

## Анализ типов и серий асинхронных машин на основе альтернативной машинной постоянной

МАТВЕЕВ А.В.

*Анализируются типы и серии асинхронных машин на основе альтернативной машинной постоянной. Показана зависимость машинной постоянной от типа, исполнения и характеристик машины. Делается предположение о недостаточности мер по увеличению энергоэффективности серий асинхронных машин в области малых значений мощности. Также предлагается метод сравнения машин и даются формулы для масштабирования, затрагивается вопрос эволюции асинхронных машин. Важно помнить, что альтернативная машинная постоянная не является точным инструментом предсказания массы конкретной машины из конкретного каталога. Она лишь показывает, насколько компактную машину можно построить при заданных характеристиках и выбранном исполнении. Наличие надежных точек отсчета, которые можно легко определить с помощью машинной постоянной, будет способствовать определению действительно лучших решений и отсеву неоптимальных. Таким образом, будут сэкономлены временные и материальные ресурсы. При разработке новых машин предлагается ставить амбициозные цели и выбирать за точки отсчета значения машинной постоянной например на 20% ниже, чем современный уровень техники.*

*К л ю ч е в ы е с л о в а: асинхронные машины с короткозамкнутым ротором, с массивным ротором, двойного питания, энергоэффективность, классы КПД, типы охлаждения, оценка массы и габаритных размеров, машинная постоянная, масштабирование*

Для предметного разговора о целях и результатах проектирования электрических машин нужны надежные точки отсчета. Соответствие новой машины современному уровню техники может стать инструментом оценки качества выбранных технических решений и используемых технологий и позволит выбирать стратегии дальнейшего усовершенствования. Статья посвящена определению точек отсчета для проектирования различных типов асинхронных машин.

Возьмем для примера условную электрическую машину мощностью 500 кВт и частотой вращения 1500 об/мин. Масса такой машины, если обратиться к каталогам производителей асинхронных машин, для вариантов с высоким значением номинального напряжения и естественным воздушным охлаждением будет около трех тонн. Если для применения машины минимальная масса является критическим параметром, то проектировщик постарается «опуститься» до уровня около двух тонн, перейдя, например, на низкое напряжение, поменяв тип машины с асинхронной, например, вентильно-индукторный и применив водяное охлаждение. Можно даже стремиться к уровню около одной тонны, перейдя на тип машины с мощными постоянными магнитами, применив дорогую сталь и повысив частоту питания. И все же, для специалистов очевидно, что достичь массы 100 кг для

500 кВт и 1500 об/мин — задача нереальная. Таким образом, для приведенного примера можно говорить о наличии «серой зоны» между 1000 и 3000 кг, в которую может пытаться «войти» разработчик машины. При этом, чем дальше в сторону уменьшения массы он будет продвигаться, тем сложнее будет становиться задача, пока не достигнет окончательного предела.

Подобные рассуждения можно было бы привести для машины с любыми другими значениями мощности и частотой вращения и в каждом случае говорить о «нечеткой границе», за которой наступает предел возможного.

Попытаемся с некоторой осторожностью оформить наши рассуждения следующим образом: «человечество в лице своих лучших групп разработчиков не может радикально улучшить массу машины с заданными мощностью, частотой вращения, энергоэффективностью при разумных ограничениях по себестоимости».

Нужно отметить, что существует множество машин, неоптимально спроектированных, признанных просто устаревшими. Такие машины, конечно, могут быть значительно улучшены, но в данной работе этот вопрос не рассматривается, интерес представляют современные хорошо спроектированные машины.

Возвращаясь к идее о «нечеткой границе» и «пределе», сделаем следующий шаг в рассуждениях и приходим к выводу, что массу большинства существующих электрических машин можно оценить или предсказать с неплохой точностью, если предположить, что машины оптимально спроектированы и находятся вблизи вышеупомянутого «предела».

Задача создания методики для оценки массы большинства существующих электрических машин с использованием всего лишь одной очень несложной формулы и таблицы коэффициентов была поставлена и частично решена в [1]. Предлагаемая методика оценки основана на таких входных параметрах, как тип машины, номинальные мощность, частота вращения, напряжение, способ охлаждения, уровень КПД, уровень перегрузок. Ключевым элементом, на котором построена методика в [1], является логарифмическая карта (рис. 1), описывающая распределение удельных показателей электрических машин (без разделения на типы) в зависимости от уровней значений мощности и частоты вращения. Можно сделать вывод, что электрические машины – класс устройств, в значительной степени подчиняющийся логарифмическим законам в том, что касается изменению массы в зависимости от мощности и частоты вращения.

На основе анализа графической информации на рис. 1 было выведено выражение для массы машины в общей форме:

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

где  $C_p, C_n$  – коэффициенты, отражающие общую тенденцию изменения массы электрических машин при варьировании мощности и частоты вращения;  $C_M$  – альтернативная машинная постоянная значе-

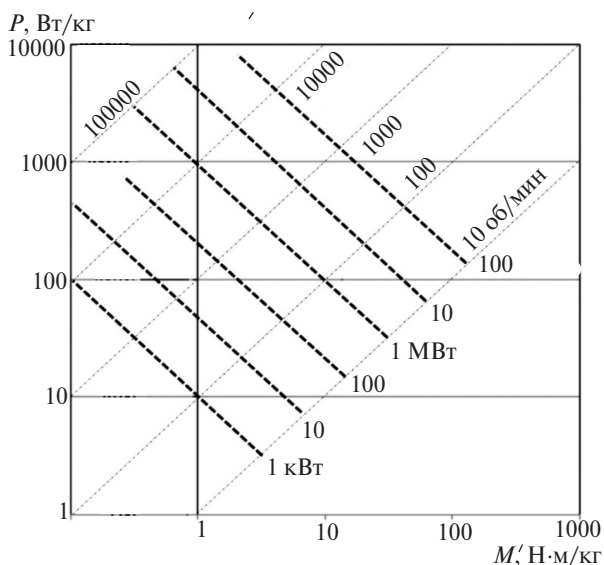


Рис. 1. Линии равных значений мощности и частоты вращения

ния  $C_p$  и  $C_n$ , можно сказать, определяются «природой» электрических машин как класса технических устройств. Машинная постоянная  $C_M$  будет зависеть от многих факторов. В [1] выбраны четыре основных:

$$C_M = K_t K_e K_c K_u, \quad (2)$$

где  $K_t$  – коэффициент типа машины;  $K_e$  – коэффициент требования к КПД;  $K_c$  – коэффициент типа охлаждения;  $K_u$  – коэффициент уровня напряжения. Можно также выразить  $C_M$  из (1), получив математическое определение альтернативной машинной постоянной:

$$C_M = \frac{m}{P^{C_p} n^{C_n}}. \quad (3)$$

В [1] предложены значения  $C_p = 0,69$ ;  $C_n = -0,5$ , при этом отмечено, что значения эти – предварительные и требуют уточнения. Также отметим, что в (1) и (3)  $m$  (кг),  $P$  (кВт),  $n$  (об/мин).

Попытаемся протестировать возможность оценки массы асинхронных машин различных типов, пользуясь машинной постоянной  $C_M$ , и уточнить значения коэффициентов  $C_p, C_n, K_t, K_e, K_c$  и  $K_u$ . В идеале значение новой машинной постоянной должно быть неизменным во всем диапазоне мощностей и частот вращения, для которых спроектирована данная серия машин. Для проверки того, как методика работает в реальности, проанализируем данные из нескольких доступных каталогов (табл. 1), используя графическое представление результатов.

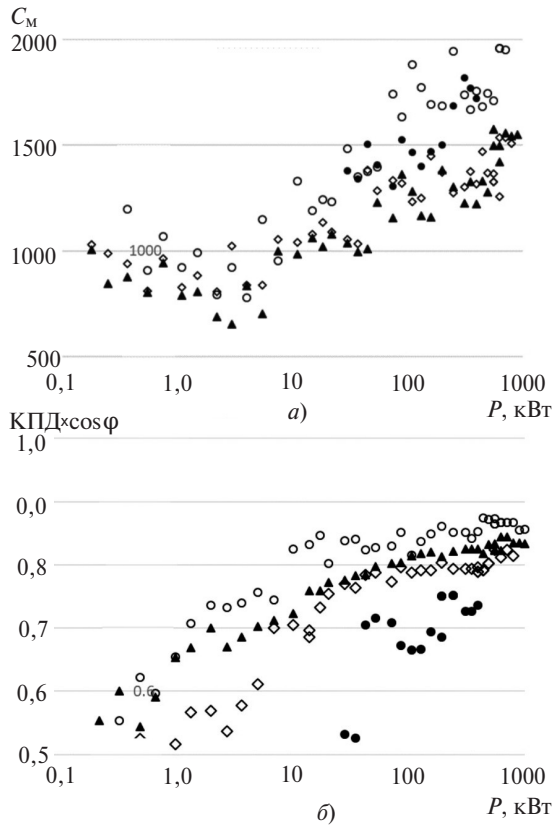
Распределение значений  $C_M$  индивидуальных машин серии 1А, рассчитанных по (3) при  $C_p = 0,69$ , представлено на рис. 2,а. На основании визуального анализа можем отметить следующее:

множество точек имеет четкую тенденцию смещаться вправо вверх, в то время как ожидалось более «горизонтальное» расположение, поскольку «постоянная должна быть постоянной»;

значения  $C_M$  даже для одного и того же числа полюсов имеют разброс до 30% у машин с «соседними» значениями мощности из стандартного ряда;

точки, соответствующие значениям  $C_M$ , образуют разные подмножества для разных значений частоты вращения, в то время как ожидалось увидеть значения, не зависящие от номинальной частоты вращения (числа полюсов).

