

Л и т е р а т у р а

1. К р а с о в с к и й А.А. Аналитическое конструирование контуров управления летательными аппаратами. — М., 1969. 2. К а р а п е т ь я н Р.М. О численном решении уравнений оптимальных коэффициентов в задачах аналитического конструирования регуляторов. — автоматика и телемеханика, 1972, № 12. 3. К у з ь м и ц к и й И.Ф., П о л з и к П.В. К выбору весовых коэффициентов функционала при аналитическом конструировании регуляторов. — Автоматика и телемеханика, 1973, № 11. 4. Л е т о в А.М. Динамика полета и управления. — М., 1969.

УДК 62 – 83:621.313.3 – 592.3

А.И.Лапидус

АСИНХРОННЫЙ КОРОТКОЗАМКНУТЫЙ ДВИГАТЕЛЬ В РЕЖИМЕ ПОЛЗУЧЕЙ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ

Ползучая частота вращения трехфазного асинхронного короткозамкнутого двигателя применяется в позиционных электроприводах металлорежущих станков для осуществления операций доворота механизмов в заданное положение или для их подналадки.

Двигатель работает в режиме ползучей частоты вращения, если обмотки статора питаются одновременно переменным и постоянным током. Сложный характер происходящих в машине физических процессов обусловлен взаимодействием полей переменного и постоянного тока. Результирующее магнитное поле машины можно рассматривать состоящим из поля, которое вращается с синхронной частотой и создает двигательный момент, и неподвижного поля, которое создает момент динамического торможения. При этом каждая из составляющих момента является результатом взаимодействия соответствующего поля статора и вызванной им реакцией ротора. Результирующая механическая характеристика машины (рис. 1, кривая 2) получается алгебраическим суммированием составляющих характеристик двигательного режима (рис. 1, кривая 1) и режима динамического торможения (рис. 1, кривая 3).

На рис. 2 представлена разработанная схема включения асинхронной машины на ползучую частоту вращения. Эта схема отличается от других симметричных схем [1] простотой и тем, что обеспечивает более жесткий участок механической характеристики в зоне ползучей частоты вращения. Жесткость характеристики обусловлена соотношением между постоянной и переменной составляющими тока в обмотках двигателя. В рассматриваемой схеме это отношение является наибольшим.

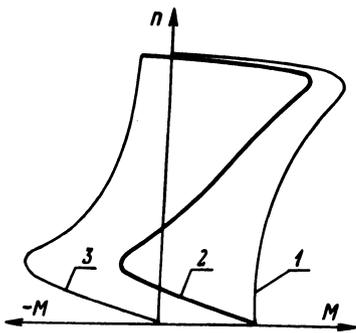


Рис. 1. Суммирование механических характеристик для получения ползучей частоты вращения:

1, 3 – соответственно составляющая двигательного режима и динамического торможения; 2 – результирующая характеристика.

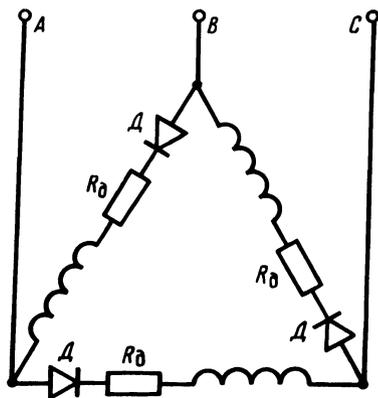


Рис. 2. Схема включения двигателя.

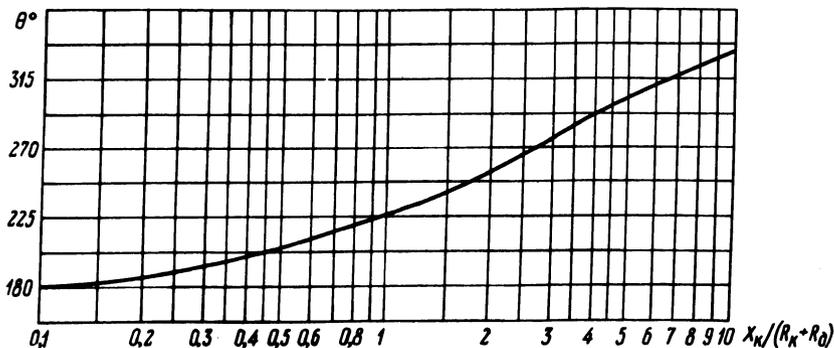


Рис. 3. Зависимость угла запитания диода от параметров цепи фазы статора.

