

К ВОПРОСУ СИНХРОНИЗАЦИИ ПРИВОДНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ВИБРОМАШИН ДЛЯ ОБРАБОТКИ ДЛИННОМЕРНЫХ ДЕТАЛЕЙ

М. А. Калмыков

Кандидат технических наук, доцент
Кафедра «Компьютерные системы и сети»*

А. В. Романченко

Аспирант
Кафедра «Технология машиностроения»*
Контактный тел.: 099-038-24-79, (0642) 55-25-08
E-mail: romanchenkoav@mail.ru

Б. Н. Локотш

Кандидат технических наук, профессор
Кафедра «Компьютерных наук»*

В. В. Яковенко

Доктор технических наук, профессор, заведующий
кафедрой
Кафедра «Электромеханика»*
Восточноукраинский национальный университет
им. Владимира Даля
кв. Молодежный, 20А, г. Луганск; Украина, 91034

Проведен аналіз роботи системи синхронізації двигунів вібраційного верстата за схемою електричного валу. Розроблена методика розрахунку стійкості роботи системи синхронізації приводу вібраційного верстата

Ключові слова: електричний вал, привід, синхронізація, асинхронна машина

Проведен анализ работы системы синхронизации двигателей вибрационного станка по схеме электрического вала. Разработана методика расчета устойчивости работы системы синхронизации привода вибрационного станка

Ключевые слова: электрический вал, привод, синхронизация, асинхронная машина

The analysis of work of the synchronization system of oscillation machine-tool engines is conducted on the chart of electric billow. The method of calculation of stability of work of the synchronization system of oscillation machine-tool drive is developed

Keywords: electric billow, drive, synchronization, asynchronous machine

1. Введение

Вибрационная обработка длинномерных деталей возможна при длине контейнера соответствующей длине деталей, например, труб. При этом соотношение площади сечения контейнера и квадрата его длины оценивается коэффициентом удлинения, который находится в пределах

$$k_d = \frac{l^2}{S^2} = 4 \dots 16 .$$

Практикой установлено, что при $k_d > 4$ требуется увеличение жесткости контейнера, а, следовательно, и увеличение его массы, если в качестве электромехани-

ческого привода использовать один электродвигатель. Причем мощность электродвигателя возрастает прямо пропорционально коэффициенту k_d .

2. Постановка проблемы

Использовать несколько дебалансных механизмов по длине контейнера на одном валу крайне нежелательно, т.к. при передаче значительных вращающихся моментов и большей длине вала может возникнуть недопустимое скручивание вала. Поэтому взамен громоздкой механической передачи предлагается использовать систему, состоящую из нескольких электродви-

гателей с отдельными дебалансными механизмами, работающими синхронно, которую для простоты называют электрическим валом. Помимо упрощения кинематической схемы механизма электрический вал дает возможность увеличить угловую скорость, т.к. снимаются ограничения, обусловленные механическим резонансом, и, кроме того, упрощается управление механизмом.

Электрический вал находит применение для привода таких механизмов, как разводные мосты, затворы шлюзов, мостовые краны, крупные токарные станки и т.п. Поскольку система электрического вала при вибрационной обработке применяется впервые, требуется проведение определенных исследований работы электрического вала в качестве привода длинномерных вибрационных станков.

3. Исследование устойчивости работы системы синхронизации асинхронных двигателей дебалансов вибрационного станка

Работа электрического вала в условиях привода вибрационного станка может быть проанализирована с помощью аналитических зависимостей, приведенных в [1, 2, 3, 4].

Рассматриваются следующие величины:

θ - угол рассогласования между роторами асинхронных двигателей или между э.д.с.;

E_{21} – э.д.с. ротора вспомогательного двигателя ВД1;

E_{22} – э.д.с. ротора вспомогательного двигателя ВД2;

E_y – уравнивающая э.д.с.;

I_y – уравнивающий ток.

При появлении токов в роторной цепи вспомогательных машин возникают токи в их статорах, которые вызовут соответствующее падение напряжения. Величина активной составляющей падения напряжения в обмотке статора невелика и ею пренебрегают.