Проанализируем эти три пункта. Первый пункт может привести к заключению о том, что значение коэффициента  $C_p = 0,69$  из [1], который определяет зависимость машинной постоянной  $C_M$  от мощности, не оптимально для описания асинхронных ма-

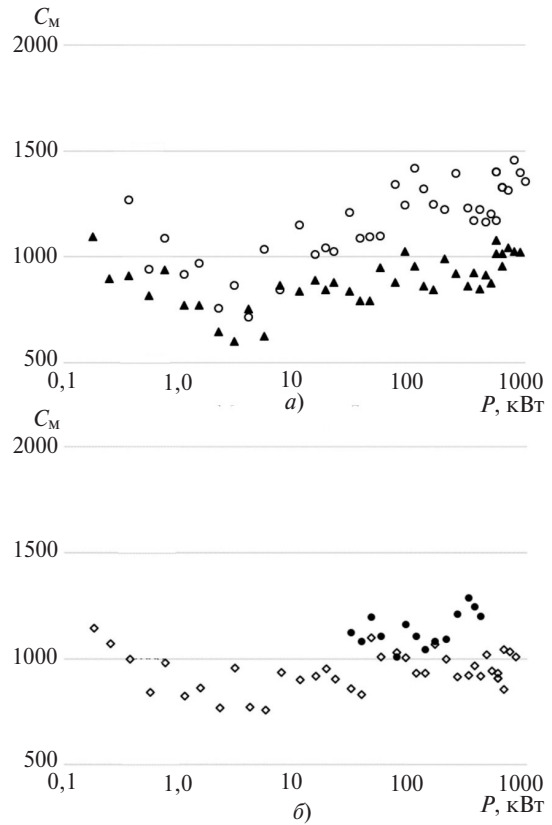


**Рис. 2.** Распределение значений  $C_M$  (а) и энергетических показателей (б) для серии 1А при  $C_p=0,69$ :  $\circ$  – 3000 об/мин, IE2;  $\blacktriangle$  – 1500;  $\diamond$  – 1000;  $\bullet$  – 500

шин с короткозамкнутым ротором (АМКЗ). В поисках альтернативных значений  $C_p$  можно обратиться к [2], где показано, что для геометрически подобных машин при постоянстве токовой нагрузки и магнитной индукции мощность  $P$  пропорциональна базисному размеру  $l$  в четвертой степени. Тогда, принимая упрощенно, что масса машины пропорциональна ее объему и базисному размеру в третьей степени, можно прийти к выражению  $m \sim P^{3/4}$ . Таким образом, масса пропорциональна мощности в степени 0,75 и, соответственно,  $C_p=0,75$ . Ниже попробуем использовать именно это значение  $C_p$  как основное при расчете  $C_M$ .

Одна из вероятных причин разброса значений  $C_M$  (второй пункт) – использование проектировщиками и производителями ограниченного ряда стандартных корпусов машин, некоторые из которых больше соответствуют данным мощности и частоте вращения, а некоторые – меньше.

Что же касается третьего пункта, то здесь найти объяснения сложнее. Одно из возможных следующее: существует прямая логическая связь между компактностью машины и ее энергетическими показателями – КПД и  $\cos\phi$ . Известно, что можно повысить эти показатели проектируемой машины, уменьшить ее компактность. Для проверки данной



**Рис. 3.** Распределение значений  $C_M$  для серии 1А при  $C_p=0,75$ : а –  $p=2$  и 4; б –  $p=6$  и 12; обозначения точек см. на рис. 2

гипотезы покажем зависимость КПД и коэффициента мощности<sup>1</sup> (в виде произведения  $\text{КПД} \times \cos\phi$ ) от мощности и частоты вращения (рис. 2,б). Можно заметить, что разница в компактности машин с 2 и 4 полюсами сопровождается разницей в уровне значения  $\text{КПД} \times \cos\phi$ . Еще одно возможное объяснение третьего пункта – серия просто «так спроектирована». Вернемся к этому вопросу ниже.

Рассчитаем значения  $C_M$  для той же Серии 1А, используя  $C_p=0,75$ . На рис. 3,а представлены значения для машин с 2 и 4 полюсами, а на рис. 3,б – значения для машин с 6 и 12 полюсами. Видим, что характер распределения точек более «горизонтальный», чем на рис. 2,а. Можно заключить, что значение коэффициента  $C_p=0,75$  – более правильный выбор, чем  $C_p=0,69$ .

Для удобства визуального анализа представим информацию по серии 1А, ранее данную на рис. 2 и 3, в виде линий, приблизительно показывающих средние значения  $C_M$  и произведения  $\text{КПД} \times \cos\phi$ , не отражающих колебания  $C_M$  и произведения  $\text{КПД} \times \cos\phi$  для отдельных машин (рис. 4).

Значения  $C_M$  для 2- и 12-полюсных машин в среднем несколько выше, чем для 4- и 6-полюсных. Этому факту трудно придумать логическое

<sup>1</sup> Коэффициент мощности принят равным значению  $\cos\phi$  для синусоидального питания.

Таблица 1

## Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором

Серии	Основные характеристики АДКЗ, название серии, производитель	Источник
Серия 1А	400 В, IP55, IC411, класс КПД IE2, МЗВР (ABB)	[3]
Серия 1В	400 В, IP55, IC411, класс КПД IE3, МЗВР (ABB)	[3]
Серия 2	3.3-6.6 кВ, IP55, IC411, МЗВМ (ABB)	[4]
Серия 3	400 В, IC411, класс КПД IE2 (Siemens)	[5]
Серия 4А	6.6-11 кВ, IP55, IC411, 1LA4 H-compact (Siemens)	[6]
Серия 4В	Несинусоидальное питание, 0.69-6.6 кВ, IP55, IC411, 1LA4 H-compact (Siemens)	[6]
Серия 5А	6.6-11 кВ, IP55, IC81W, 1RN H-compact+ (Siemens)	[6]
Серия 5В	Несинус. питание, 2.3-6.6 кВ, IP55, IC81W, 1RN H-compact+ (Siemens)	[6]
Серия 6А	6.6-11 кВ, IP55, IC611, 1RQ4 H-compact+ (Siemens)	[6]
Серия 6В	Несинус. питание, 2.3-6.6 кВ, IP55, IC611, 1RQ4 H-compact+ (Siemens)	[6]
Серия 7А	6.6-11 кВ, IP23, IC01, 1RA4 H-compact+ (Siemens)	[6]
Серия 7В	Несинус. питание, 2.3-6.6 кВ, IP23, IC01, 1RA4 H-compact+ (Siemens)	[6]
Серия 8	Несинус. питание, 0.69-4.16 кВ, IP55, IC71W, 1LN4 H-compact (Siemens)	[6]
Серия 9	400 В, IP55, IC71W, МЗЛР (ABB)	[7]
Серия 10	3-10 кВ, IP55, IC411, HXR (ABB)	[4]
Серия 11А	3-10 кВ, IP55, IC611, AMI (ABB)	[4]
Серия 11В	3-10 кВ, IP24W, IC01, AMI (ABB)	[4]
Серия 11С	3-6 кВ, IP55, IC81W, AMI (ABB)	[4]
Серия 12	690 В, IP55, IC71W, В4/5J (Marelli)	[8]

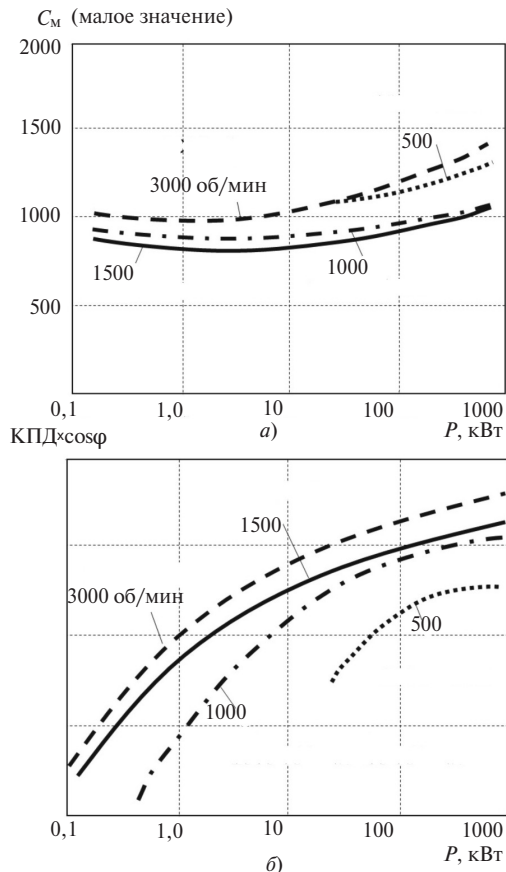


Рис. 4. Усредненные значения  $C_m$  и произведения КПД  $\times \cos \varphi$  для машин серии 1А

объяснение, поэтому можно снова сослаться на произвольный выбор проектировщика. Что касается энергетических показателей, то они, как и ожидалось, более низкие для машин с более высоким значением числа полюсов. Кроме того, для более высоких значений мощности энергетические показатели выше. Отметим, что высокий КПД для машин большой мощности просто необходим с точки зрения возможности охлаждения, поскольку с ростом размеров машины при увеличении линейного размера  $l$  объем машины  $V$  растет быстрее, чем площадь ее поверхности  $S$  ( $V \sim l^3$ ,  $S \sim l^2$ ). Если упрощенно представить мощность машины пропорциональной объему и предположить одинаковое значение КПД как для больших, так и для маленьких машин, то потери на единицу поверхности машины будут возрастать при росте ее размеров. С определенного уровня мощности это приведет к невозможности охлаждения машин, если КПД недостаточно высок. Таким образом, для больших машин просто необходимо иметь высокий КПД, а для маленьких — необязательно.

Проведем аналогичный рис. 3 анализ для высоковольтных машин серии 2, имеющих тот же класс защиты и тип охлаждения (IP55, IC411), что и серия 1. Серия 2 спроектирована для значительно более узкого диапазона мощности. Распределение

значений  $C_M$  и энергетических показателей для серии 2 при разных уровнях напряжения показано на рис. 5. Отметим, что произведение  $\text{КПД} \times \cos\varphi$  остается практически неизменным в данном более узком диапазоне мощности. Видим, что  $C_M$  для 2-полюсных машин выше, чем для 8-полюсных. Можно снова констатировать, что серия «так спроектирована», хотя конкретно для рис. 5 можно искать объяснение в более низких значениях энергетических показателей 8-полюсной машины. Машин с большим числом полюсов (и меньшей частотой вращения) при той же мощности имеют большие размеры, чем машины с малым числом полюсов, поэтому могут эффективно охлаждаться даже при низком КПД.

