

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ МОЩНОСТИ ОТ ВЕЛИЧИНЫ ПОЛЮСНОГО ДЕЛЕНИЯ ТРЁХФАЗНЫХ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

О.Ю. Селицкая, ст. преподаватель, Е.М. Рак, студент (УО БГАТУ)

Аннотация

В статье представлены исследования зависимости мощности трёхфазных асинхронных электродвигателей от конструктивных параметров магнитопровода. В результате исследований получены зависимости, позволяющие с приемлемой степенью точности по величине полюсного деления определить мощность асинхронных электродвигателей серии 4А, а также взрывозащищённых двигателей серии ВАО.

Введение

Цель публикации заключается в том, чтобы на основе современных достижений науки провести исследование и получить математическую зависимость мощности асинхронных электродвигателей от типоразмеров их магнитопровода; оптимизацию процедуры перерасчёта современных асинхронных электромашин при проектировании и модернизации.

Для повышения эффективности системы проектирования и ремонта электродвигателей необходимо учитывать не только перечисленные выше факторы, но также пути улучшения структуры системы ремонтов, технологии изготовления ее отдельных деталей, агрегатов, блоков, узлов в целом в опытных и серийных образцах.

Поэтому расчет и моделирование асинхронного двигателя представляют собой математически неопределенную задачу со многими решениями, так как число определяемых неизвестных больше числа уравнений, связывающих их. Вследствие этого на начальном этапе проектирования приходится задаваться определенными значениями некоторых электромагнитных и конструктивных величин, базируясь на рекомендациях, полученных в процессе проектирования двигателей подобного класса.

Основная часть

Конструктивное оформление асинхронных электродвигателей, их мощность и габариты зависят от назначения и условий работы.

Технико-экономические показатели – размеры, масса и стоимость электродвигателя зависят от его главных размеров: внутреннего диаметра сердечника статора и его длины.

В свою очередь, главные размеры зависят от мощности двигателя, частоты вращения, а также основных электромагнитных нагрузок в номинальном режиме – индукции в воздушном зазоре B_δ и линейной нагрузки A . Величины B_δ и A определяют среднюю касательную силу F_K на единицу поверхности статора (рис. 1).

$$F_K = \alpha_\delta \cdot K_B \cdot K_{об} \cdot B_\delta \cdot A \quad (1)$$

Здесь α_δ – коэффициент полюсной дуги, учитывающий действие индукции B_δ в пределах полюсного деления (только на протяжении расчетной полюсной дуги $\alpha_\delta \tau$); K_B – коэффициент, зависящий от формы кривой магнитного поля в воздушном зазоре; $K_{об}$ – обмоточный коэффициент.

Умножив F_K на площадь поверхности статора $\pi D L$ и на плечо $D/2$, получим выражение электромагнитного момента:

$$M_{эм} = \frac{\pi}{2} \cdot \alpha_\delta \cdot K_B \cdot K_{об} \cdot D^2 \cdot L \cdot B_\delta \cdot A \quad (2)$$

где D и A – соответственно внутренний диаметр и длина сердечника статора, мм.

Умножив выражение (2) на синхронную угловую скорость магнитного поля статора ω_1 ($\omega_1 = 2\pi n_1/60$) или на частоту вращения n_1 , получим зависимость $P_{эм}$ от основных геометрических размеров, электромагнитных нагрузок и скорости вращения машины:

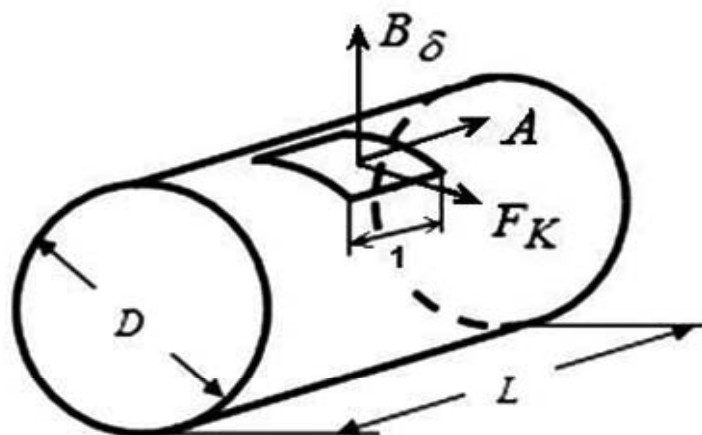


Рисунок 1. Определение средней касательной силы

$$P_{эм} = \frac{\pi}{2} \cdot \alpha_{\delta} \cdot K_B \cdot K_{об} \cdot D^2 \cdot L \cdot B_{\delta} \cdot A \cdot \omega_1$$

