

Выбор параметров элементов стапеля и их взаимная координация осуществляются с соблюдением требований точной геометрической соизмеримости и взаимозаменяемости стандартных базовых элементов, в то время как закономерности построения рядов предпочтительных чисел и нормальных линейных размеров не всегда отвечают этим требованиям.

Более целесообразным, как показала практика, является путь упорядочения параметрических характеристик сварочного стапеля. Кроме того, применение стандартных и унифицированных элементов сварочного стапеля позволяет разрабатывать не только отдельные инновационные элементы стапеля, но и целые комплексы – конструктивно-унифицированные, полуавтоматические и автоматические линии [1, с. 320].

Подводя итоги, можно сделать вывод о том, что стандартизация является необходимым условием создания соразмерных элементов сварочного стапеля (рис. 4). При этом стандартные решения должны выступать как базовые элементы, с помощью которых конструктор осуществляет проектирование быстро трансформируемой, перенастраиваемой в условиях реального производства технологической оснастки.



Рис. 4. Технологическая оснастка в условиях сварочного производства

Литература

1. Ветер В.В., Белкин Г.А., Самойлов М.И. Инновационные процессы в сварке и металлургии. Липецк: Гравис, 2011.
2. Иванов В.В. Практика расчета размерных цепей в машиностроении. Киев, Машгиз, 1960.
3. Будкин Ю.В. Механизм и модели управления эффективностью инновационных процессов в сварочном производстве. М.: РУСАКИ, 2007.

Моделирование переходных процессов «угасания» характеристик электродвигателей при отключении питания

А.А. Лисов

профессор кафедры «Электроника и информатика» НИУ МАИ; Москва

Т.А. Чернова

профессор кафедры «Электроника и информатика» НИУ МАИ; Москва

М.С. Горбунов

учебный мастер кафедры «Электроника и информатика» НИУ МАИ; Москва

П.В. Кубрин

аспирант кафедры «Электроника и информатика» НИУ МАИ; Москва

Сегодня трудно назвать отрасль человеческой деятельности, где не применяют различные по размерам и мощности асинхронные электродвигатели (ЭД). Такие двигатели отличаются простотой конструкции и высокой надежностью. Их недостатками являются небольшой коэффициент мощности в диапазоне малых оборотов и ограниченная скорость вращения. Однако, несмотря на такие ограничения, использование их возрастает. Для наиболее ответственных конструкций предупреждение отказов таких двигателей остается актуальной проблемой.

Существуют различные школы расчета процессов в электрических машинах. Как правило, результативные расчеты могут проводить специалисты-электромеханики с применением сложного, громоздкого информационно-компьютерного



обеспечения. Тем не менее, в широкой практике эксплуатации электрических машин для их экспресс-диагностики может быть использован анализ частотной характеристики ротора в режиме выбега, т.е. при отключении электродвигателя от сети. По значениям параметров дифференциального уравнения выбега ЭД можно судить о конкретных показателях конкретного типоразмера двигателя, его техническом состоянии и продолжительности безотказной эксплуатации и даже о состоянии его ведущих элементов. Поэтому задачей настоящей работы является моделирование режима выбега асинхронного ЭД.

Получив экспериментальные данные частотной характеристики ротора, в каждом плановом контроле для нее можно установить закономерность и таким образом оценить состояние ведущих элементов и показатели ЭД в последующей эксплуатации. Для определения параметров дифференциального уравнения свободных затухающих колебаний в практических условиях эксплуатации ЭД возникает необходимость решения следующих задач:

- установить для такого двигателя физическую сущность, составляющие и закономерности протекающих процессов;
- выполнить анализ этих процессов в конкретном асинхронном ЭД при отключении питания; выбрать аппарат для анализа конкретного ЭД в рассматриваемом режиме;
- подтвердить адекватность применяемого метода моделирования механических и электромагнитных процессов;
- для подтверждения соответствия результатов расчетов экспериментальным зависимостям необходимо разработать алгоритм и выполнить вычислительный эксперимент по числовым данным конкретного ЭД.