Заметим также, что значения  $C_M$  высоковольтных машин находятся в диапазоне 1100–1700, в то время как низковольтных – 1000–1400. На рис. 5 видна разница между машинами напряжением 3 и 6,6 кВ. Это указывает на большую зависимость машинной постоянной от напряжения, что будет исследовано ниже, а пока рассмотрим влияние на нее класса КПД.

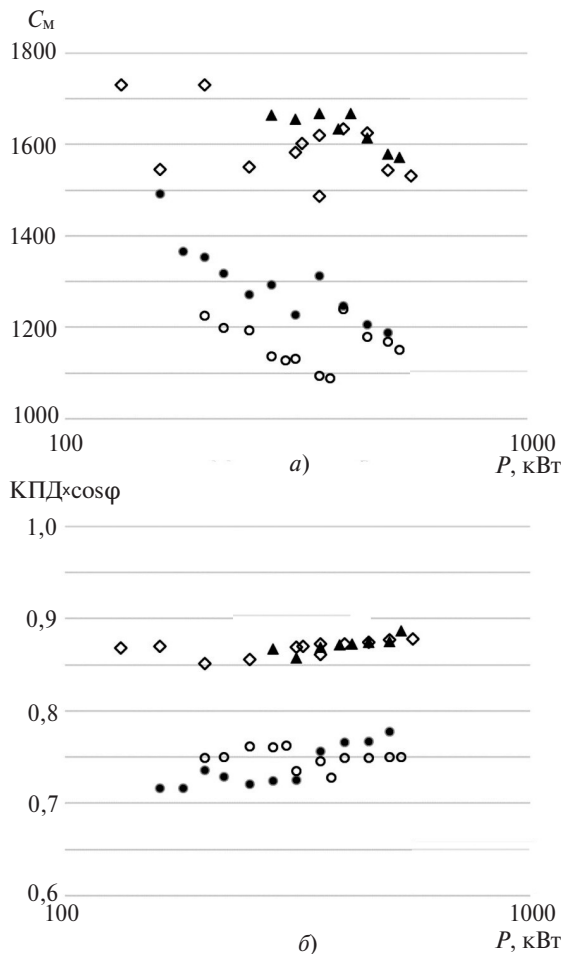


Рис. 5. Распределение значений  $C_M$  (а) и энергетических показателей (б) для серии 2 при  $C_p = 0,75$ ; обозначения точек см. на рис. 2

Анализ на рис. 6, на котором представлены 2-полюсные машины серии 1 с классами КПД IE2 и IE3, показывает, что преимущество в 2–3% по энергетическим показателям (за счет разницы в КПД) соответствует на 5–20% более высоким значениям машинной постоянной и, соответственно, более низкой компактности машины. Это подтверждает нашу гипотезу о том, что разница в  $C_M$  может объясняться разницей в значениях  $\text{КПД} \times \cos\varphi$ . Можем также заметить, что на рис. 3 и 6 для мощности в диапазоне приблизительно от 1 до 10 кВт значения машинной постоянной заметно ниже, чем для других диапазонов. Подобный характер распределения точек виден также на рис. 14 для серии 3. Можно заметить, что при этом значения  $\text{КПД} \times \cos\varphi$  также несколько ниже, чем могли бы быть исходя из характера кривой рис. 6,б. Можно констатировать «неравномерность» компактности и энергетических показателей указанных серий АМКЗ. В попытке объяснить низкую энергоэффективность двигателей из данного диапазона мощности можно выдвинуть гипотезу, что производители в борьбе за низкую стоимость в диапазоне низких значений мощности примерно (от 1 до 10 кВт) тра-

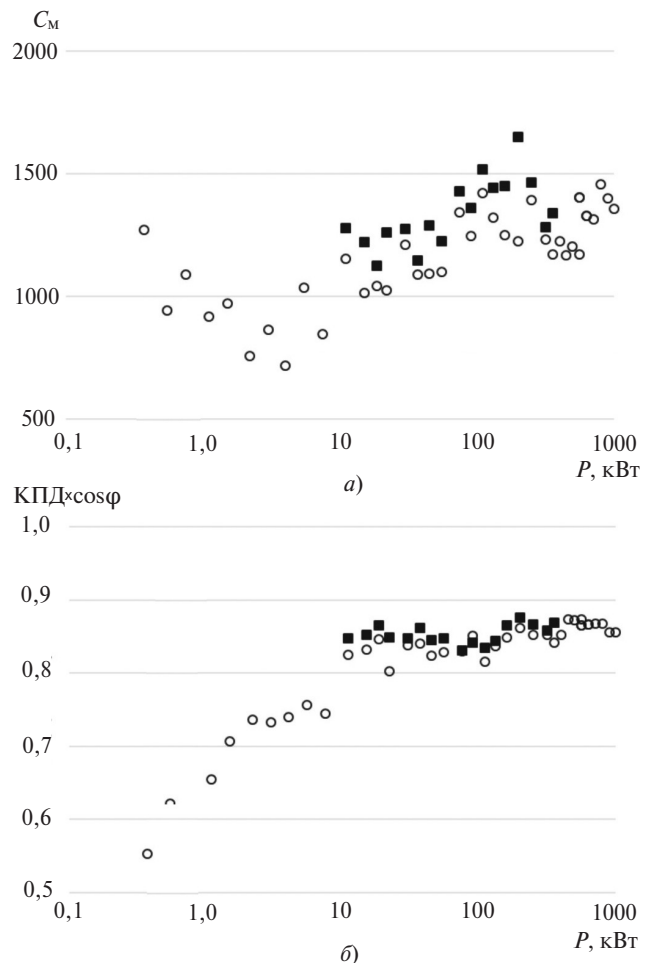


Рис. 6. Влияние класса КПД на значение  $C_M$ ; обозначения точек см. на рис. 2



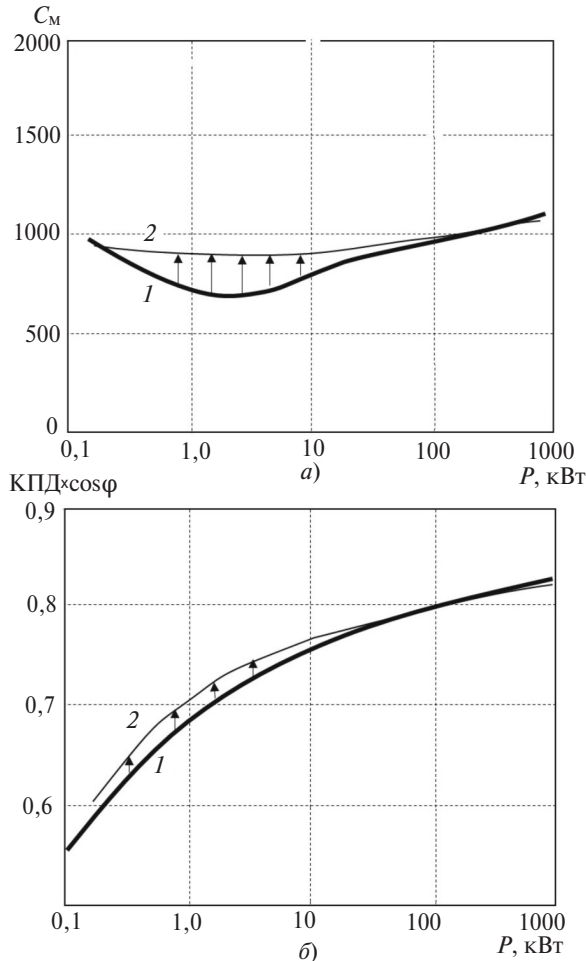


Рис. 7. Изменения в целевые функции проектирования серии

диционно производят компактные недорогие машины с более низким КПД. Отметим, что это неэкологично, и предложим некоторые изменения с целью энергосбережения. Именно по этим соображениям были введены классы КПД и соответствующие ограничения для производителей асинхронных машин. На рис. 7 показаны предложенные изменения для 4-полюсных машин. Например, можно обсудить введение нового класса КПД – IE5 (рис. 8). Он может использоваться для двигате-

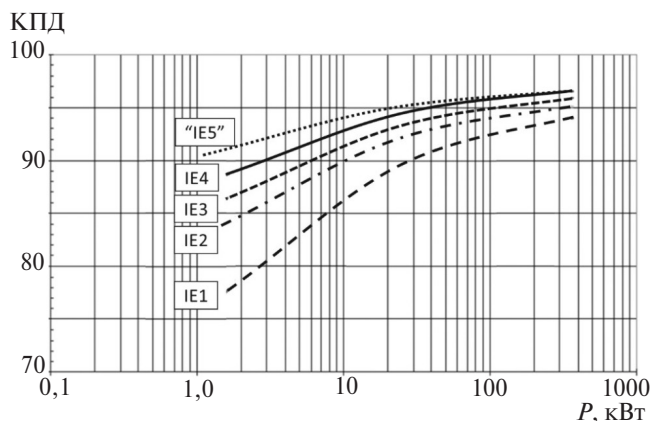


Рис. 8. Классы КПД для 4-полюсной АМ

лей приблизительно от 0,75 до 15 кВт. Интересно, что к такому предложению можно прийти, анализируя значение  $C_M$ , позволяющее визуализировать проблему.

Для проверки влияния уровня номинального напряжения на  $C_M$  рассмотрим 2-полюсные машины серий 1А и 10 с одинаковым типом охлаждения IC411. Результаты представлены на рис. 9. Очевидно большее влияние номинального напряжения на  $C_M$ , что требует более глубокого исследования.

