

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Падеев А.С., Кутарев А.М., Сурков Д.В.
ФГБОУ ВПО «Оренбургский государственный университет»,
г. Оренбург

Проблема повышения энергоэффективности российской промышленности является одной из ключевых в настоящее время. Известно, что энергоёмкость российской экономики в несколько раз превышает данный показатель развитых стран [1]. В связи с этим возникает задача внедрения на промышленных предприятиях энерго- и ресурсосберегающих технологий.

На большинстве промышленных предприятий основными потребителями электроэнергии являются электрические двигатели. При этом наиболее распространенные в силу своей относительной дешевизны и надежности – это асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором. В России, согласно ГОСТ Р 54413-2011, односкоростные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором имеют четыре класса энергоэффективности (IE1 – IE4). В тоже время, асинхронные двигатели, выпускаемые отечественными предприятиями, имеют, как правило, низшие классы энергоэффективности (IE1-IE2). Для примера в таблице 1 приведены технические данные двух, четырех и шестиполюсных двигателей мощностью 4 кВт.

Таблица 1 – Энергетические показатели асинхронных электродвигателей

Тип двигателя	4A100S2	АИР100S2	5A100S2	RA112M2
КПД, %	86,5	87	84	83,5
Класс энергоэффективности	IE2	IE2	IE1	IE1
Тип двигателя	4A100L4	АИР100L4	5A100L4	RA112M4
КПД, %	84	85	82	84,2
Класс энергоэффективности	IE1	IE1	IE1	IE1
Тип двигателя	4A112MB6	АИР112MB6	5A112MB6	RA132MA6
КПД, %	82	82	81	84
Класс энергоэффективности	IE1	IE1	IE1	IE1

Таким образом, возникает задача повышения энергетических показателей выпускаемых двигателей при минимальном увеличении их массогабаритных показателей и стоимости.

Объектами исследования были выбраны асинхронные двигатели серии 4А мощностью 4 кВт. Решение поставленной задачи целесообразно начинать с анализа потерь энергии в электродвигателе. В Таблице 2 приведены количественные значения потерь энергии и их процентное соотношение. В

последней строке таблицы приведены значения перегрева обмотки статора при продолжительном режиме работы.

Таблица 2 – Потери мощности в исследуемых электродвигателях

Потери	4A100S2	4A100L4	4A112MB6
$\Sigma P, \text{Вт}/\%$	614/100	714/100	898/100
$P_{эл1}, \text{Вт}/\%$	251/41	323/45	449/50
$P_{эл2}, \text{Вт}/\%$	151/25	210/29	232/26
$P_{см}, \text{Вт}/\%$	118/19	138/20	179/19
$P_{мех}, \text{Вт}/\%$	72/12	19/3	14/2
$P_{доб}, \text{Вт}/\%$	22/3	23/3	24/3
$\Delta v_1, ^\circ\text{C}$	60	69	80

Из таблицы 2 видно, что наибольшую долю потерь (более 40 %) занимают электрические потери в обмотке статора. При этом доля данных потерь возрастает с ростом числа полюсов двигателя. Электрические потери в обмотке ротора составляют от 25 % до 29 %, потери в магнитопроводе около 20 %. Механические и добавочные потери относительно невелики. Превышение температуры обмотки статора над температурой окружающей среды составляет от 60 °C до 80 °C.

Как известно, для повышения энергоэффективности необходимо уменьшать потери энергии. Механические и добавочные потери в двигателях существенно снизить малозатратными способами практически невозможно, к тому же они относительно невелики. Таким образом, остаются только электрические потери в обмотках статора и ротора и потери в стали статора, которые можно снизить.

Уменьшение электрических потерь в обмотке статора осуществляется путем уменьшения плотности тока в обмотке (J_1), т.е. увеличением сечения обмоточного провода. В исследуемых двигателях серии 4А плотность тока: $J_{1\ 2p=2} = 5,4 \text{ А}/\text{мм}^2$, $J_{1\ 2p=4} = 6,5 \text{ А}/\text{мм}^2$, $J_{1\ 2p=6} = 7,4 \text{ А}/\text{мм}^2$. При расчете двигателей класса энергоэффективности IE3 плотность тока в обмотках составила: $J_{1\ 2p=2,4} = 4 \text{ А}/\text{мм}^2$, $J_{1\ 2p=6} = 3,8 \text{ А}/\text{мм}^2$. В двигателях класса IE4: $J_1 = 2,6 - 2,8 \text{ А}/\text{мм}^2$. Для размещения в пазах статора увеличившегося “объема меди”, пазы статора также были увеличены за счет внешнего диаметра статора до максимально возможного при данной высоте вращения. При использовании в производстве нового оборудования для изготовления и укладки обмоток, коэффициент заполнения паза может быть повышен до 0,85.