или

$$P_{эм} = \frac{\pi^2}{60} \cdot \alpha_{\delta} \cdot K_B \cdot K_{об} \cdot D^2 \cdot L \cdot B_{\delta} \cdot A \cdot n_1. \quad (3)$$

Из формулы (3) следует, что при неизменной электромагнитной мощности, чем выше электромагнитные нагрузки B_{δ} и A , тем меньше габариты машины и ее масса, расход активных материалов и стоимость. В одном и том же габарите машины высокоскоростные имеют мощность выше низкоскоростных. Машинная постоянная определяется по формуле:

$$\frac{D^2 \cdot L \cdot n_1}{P_{эм}} = \frac{60}{\pi^2 \cdot \alpha_{\delta} \cdot K_B \cdot K_{об} \cdot A \cdot B_{\delta}} = C. \quad (4)$$

Задачей моделирования является определение параметров формулы (4), для оптимальных типоразмеров магнитопровода при максимальной мощности на валу, развиваемой машиной.

Все величины в формуле (4), кроме синхронной частоты вращения магнитного поля статора n_1 , неизвестны, но на выбор параметров A , B_{δ} , α_{δ} , K_B , $K_{об}$ имеются рекомендации в литературе по проектированию электрических машин.

Остаются два неизвестных D и L . От размеров D и L и от соотношений между ними зависят вес машины и ее стоимость, а также технико-экономические характеристики и надежность.

Проектирование электрической машины сводится к многократному расчету зависимостей между основными показателями в формуле (4), заданных в виде системы формул, эмпирических коэффициентов, графических зависимостей.

При решении поставленной задачи требуется выполнять проверки условий с целью уточнения значений параметров, принятых в начале проектирования, значениям этих же параметров, полученных в процессе проектирования.

Если пренебречь потерями в роторе электродвигателя, то можно считать, что $P_{эм} = P_2$, где P_2 – полезная мощность:

$$P_2 = C(\tau) \cdot L \cdot D^2 \cdot n_1, \quad (5)$$

где n_1 – синхронная частота вращения магнитного поля статора, мин⁻¹.

Таким образом, для определения полезной мощности трёхфазных асинхронных электродвигателей можно применить формулу (5), позволяющую связать между собой все параметры моделируемой машины.

В формуле (5) C – функция, определяющая модель и зависимость от полюсного деления τ :

$$\tau = \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot p_1}, \quad (6)$$

где p_1 – число пар полюсов в машине. Определяется по формуле: $p_1 = 60 \cdot f_1 / n_1$,

где f_1 – частота напряжения сети, Гц.

На основе выборки и обобщения экспериментальных данных была получена эмпирическая формула функции C по методу наименьших квадратов [1] в виде логарифмической зависимости:

$$C(\tau) = a \cdot \ln \tau + b, \quad (7)$$

где a и b – некоторые постоянные коэффициенты, имеющие размерность $\times 10^{-9}$.

При этом в ходе исследования был сделан важный вывод, что постоянная ядра машины C – это величина, распределяемая относительно полюсного деления по закону натурального логарифма.

Под экспериментальными данными понимаются данные, полученные в ходе анализа существующего спектра асинхронных машин серий 4А (также отдельно ВАО – взрывозащищенные двигатели), выпускаемых промышленностью в настоящее время, систематизированных по типу, мощности, геометрическим параметрам и числу пар полюсов.

Двигатели серии 4А спроектированы оптимальными для нужд народного хозяйства. Критерием оптимизации была принята суммарная стоимость двигателя в производстве и эксплуатации, которая должна быть минимальной. Серия охватывает диапазон мощностей от 0,6 до 400 кВт и построена на 17 стандартных высотах оси вращения от 50 до 355 мм. Серия включает основное исполнение двигателей, ряд модификаций и специализированное исполнение.

Численные данные анализа, представленные в виде массива, будем называть таблично-заданной функцией $C=f(\tau)$.

Приведём в качестве примера некоторые данные для двигателей основного исполнения IP44 скоростью 1500 мин⁻¹, их технические характеристики представлены в табл. 1 и 2 для машин различных классов мощности. Здесь C – постоянная машины, полученная по справочным данным с использованием формулы (4).

Вывод формулы зависимости основывается на поиске приближенной функции для расширения дискретной области определения таблично-заданной зависимости до непрерывной области.

