

*к.т.н. Комаревцева Л.Н.,
Худобин К.В.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)*

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МОЩНОСТИ ДВИГАТЕЛЯ ЦЕНТРИФУГИ С ЗАДАННЫМ МОМЕНТОМ ИНЕРЦИИ, РАБОТАЮЩЕГО ПО СПЕЦИАЛЬНОМУ ГРАФИКУ

Запропонована методика попереднього визначення потужності двигуна для механізмів із заданим моментом інерції, що працює по спеціальному графіку. У основу методу покладена величина динамічного моменту приводу. Досліджені механічні перехідні процеси розрахованого двошвидкісного двигуна центрифуги, які підтвердили відповідність вибраній потужності двигуна вимогам механізму.

Ключові слова: *момент інерції приводу, спеціальний графік, потужність двигуна, рівняння руху приводу зі змінним моментом інерції, середня потужність електричних втрат.*

Предложена методика предварительного определения мощности двигателя для механизмов с заданным моментом инерции, работающих по специальному графику. В основу метода положена величина динамического момента привода. Исследованы механические переходные процессы рассчитанного двухскоростного двигателя, которые подтвердили соответствие выбранной мощности двигателя требованиям механизма.

Ключевые слова: *момент инерции привода, специальный график, мощность двигателя, уравнение движения привода с переменным моментом инерции, средняя мощность электрических потерь.*

Определение мощности двигателя не представляет каких-либо затруднений только в случае, когда механизмы, приводимые ими в движение, работают в длительном режиме с постоянной нагрузкой.

В ряде производств двигатели работают в повторно-кратковременных режимах, которые входят в рамки ГОСТ 183. Особую группу механизмов составляют центрифуги для сушки сыпучих материалов, которые работают в повторно-кратковременном режиме по специальному графику (таблица 1). При этом, в ходе рабочего процесса, изменяется приведенный момент инерции привода.

Из анализа специальной технической литературы можно сделать выводы, что для работы в специальных режимах выбирают двигатели из модификаций, предназначенных для работы в режимах S3 (или S4) с некоторым запасом относительно известной мощности, который принимается из-за возникновения дополнительных потерь переходных режимов при торможении или реверсе двигателя. После выбора двигателя необходимо исследовать переходные процессы и определить величину потерь в обмотках машины. Такой подход не позволяет на стадии выбора мощности приводного двигателя учесть влияние переходных процессов и особенности графика его работы, который заключается в том, что в ходе работы механизма изменяется его момент инерции.

В таблице 1 приведен график работы центрифуги, для которой по техническим данным рассчитана величина момента инерции привода на различных подциклах его работы.

Таблица 1 - Специальный график работы двигателя центрифуги

№ п/п	Наименование подциклов	Момент инерции центрифуги Н·м ·с ²		Время, с
		Нач.	Кон.	
1	Разгон двигателя до частоты вращения 320 об/мин	135	135	19
2	Загрузка центрифуги при частоте вращения ротора 320 об/мин	135	213	12
3	Разгон загруженной центрифуги до частоты вращения 970 об/мин	213	213	27
4	Сушка материала на частоте вращения 970 об/мин	213	190	300
5	Торможение двигателя с рекуперацией электроэнергии в сеть путем переключения обмотки статора на пониженную синхронную частоту вращения (320 об/мин)	190	190	12
6	Торможение механическим тормозом	190	190	60
7	Выгрузка и стоянка центрифуги			60
	Длительность цикла			490

В данной работе предлагается метод предварительного определения мощности приводного двигателя, в основе которого лежит величина динамического момента привода, что уже на этой стадии позволяет учесть механические переходные процессы привода.

Величина динамического момента привода равна

$$M_{дин} = -J \cdot \frac{d\Omega}{dt} = -J \cdot \varepsilon, \quad (1)$$

где J – приведенный момент инерции привода;
 ε – угловое ускорение.

На первом этапе определения мощности приводного двигателя можно принять, что разгон и торможение двигателя является равноускоренным. Тогда угловое ускорение двигателя будет равно

$$\varepsilon_i = \frac{\pi}{30} \cdot \frac{n_{кон} - n_{нач}}{\Delta t_i}, \quad (2)$$

где $n_{кон}$ - конечная частота подцикла;

$n_{нач}$ - начальная частота подцикла;

$\Delta t_i = t_{кон} - t_{нач}$ - длительность подцикла, для которого определяется мощность двигателя.