Для исследования влияния уровня напряжения, класса защиты и типа охлаждения машины на машинную постоянную были рассмотрены машины семнадцати серий. Варианты типов охлаждения, используемые в машинах выбранных серий, представлены на рис. 10. Поскольку не все серии включали машины с 2, 10 и 12 полюсами, анализ проводился только для машин с 4, 6 и 8 полюсами. Для каждой серии были рассчитаны средние значение  $C_M$  и  $KПД \times \cos\varphi$  для каждого из выбранных уровней напряжения. Результаты представлены в табл. 2.

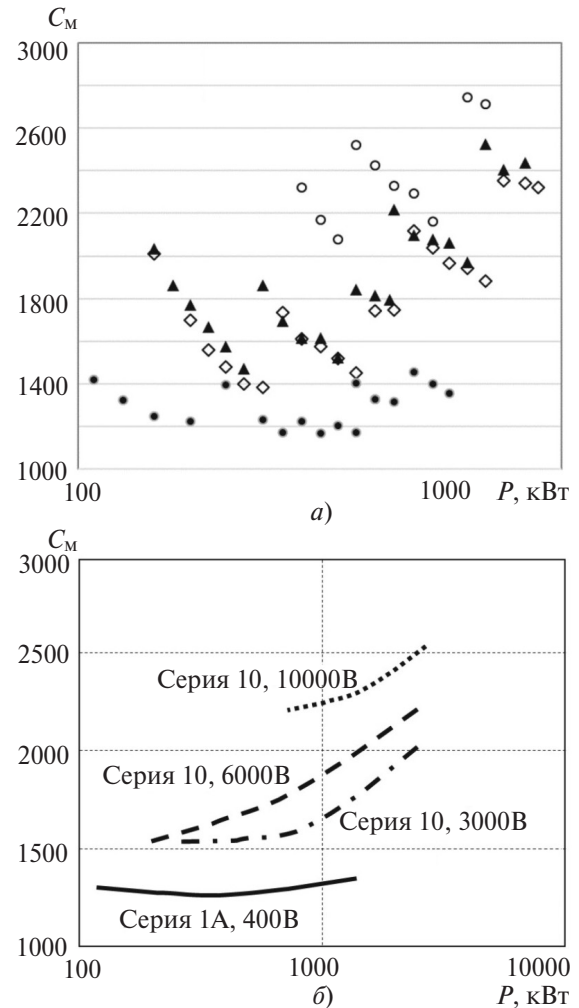


Рис. 9. Пример влияния напряжения на машинную постоянную при  $C_p = 0,75$ : а – действительные значения; б – усредненные кривые; обозначения точек см. на рис. 2

Таблица 2

Средние значения и  $\text{КПД} \times \cos \varphi$  серий АМКЗ

Серии	Диапазон мощности, кВт	Защита и охлаждение	400 В		690 В		2300 В		3000 В		3300 В	
			$C_M$	$\text{КПД} \times \cos \varphi$	$C_M$	$\text{КПД} \times \cos \varphi$	$C_M$	$\text{КПД} \times \cos \varphi$	$C_M$	$\text{КПД} \times \cos \varphi$	$C_M$	$\text{КПД} \times \cos \varphi$
Серия 4А	200-3000	IP55, IC411	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Серия 5А	540-7500	IP55, IC81W	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Серия 6А	630-5800	IP55, IC611	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Серия 7А	1320-7500	IP23, IC01	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Серия 4В	800-3150	IP55, IC411	–	–	1072	0,82	1131	0,82	–	–	–	–
Серия 5В	850-6960	IP55, IC81W	–	–	–	–	624	0,82	–	–	–	–
Серия 7В	820-6960	IP23, IC01	–	–	–	–	599	0,82	–	–	–	–
Серия 6В	700-5680	IP55, IC611	–	–	–	–	765	0,82	–	–	–	–
Серия 8	850-1750	IP55, IC71W	–	–	950	0,82	–	–	–	–	–	–
Серия 12	330-2700	IP55, IC7A1W7	–	–	916	0,83	–	–	–	–	–	–
Серия 2	110-750	IP55, IC411	–	–	–	–	–	–	–	–	1099	0,78
Серия 10	100-2240	IP55, IC411	–	–	–	–	–	–	1142	0,81	–	–
Серия 11А	630-6900	IP55, IC611	–	–	–	–	–	–	746	0,82	–	–
Серия 11В	315-8000	IP24W, IC01	–	–	–	–	–	–	645	0,82	–	–
Серия 11С	315-8000	IP55, IC81W	–	–	–	–	–	–	645	0,82	–	–
Серия 1	0.25-1000	IP55, IC411	971	0,70	–	–	–	–	–	–	–	–
Серия 9	55-1200	IP55, IC71W	776	0,80	–	–	–	–	–	–	–	–
<i>Продолжение табл. 2</i>			4160 В		6000 В		6600 В		10000 В		11000 В	
Серия 4А	200-3000	IP55, IC411	–	–	–	–	1136	0,81	–	–	1315	0,82
Серия 5А	540-7500	IP55, IC81W	–	–	–	–	670	0,83	–	–	769	0,84
Серия 6А	630-5800	IP55, IC611	–	–	–	–	829	0,83	–	–	944	0,83
Серия 7А	1320-7500	IP23, IC01	–	–	–	–	644	0,8	–	–	735	0,8
Серия 4В	800-3150	IP55, IC411	1165	0,83	–	–	1254	0,83	–	–	–	–
Серия 5В	850-6960	IP55, IC81W	637	0,83	–	–	719	0,83	–	–	–	–
Серия 7В	820-6960	IP23, IC01	612	0,83	–	–	691	0,83	–	–	–	–
Серия 6В	700-5680	IP55, IC611	789	0,83	–	–	869	0,82	–	–	–	–
Серия 8	850-1750	IP55, IC71W	1013	0,82	–	–	–	–	–	–	–	–
Серия 12	330-2700	IP55, IC7A1W7	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Серия 2	110-750	IP55, IC411	–	–	–	–	1196	0,78	–	–	–	–
Серия 10	100-2240	IP55, IC411	–	–	1196	0,8	–	–	1509	0,79	–	–
Серия 11А	630-6900	IP55, IC611	–	–	771	0,82	–	–	847	0,82	–	–
Серия 11В	315-8000	IP24W, IC01	–	–	664	0,82	–	–	736	0,83	–	–
Серия 11С	315-8000	IP55, IC81W	–	–	664	0,82	–	–	–	–	–	–
Серия 1	0.25-1000	IP55, IC411	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Серия 9	55-1200	IP55, IC71W	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

Представим значения  $C_M$  из табл. 2 в зависимости от напряжения и классов охлаждения и защиты в графической форме (рис. 11). В соответствии с (2) машинная постоянная является произведением коэффициентов  $K_t$ ,  $K_e$ ,  $K_c$  и  $K_u$ . Примем значение коэффициента типа машины для АМ с охлаж-

дением IC411 и классом защиты IP55, как самый распространенный вариант исполнения, за базовое и равное 1000 ( $K_t=1000$ ). Также примем коэффициент требования к КПД  $K_e=1$ , тогда разброс точек на рис. 11 будет определяться только произведением  $K_c K_u$ .

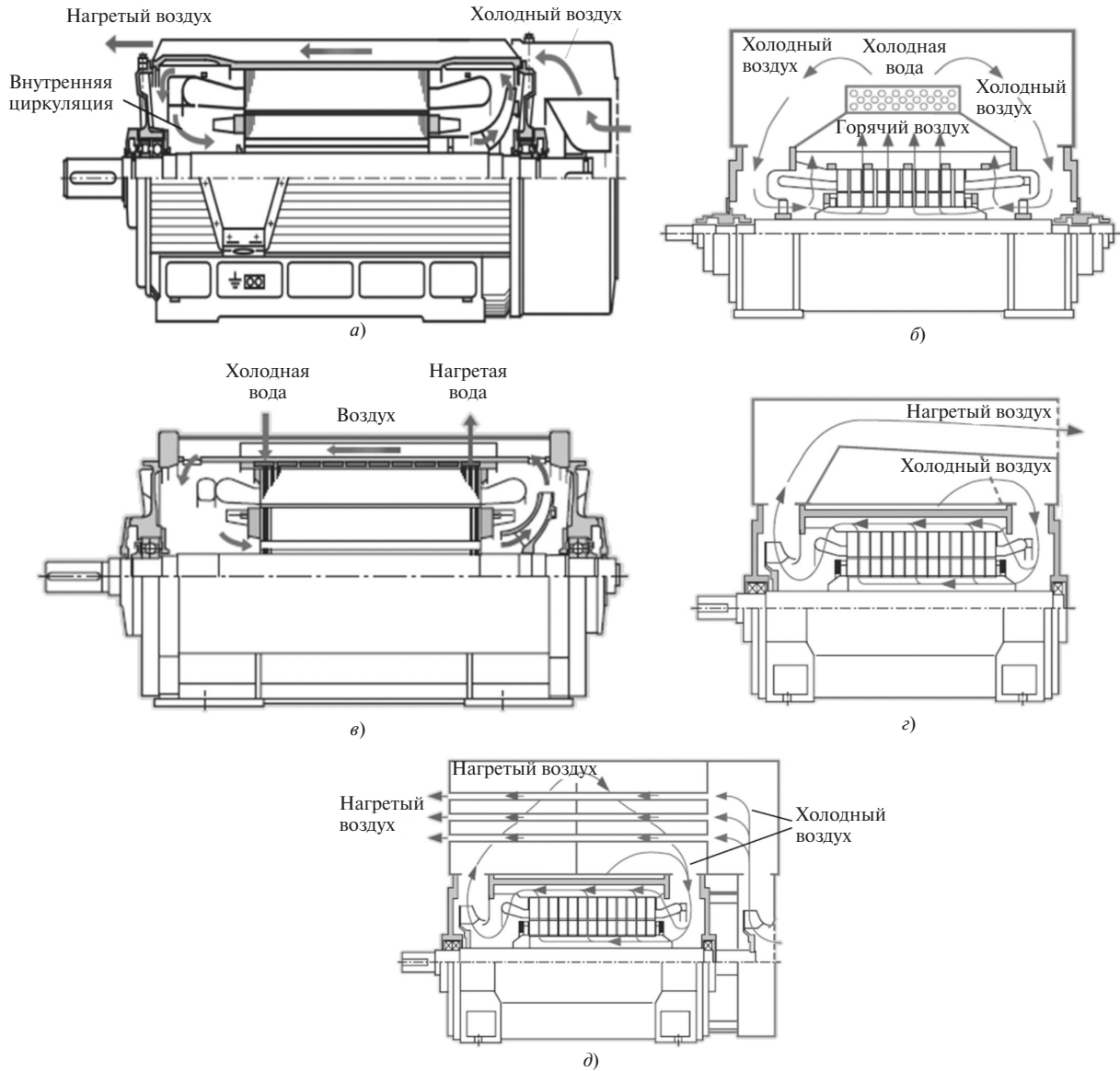


Рис. 10. Рассматриваемые типы охлаждения IC411 (а), IC81W (б), IC71W (в), IC01 (г), IC611 (д)