Расчет короткозамкнутого ротора выполнялся с пазами той же конфигурации, что и в двигателях серии 4А. Для улучшения пусковых характеристик пазы ротора применялись максимальной глубины, а для уменьшения электрических потерь в короткозамкнутой обмотке ротора плотность тока J_2 была уменьшена на 15 – 25 %.

Магнитопровод рекомендуется выполнять из электротехнической стали с большой индукцией насыщения и низкими удельными потерями. В спроектированных двигателях была использована сталь марки 2215 (удельные потери $p_{1.0/50} \leq 2 \text{ Вт/кг}$). Для уменьшения реактивной составляющей полного тока, воздушный зазор должен быть выполнен минимально возможным.

Практически у всех спроектированных энергоэффективных двигателей увеличилась длина активной части. Двигатели класса IE3, были выполнены на первоначальных высотах оси вращения. У четырех и шестиполюсного двигателей класса IE4 пришлось увеличить высоту оси вращения до следующего стандартного значения. В таблицах 3-4 представлены потери мощности и перегрев обмотки статора в энергоэффективных двигателях.

Таблица 3 – Потери мощности в электродвигателях класса IE3

Потери	100S2	100L4	112MB6
$\Sigma P, \text{ Вт/\%}$	542/100	513/100	606/100
$P_{эл1}, \text{ Вт/\%}$	187/34,5	176/34,3	212,7/35
$P_{эл2}, \text{ Вт/\%}$	125/23	165/32	158/26
$P_{см}, \text{ Вт/\%}$	135,7/25	128/25	196,7/32,5
$\Delta v1, \text{ }^\circ\text{C}$	49,9	47,2	51,8

Таблица 4 – Потери мощности в электродвигателях класса IE4

Потери	100S2	112S4	132MB6
$\Sigma P, \text{ Вт/\%}$	432/100	399/100	453/100
$P_{эл1}, \text{ Вт/\%}$	111/25,7	123,7/31	133,2/29,4
$P_{эл2}, \text{ Вт/\%}$	104/24,1	95/23,8	91,1/20,1
$P_{см}, \text{ Вт/\%}$	123/28,5	127,2/31,8	178/39,3
$\Delta v1, \text{ }^\circ\text{C}$	34,5	34,4	34,4

Из таблиц 3-4 видно, что повышение энергоэффективности приводит к существенному уменьшению электрических потерь в обмотке статора и ротора. Как следствие уменьшается перегрев обмотки статора до 47-52 $^\circ\text{C}$ у двигателей класса IE3, и до 34-35 $^\circ\text{C}$ у двигателей класса IE4. Вместе с тем уменьшение электрических потерь за счет уменьшения плотности тока в обмотках неминуемо приводит к увеличению массы проводникового материала. В таблице 5 приведено процентное изменение масс активной части двигателя при повышении класса энергоэффективности. Видно, что масса обмотки статора увеличивается у всех энергоэффективных двигателей (почти в 3 раза у шестиполюсного двигателя). Масса алюминия также увеличивается, но не столь существенно (до полутора раз). Изменение массы магнитопровода не столь однозначное. У двигателей класса IE3 масса магнитопровода изменялась в пределах $\pm 6\%$ от базового значения, у двигателей класса IE4 масса увеличивалась от 7 до 27% в зависимости от числа полюсов. Однако, даже при

уменьшении массы магнитопровода (-6% у АД 100S2), увеличился расход электротехнической стали за счет увеличения внешнего диаметра статора.

Таблица 5 – Изменение масс активной части энергоэффективных двигателей

Класс энергоэффективности	IE3		
	100S2	100L4	112MB6
Тип двигателя	100S2	100L4	112MB6
Изменение массы обмотки статора ΔG_{Cu}	+36%	+53%	+95%
Изменение массы обмотки ротора ΔG_{Al}	+13%	+8%	+27%
Изменение массы магнитопровода ΔG_{Fe}	-6%	+6%	-2%
Класс энергоэффективности	IE4		
	100S2	112S4	132MB6
Тип двигателя	100S2	112S4	132MB6
Изменение массы обмотки статора ΔG_{Cu}	+116%	+129%	+170%
Изменение массы обмотки ротора ΔG_{Al}	+32%	+30%	+46%
Изменение массы магнитопровода ΔG_{Fe}	+7%	+12%	+27%

В заключение можно сделать следующие выводы:

1. Повышение класса энергоэффективности приводит к уменьшению рабочей температуры обмотки статора и других составных частей, что приводит к повышению надежности, и продлевает срок службы двигателя.

2. Уменьшение потерь энергии позволяет использовать более простые системы вентиляции и охлаждения.

3. К сожалению, повышение энергоэффективности происходит за счет увеличения массы и габаритов активной части, что неминуемо приведет к увеличению стоимости энергоэффективного двигателя.

4. Таким образом, использование энергоэффективных асинхронных двигателей экономически наиболее оправдано при эксплуатации в продолжительном режиме работы.

Список литературы

1. Энергетическая стратегия России на период до 2020 г. // ТЭК. – 2003. – № 2. – с. 5–37.