Эквивалентная схема двигателя содержит следующие элементы:

x_{11} – индуктивное сопротивление обмотки статора ВД1;

x_{12} – индуктивное сопротивление обмотки статора ВД2;

x'_{21} – индуктивное сопротивление обмотки ротора, приведенное к первичному напряжению статора ВД1;

x'_{22} – индуктивное сопротивление обмотки ротора, приведенное к первичному напряжению статора ВД2;

r'_{21} – активное сопротивление обмотки ротора, приведенное к первичному напряжению ВД1;

r'_{22} – активное сопротивление обмотки ротора, приведенное к первичному напряжению ВД2;

Вспомогательные машины выбраны однотипными, следовательно, параметры их одинаковы, тогда

$$r'_{21}=r'_{22}=r'_2;$$

$$x_{11}+x'_{21}=x_{12}+x'_{22}=x_s.$$

Пусть

V_2 – напряжение статора ВД2;

V_1 – напряжение статора ВД1;

E'_y – уравнивающая э.д.с., приведенная к первичному напряжению;

θ - угол рассогласования.

Имеем

$$E'_y = 2U \sin \frac{\theta}{2}; \tag{1}$$

ток в эквивалентной схеме равен

$$I_y = \frac{2U \sin \frac{\theta}{2}}{2 \sqrt{\left(\frac{r'_2}{S}\right)^2 + (x_s)^2}}. \tag{2}$$

Угол сдвига фаз между I'_y и E'_y при нормальной работе асинхронной машины определяется из соотношения

$$\cos \varphi = \frac{r'_2}{\sqrt{\left(\frac{r'_2}{S}\right)^2 + (x_s)^2}}. \tag{3}$$

Формулы для моментов вспомогательных машин в схеме электрического вала могут быть записаны так

$$M_1 = C_m \Phi I'_y \cos \varphi_1; M_2 = C_m \Phi I'_y \cos \varphi_2. \tag{4}$$

Имеем

$$\varphi_1 = \varphi - \left(\frac{\pi}{2} - \frac{\theta}{2}\right); \varphi_2 = \varphi + \left(\frac{\pi}{2} - \frac{\theta}{2}\right)$$

или

$$\cos \varphi_1 = \cos \left[\varphi - \left(\frac{\pi}{2} - \frac{\theta}{2}\right)\right]; \cos \varphi_2 = \cos \left[\varphi + \left(\frac{\pi}{2} - \frac{\theta}{2}\right)\right].$$

Производятся следующие тригонометрические преобразования:

$$\begin{aligned} \cos \varphi_1 &= \cos \varphi \cos \left(\frac{\pi}{2} - \frac{\theta}{2}\right) + \sin \varphi \sin \left(\frac{\pi}{2} - \frac{\theta}{2}\right) = \\ &= \cos \varphi \left(\sin \frac{\theta}{2} + \frac{S}{S_k} \cos \frac{\theta}{2}\right); \end{aligned} \tag{5}$$

$$\cos \varphi_2 = \cos \varphi \left(\sin \frac{\theta}{2} - \frac{S}{S_k} \cos \frac{\theta}{2}\right),$$

где S – критическое скольжение.

Величина $S_m \Phi$ определяется из формулы механической характеристики асинхронного двигателя

$$M = C_m \Phi I \cos \varphi = \frac{2M_k}{\frac{S}{S_k} + \frac{S_k}{S}}, \tag{6}$$

откуда

$$C_m \Phi = \frac{2M_k}{S + S_k} \frac{1}{I \cos \varphi}. \tag{7}$$

Подстановка найденных значений углов сдвига фаз и величины $S_m \Phi$ дает значения моментов на валу двигателей

$$M_1 = \frac{2M_k}{S + S_k} \frac{I'_y}{I} \left(\sin \frac{\theta}{2} + \frac{S}{S_k} \cos \frac{\theta}{2}\right); \tag{8}$$

$$M_2 = \frac{2M_k}{S_k + \frac{S_k}{S}} \frac{I'_y}{I} \left(\sin \frac{\theta}{2} - \frac{S}{S_k} \cos \frac{\theta}{2} \right). \quad (9)$$

Отношение токов находится из соотношений

$$\frac{I'_y}{I} = \frac{E'_y}{E_2} = \sin \frac{\theta}{2}. \quad (10)$$

После подстановки отношений токов и окончательных преобразований получаются математические зависимости для моментов вспомогательных машин, работающих в системе электрического вала.

$$M_1 = \frac{M_k}{\frac{S}{S_k} + \frac{S_k}{S}} \left(1 - \cos \theta + \frac{S}{S_k} \sin \theta \right); \quad (11)$$

$$M_2 = \frac{M_k}{\frac{S}{S_k} + \frac{S_k}{S}} \left(1 - \cos \theta - \frac{S}{S_k} \sin \theta \right). \quad (12)$$

Вспомогательная машина ВД1 имеет положительный момент и работает в двигательном режиме; ВД2 имеет отрицательный момент и работает в генераторном режиме.