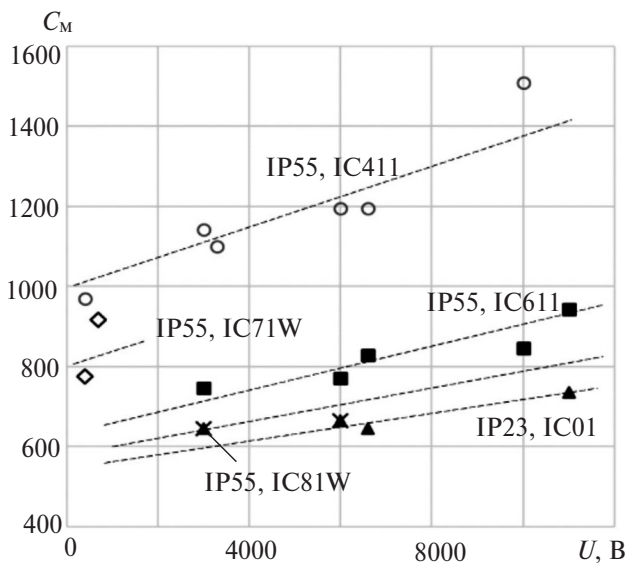


Рис. 11. Зависимость  $C_m$  от напряжения и типа охлаждения

Если предположить линейную зависимость  $C_m$  машин одного типа охлаждения и защиты от напряжения и провести соответствующие линии (рис. 11), то их наклон позволяет вывести выражение для коэффициента уровня напряжения:

$$K_u = 1 + 0,035(U - 400) / 1000, \quad (4)$$

где  $U$  – напряжение, В.

Следует отметить, что для напряжений ниже 400 В зависимость может быть нелинейной – этот вопрос требует отдельного исследования, поэтому следует ограничить действие предложенного выражения напряжением 400 В и выше. Расстояние между линиями на рис. 11 позволяет предложить приблизительные значения коэффициента  $K_c$  в зависимости от типа охлаждения машины и ее класса защиты:



IP55, IC411	$K_c = 1$
IP55, IC71W	0,80
IP55, IC611	0,66
IP55, IC81W	0,55
IP23, IC01	0,53

Получается, что лучше охлаждается машина с IP23. Важно заметить, что все выведенные «графическим» путем коэффициенты потребуют дальнейшего уточнения.

Для охвата более широкого диапазона мощности и значений частоты вращения добавим к рассмотрению две машины большой мощности. Первая разработана компанией Alstom [9], ее основные параметры: 20 МВт, 180 об/мин, 4,16 кВ, 89 т, воздушное охлаждение с внешним теплообменником «воздух–вода». Расчет машинной постоянной по (3) при  $C_p = 0,75$  дает значение  $C_M = 710$ . Это хорошее совпадение с нашей методикой, поскольку такое значение может быть предсказано по (2) при  $K_u$ , рассчитанном по (4) и  $K_c \approx 0,7$ .

Вторая машина разработана компанией GE [10], ее основные параметры: 80 МВт, 2500 об/мин, 11 кВ, 150 т, КПД 98,1%, водяное охлаждение с дополнительным вентилятором. Расчет машинной постоянной по (3) при  $C_p = 0,75$  дает значение  $C_M = 1545$ . Это значение выше того, которое могло бы быть предсказано по (2) при  $K_u$ , рассчитанном по (4) и  $K_c \approx 0,8$ . Предполагаем, что создание столь такого асинхронного двигателя – только первый опыт, следующий вариант удастся сделать компактнее при более низком значении  $C_M$ .

Для охвата более широкого диапазона значений частоты вращения добавим к рассмотрению высокоскоростные АМ с КЗ ротором серии ДМЧЦ. Основные параметры серии: напряжение 380 В, синхронная частота вращения 6000 об/мин, частота питания 400 Гц, охлаждение ICA0141 (соответствует IC411), климатическое исполнение OM2. В качестве примера в табл. 3 представлены две машины из серии.

Машинная постоянная, рассчитанная по (2) при  $C_p = 0,75$  и коэффициенте уровня КПД  $K_e = 0,8$  (уровень КПД серии ДМЧЦ достаточно низкий) имеет значение  $C_M = 800$ . Это выше, чем при расчете по (3):  $C_M = 582–686$ . Попробуем определить возможные причины расхождения.

С учетом частоты питания и частоты вращения можно определить число полюсов данной серии машин – 8. Очевидно, при таком числе полюсов ярма сердечников более тонкие, чем для 2 или 4 полюсов, что позволяет уменьшить массу активных частей. При этом высокое значение частоты вращения достигается за счет высокой частоты питания. Для того чтобы учитывать данное решение, дополним (2) еще одним множителем  $K_{fp}$ , который можно называть коэффициентом высокой частоты и большого числа полюсов:

$$C_M = K_t K_e K_c K_u K_{fp}. \quad (5)$$

Примем для ДМЧЦ  $K_{fp} = 0,8$ , получаем значение  $C_M = 640$ , которое значительно ближе к значению, полученному по (3).

Таблица 3

### Высокоскоростные асинхронные машины ДМЧЦ

Тип	Мощность, кВт	Масса, кг	КПД, %	Расчет $C_M$ по (3)	Оценка $C_M$ по (2) при $K_e = 0,8$	Оценка $C_M$ по (5) при $K_{fp} = 0,8$
ДМЧЦ-71-2-8OM2	1.5	12	69	686	800	640
ДМЧЦ-132-2-8OM2	18.5	67	87	582	800	640

Таблица 4

### Машины двойного питания АВВ

Тип	Мощность, кВт	Напряжение, В	Частота вращения, об/мин	Масса, кг	КПД, %	$\cos \varphi$	Расчет $C_M$ по (3)	Оценка $C_M$ по (2) при $K_t = 1100$
AMK 500L6A	1250	6600	990	6810	95.6	0.86	1019	893
AML 710L6A	5765	6600	993	18850	96.9	0.85	898	893
AMK 500L4A	1800	690	1890	5010	-	-	788	751
AMK 500L4A	2020	690	1680	5010	-	-	682	751
AMK	2200	690-1000	1750	6700	-	-	873	741
AMK	3200	690-1000	1750	10000	-	-	983	741
AMK	3600	3000-6000	1750	12000	-	-	1080	878

Заметим, что влияние большого числа полюсов при высокой частоте питания требует отдельного исследования.

Следующий тип АМ, который рассмотрим, – асинхронная машина двойного питания (или АМ с фазным ротором – АМДП). Информация по ряду таких машин собрана в табл. 4. Можно предположить, что масса АМДП выше, чем масса АМКЗ на 5–10% из-за наличия блока контактных колец. При  $K_c = 0,66$ , соответствующем охлаждению IC611 и  $K_t = 1100$ , получаем значения, приведенные в правом крайнем столбце табл. 4. Итак, приняли  $K_t = 1100$  (на 10% выше, чем для АДКЗ), хотя только по собранной автором информации судить сложно – требуется анализ большего объема данных.

Применимость методики к асинхронным машинам с массивным ротором (АММР) проверим на машинах финской компании Rotatek. Компания уже не существует, но остались спецификации серии машин с массивным ротором (начала 2000-х годов), в которых указаны основные характеристики машин и приведены габаритные размеры. К сожалению, тип охлаждения и масса машин в спецификациях не указаны. По наличию теплообменника сбоку машины и его форме (рис. 12) можно предположить, что статор имеет водяное охлаждение и что в целом охлаждение машины примерно на 40% эффективнее, чем естественное воздушное охлаждение. Тогда можем принять коэффициент  $K_c \approx 0,6–0,8$ .

Для оценки массы машин мы можем воспользуемся средним значением плотности машин цилиндрической формы –  $3000 \text{ кг/м}^3$ . Объем машины может приблизительно рассматриваться как объем цилиндра, в который «вписана» машина, исключая клеммную коробку, теплообменник, лапы и выходные концы вала. Если взять  $K_t = 1000$ , то расчет  $C_M$  по (5) даст более высокие значения, чем полученные по (3), которые лежат в пределах 505–630 (см. табл. 5). Если предположить, что коэффициент

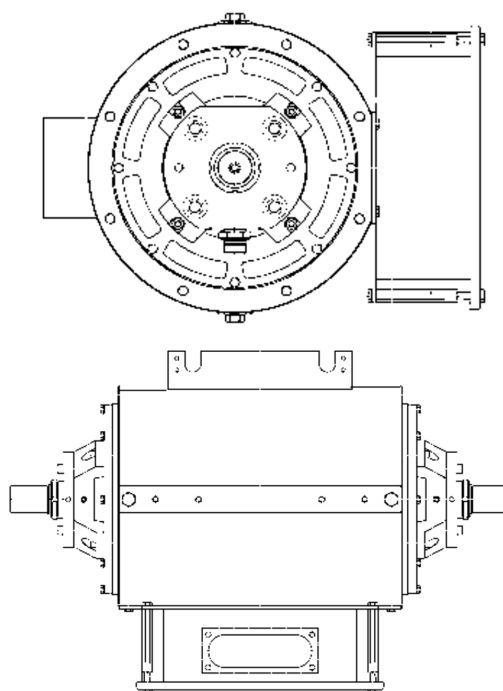


Рис. 12. Вид машины Rotatek с торца и сверху

типа  $K_t = 700$ , то при  $K_c = 0,7$  получаем большее соответствие – см. правый крайний столбец в табл. 4.

