

ИССЛЕДОВАНИЕ НАГРУЗОЧНОЙ СПОСОБНОСТИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ В ТИРИСТОРНЫХ СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Ф. ЧЁРГИЧ, Ш. ХАЛАС, И. ШМИДТ

Кафедра Электрических машин Будапештского Технического Университета

(Поступило: 9 июля 1975 г.)

Представлено: проф. д-р Д. Ретгер

По заказу Объединенного Электромашиностроительного завода были проведены практические исследования нагрузочной способности, перегрева, распределения потерь, шума и вибрации асинхронных двигателей в следующих системах асинхронного тиристорного электропривода:

1. Асинхронный двигатель с питанием от преобразователя частоты с промежуточным звеном постоянного тока (рис. 1а).
2. Асинхронный двигатель с диодным мостом в роторе (рис. 1б).

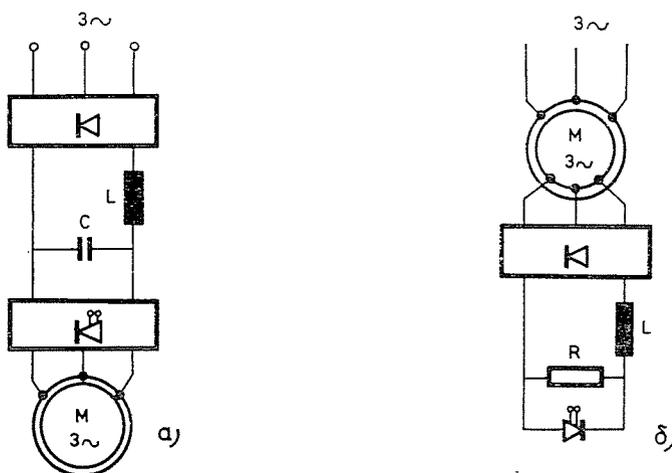


Рис. 1.

I. Асинхронный двигатель с питанием от преобразователя частоты с промежуточным звеном постоянного тока

Результаты теоретического анализа изложены, например, в [1]. Расчеты проводятся, обычно, по схеме замещения рис. 2, где L' обозначает переходную индуктивность статора.

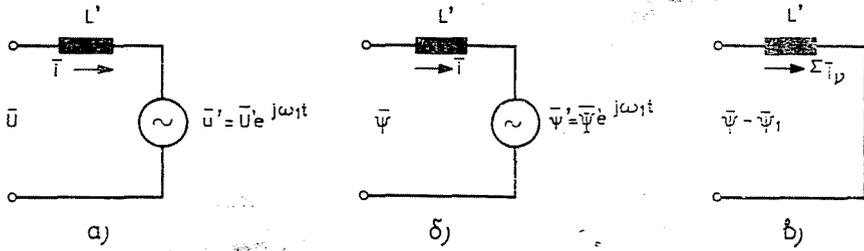


Рис. 2.

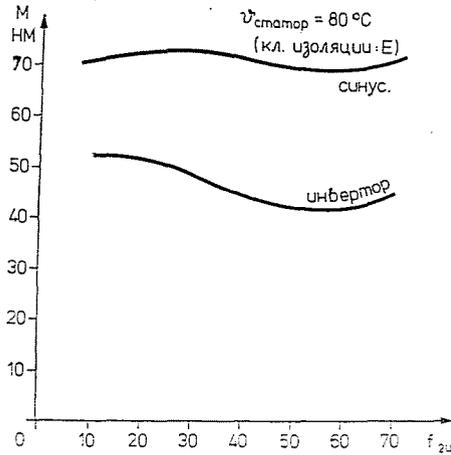


Рис. 3.

Практические исследования проводились на короткозамкнутом асинхронном двигателе нормальной серии типа VZ 160 M4, 11 квт, 1460 об/мин, 190 в, 45 а в области частот 10—125 гц. Основная гармоника потока статора двигателя до частот 65—70 гц — путем широтно-импульсной модуляции напряжения инвертора — поддерживалась равной номинальной величине, а при больших частотах двигатель работал с максимальным напряжением и ослабленным потоком. Как показали исследования зависимости потерь двигателя от частоты, уменьшение потока двигателя, начиная с частоты 65—70 гц, целесообразно и с точки зрения увеличения нагрузочной способности двигателя.

На основании измерения нагрева на рис. 3 представлены моменты двигателя, максимально возможные по условиям перегрева статорной обмотки. Здесь же, для сравнения, приведены соответствующие максимально возможные моменты, полученные при синусоидальном питании двигателя (при том же потоке статора). В данном случае двигатель имел естественную вентиляцию с обдувом вдоль ребристого кожуха. В случае синусоидального

питания нагрузочная способность двигателя практически не зависела от частоты (скорости), что связано с уменьшением потерь в стали и механических с уменьшением скорости.