В стандартном исполнении рассматриваемый двигатель состоит из статора и ротора, изготовленных из листов электротехнической стали, в них специальным образом укладывается медная обмотка. Подача тока на обмотку статора вызывает вращение. Электродвигатель и как механическая система, и как электромагнитная образует упругую колебательную систему, для которой характерна периодичность, изменения фазы φ , угловой частоты ω и мгновенного ускорения α . Колебания инерционных систем можно разделить на вынужденные и свободные.

Вынужденные колебания обусловлены внешними возмущениями. Однако после исключения внешних возмущений в системе колебания, возникающие в дальнейшем под воздействием различных причин, называют *свободными*. Все сво-

бодные колебания с течением времени затухают. В частности, в механических колебательных системах убывание энергии обусловлено потерями ее при трении в опорах, при трении в процессе вращения ротора о воздух и при преобразовании ее в тепло. В электромагнитном колебательном контуре потери энергии обусловлены преобразованием ее в тепло в активных сопротивлениях и при излучении электромагнитных волн.

Механические колебания подвижных частей ЭД и электромагнитные колебания в его обмотках в режиме выбега при отключенной сети питания представляют собой свободные затухающие колебания. В этом режиме насыщение магнитного поля ферромагнитных участков снижается, поэтому параметры ЭД можно считать постоянными. Колебательные системы, в которых параметры, определяющие физические свойства, остаются неизменными в ходе всего процесса затухания, называются *линейными системами*. В линейных электромагнитных системах активное сопротивление, индуктивность и емкость не зависят ни от проходящих через них токов, ни от приложенных к ним напряжений.

В линейных механических колебательных системах распределение масс остается постоянным в течение всего процесса затухания. Для описания линейных колебательных систем используют, как правило, *линейные дифференциальные уравнения*. Последнее дает основания к исследованию колебаний различной физической природы, к их моделированию с единых позиций, едиными методами, в том числе и к моделированию на ЭВМ. Математической моделью механического вращения ротора в режиме выбега служит дифференциальное уравнение вида [1–3]:

$$J \frac{d^2 n}{dt^2} + R \frac{dn}{dt} + D \cdot n = 0, \quad (1)$$

представляющее свободные затухающие колебания линейной системы. Параметры J, R, D характеризуют физические механические свойства элементов ЭД. Для вычислительного эксперимента при анализе механического вращения ротора в режиме выбега выбран трехфазный короткозамкнутый двигатель с параметрами [4]:

Полезная мощность	кВт
Число фаз.....	$m = 3$;
Соединение фаз.....	Δ/γ
Напряжение питания	$U = 220/380$ В;
Частота питания	$f = 50$ Гц;
Скорость вращения ротора	$n = 1500$ об./мин;
Исполнение.....	нормальное.

Основные геометрические размеры, используемые в расчете:

Внешний диаметр ротора..... $D_r = 18$ см;
 Длина ротора $l_r = 12,8$ см;
 Вес стержней короткозамкнутой обмотки ротора $G_s = 1,58$ кг.

Другие геометрические размеры:

Высота яра ротора..... $h_r = 3$ см;
 Диаметр вала $d_b = 6$ см;
 Высота зубцовой зоны ротора..... $h_z = 3$ см;
 Наружный диаметр статора $D_s = 20$ см;
 Длина статора $l_s = 20$ см;
 Воздушный зазор..... $\delta = 0,45$ мм;

1. При заданных параметрах и геометрических размерах масса ротора:

$$m_r = \frac{\pi D_r^2 L_r \rho}{4 g} = \frac{\pi \cdot 18^2 \cdot 12,8 \cdot 7,8}{4 \cdot 9,8} = 2,6 \text{ кг.} \quad (2)$$

здесь $\rho = 7,8$ г/см³ – удельный вес стали.