Рассмотрим еще одну серию АММР, описанную в [11] (производитель Mitsubishi). К сожалению, масса машин в [11] не указана, как и напряжение. Даны только размеры активных частей. Массу их можно оценить, приняв среднее значение плотности  $7800 \text{ кг/м}^3$ . Полную массу можно очень приблизительно оценить как удвоенную активную. Расчеты  $C_M$  приведены в табл. 6. Значения близки к тем, которые можно было бы получить по (5), если принять  $K_t = 700$ ,  $K_{fp} = 0,8$  и коэффициент охлаждения, соответствующий водяному охлаждению.

Это не очень надежная проверка, поэтому для подтверждения гипотезы о  $K_t = 700$  (для АММР) рассмотрим отдельные прототипы машин с массивным ротором, информация о которых приведена в научных статьях и диссертациях. В тех случаях, ко-

Таблица 5

Серийные машины с массивным ротором Rotatek

Тип	Мощность, кВт	Напряжение, В	Частота вращения, об/мин	Объем, м <sup>3</sup>	Масса, кг	Расчет $C_M$ по (3)	Оценка $C_M$ по (2) при $K_t = 1000$	Оценка $C_M$ по (2) при $K_t = 700$
755-1000-690-08-A	1000	690D	8000	0,36	1081	544	707	495
630-600-690-09-A	600	690Y	9000	0,22	645	505	707	495
510-400-690-20-B	400	690Y	20000	0,13	398	630	707	495
510-300-400-10-A	300	400Y	10000	0,13	398	553	700	490
430-200-400-12-A	200	400Y	12000	0,08	253	520	700	490

Таблица 6

## Серийные машины с массивным ротором Mitsubishi

Тип	Мощность, кВт	Частота вращения, об/мин	Диаметр 1, мм	Диаметр 2, мм	Длина, мм	Объем, м <sup>3</sup>	Масса, кг	$C_M$ (активная масса)	$C_M$ (полная масса)
SJ-2B2A04Y	5,5	40000	89,5	28	50	0,0003	2	123	246
SJ-2B2009Y	7,5	30000	109,5	35	70	0,0006	5	176	352
SJ-2B2210Y	11	30000	159,5	55	60	0,0011	8	236	472
SJ-2B2307Y	15	30000	179,5	70	60	0,0013	10	228	456
SJ-2B2402Y	22	20000	209,5	85	90	0,0026	20	281	562

Таблица 7

## Прототипы машин с массивным ротором

Параметры	Источник			
	[12]	[13]	[14]	[15]
Номинальная мощность, кВт	11	300	5	250–300
Номинальное напряжение, В	206	400	220	400
Частота питания, Гц	250	–	–	140
Номинальная частота вращения, об/мин	14000	60000	23760	8400
Охлаждение	IC71W	IC71W	не указано	воздушное (IC411)
КПД, %	83	94	–	95–95,6
$\cos\varphi$	0,69	0,7	–	–
Объем машины (цилиндр), м <sup>3</sup>	0,0047	0,008	–	0,0302
Принятая плотность машины, кг/м <sup>3</sup>	5000	–	–	–
Оценка полной массы машины по объему и плотности, кг	23	–	–	–
Объем активных частей машины, м <sup>3</sup>	–	–	–	–
Принятая плотность активных частей машины, кг/м <sup>3</sup>	7800	7800	–	7800
Масса активных частей машины, кг	12	62	13	236
Машинная постоянная $C_M$ , рассчитанная только для активных частей по оценке массы активных частей машины	230	212	620	320
Оценка полной массы машины по массе активных частей, кг (x2)	–	124	26	472
$C_M$ , рассчитанная по оценке полной массы	459	424	1240	640
$K_f$	700	700	700	700
$K_e$	0.9	0.9	1	1
$K_c$	0.8	0.8	1	1
$K_u$	1	1	1	1
$K_{fp}$	1	1	1	1

гда требуется оценить полную массу машин как удвоенную массу активных частей (символ «x2» в табл. 7). Из таблицы видим, что для машины из [14] значение  $C_M$  слишком большое, вероятно, машина неоптимально спроектирована. В остальном можно заключить, что гипотеза о  $K_f = 700$  для АММР имеет право на существование.

Уточненные значения всех используемых коэффициентов предложены в табл. 8. С учетом (1), (5)

и табл. 8 можно оценить массу большинства асинхронных машин.

На рис. 13 показаны диапазоны значения мощности и частота вращения рассмотренных типов АМ. Показано, что методика работает для всех типов АМ на протяжении пяти-шести значений порядка мощности и около трех порядков значения частоты вращения. Напомним, что назначение  $C_M$  – не предсказать массу конкретной машины, а

## Значения коэффициентов используемых в (5)

Коэффициент	Предлагаемые ориентировочные значения или выражения
$K_t$	$K_t = 1100$ для асинхронных машин двойного питания; $K_t = 1000$ для асинхронных машин с короткозамкнутым ротором; $K_t = 700$ для асинхронных машин с массивным ротором
$K_e$	$K_e = 1$ для среднего уровня КПД; $K_e = 07-08$ для низкого уровня КПД; $K_e = 1,2-1,3$ для высокого уровня КПД
$K_c$	$K_c = 1$ для IP55, IC411; $K_c = 0,55$ для IP55, IC81W; $K_c = 0,66$ для IP55, IC611; $K_c = 0,53$ для IP23, IC01; $K_c = 0,8$ для IP55, IC71W
$K_u$	$K_u = 1 + 0,035(U - 400)/1000$ , где $U$ – напряжение
$K_{fp}$	$K_{fp} = 1$ для частоты питания около 50 Гц; $K_{fp} = 0,8$ для частоты питания, значительно большей 100 Гц, и числа полюсов больше 6

«обозначить» современный уровень техники, т.е. дать проектировщику точки отсчета.

Зачастую в работах, представляемых на научных конференциях, в статьях и даже в диссертациях, новая машина сравнивается с одной или двумя уже известными машинами. При этом сравнение компактности проводится по одному основному критерию – или удельной мощности  $P'$ , или удельному моменту  $M'$ . Подобный подход может приводить к неверным выводам, особенно если сравниваемые машины несколько отличаются по номинальным значениям мощности и частоты вращения, типу охлаждения, уровню напряжения и т.п.

Дело в том, что удельные показатели  $P'$  и  $M'$  широко варьируются в зависимости от уровня мощности и частоты вращения. Для иллюстрации выберем из каталога [3] несколько значений мощности таким образом, чтобы разница между соседними была приблизительно одного порядка (10 раз). Расчеты показали, что значения как  $P'$  так и  $M'$  и могут отличаться в несколько раз. Кроме того, стоит отметить, что машина с более высокой удельной мощностью по сравнению с другой машиной может иметь более низкое значение удельного момен-

та. Таким образом, использовать 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 постоянная  $C_M$  варьируется в пределах примерно 50%, т.е.  $C_M$  выглядит значительно более надежным критерием, причем интегральным (один критерий вместо двух).

Вариативность удельных показателей не единственная проблема. Даже в рамках одной и той же серии машины могут быть спроектированы таким образом, что компактность машин на соседних строчках каталога может отличаться на десятки процентов. В качестве иллюстрации сравним серии низковольтных машин с чугунными корпусами АВВ (серия 1А) и Siemens (серия 3). Обе серии имеют один и тот же класс КПД (IE2), охлаждение (IC411) и класс защиты (IP55). За критерий компактности принимаем машинную постоянную  $C_M$ , поскольку ее значение пропорционально массе (в соответствии с (3)), но не связано с мощностью и частотой вращения. Результаты расчета значений постоянной  $C_M$  для машин с 4 и 6 полюсами обоих производителей при  $C_M = 0,75$  представлены на рис. 14. Видим, что для 4-полюсных машин на рис. 14,а машины Siemens значительно более компактны, при этом при мощности 4 или 7,5 кВт машины сопоставимы, а, например, при 15 кВт преимущество Siemens составляет до 40%. Разница в компактности 4-полюсных машин двух серий не может быть объяснена разницей в энергетических показателях, поскольку на рис. 14,б видим, что они на одном уровне у обоих производителей.