Для формирования численной модели была использована система *Wolfram Research Mathematica 7* [2, 3].

На рис. 2 и 3 представлены графики функции $C=f(\tau)$, для двигателей малой и средней мощности основного исполнения IP44 с частотой вращения 1500 мин⁻¹.

Для двигателей средней мощности величина максимума значения относительной погрешности составляет $\epsilon=4.81\%$, для двигателей малой мощности $\epsilon=3.72\%$.

Таблица 1. Двигатели серии 4А малой мощности

Типоразмер	P, кВт	n, мин ⁻¹	2р	D, мм	L, мм	C	τ, мм
4A71A4Y3	0,55	1500	4	70	65	1,151	54,978
4A71B4Y3	0,75	1500	4	70	74	1,379	54,978
4A80A4Y3	1,1	1500	4	84	78	1,332	65,973
4A80B4Y3	1,5	1500	4	84	98	1,446	65,973
4A90L4Y3	2,2	1500	4	95	100	1,625	74,613
4A100S4Y3	3	1500	4	105	100	1,814	82,467
4A100L4Y3	4	1500	4	105	130	1,861	82,467
4A112M4Y3	5,5	1500	4	126	125	1,848	98,960
4A132S4Y3	7,5	1500	4	145	115	2,068	113,883
4A132M4Y3	11	1500	4	145	160	2,180	113,883

$$C(\tau) = a \cdot \ln \tau + b, \text{ где } a = 1.202 \cdot 10^{-9}, b = -3.570 \cdot 10^{-9} \quad (8)$$

Таблица 2. Двигатели серии 4А средней мощности

Типоразмер	P, кВт	n, мин ⁻¹	2р	D, мм	L, мм	C	τ, мм
4A160S4Y3	15	1500	4	185	140	2,087	145,299
4A160M4Y3	18,5	1500	4	185	180	2,002	145,299
4A180S4Y3	22	1500	4	211	145	2,272	165,719
4A180M4Y3	30	1500	4	211	185	2,428	165,719
4A200M4Y3	37	1500	4	238	170	2,562	186,925
4A200L4Y3	45	1500	4	238	215	2,463	186,925
4A225M4Y3	55	1500	4	264	200	2,630	207,345
4A250S4Y3	75	1500	4	290	220	2,702	227,765
4A250M4Y3	90	1500	4	290	260	2,744	227,765
4A280S4Y3	110	1500	4	335	220	2,970	263,108
4A280M4Y3	132	1500	4	335	240	3,267	263,108
4A315S4Y3	160	1500	4	335	290	3,277	263,108
4A315M4Y3	200	1500	4	335	360	3,300	263,108
4A355S4Y3	250	1500	4	380	360	3,206	298,451
4A355M4Y3	315	1500	4	380	470	3,094	298,451

$$C(\tau) = a \cdot \ln \tau + b, \text{ где } a = 1.679 \cdot 10^{-9}, b = -6.279 \cdot 10^{-9} \quad (9)$$

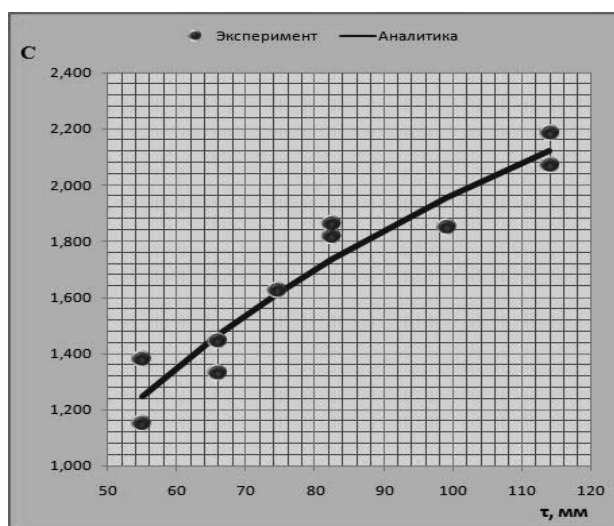
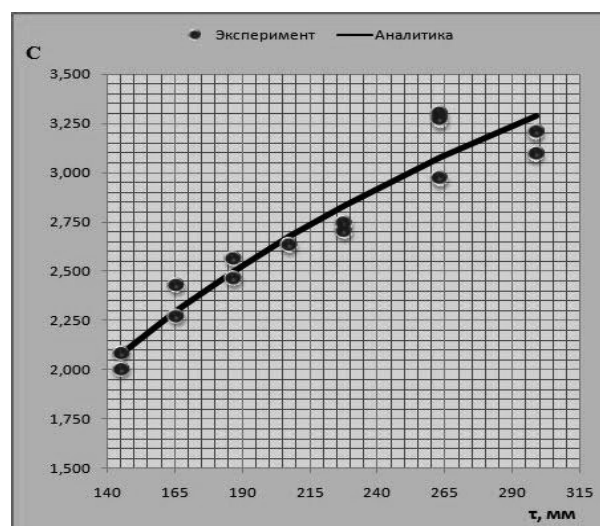