Формулы для моментов (11) и (12) выведены для случая, когда вспомогательные машины вращаются по полю главных двигателей.

На основании формул уравнительных моментов (11) и (12) рассчитаны зависимости уравнительных моментов от угла рассогласования для различных значений скольжения, которые приведены в табл. 1.

$$M_1 = \frac{M_k}{\frac{S}{S_k} + \frac{S_k}{S}} \left(\cos \theta + \frac{S}{S_k} \sin \theta + 1 \right); \quad (13)$$

$$M_2 = \frac{M_k}{\frac{S}{S_k} + \frac{S_k}{S}} \left(\cos \theta - \frac{S}{S_k} \sin \theta - 1 \right). \quad (14)$$

Из соотношений (13) и (14) видно, что уравнительный момент вспомогательной машины зависит от двух переменных: скольжения S и угла рассогласования θ .

Необходимо определить значения углов рассогласования, при которых моменты будут максимальными

$$\frac{dM_1}{d\theta_1} = 0; \quad \frac{dM_2}{d\theta_2} = 0. \quad (15)$$

откуда

$$\theta_1 = \arctg \frac{S}{S_k}; \quad \theta_2 = \arctg \left(-\frac{S}{S_k} \right). \quad (16)$$

После подстановки (16) в (13), (14) получается

$$M_1 = \frac{M_k}{\frac{S}{S_k} + \frac{S_k}{S}} \left(1 - \sqrt{1 + \left(\frac{S}{S_k} \right)^2} \right); \quad (17)$$

$$M_2 = \frac{M_k}{\frac{S}{S_k} + \frac{S_k}{S}} \left(1 + \sqrt{1 + \left(\frac{S}{S_k} \right)^2} \right). \quad (18)$$

Таблица 1

Зависимость уравнительных моментов от угла рассогласования при различных S

θ	M	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$S=0,5S_k$	M_1	0,75	1,7	2,8	4,1	5,5	6,9	8,3	9,7	11,1
	M_2	-0,5	-0,83	-0,86	-0,59	-0,14	0,05	-0,14	0,25	0,37
$S=S_k$	M_1	1,76	3,7	5,9	8,15	10,4	12,6	14,8	16,7	18,5
	M_2	-1,39	-2,6	-3,34	-3,71	-3,7	-3,34	-2,6	-1,39	1,24
$S=2S_k$	M_1	2,66	5,48	7,85	11,2	13,9	16,4	18,8	20,6	22,2
	M_2	-2,36	-4,6	-6,36	-7,7	-8,6	-9,06	-3,96	-9,36	-7,4
$S=4S_k$	M_1	3,08	6,23	9,3	12,3	14,9	17,2	19,2	20,8	21,8
	M_2	-2,92	-5,7	-8,1	-10,2	-11,8	-12,9	-13,6	-13,7	-13
$S=6S_k$	M_1	3,8	6,03	9,40	12,3	14,7	17,1	18,9	20,2	21
	M_2	-3,06	-5,96	-8,6	-10,8	-12,6	-14,1	-14,9	-15,2	-15
$S=8S_k$	M_1	3,22	6,35	9,45	12,2	14,6	16,9	18,6	19,7	20,5
	M_2	-3,14	-6,07	-8,8	-11,15	-13	-14,7	-15,6	-16,0	-16,0

Из данных, приведенных в табл. 1, следует, что при малых скольжениях вспомогательные машины развивают малые моменты, при больших скольжениях величина моментов возрастает. Поэтому необходимо, чтобы вспомогательные машины включались так, чтобы их валы вращались против поля главных двигателей и работали при скольжениях, близких к оптимальным.

Вспомогательная машина ВД1 является двигателем, машина ВД2 – генератором, т.е.

Далее определяется наиболее возможная величина M_2 , имеющая место при определенном значении относительного скольжения S/S_k

$$\frac{dM_2}{d\left(\frac{S}{S_k}\right)} = 0, \quad (19)$$

откуда

$$\left(\frac{S}{S_k}\right)_m = \sqrt{3} \tag{20}$$

При подстановке (20) в (18) получается

$$M_{2max} = \frac{3}{4}\sqrt{3}M_k = 1,3M_k \tag{21}$$

Соотношение (21) указывает на то, что уравнильный момент асинхронной машины в схеме электрического вала может быть больше ее опрокидывающего момента на 30%.