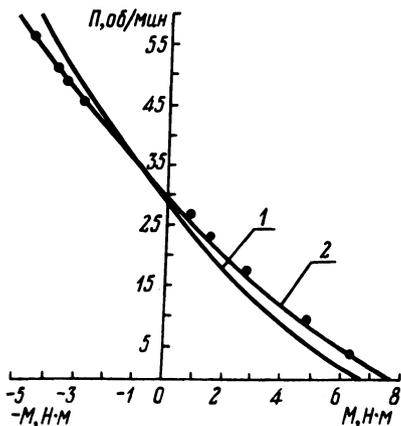


Рис. 4. Участок механической характеристики в зоне ползучей частоты вращения для двигателя АО2-31-2:
1 – расчетная характеристика; 2 – экспериментальная.

Так как машина работает в режиме, близком к режиму короткого замыкания (в области больших скольжений), то для определения тока фазы двигателя i_ϕ может быть составлено дифференциальное уравнение

$$\frac{X_K}{\omega} \frac{di_\phi}{dt} + (R_K + R_\partial) i_\phi = \sqrt{2} U \sin \omega t, \quad (1)$$

где $X_K = X_1 + X'_2$ и $R_K = R_1 + R'_2$ — соответственно индуктивное и активное сопротивление фазы двигателя в режиме короткого замыкания; X_1 и X'_2 — индуктивное сопротивление рассеяния фазы статора и ротора; R_1 и R'_2 — активное сопротивление фазы статора и приведенное сопротивление фазы ротора; R_∂ — добавочное сопротивление в цепи фазной обмотки статора; U — действующее значение линейного напряжения сети.

Решение уравнения (1) имеет вид

$$i_\phi = \frac{\sqrt{2} U}{\sqrt{(R_K + R_\partial)^2 + X_K^2}} \left[\sin(\omega t - \varphi) + \sin \varphi e^{-\frac{R_K + R_\partial}{X_K} \omega t} \right], \quad (2)$$

где $\varphi = \arctg \frac{X_K}{R_K + R_\partial}$.

Приняв в (2) $i_\phi = 0$, получаем для угла запирающего диода $\omega t = \theta$ выражение

$$\sin(\theta - \varphi) + \sin \varphi e^{-\frac{R_K + R_\partial}{X_K} \theta} = 0. \quad (3)$$

Зависимость $\theta = f\left(\frac{X_K}{R_K + R_\partial}\right)$, вычисленная по формуле (3) в соответствии с рекомендациями, приведенными в [2], представлена на рис. 3.

Постоянная составляющая выпрямленного фазного тока определяется как

$$I_{\phi-} = \frac{1}{2\pi} \int_0^\theta i_\phi d\omega t. \quad (4)$$

Подставляя значение i_ϕ из (2) и принимая во внимание (3), после интегрирования находим

$$I_{\phi-} = \frac{\sqrt{2} U}{\pi(R_K + R_\partial)} \cdot \frac{1 - \cos \theta}{2}. \quad (5)$$

Переменная составляющая тока фазы статора определяется разложением кривой тока в ряд Фурье. Анализ гармонического состава такой кривой показал, что при однополупериодном выпрямлении первая гармоника тока практически равна постоянной составляющей (гармониками более высокого порядка можно пренебречь), т.е.

$$I_{\phi\sim} = I_{\phi-}. \quad (6)$$

Составляющая трехфазного момента может быть определена по известной формуле

$$M = \frac{3p}{2\pi f} \cdot I_{2\phi\sim}^2 \frac{R'_2}{s}, \quad (7)$$

где p – число пар полюсов машины; f – частота питающей сети; $I_{2\phi\sim}$ – ток фазы ротора, приведенный к фазе статора; s – текущее значение скольжения. Так как мы рассматриваем работу машины при больших скольжениях, то можно принять $I_{2\phi\sim} = I_{\phi-}$.

