abb.com (дата обращения 25.01.2019).
8. Раздел спецификации генераторов для ветротурбин компании The Switch [Электрон. ресурс] www.theswitch.com (дата обращения 25.01.2019).

[27.03.2019]

А в т о р: **Матвеев Алексей Вячеславович** окончил Московский энергетический институт в 1998 г. В 2006 г. защитил диссертацию в Эйндховенском университете (Нидерланды). Занимается развитием собственного проекта DriveConstructor.

## The new machine constant and estimation of weight and dimensions of electric machines

**MATVEYEV Alexey V.** (graduated the Moscow Power Engineering Institute in 1998. He obtained his PhD from Eindhoven University of Technology (the Netherlands) in 2006. Currently he is developing his own project DriveConstructor



*In this work the set of expression is derived to enable estimation the mass and dimensions of electrical machines in a wide range of powers and speeds. The input parameters are the type of machine, its power, speed, voltage, type of cooling and efficiency requirements. The key to obtaining the results was the simultaneous consideration of specific powers and torques of a wide range of machines on a logarithmic scale and analysis of the graphical information. The coefficients are proposed that are determined by the "nature" of electrical machines as the class of technical devices, and coefficients that depend on the design of a particular machine. In addition, the expression for scaling is derived enabling estimation of the mass of the new machine, based on the parameters of the known machine. The paper also carried out a critical evaluation of the Arnold's machine constant derived in 1896, and still used, and proposes an alternative machine constant.*

**Key words:** *electric machines, estimation of weight and dimensions, machine constant, scaling*

#### REFERENCES

1. **Ivanov-Smolenskiy A.V.** *Elektricheskiye mashiny* (Electrical machines). Moscow, Energiya, 1980, 927 p.
2. **Hanselmann D.C.** Brushless permanent-magnet motor design. New York: McGraw-Hill, Inc., 1994.
3. **Pyrhönen J., Jokinen T., Hrabovovǎ V.** Design of rotating electrical machines. – John Wiley & Sons, 2008.
4. **Hendershot J.R., Miller T.J.E.** Design of brushless permanent-magnet motors. Magna Physics Pub., 1994.
5. **Arnold E.** Die Gleichstrommaschine, Zweite Band. Springer, 1903.
6. **Zhang Z., Matveev A., Швребин S., Nilssen R., Nysveen A.** State of the art on generator technology for offshore wind energy conversion system. International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC 2011) at Niagara Falls, USA, 15–18 May 2011. IEEE International, 2011, pp. 1131–1136.
7. **Razdel katalogov elektricheskikh mashin kompanii AV** (Section of catalogs of electric machines of ABB company) [Electron. resource] [www.abb.com](http://www.abb.com) (Data of appeal 25.01.2019).
8. **Razdel spetsifikatsii generatorov dlya vetroturbin kompanii the switch** (The Switch Wind Turbine Generator Specification Section) [Electron. resource] [www.theswitch.com](http://www.theswitch.com) (Data of appeal 25.01.2019).

[27.03.2019]