Нагрузочный момент двигателя при установившемся режиме работы центрифуги, который практически определяется моментом сил трения в подшипниках и центрифуги о воздух, мал, и его можно принять, равным $(0,1 \div 0,15) \cdot M_{дин}$. Тогда момент сопротивления на валу двигателя, который определяет потребную мощность, будет равен

$$M_c = (1,1 \div 1,15) \cdot M_{дин}. \quad (3)$$

Мощность приводного двигателя будет равна

$$P_{дв} = M_c \cdot \frac{\pi}{30} \cdot n_{кон}. \quad (4)$$

Наиболее энергоемкими подциклами (таблица 1) работы двигателя является 1 и 3. Расчет угловых ускорений, динамического, нагрузочного моментов, необходимой мощности приводного двигателя для 1 и 3 подциклов приведен в таблице 2.

Наилучшим решением выбора приводного двигателя, работающего от сети промышленной частоты, является использование двухскоростного асинхронного двигателя, у которого число пар полюсов должно быть равным: $p_1 / p_2 = 3 / 9$.

Таблица 2 – Расчет мощности двигателя центрифуги с заданным моментом инерции привода для работы по специальному графику

Рассчитываемая величина			Режим работы центрифуги	
Название	обозначение	единицы	Разгон и загрузка	Рабочий режим
начальная частота	$n_{нач}$	об/мин	0	320
конечная частота $n_{кон}$	$n_{кон}$	об/мин	320	950
момент инерции	J	кг·м ²	135	213
время работы	t	с	16	30
угловое ускорение	ε	с ⁻²	2,1	2,2
Динамический момент	$M_{дин}$	Н·м	282,6	468,174
Нагрузочный момент	M_c	Н·м	324,99	538,40
Необходимая мощность двигателя	$P_{дв}$	кВт	10,88	53,53

Учитывая действующие стандарты на шкалу мощностей (ГОСТ 12139) для осуществления заданного режима работы центрифуги двухскоростной двигатель должен иметь мощность:

$$P_{1н} = 55 \text{ кВт};$$

- при работе с числом пар полюсов $p_2 = 9$ (разгон и торможение центрифуги)

$$P_{2н} = 11 \text{ кВт}.$$

Для проверки правильности предложенного метода предварительного определения мощности был спроектирован двухскоростной асинхронный двигатель по известной методике, изложенной в [3]. Номинальные данные двигателя, величины потерь в обмотках и их перегрев при работе двигателя в режиме S1, приведены в таблицах 3 – 4, соответственно.

Проектирование двигателя, исследование его переходных режимов осуществлялось в среде MathCAD.

Таблица 3 – Номинальные данные спроектированного асинхронного двухскоростного двигателя

P_n	Число пар полюсов	U_n	I_n	s_n	$\cos \varphi_n$	η_n	$\frac{I_n}{I_n}$	$\frac{M_n}{M_n}$
кВт		В	А	%	О.е.	%	О.е.	О.е.
55	3	380	101,85	2,08	0,868	91,1	3,628	0,735
11	9	380	32,05	4,13	0,567	81,48	2,547	1,082

Таблица 4 – Данные расчета потерь и температуры перегрева обмоток статора в режиме S1

P_n	$P_{ст}$	$P_{мех}$	$P_{доб.н}$	$P_{эл1}$	$P_{эл2}$	$P_{эл} = P_{эл1} + P_{эл2}$	Перегрев обмоток статора
кВт	Вт	Вт	Вт	кВт	кВт	кВт	$^{\circ}\text{C}$
55	834,4	454,06	295,7	2,571	1,192	3,763	92,6
11	407,1	50,45	68,7	1,469	0,482	1,951	54,3

Величины, которые в процессе расчета пусковых характеристик были определены массивом точек, в программе исследования переходных процессов были заданы аналитически. Пакет MathCAD имеет несколько встроенных программ, которые позволяют задавать массивы данных аналитически. В данной работе была использована встроенная функция $linterp(v_x, v_y, x)$.

Эта функция возвращает линейное интерполированное значение в x для векторов данных v_x и v_y .

Интерполированные кривые механических характеристик, тока обмоток статора и ротора, активного сопротивления обмотки ротора, которые рассчитаны с учетом эффекта вытеснения тока и насыщения коронок зубцов спроектированного двигателя, приведены на рисунках 1 – 4, соответственно. Кривые с индексом «1» относятся к двигателю при числе пар полюсов $p_1 = 3$, с индексом «2» - при $p_2 = 9$.