Проведя аналогичный анализ 6-полюсных машин, приходим к совершенно противоположным результатам. Уже машины АВВ демонстрируют большую компактность (рис. 14,в), при этом при 15 кВт преимущество АВВ составляет те же 30–40%. В целом, по результатам сравнения машин с 4 и 6 полюсами можно сказать, что серии

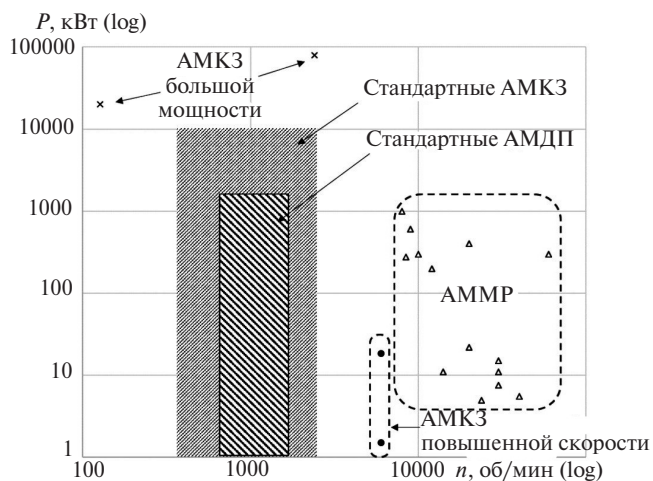


Рис. 13. Исследованные диапазоны мощности и частоты вращения

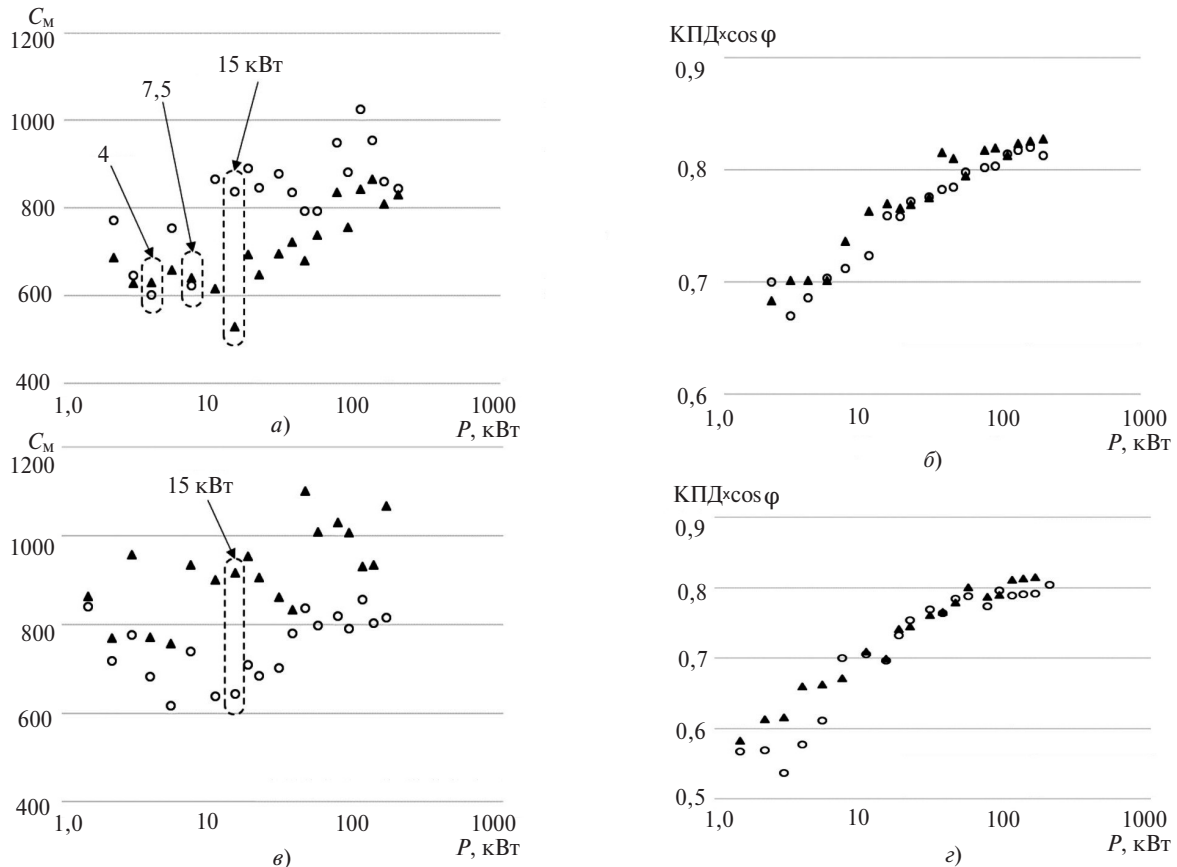


Рис. 14. Сравнение серий АДКЗ с чугунными корпусами при  $C_p = 0,75$ : а и б –  $\circ$  – АBB 1500 об/мин IE2;  $\blacktriangle$  – Siemens 1500 об/мин IE2; в и г –  $\circ$  – АBB 1000 об/мин;  $\blacktriangle$  – Siemens 1000 об/мин

АBB и Siemens выглядят равными (просто они спроектированы по-разному).

Таким образом, становится очевидным, что брать для сравнения только одну машину из каталога или какой-либо статьи не имеет смысла, поскольку можно прийти к совершенно неверным выводам. Кроме того, сравнивать серии или производителей по ряду машин для одной синхронной частоты вращения (одного числа полюсов) также неверно, надо рассматривать все значения частоты вращения. Более адекватным было бы сравнение по среднему значению машинной постоянной  $C_M$  для всей серии машин.

Подводя промежуточные итоги, можно отметить, что  $C_M$  дает возможность сравнения не только отдельных машин друг с другом, но и сравнение целых серий, типов машин и опосредовано используемых технологий. При сравнении двух отдельных машин (для получения верных 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 одного и того же применения (те же перегрузки и т.п.). Также весьма 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 только активных частей машин (без корпуса, вала и прочих несущих структур), но тогда необходимо, чтобы обе сравниваемые машины не имели корпуса, вала и т.д.

Интересным применением машинной постоянной  $C_M$  может быть оценка темпов эволюции типов электрических машин. В СССР и затем в России развитие общепромышленных асинхронных машин шло в рамках серий 4А-4АМ-АИР-РА, при этом каждая новая серия в целом демонстрировала улучшенные показатели по компактности и энергетиче-

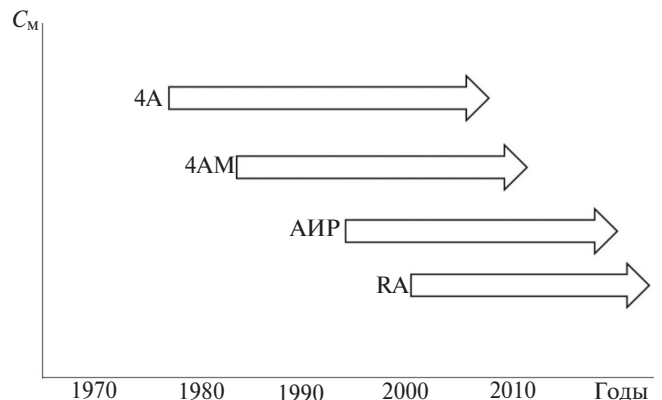


Рис. 15. Отечественные серии общепромышленных АМ



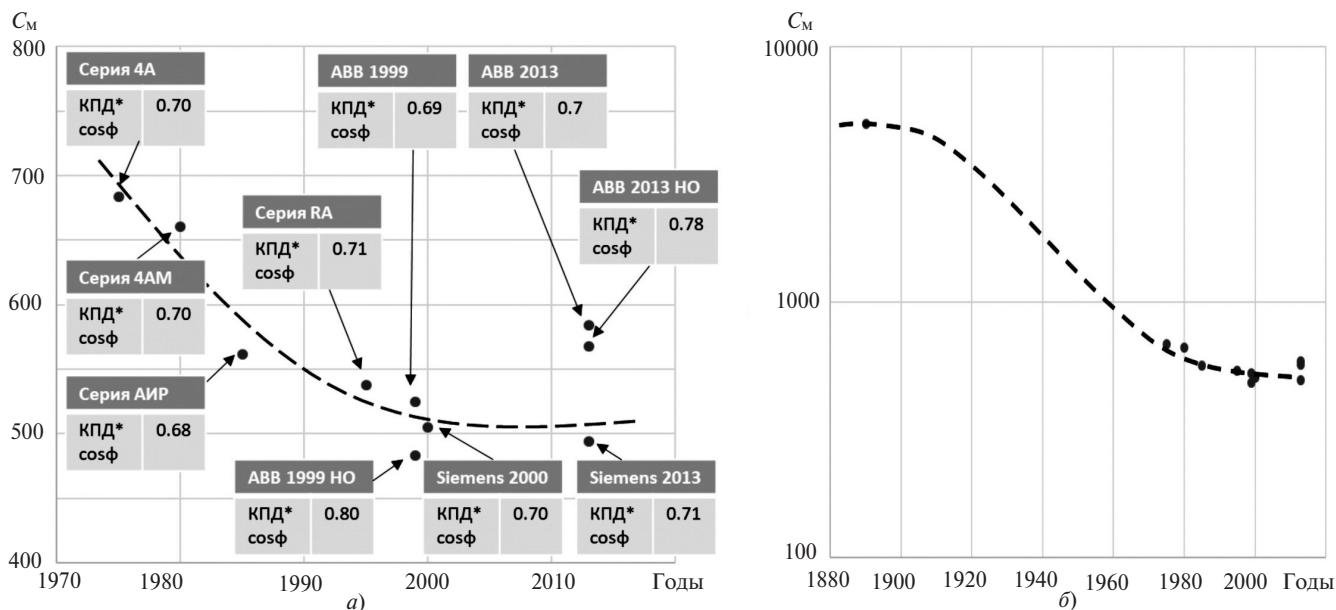


Рис. 16. Эволюция компактности

ским характеристикам. На рис. 15 представлен процесс появления серий в исторической перспективе и качественно показано повышение компактности серий (снижение значений  $C_M$ ).

На рис. 16, а и б представлены результаты анализа вышеупомянутых отечественных серий, а также серий ведущих мировых производителей. Были исследованы только 2- и 4-полюсные двигатели с алюминиевыми корпусами. При этом для каждой серии были рассчитаны средние значения  $C_M$  и произведений КПД $\times$ cosφ. На рис. 16 видно, что за последние 3-4 десятилетия компактность машин была в целом улучшена на 25–35% при небольшом повышении энергетических показателей. В то же время можно заметить, что с начала XXI в. прогресса не наблюдается.

Если взглянуть на более широкий временной промежуток, то заслуживают внимания два свидетельства: производитель машин Hitachi в [16] утверждает, что в период с 1910 по 2010 г. габариты двигателя Hitachi мощностью 5 л.с. были снижены в 5 раз; в [17] утверждается, что в одном и том же типоразмере корпуса (NEMA 404) в 1897 г. можно было получить 7,5 л.с., а в 1976 г. – уже 100 л.с.

На основе этой информации попытаемся построить кривую изменения компактности машин для всего периода существования асинхронных машин, как показано на рис. 16, б, используя логарифмическую шкалу для  $C_M$ . Если принять, что компактность – «главный критерий развития системы» по терминологии теории систем или ТРИЗ, то можно предположить, что кривая на рис. 16, б представляет собой кривую эволюции асинхронных машин как класса технических систем. В таком случае конечный участок кривой будет указывать

на окончание развития данного класса машин и его вероятное замещение другими типами машин в обозримом будущем.