При питании от инвертора при $f = 50$ гц наблюдается минимум нагрузочной способности двигателя. Уменьшение нагрузочной способности двигателя значительно превосходит данные литературы и достигает в среднем 30%, а при 50 гц — 40%.

К сожалению, не было возможности для измерения температуры перегрева клетки ротора, ведь рост потерь в роторе значительно превосходит увеличение потерь в статоре двигателя.

Для объяснения значительного уменьшения нагрузочной способности двигателя были проведены расчеты увеличения потерь в двигателе при инверторном питании.

а) Потери в стали

Основные потери в стали статора определялись на основании формулы, полученной из оценки потерь холостого хода при синусоидальном напряжении:

$$P_{cm} = 420 \frac{u^2}{v} + 245 u^2, \quad (1)$$

где:

$$u = \frac{U}{U_{50}}; U_{50} \text{ — номинальное напряжение двигателя при } f = 50 \text{ гц,}$$

$$v = f/50.$$

В случае высших гармонических потери в стали определялись по формуле (1) с учетом падения напряжения в цепи статора, а также при условии, что потери в стали ротора от потоков высших гармонических примерно равны 0,5-ых потерь в стали статора. Оказалось, что даже при $f = 50$ гц основные потери в стали от высших гармонических увеличивают общие потери в стали примерно на 8%-ов, то есть незначительно. Более значительными — согласно измерениям — оказались потери в стали от высокочастотных пульсаций индукции в зубцах, поверхностного эффекта и т. д. [2].

б) Потери в клетке ротора

Величина $\Sigma \bar{i}_v$ токов высших гармонических определяется формой напряжения инвертора и значением L' , зависящим от тока (из-за насыщения) и частоты (из-за эффекта вытеснения тока). Согласно рис. 2, при $L' = \text{const}$

$$\Sigma \bar{i}_v = \frac{\bar{\Psi} - \bar{\Psi}_1}{L'} = \frac{\Sigma \bar{\Psi}_v}{L'}, \quad (2)$$

где: $\bar{\Psi}_1$ — первая гармоническая, $\Sigma \bar{\Psi}_v$ — сумма высших гармонических потока статора $\bar{\Psi}$. Легко показать, что при широтно-импульсной модуляции в напряжении, потоке и, соответственно, токе всегда имеются высшие гармонические значительной величины, соответствующие числу импульсов модуляции N (а также кратным N) на $1/6$ периода, порядок которых определяется формулой

$$v = 1 \pm 6N. \quad (2)$$

Так при $f = 10$ гц и $N = 10$ эффективное значение составляющих i_{59} и i_{61} почти достигало значения основной гармоники приложенного напряжения. Влияние этих составляющих, несмотря на их высокую частоту, значительно, так как при 600 гц эффект вытеснения тока в роторе значителен. На рис. 4 представлены зависимости L' и сопротивления ротора R_p от частоты, полученные экспериментально и подтверждённые расчетом. В результате значительного напряжения и пониженного значения L' , эффективное значение токов этих двух составляющих (общее) достигало 18% номинального тока, а потери в роторе от них и кратных N были равны 53% номинальных потерь ротора. При $f = 50$ гц и $N = 2$ потери от 11, 13, 23, 25, 35 и 37-ой гармоник уже превосходили номинальные (около 110%). Без эффекта вытеснения тока соответствующее значение потерь было бы 3% при 10 гц и 6% при 50 гц.

Учитывая значительную роль эффекта вытеснения тока в роторе, были проведены расчеты в целях уменьшения потерь путем увеличения числа импульсов и улучшения управления. Результаты расчетов сведены в таблицы 1—2. В таблицах приведены потери в роторе от токов высших гармонических при $f = 10$ гц и $f = 50$ гц в процентах от номинальных потерь ротора (для номинального значения основной гармоники потока статора). Улучшения управления можно достигнуть тем, что в пределах 60° на период одного или нескольких импульсов фаза вектора выходного напряжения инвертора выбирается так, чтобы уменьшить величину высших гармонических напряжения. На рис. 5 представлены годографы вектора потока для случая, когда в пределах 60° при начальном и конечном импульсах фаза напряжения сдвинута на 60° назад или вперед, соответственно.

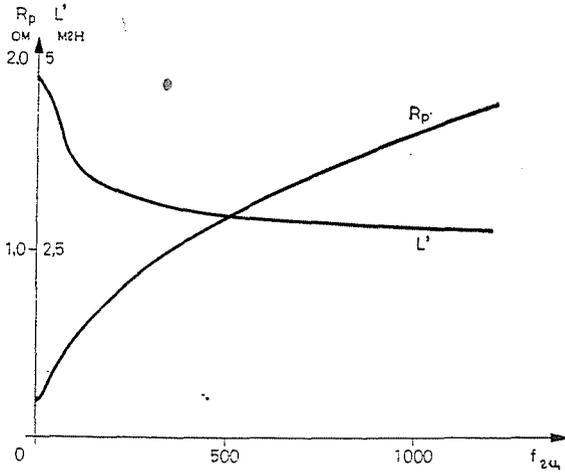


Рис. 4.