Для оценки правильности нахождения мощности приводного двигателя необходимо определить электрические потери в обмотках.

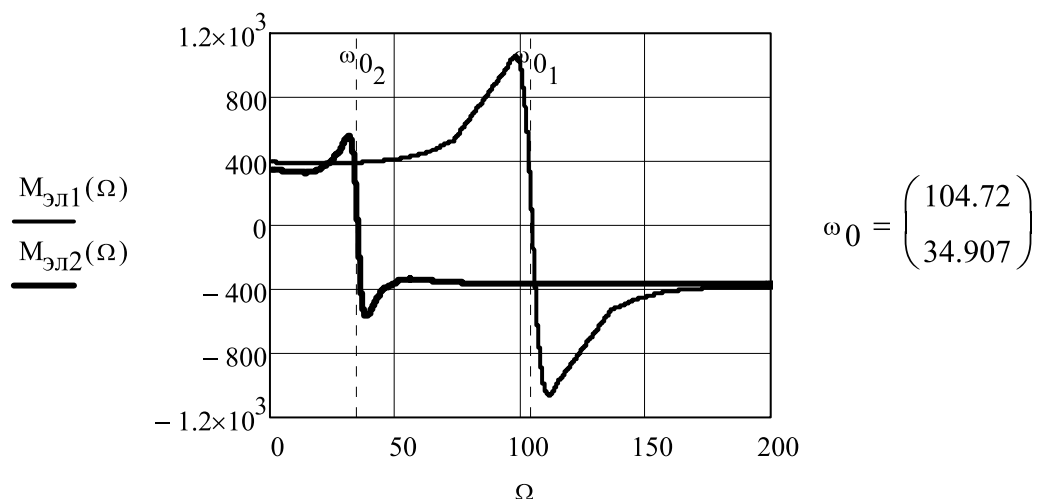


Рисунок 1 – Механические характеристики двигателя

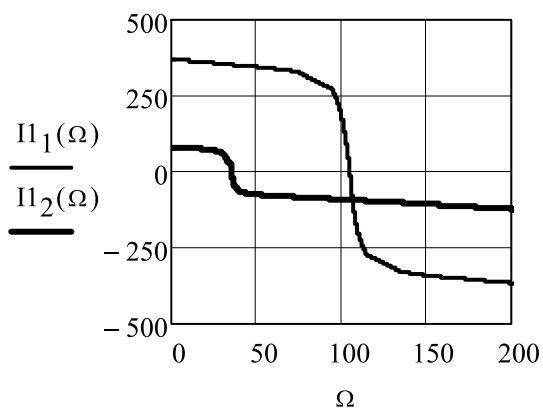


Рисунок 2 – Характеристики ток статора

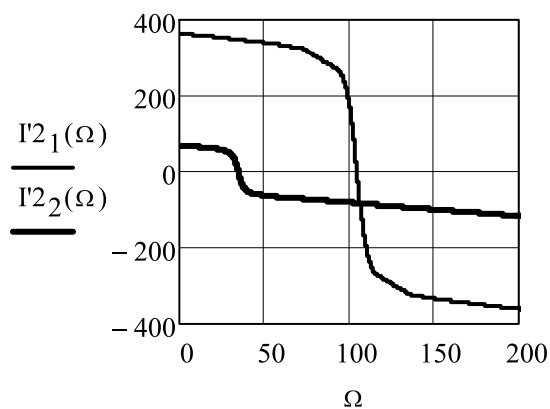


Рисунок 3 – Характеристики приведенного тока ротора

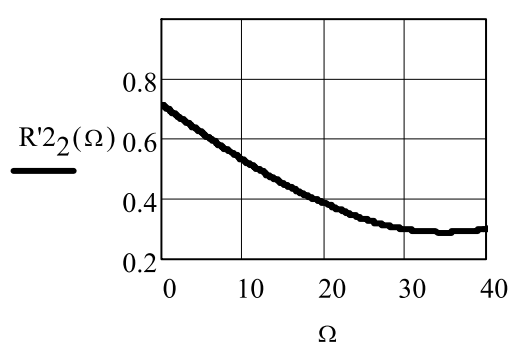
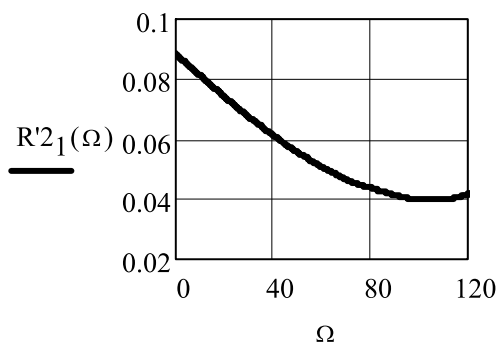