Для упрощения анализа режима динамического торможения целесообразно возбуждение машины постоянным током заменить эквивалентным с точки зрения амплитуды намагничивающей силы симметричной системой трехфазного тока. Так как в обмотках фаз статора протекают одинаковые по величине и направлению постоянные составляющие токов, то создаваемая этими точками результирующая намагничивающая сила состоит только из третьей пространственной гармоники. В этом случае характеристика динамического торможения рассчитывается по формуле [3]:

$$M_{(3)} = \frac{2M_m(3)}{\frac{s_{(3)}}{s_m(3)} + \frac{s_m(3)}{s_{(3)}}}, \quad (8)$$

где $M_m(3) = \frac{1}{2} \frac{3p}{2\pi f} \frac{I_{\text{эКВ}}^2(3) X_{\mu}^2(3)}{(X_{\mu}(3) + X'_{2(3)})}$ – критический момент; (9)

$$s_m(3) = \frac{R'_2(3)}{X_{\mu}(3) + X'_{2(3)}} \text{ – критическое скольжение.} \quad (10)$$

Рассмотрим входящие в выражения (9) и (10) величины. Эквивалентный ток определяется в соответствии с [3], как $I_{\text{эКВ}}(3) = \sqrt{2} I_{\phi-}$. Активное сопротивление ротора $R_{2(3)}$ для третьей гармоники поля определяется из [4].

Приведенное индуктивное сопротивление рассеяния фазы ротора $X'_{2(3)}$, а также индуктивное сопротивление намагничивания $X_{\mu(3)}$ для третьей гармоники поля вычисляются по [5], Явление взаимовытеснения магнитных полей переменного и постоянного тока [6] количественно учитывается коэффициентом λ , уменьшающим индуктивные сопротивления намагничивания. На основании проведенных исследований для короткозамкнутых двигателей мощностью от 1,1 кВт до 5 кВт можно принять $\lambda = 0,5 \dots 0,7$.

На рис. 4 показан участок механической характеристики в зоне ползучей частоты вращения, построенный по данным расчета (рис. 4, кривая 1) и по результатам эксперимента (рис. 4, кривая 2) для двигателя А02-31-4 ($P_N = 2,2$ кВт) при $R_0 = 7$ Ом и $U = 380$ В. Экспериментальная характеристика снималась с помощью электромашинного динамометра. Для расчета были использованы следующие величины: $X_1 = 2,469$ Ом; $X'_2 = 4,355$ Ом; $X_\mu = 67,87$ Ом; $R_1 = 2,155$ Ом; $R'_2 = 1,482$ Ом; $X'_{2(3)} = 0,41$ Ом; $X_{\mu(3)} = 2,02$ Ом; $R'_{2(3)} = 1,1$ Ом. По расчету получено: постоянная составляющая фазного тока $I_{\phi-} = 14,82$ А, переменная составляющая фазного тока $I_{\phi\sim} = 14,82$ А, пусковой момент $M_{\Pi} = 6,73$ Н·м. Эксперимент дал следующие результаты: $I_{\phi-} = 14,2$ А, $I_{\phi\sim} = 15,7$ А, $M_{\Pi} = 7,6$ Н·м.

В связи с тем что время работы двигателя в режиме ползучей частоты вращения составляет незначительную часть продолжительности всего цикла механизма, то, несмотря на перегрузку по току, потери энергии за этот период соизмеримы с другими цикловыми потерями, которые учитываются при выборе мощности двигателя, например, методом средних потерь.

Л и т е р а т у р а

1. П е т р о в И.И., М е й с т е л ь А.М. Специальные режимы работы асинхронного электропривода. — М., 1969.
2. Р о з е н б л а т М.А. Магнитные усилители. — М., 1960.
3. М е й с т е л ь А.М. Динамическое торможение приводов с асинхронными двигателями. — М. — Л., 1967.
4. К а п л а н Н.А. и Л а п и д у с А.И. Регулирование частоты вращения трехфазного асинхронного короткозамкнутого двигателя совмещением токов прямой и нулевой последовательности. — Электричество, 1971, № 4.
5. К о с т е н к о М.П. Электрические машины. — М., 1949.
6. П а р а и л В.А., П е т р о в Н.К. Учет магнитной несимметрии при расчете моментов асинхронного двигателя. — В сб.: Электромашиностроение и электрооборудование. Харьков, 1967, вып. 6.