 Рисунок 2. Графики функций $C=f(\tau)$ для двигателей малой мощности

 Рисунок 3. Графики функций $C=f(\tau)$ для двигателей средней мощности

Таблица 3. Результаты исследований асинхронных двигателей серий 4А и ВАО

Скорость, мин ⁻¹	Диапазон мощностей, кВт	Коэффициенты зави- симости $C(\tau) = a \cdot \ln \tau + b$		Примечание
		$a \times 10^{-9}$	$b \times 10^{-9}$	
Единая серия 4А (двигатели малой мощности)				
750	0.55...11	0.78	-1.96	-
1000	0.55...11	1.05	-2.77	-
1500	0.55...11	1.20	-3.57	-
3000	0.55...11	0.94	-3.23	-
Единая серия 4А (двигатели средней мощности)				
750	> 11	0.40	0.71	-
1000	> 11	1.15	-3.15	-
1500	> 11	1.68	-6.28	-
3000	> 11	1.22	-4.65	-
Серия ВАО (двигатели малой мощности)				
750	0.4...13	0.10	0.87	Габарит «0»-«6»
1000	0.4...13	0.37	-0.32	Габарит «0»-«6»
1500	0.4...13	0.64	-1.57	Габарит «0»-«6»
3000	0.4...13	0.46	-1.26	Габарит «0»-«6»
Серия ВАО (двигатели средней мощности)				
750	10...100	0.99	-2.89	Габарит «6»-«8»
1000	10...100	0.05	1.57	Габарит «6»-«8»
1500	10...100	1.60	-6.29	Габарит «6»-«8»
3000	10...100	0.97	-3.95	Габарит «6»-«8»

750, 1000 и 3000 мин⁻¹ для серии 4А и для серии ВАО (табл. 3).

Выводы

Таким образом, в результате проведенного исследования получена методика расчёта мощности электродвигателя, которая позволяет унифицировать рассчитываемые машины, т.е. варьировать их геометрические параметры, влияя, тем самым, на стоимость отдельных узлов машины. Использование методики позволит проводить корректировку затрачиваемых ресурсов на производство, ремонт и модернизацию асинхронных двигателей, так как эти критерии зависят, в первую очередь, от расчётного значения их мощности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лоусон, Ч. Численное решение задач методом наименьших квадратов / Ч. Лоусон, Р. Хенсон; пер. с англ. – М.: Наука, 1986. – 232 с.
2. Advanced Engineering Mathematics / Alan Jeffrey. – Harcourt: «Academic Press», 2002. – 1081 p.
3. Nonlinear Physics with Mathematica for Scientists and Engineers / Richard H.Enns, George C.McGuire. – Boston: «Birkhauser», 2001. – 726 p.

Кроме представленных выше зависимостей, для двигателей со скоростью 1500 мин⁻¹ были получены аналогичные зависимости для двигателей со скоростями

neers / Richard H.Enns, George C.McGuire. – Boston: «Birkhauser», 2001. – 726 p.

“Агропанорама” - научно-технический журнал для работников агропромышленного комплекса. Это издание для тех, кто стремится донести результаты своих исследований до широкого круга читателей, кого интересуют новые технологии, кто обладает практическим опытом решения задач.

Журнал “Агропанорама” включен в список изданий, рекомендуемых Высшей аттестационной комиссией для опубликования результатов диссертационных исследований по сельскохозяйственным и техническим наукам (сельскохозяйственное машиностроение, транспорт, геоэкология, энергетика). Журнал выходит раз в два месяца, распространяется по подписке и в розницу в киоске БГАТУ. Подписной индекс в каталоге Республики Беларусь: для индивидуальных подписчиков - 74884, предприятий и организаций - 748842. Стоимость подписки на второе полугодие 2009 года: для индивидуальных подписчиков - 26670 руб., ведомственная подписка - 52599 руб.