2. Момент инерции ротора, как сплошного цилиндра, вычисленный относительно оси вращения, проходящей через центр масс:

$$J = \frac{m_r}{2} \left(\frac{D_r}{2} \right)^2 = \frac{2,6 \cdot 18^2}{8} = 105,3 \text{ кг}\cdot\text{см}^2. \quad (3)$$

3. Число пар полюсов статора p можно определить из соотношения:

$$f = \frac{pn}{60} \quad p = \frac{60f}{n} = \frac{60 \cdot 50}{1500} = 2. \quad (4)$$

4. Угловая частота вращения ротора:

$$\omega = 2\pi f = 2\pi \cdot 50 = 314 \text{ 1/с} \quad (5)$$

5. Важной характеристикой любого электродвигателя, определяющей его механические свойства, является его механическая постоянная времени T_m . Для современных асинхронных короткозамкнутых двигателей при заданной частоте питания постоянную времени определяют из эмпирических соотношений [4]:

$$T_m = P_h^\alpha,$$

где: $\alpha = 0,28$ при $P_h = 0.3 \dots 20$ кВт;
 $\alpha = 0,34$ при $P_h = 20 \dots 100$ кВт;
 $\alpha = 0,42$ при $P_h = 100 \dots 500$ кВт;
 $\alpha = 0,63$ при $P_h = 500 \dots 5000$ кВт;

6. Электромагнитный момент двигателя:

$$M = P_h / \omega = 13000/314 = 41,4 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

7. Для заданного двигателя $T_m = 13^{0,28} \cong 2,05$ с. Механическая постоянная времени T_m и момент инерции J вращающихся частей электродвигателя определяют время разгона или останова электродвигателя τ :

$$\tau = \frac{195G_s}{M_{cp}} = \frac{195 \cdot 1,58}{50} = 6,162 \text{ с}.$$

Следует отметить, что всякий переходный процесс, каковым является интервал останова двигателя, заканчивается практически за 3 постоянных времени:

$$\tau_n \cong 3T_m = 3 \cdot 2,05 = 6,15 \text{ с}.$$

В данном случае получилось близкое совпадение оценок времени останова ЭД, вычисленных, в целом, разными способами.

8. В режиме останова (выбега ЭД) электромагнитная постоянная времени определяется параметрами ротора (здесь из [4] $r_r = 0,90$ м; $L_r = 0,048$ Гн.)

$$\tau_r = \frac{L_r}{r_r} = \frac{0,048}{0,9} = 0,05 \text{ с}. \quad (6)$$

9. Дифференциальное уравнение (1) останова ротора относительно скорости его вращения можно записать в приведенной форме:

$$\frac{d^2 n}{dt^2} + \frac{R}{J} \frac{dn}{dt} + \frac{D}{J} n = 0. \quad (7)$$

Если корни характеристического уравнения (7) действительны и различны, то его решение можно записать в виде, причем, для заданного ЭД:

$$K_1 = \frac{1}{T_m} = 0,5, \quad K_2 = \frac{1}{T_\beta} = 20.$$

$$n(t) = A_1 e^{-K_1 t} + A_2 e^{-K_2 t}. \quad (8)$$

10. В табл. 1 и на рис. 1 представлены данные исследуемого ЭД в режиме останова, выбега (расчетные значения).

Таблица 1.

Данные исследуемого ЭД в режиме выбега

№	1	2	3	4	5	6	7
T	0	0,5	1	2	3	4	6
n	1500	11,87	925	561	340	206	76
n'	-250	-594	-462	-280	-170	-103	-38
n_p	1500	11,88	925	561	340	206	76
Δ	0	1	0	0	0	0	0



11. По данным *табл. 1* и на основании предложенного алгоритма получены коэффициенты уравнения (7), равные: $R/J = 20,5$; $D/J = 10$, и далее искомая расчетная аналитическая функция $n_p(t)$:

$$n_p(t) = 1525,64e^{-0,5t} - 25,64e^{-20t}. \quad (9)$$

12. Угловая жесткость ротора

$$D = \omega_0^2 J = 10 \cdot 105,3 = 1053 \text{ кг} \cdot \text{см}^2/\text{с}^2.$$