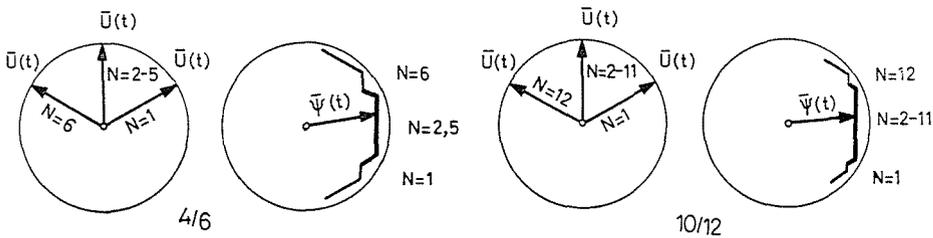


Рис. 5.

В случае $N = 6$ это управление названо 4/6-ых, при $N = 12$ — 10/12-ых. Возникающее при этом уменьшение 5 и 7-ой или же 11 и 13-ой гармоник соответствуют укорочению шага обмотки в машинах.

На основании расчетов можно было сделать вывод о том, что увеличение числа импульсов модуляции, а также улучшение управления путем варьирования фазы вектора напряжения, обычно, приводит к заметному относительному уменьшению потерь в роторе, однако абсолютное значение потерь в случае широтно-импульсной модуляции и практически выполненном числе импульсов модуляции все же остается высоким.

Таблица 1.

$f = 10$ гц	$N=6$	$N=10$	$N=12$	$N=20$	$N=\infty$	$N=6$ 4/6	$N=12$ 10/12
	%						
без учета эффекта вытеснения	19,2	13,3	12,2	10,7	9,9	14,2	8,5
с учетом эффекта вытеснения	159	96	82	56	33	160	73

Таблица 2.

$f=50$ гц	$N=2$	$N=3$	$N=4$	$N=6$	$N=\infty$	$N=6$ 4/6
	%					
без учета эффекта вытеснения	15,2	10,7	9,0	7,8	6,9	3,7
с учетом эффекта вытеснения	227	164	137	113	84	82

Следует отметить, что при расчетах по формуле (2) в нее следует подставлять значение L' , по крайней мере, для 6-кратной частоты. В противном случае расчет дает значительно заниженные величины токов высших гармонических, потерь, а также пульсаций момента двигателя.

в) Потери в обмотке статора

Эффектом вытеснения тока в обмотке статора можно пренебречь, однако уменьшение значения L' в результате эффекта вытеснения тока в роторе значительно увеличивает потери в обмотке статора от токов высших гармонических. В результате при $f = 50$ гц и $N = 2$ потери в обмотке статора от токов высших гармонических возрастают примерно в 2,5-ой раз и начинают достигать 30%-ов от номинальных потерь обмотки.

Шум двигателя при питании от инвертора при $f = 10$ гц возрастал на 15,7 дБА по сравнению с питанием от источника синусоидального напряжения, эта разница при $f = 100$ гц уменьшалась до 0,5 дБА. Практически же, уже начиная от 70 гц электромагнитный шум становился пренебрежимо малым по сравнению с механическим и аэродинамическим шумами. Скорость вибрации заметно изменилась только при питании частотой до 20 гц, при $f > 25$ гц скорость вибрации практически не зависела от электромагнитных явлений.

Следует отметить, что при питании несинусоидальным напряжением механические силы нового порядка не возникают, но их частотно-временной спектр становится более богатым.

На основании изложенного были сделаны следующие выводы

1. Конструкция роторной клетки должна быть такой, чтобы ее сопротивление было минимальным. Продуманной конструкцией клетки эффект вытеснения тока следует свести к минимуму и этим уменьшить величину потерь и размеры двигателя. Следует отметить, что именно эффект вытеснения тока в роторе весьма затрудняет выбор двигателя из обычных серий асинхронных двигателей и ставит под сомнение целесообразность такого

выбора (при импульсном регулировании напряжения). Вообще говоря, желательно иметь специально разработанную серию асинхронных двигателей.

2. При работе на частотах свыше 100 гц следует обращать особое внимание на изоляцию стали листов статора и ротора. Этим можно существенно снизить потери от вихревых токов.

3. Тип применяемого инвертора следует согласовать с типом двигателя и эффектом вытеснения тока в роторе. Импульсное управление, особенно в случае двигателей обычных серий, следует избегать (например, применение тиристорного ключа в цепи постоянного тока и т. д.).