Для устойчивой работы электрического вала наиболее существенным является не абсолютное значение моментов вспомогательных машин, а их разность, т.к. именно она определяет способность выравнивать нагрузки главных приводных двигателей

$$\Delta M = M_1 - M_2 = \frac{2M_k}{\frac{S}{S_k} + \frac{S_k}{S}} \frac{S}{S_k} \sin \theta \tag{22}$$

Из формулы (22) следует, что угол рассогласования $\theta=90^\circ$ является предельным. При дальнейшем увеличении неравномерности нагрузок на осях двигателей и росте угла рассогласования θ система выпадает из режима синхронизации.

4. Исследование устойчивости системы синхронизации асинхронных двигателей привода вибрационного станка для обработки длинномерных деталей

Согласно расчету необходимой мощности приводного двигателя выбирается два двигателя мощностью $P_n=7$ кВт; числом оборот $n_n=730$ об/мин; $n_0=750$ об/мин; $\lambda = \frac{M_k}{M_n} = 1,7$; $\frac{M_n}{M_k} = 1$; число пар полюсов $z_p=8$.

Номинальный момент двигателя

$$M_n = \frac{975P_n}{n} = 9,35 \text{ кг м.}$$

Номинальное скольжение двигателя

$$S_n = \frac{n_0 - n}{n_0} = 0,0267$$

Площадь сечения контейнера $S=0,8 \text{ м}^2$, длина контейнера $l=2 \text{ м}$, $k_d=5$.

Электрическая принципиальная схема электрического вала приведена на рис. 1.

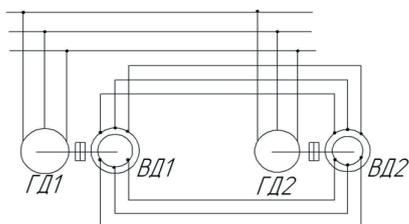


Рис. 1. Электрическая принципиальная схема электрического вала

Механическая характеристика двигателя определяется по следующей формуле

$$M = \frac{2M_k(1+\epsilon)}{\frac{S}{S_k} + \frac{S_k}{S} + 2\epsilon} \tag{23}$$

Величина M_k равна

$$M_k = 1,7M_n = 15,9 \text{ кг м.}$$

Для определения величин S_k и ϵ , входящих в (23), составляется система уравнений относительно S_k и ϵ

$$M_n = \frac{2M_k(1+\epsilon)}{\frac{S_n}{S_k} + \frac{S_k}{S_n} + 2\epsilon}$$

$$M_n = \frac{2M_k(1+\epsilon)}{\frac{1}{S_k} + S_k + 2\epsilon}$$

где M_n – пусковой момент двигателя.

При решении системы уравнений получается $S_k=0,164$ и $\epsilon=2,03$.

Формула для механической характеристики приобретает вид

$$M = \frac{98,3}{\frac{S}{0,164} + \frac{0,164}{S} + 4,06} \tag{24}$$

Задаваясь скольжением $0 \leq S \leq 1$, рассчитываются значения моментов по (24). Результаты расчета сведены в табл. 2.

Таблица 2

Зависимость момента главного двигателя от скольжения

S		0	0,013	0,0267	0,04	0,053	0,093	0,164
n	об/мин	750	740	730	720	710	680	626
M	кг м	0	5,75	9,35	11,4	12,9	15	15,9
S	0,2	0,267	0,387	0,467	0,533	0,6	0,8	1
n	600	550	460	400	350	300	150	0
M	15,75	15,3	14,1	13,3	12,7	12	10,5	9,35

В качестве вспомогательных асинхронных машин выбираются одинаковые асинхронные двигатели с фазным ротором серии АК, предназначенные для работы в нормальных условиях окружающей среды в длительном режиме [1]. Мощность вспомогательных двигателей выбирается равной мощности главных двигателей.

Данные вспомогательных двигателей:

- $P_n=7$ кВт; $n_n=730$ об/мин;
- $\lambda=1,9$; $r_1=0,574$ Ом; $r_2'=0,98$ Ом;
- $M_n=9,75$ кг м; $M_k=18,5$ кг м;
- $S_k=0,251$; $GD^2=1,1$ кг м².