13. Частота свободных колебаний

$$\omega_0 = \sqrt{10} = 3,161/\text{с}.$$

14. Коэффициент затухания колебаний ротора

$$\beta = \frac{1}{2} \frac{R}{J} = 10,25 \text{ 1/с}.$$

В процессе останова при уменьшении скорости (частоты) вращения ротора увеличиваются периоды его оборотов, причем постоянные времени равны:

$$T_1 = \frac{1}{K_1} = \frac{1}{0,5} = 2 \text{ с}; \quad T_2 = \frac{1}{K_2} = \frac{1}{20} = 0,05 \text{ с}.$$

Можно утверждать, что первое слагаемое в (9) обусловлено накопленной механической энергией вращающегося ротора, а второе слагаемое – накопленной энергией электромагнитных полей. Причем, электромагнитная составляющая в режиме выбега оказывает тормозной скоротечный эффект. Сравнение функций графика (*рис. 1*) показывает хорошее совпадение экспериментальной $n(t)$ и расчетной $n_p(t)$ кривой выбега.

Можно предположить, что в процессе эксплуатации даже в ЭД закрытого исполнения в результате трения металлических поверхностей активные поверхности статора и ротора загрязняются, больше перегреваются, активные сопротивления обмоток увеличиваются, из-за трения в подшипниках момент сопротивления увеличивается, потери электрические и магнитные увеличиваются и т.д., происходят деградиционные изменения. Выполнив дополнительно статистический анализ с привлечением факторного анализа, можно установить зависимость числовых параметров ЭД и функции (9), отражающей характер затухания скорости вращения ротора в режиме выбега.

По значениям параметров дифференциального уравнения выбега двигателя с конкретными физическими и конструктивными данными можно судить о его техническом состоянии и продолжительности безотказной эксплуатации, составить

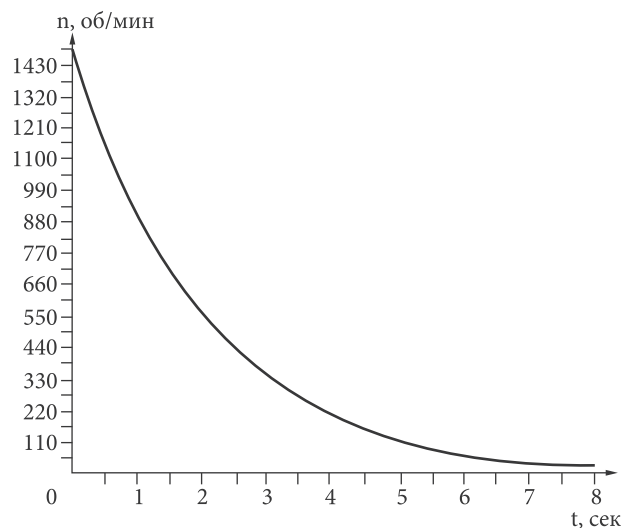


Рис. 1. Затухание скорости вращения ротора в режиме выбега

прогноз на поведение исследуемого ЭД в процессе эксплуатации.

Выводы

1. Выполнен анализ процессов конкретного асинхронного ЭД с короткозамкнутым ротором средней мощности при отключении от источника питания (в режиме выбега); установлена физическая сущность, составляющие и закономерности протекающих процессов.
2. Подтверждена адекватность предложенной модели механических и электромагнитных процессов электродвигателей при отключении питания (в режиме выбега), полученной на основе решения задачи Коши для обыкновенных дифференциальных уравнений.
3. Разработан алгоритм, на его основе проведен вычислительный эксперимент и установлено соответствие результатов расчетов реальным зависимостям и процессам; подготовлена база для последующего прогнозирования состояния ЭД по аналитической функции $n(t)$.

Литература

1. Алексеев Г.В. Введение в численные методы решения дифференциальных уравнение. Учебное пособие. – Владивосток.: ДВФУ, 2010.
2. Кожевник Я. Механика вращающихся электрических машин. – М.: Госэнергоиздат, 1962.
3. Барков А.В., Баркова Н.А. Анализ вибрации. Учебное пособие. – СПб.: СПбГМТУ, 2004.
4. Сергеев П.С., Виноградов Н.В., Горяинов Ф.А. Проектирование электрических машин. Учебное пособие. – М.: Энергия, 1969.