II. Асинхронный двигатель с диодным мостом в роторе

Теоретическое исследование нагрузочной способности двигателя с диодным мостом в роторе изложено, например, в [3]. Было установлено, что из-за диодного моста при номинальном моменте двигателя эффективное значение тока ротора увеличивается на 8—9%, а тока статора на 10—12%.

Практическое исследование было проведено на двигателе типа СН 160 Lr4, 11 квт, 1470 об/мин, 380 в, 24 А в области скоростей 0,25—1,0 $n_{ном}$. Скорость двигателя изменялась с помощью тиристорного прерывателя, регулирующего сопротивление в цепи выпрямленного тока ротора.

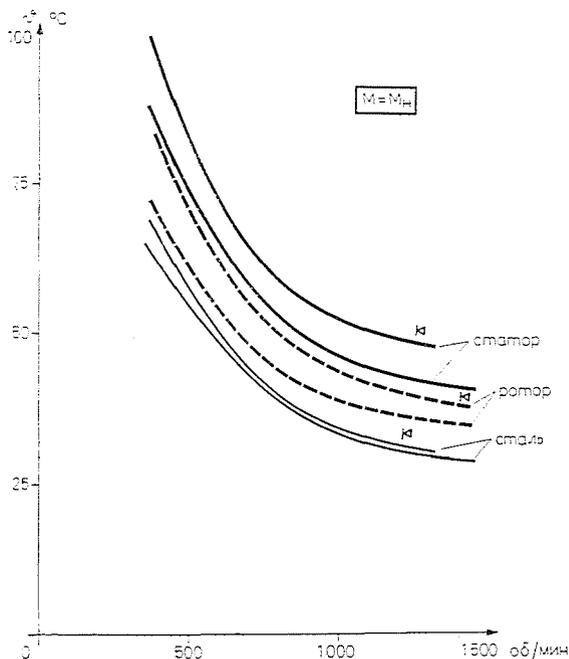


Рис. 6.

Для сравнения проводились также измерения нагрева двигателя в тех же рабочих точках при регулировании путем добавочных сопротивлений в фазах ротора. Результаты измерений перегрева обмоток статора и ротора, а также стали статора при нагрузке двигателя номинальным моментом приведены на рис. 6.

Перегрев стали статора практически не зависит от режимов (небольшая разница ок. 5°C), что говорит о практическом постоянстве потерь в стали в обоих режимах. Хотя ток статора при диодном мосте в роторе возрастает относительно больше, чем ток ротора, перегрев обмоток статора и ротора в процентном отношении к нормальному режиму — при полной нагрузке — один и тот же. Последнее объясняется наличием постоянных потерь в стали статора.

Согласно измерениям, уменьшение нагрузочной способности двигателя в среднем достигало 11—12%. Определяющим в этом отношении был перегрев обмотки статора, так как при уменьшении нагрузки перегрев обмотки ротора резко падает.

Вообще следует отметить, что результаты практических исследований потерь и перегрева двигателя хорошо согласуются с результатами теоретического анализа. Этот факт объясняется тем, что токи высших гармонических и их частота относительно малы. В конструктивном отношении нет особых требований и поэтому в данном случае могут быть применены двигатели нормального исполнения.

Измерение шума и вибрации двигателя показало, что увеличение последних по сравнению с нормальным режимом находилось в пределах точности измерений.

Резюме

Дан краткий теоретический обзор увеличения потерь и нагрева асинхронных двигателей в электроприводе с преобразователем частоты с промежуточным звеном постоянного тока, а также в системе инверторного каскада. Результаты теоретического анализа сравнены с данными лабораторных исследований, на основе чего сформулированы требования по проектированию и выбору асинхронных двигателей для этих приводов.

Литература

1. RÁCZ, I. Betrachtungen zu Oberwellenproblemen an Asynchronmotoren bei Stromrichter-speisung. *Per. Polytechnica, Elektrotechnik* vol. 11. No. 1—2. Budapest, 1967.
- CHALMERS, B. I., SARKAR, B. R.: Induction-motor losses due to nonsinusoidal supply waveforms, *Proc. IEE*, Vol. 115. No 12, December 1968.
- CSÖRCSITS, F.: Wirkungen des Gleichrichters im Rotorkreis aus die Belastbarkeit des Asyn-chronmotors. 1. Konferenz für Leistungs-elektronik, Budapest 1970.
- HALÁSZ, S.: Pulsgesteuerter Widerstand im Läuferkreis von Asynchronmotoren. 1. Konfe-renz für Leistungselektronik, Budapest 1970.

Ф. Чёргич, к. т. н.	} Н-1521 Budapest
Ш. Халас,	
И. Шмидт	