Подводя итоги, приведем полную систему формул для оценки массы и габаритных размеров асинхронных машин в общей форме (машина упрощенно представляется цилиндром с диаметром  $D$  и длиной  $L$ , не учитывая выходной конец вала, клеммную коробку и пр.):

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

$$D \approx \left( \frac{4m}{\pi (A n^a) C n^x} \right)^{1/3}; \quad (6)$$

$$L \approx \frac{4m}{\pi D^2 C n^x},$$

где  $D$  – внешний диаметр корпуса машины, м;  $L$  – длина корпуса машины, м;  $C_p = 0,75$ ;  $C_n = -0,5$ ;  $A = 0,33$ ;  $a = 0,22$ ;  $C = 1900$ ;  $x = 0,09$ ;  $C_M$  определяется по (5) и табл. 8.

Для масштабирования – оценки массы и габаритов новой машины, учитывая параметры известной машины, – предлагается:

для машин с идентичными типом, напряжением, охлаждением и уровнем КПД массу новой машины  $m_2$  можно рассчитать, зная массу исходной машины  $m_1$ :

$$m_2 = m_1 \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{0,75} \sqrt{\frac{n_1}{n_2}}; \quad (7)$$

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  $C_{M1}$  исходной машины, затем рассчитать  $C_{M2}$  для машины по  $C_{M1}$  с коррекцией на изменяющиеся коэффициенты  $K_e$ ,  $K_c$  или  $K_u$  и, наконец, определить массу и габариты новой машины по (3) или (6).

В заключение скажем, что пользователями предлагаемых методик оценки массы и размеров и масштабирования могут быть как разработчики асинхронных машин, так и систем, в которых асинхронная машина АМ является одним из компонентов.

Отметим, что анализ с помощью  $C_M$  позволил поставить вопрос о низкой энергоэффективности АДКЗ в диапазоне мощностей от 1 до 10 кВт и предложить новый класс КПД, что является конкретным результатом применения методики.

В дальнейшем было бы интересно исследовать зависимость между мощностью и частотой вращения машины и ее энергетическими показателями. Также представляет интерес дальнейшее уточнение значений коэффициентов  $C_p$  и  $C_n$ , а также коэффициентов  $K_t$ ,  $K_e$ ,  $K_c$ ,  $K_u$  и  $K_{fp}$  как для асинхронных, так и для прочих типов машин.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Матвеев А.В.** Альтернативная машинная постоянная и оценка массы и габаритов электрических машин. – Электричество, 2019, № 11, с. 45–53.
2. **Иванов-Смоленский А.В.** Электрические машины. М.: Энергия, 1980, 927, с.
3. **Каталог** «Low voltage process performance motors according to EU MEPS», 9AKK105944 EN, October 2013, ABB Motors and Generators [Электрон. ресурс] www.abb.com (дата обращения 15.12.2019).
4. **Каталог** «HV induction motors, technical catalog for IEC motors», EN, 09-2011, ABB Motors and Generators [Электрон. ресурс] www.abb.com (дата обращения 15.12.2019).
5. **Каталог** «SIMOTICS low-voltage motors type, series 1LE1, 1MB1 and 1PC1», D 81.1, 2013, Siemens [Электрон. ресурс] www.siemens.com (дата обращения 15.12.2019).
6. **Каталог** «Three-phase induction motors: H compact, H compact PLUS», D 84.1, Siemens, 2009, [Электрон. ресурс] www.siemens.com (дата обращения 15.12.2019).
7. **Каталог** «Low voltage water cooled motors», EN, 02-2011, ABB Motors and Generator [Электрон. ресурс] www.abb.com (дата обращения 15.12.2019).
8. **Каталог** «Water jacket three phase squirrel cage induction motors», ASI.CT.036.1 GB, Marelli [Электрон. ресурс] www.marellimotori.com (дата обращения 15.12.2019).
9. **Lewis C.** The Advanced Induction Motor. – IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Chicago, USA, 21–25 July 2002.
10. **Брошюра** «Power Conversion Solutions, High speed induction motors up to 100 MW» [Электрон. ресурс] www.gepowerconversion.com (дата обращения 15.12.2019).
11. **Kawashima K., Shimada A.** Spindle motors for machine tools. – Technical report, Motor Technologies for Industry and Daily Life Edition, Mitsubishi Electric Advance, pp. 17–18, vol. 103, September 2003.
12. **Mekuria Y.G.** Development of a high speed solid rotor asynchronous drive fed by a frequency converter system, Shaker Verlag GmbH, Germany, 2013.
13. **Gieras J.F., Saari J.** Performance calculation for a high speed solid- rotor induction motor. – IEEE Transactions on Industrial Electronics, 59(6):2689–2700, June 2012.
14. **Gulbahce M.O., Kocabas D.A.** High-speed solid rotor induction motor design with improved efficiency and decreased harmonic effect. – IET Electr. Power Appl., 2018, vol. 12, iss. 8, pp. 1126–1133.
15. **Hupponen J.** High-speed solid-rotor induction machine – electromagnetic calculation and design. – DSc thesis at Lappeenranta University of Technology, Finland, 2004.
16. **Mikami H., Ide K., Shimizu Y., Senoo M., Seki H.** Historical evolution of motor technology. – Hitachi Review, vol. 60 (2011), No. 1.
17. **Alger P.L., Arnold R.E.** The history of induction motors in America. – Proc. IEE, vol. 64, No. 9, September 1976.

[26.12.2020]

*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.*

## Analyzing the Types and Series of Induction Machines on the Basis of an Alternative Machine Constant

**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

*The types and series of induction machines are analyzed on the basis of an alternative machine constant. The dependence of the machine constant on the machine type, design, and characteristics is shown. It is conjectured that the measures taken to improve the energy efficiency of the series of induction machines are insufficient in the range of small power values. A method for comparing the machines is*

*proposed; formulas for scaling them are given, and the matter regarding the evolution of induction machines is touched. It is important to remember that the alternative machine constant is not a precise tool for predicting the mass of a particular machine from a particular catalogue. It only shows the extent of compactness to which the machine can be made with the specified characteristics and selected design version. The availability of reliable reference points that can be easily determined using the machine constant will help determine the really best solutions and screen out non-optimal ones. This, both time and material resources will be saved. In designing new machines, it is proposed to set forth ambitious objectives and to select, as reference points, the machine constant values by 20% lower than those corresponding to the state of the art.*

**Key words:** *induction machines with a squirrel-cage rotor, with a solid rotor, doubly-fed induction machines, energy efficiency, efficiency classes, cooling types, assessment of mass and overall dimensions, machine constant, scaling*

---

REFERENCES

1. **Matveyev A.V.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2019, No. 11, pp. 45–53.
2. **Ivanov-Smilehsky A.V.** *Elektricheskiye mashiny* (Electrical machines). M.: Energiya, 1980, 927, p.
3. **Catalogue** «Low voltage process performance motors according to EU MEPS», 9AKK105944 EN, October 2013, ABB Motors and Generators [Electron. Resource] [www.abb.com](http://www.abb.com) (Data of appeal 15.12.2019).
4. **Catalogue** «HV induction motors, technical catalog for IEC motors», EN, 09-2011, ABB Motors and Generators [Electron. Resource] [www.abb.com](http://www.abb.com) (Data of appeal 15.12.2019).
5. **Catalogue** «SIMOTICS low-voltage motors type, series 1LE1, 1MB1 and 1PC1», D 81.1, 2013, Siemens [Electron. Resource] [www.siemens.com](http://www.siemens.com) (Data of appeal 15.12.2019).
6. **Catalogue** «Three-phase induction motors: H compact, H compact PLUS», D 84.1, Siemens, 2009 [Electron. Resource] [www.siemens.com](http://www.siemens.com) (Data of appeal 15.12.2019).
7. **Catalogue** «Low voltage water cooled motors», EN, 02-2011, ABB Motors and Generator [Electron. Resource] [www.abb.com](http://www.abb.com) (Data of appeal 15.12.2019)
8. **Catalogue** «Water jacket three phase squirrel cage induction motors», ASI.CT.036.1 GB, Marelli [Electron. Resource] [www.marellimotori.com](http://www.marellimotori.com). (Data of appeal 15.12.2019).
9. **Lewis C.** The Advanced Induction Motor. – IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Chicago, USA, 21–25 July 2002.
10. **Brochure** «Power Conversion Solutions, High speed induction motors up to 100 MW» [Electron. Resource] [www.gepowerconversion.com](http://www.gepowerconversion.com) (Data of appeal 15.12.2019).
11. **Kawashima K., Shimada A.** Spindle motors for machine tools – Technical report, Motor Technologies for Industry and Daily Life Edition, Mitsubishi Electric Advance, pp 17–18, vol. 103, September 2003.
12. **Mekuria Y.G.** Development of a high speed solid rotor asynchronous drive fed by a frequency converter system, Shaker Verlag GmbH, Germany, 2013.
13. **Gieras J.F., Saari J.** Performance calculation for a high speed solid- rotor induction motor. – IEEE Transactions on Industrial Electronics, 59(6): 2689–2700, June 2012.
14. **Gulbahce M.O., Kocabas D.A.** High-speed solid rotor induction motor design with improved efficiency and decreased harmonic effect. – IET Electr. Power Appl., 2018, vol. 12 iss. 8, pp. 1126–1133.
15. **Huppunen J.** High-speed solid-rotor induction machine – electromagnetic calculation and design. – DSc thesis at Lappeenranta University of Technology, Finland, 2004.
16. **Mikami H., Ide K., Shimizu Y., Senoo M., Seki H.** Historical evolution of motor technology. – Hitachi Review, vol. 60 (2011), No. 1.
17. **Alger P.L., Arnold R.E.** The history of induction motors in America. – Proc. IEE, vol. 64, No. 9, September 1976.

[26.12.2020]