Величина S_k в данном случае находится путем решения уравнения (23) для номинального режима, при этом вместо коэффициента ϵ подставляется величина

$$\varepsilon = S_k \frac{r_1}{r_2}$$

В целях увеличения синхронизирующего момента вспомогательные двигатели включаются против поля главных двигателей (рис. 1).

В рассматриваемом случае основная скорость, при которой работают машины вибрационного станка, равна $n'_{нач}=748,78$ об/мин; $n''_{нач}=1485$ об/мин; $n'''_{нач}=2970$ об/мин. Отношение начальной скорости к номинальной $\frac{n_{нач}}{n} = 0,99$.

В таком случае скольжение, при котором работают вспомогательные машины, равно

$$S'_в = \frac{750+748,78}{750} \approx 2; S''_в = 2,02; S'''_в = 1,93; S_в = 8S_k.$$

При этом значении скольжения уравнивающий момент будет максимальным.

Находятся значения моментов M_1 и M_2 вспомогательных машин в функции угла рассогласования θ по формулам:

$$M_1 = \frac{M_k}{\frac{S}{S_k} + \frac{S_k}{S}} \left(\cos\theta + \frac{S}{S_k} \sin\theta + 1 \right); \quad (25)$$

$$M_2 = \frac{M_k}{\frac{S}{S_k} + \frac{S_k}{S}} \left(\cos\theta - \frac{S}{S_k} \sin\theta - 1 \right). \quad (26)$$

Значение M_1 получается положительным и относится к отстающей по скорости машине, а момент M_2 – отрицательный и относится к опережающей по скорости машине.

Процесс синхронизации пропадает при угле рассогласования $\theta > 90^\circ$. Поэтому необходимо определить максимальный угол рассогласования для рассматриваемого случая, т.е. функционирования системы электрического вала в условиях привода вибрационного станка для обработки длинномерных деталей.

Предлагается два метода определения угла рассогласования θ :

– с помощью формул

$$\theta_1 = \arctg \frac{S}{S_k}; \theta_2 = \arctg \left(-\frac{S}{S_k} \right); \quad (27)$$

– на основе исследований переходных процессов.

Первый метод является весьма приближенным и может быть использован для предварительного расчета; второй, более точный, используется для окончательного расчета.

Пусть угловая скорость привода вибрационного станка равна $n=733$ об/мин.

Для определения угла рассогласования θ по первому методу рассматривается наиболее критический момент, когда один двигатель, установленный на вибрационном станке, имеет максимальную нагрузку, а второй работает в режиме, близком к холостому ходу.

Скольжение будет равно $S_1=0,024$;

$$S'_2 = \frac{750-748,78}{750} = 0,0163; S''_2 = 0,01; S'''_2 = 0,01.$$

Тогда согласно формуле (27) углы θ для первого и второго двигателей будут соответственно равны

$$\theta'_1 = \arctg \frac{0,024}{0,164} = 0,146; \theta'_1 = 8^\circ 20'; \theta''_1 = \theta'''_1 = 3^\circ 40';$$

$$\theta'_2 = \arctg \frac{0,00163}{0,164} = 0,0099; \theta_2 = 5^\circ 40'; \theta''_2 = \theta'''_2 = 3^\circ 40'$$

Угол рассогласования между первым и вторым двигателем будет равен $\Delta\theta < 90^\circ$.

Таким образом, система синхронизации является устойчивой.

5. Выводы

Система синхронизации двигателей вибрационного станка по схеме электрического вала с применением в качестве главных двигателей асинхронных с короткозамкнутых ротором и в качестве вспомогательных двигателей – с фазным ротором является достаточно управляемой, простой, экономичной и обеспечивает высокую синхронность работы привода вибрационного станка.

Разработанная методика расчета устойчивости работы системы синхронизации привода вибрационного станка позволяет с достаточной точностью определить углы рассогласования между двигателями и обосновать выбрать мощность двигателей.

Литература

1. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины / А.В. Иванов-Смоленский. – М.: Энергия, 1986. – 928 с.
2. Санджр А.С., Тарасенко Л.М. Динамика каскадных асинхронных электроприводов / А.С. Санджр, Л.М. Тарасенко – М.: Энергия, 1987. – 200 с.
3. Мещеряков В.Н., Соломатин А.А. Синхронизированный асинхронный электропривод с частотным управлением / В.Н. Мещеряков, А.А. Соломатин // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2006. – № 2. – С. 11-18.
4. Голубев М.И. Тиристорные электроприводы / М.И. Голубев: навч. посібн. – К.: ІЗМН, 1999. – 412 с.