Рисунок 4 – Зависимости величины активного сопротивления обмотки ротора от угловой скорости вращения

Для определения средней величины электрических потерь в обмотках статора и ротора необходимо исследовать переходные процессы привода с целью нахождения величины энергии электрических потерь в обмотках за цикл. Как известно, точная математическая модель исследования переходных режимов базируется на уравнениях Парка-Горева [4]. Но эта модель не учитывает зависимость параметров машины от эффекта вытеснения тока и насыщения коронок зубцов. Модель, которая учитывает указанные явления, достаточно сложная и громоздкая. Исходя из того, что механическая постоянная привода, которая определяется моментом инерции механизма, значительно больше электромагнитной постоянной обмоток машины, можно использовать математическую модель, которая учитывает только механические переходные процессы. Эта математическая модель базируется на уравнении движения привода.

Одна из особенностей работы двигателя центрифуги заключается в том, что в процессе работы двигателя момент инерции привода изменяется. В этом случае уравнение баланса мощности электропривода и рабочей машины можно записать в следующем виде

$$P_{дин} = P_{эл} - P_c, \quad (5)$$

где $P_{дин}$ – мощность динамического момента;

$P_{эл}$ – электромагнитная мощность;

P_c – мощность сил сопротивления на валу машины.

Динамическая мощность равна производной от запаса кинетической энергии системы по времени

$$P_{дин} = \frac{dT}{dt} = \frac{d(J\Omega^2/2)}{dt} = J \cdot \Omega \cdot \frac{d\Omega}{dt} + \frac{\Omega^2}{2} \cdot \frac{dJ}{dt}. \quad (6)$$

Полученную зависимость (6) подставим в уравнение (5), после несложных преобразований получим систему уравнений движения привода с переменным моментом инерции:

$$\begin{aligned} \frac{d\Omega}{dt} &= \frac{M_{эл} - M_c - \frac{\Omega}{2} \cdot a_J}{J}; \\ \frac{dJ}{dt} &= a_J. \end{aligned} \quad (7)$$

Мощность электрических потерь в обмотках статора можно записать следующими уравнениями

$$\begin{aligned} \frac{dW_{эл1}}{dt} &= P_{эл1} = m_1 [(I_1(\Omega))^2 R_1]; \\ \frac{dW_{эл2}}{dt} &= P_{эл2} = m_1 [(I'_2(\Omega))^2 R'_2(\Omega)]. \end{aligned} \quad (8)$$

Если (8) проинтегрировать во времени, то получим энергию, которая выделяется за цикл работы в обмотке статора и обмотке ротора, соответственно.

Исследование переходных процессов двигателя центрифуги, было проведено с помощью численного метода Рунге-Кутты с постоянным шагом, который в среде MathCAD представлен функцией

$$rkfixed(y_0, T_n, T_k, N, U),$$

где y_0 - матрица начальных условий переменных, которые исследуются;

T_n, T_k - начальное и конечное время интегрирования, соответственно;

N – количество шагов на интервале интегрирования

$U(x, y)$ - матрица правых частей уравнений математической модели.

Программа расчета приведена на рисунке 5. Графики изменения энергии электрических потерь в двигателе за цикл приведены на рисунке 6.

Из рисунка 6 следует, что за время цикла ($t_y = 490$ с.) в обмотках статора и ротора выделяются потери, сумма которых равна:

$$\begin{aligned} (P_{эл1} + P_{эл2})_{p=3} &= \frac{W_{эл1}}{t_y} = \frac{1844}{490} = 3,763, \\ (P_{эл1} + P_{эл2})_{p=9} &= \frac{W_{эл2}}{t_y} = \frac{571}{490} = 1,165. \end{aligned}$$


```

D2 = | n ← 1
      | Ω0 ← 0
      | W01 ← 0
      | W02 ← 0
      | N ← 1000
      | for k ∈ 1..6
      |   y0 ← (Ω0 W01 W02 JHk)T
      |   U(t,y) ← [
      |     [
      |       
$$\frac{M_{эл}(y1)_k - M_{с_k} - \frac{y1}{2} \cdot a_{J_k}}{y4}$$

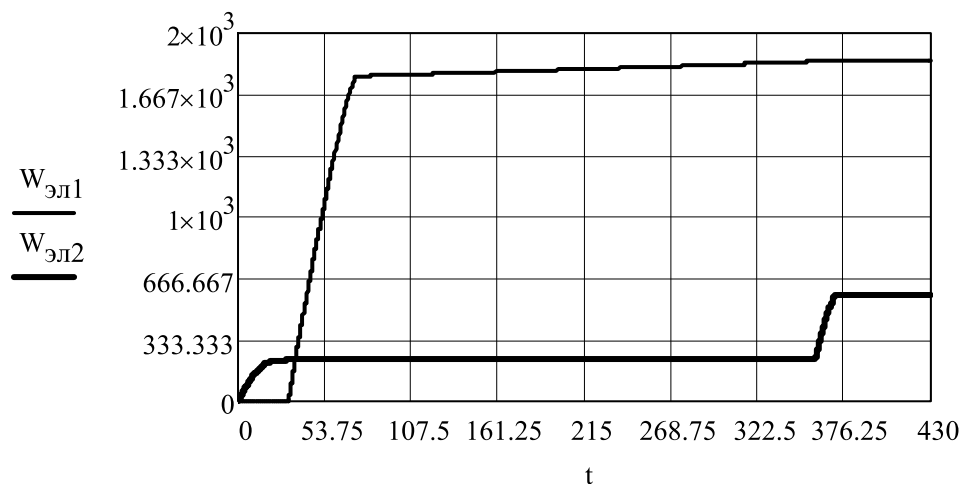
      |     ]
      |     [
      |       
$$m_1 \cdot (I_{11}(y1)_k)^2 \cdot R_{1_k} + m_1 \cdot (I'_{21}(y1)_k)^2 \cdot R'_2(y1)_k$$

      |       
$$m_1 \cdot (I_{12}(y1)_k)^2 \cdot R_{1_k} + m_1 \cdot (I'_{22}(y1)_k)^2 \cdot R'_2(y1)_k$$

      |     ]
      |     aJk
      |   ]
      |   V ← rkfixed(y0, THk, TKk, N, U)
      |   Ω0 ← (V<2>)N
      |   W01 ← (V<3>)N
      |   W02 ← (V<4>)N
      |   Mс6 ←  $\frac{(V^{<2>})_N}{T_{K_6} - T_{H_6}} \cdot J_{H_6}$  if k ← 6
      |   for i ∈ 1..N
      |     wn,1 ← (V<1>)i
      |     wn,2 ← (V<2>)i
      |     wn,3 ← (V<3>)i
      |     wn,4 ← (V<4>)i
      |     wn,5 ← (V<5>)i
      |     n ← n + 1

```

Рисунок 5 – Программа определения энергии электрических потерь двухскоростного двигателя, работающего по специальному графику



$W_{эл1}$ - суммарная энергия электрических потерь в обмотках двигателя с $p = 3$.

$W_{эл2}$ - суммарная энергия электрических потерь в обмотках двигателя с $p = 9$.

Рисунок 6 – Графики изменения энергии электрических потерь в обмотках машины.

Выводы. Сравнительный анализ средней величины электрических потерь в обмотках двухскоростного двигателя, работающего по специальному графику не превышает величины электрических потерь в обмотках двигателя в режиме S1, приведенных в таблице 2.

Это говорит о том, что предложенная методика предварительного определения мощности привода по заданному моменту инерции и графику работы привода, позволяет на стадии проектирования двигателя учитывать переходные процессы механизма.

Библиографический список

1. Ключев В.И., Терехов В.М. *Электропривод и автоматизация общепромышленных механизмов: Учебник для вузов.* – М.: Энергия, 1980. – 360 с., ил.
2. Андреев В.П., Сабинин Ю.А. *Основы электропривода.* – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 772 с., ил.
3. *Проектирование электрических машин: Учеб. Пособие для вузов/И.П. Копылов, Ф.А. Горяинов, Б.К. Клоков и др.; Под ред. И.П. Копылова.* – М.: Энергия, 1980. – 496 с., ил.
4. Ковач К.П., Рац И. *Переходные процессы в машинах переменного тока.* – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 774 с.

Рекомендовано к печати д.т.н., проф. Заблудским Н.Н.