

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ ПИТАНИИ ОТ СТАТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ

Розглянуті особливості і труднощі реалізації методів розрахунку додаткових магнітних та електричних втрат асинхронних двигунів при їх роботі від статичних перетворювачів частоти, обумовлених вищими гармоніками напруги живлення, і можливості їх визначення на основі експериментальних досліджень.

Рассмотрены особенности и трудности реализации методов расчета добавочных магнитных и электрических потерь асинхронных двигателей при их работе от статических преобразователей частоты, обусловленных высшими гармониками питающего напряжения, и возможности их определения на основе экспериментальных исследований.

Применение частотно-регулируемых асинхронных двигателей (АД) является одним из альтернативных путей, наряду с вентильными двигателями, по решению задачи регулирования скорости в широком диапазоне в тех областях техники, где требование высокой надежности является одним из определяющих. На практике в настоящее время при частотном регулировании скорости находят применение как специально спроектированные частотно-регулируемые двигатели, так и двигатели общепромышленного применения. Особенность работы АД при питании от преобразователей частоты (ПЧ) состоит в том, что на выходе ПЧ форма кривой напряжения в зависимости от типа ПЧ в различной мере отклоняется от синусоидальной. Высшие гармоники питающего напряжения создают в двигателе высшие гармоники потока и тока, что вызывает рост добавочных электрических и магнитных потерь. Кроме того, в зависимости от требований, предъявляемых производственным механизмом, законы частотного регулирования различны, что приводит к изменению и основных потерь. В специально спроектированных АД принимаются такие конструктивные изменения, чтобы получить энергетические показатели на уровне серийных двигателей, питающихся от сети [1, 2]. Однако при питании серийных двигателей от ПЧ, чтобы избежать их перегрева, обусловленных повышенными потерями, приходится ограничивать установленную мощность на валу.

Методы расчета основных потерь асинхронных двигателей распространяются и на частотно-регулируемые двигатели, но при этом, в зависимости от требований, предъявляемых приводимым во вращение механизмом, нужно учитывать основной закон частотного регулирования:

$$\frac{U_{1i}}{U_{11}} = \frac{f_{1i}}{f_{11}} \sqrt{\frac{M_{2i}}{M_{21}}} \quad (1)$$

Если способ реализуется системой управления при постоянном моменте, когда токи в обмотках постоянны, то основные электрические потери остаются постоянными [4].

В режиме работы при постоянной мощности на валу $P_2 = \text{const}$ закон частотного регулирования (1) приводится к виду:

$$\frac{U_{1i}}{U_{11}} = \sqrt{\frac{f_{1i}}{f_{11}}}$$

В соответствии с этой закономерностью при увеличении частоты рост напряжения отстает от частоты. Аналитически можно показать, что основные электрические и магнитные потери в этом режиме при уменьшении частоты ниже номинальной заметно возрастают.

В настоящей работе изложены трудности реализации методов расчета составляющих добавочных потерь и возможности их экспериментального определения.

Добавочные потери подразделим на следующие составляющие:

- поверхностные и пульсационные потери;
- добавочные магнитные потери от высших гармоник магнитного поля;
- добавочные электрические потери в обмотках от высших гармоник тока.

Расчет поверхностных и пульсационных потерь при питании от сети на практике выполняют по методике, изложенной в [3]. Расчет по этой методике основан на определении пульсаций основной гармоники индукции в зазоре и в зубцах статора и ротора в зависимости от величины открытия паза. Распространение расчетных формул на высшие гармоники питающего напряжения лишено практического смысла, и можно также ограничиться расчетом этих составляющих потерь при пульсациях основных гармоник индукций при всех частотах.

При расчете добавочных электрических и магнитных потерь должен быть известен гармонический состав напряжения на выходе ПЧ, который можно получить экспериментально с помощью анализатора гармоник. В работе [2] при расчете магнитных потерь от высших гармоник магнитного поля принято, что форма кривой напряжения на выходе ПЧ прямоугольна, при которой амплитуды высших гармоник напряжения обратно пропорциональны, а частоты прямо пропорциональны порядку гармоники v :

$$U_v = \frac{U_1}{v}; \quad f_v = v \cdot f_1$$

Для определения магнитных потерь от высших гармоник магнитного поля так же, как и для основной гармоники, используется соотношение: $B_v \equiv U_v / f_v$. Суммарные магнитные потери, созданные высшими гармониками магнитного поля, при каждой частоте равны:

$$\sum_{v=3}^{v=k} P_{Fevi} = \sum_{v=3}^{v=k} \frac{1}{v^{2,7}} P_{Feli}$$

где k – порядок наиболее высокой нечетной гармоники, p_{Fei} – магнитные потери от основной гармоники при напряжении U_{1i} , соответствующем закону частотного регулирования и частоте f_{1i} :

$$p_{Fei} = p_{Fe(50)} \cdot \left(\frac{U_{1i}}{U_{1N}} \right)^2 \cdot \frac{1}{\alpha^{0,7}},$$

где $\alpha = f_{1i} / f_{1N}$. При соединении обмотки в звезду кратные трем гармоники нужно исключить.

При использовании современных ПЧ с ШИМ высшие гармоники напряжения и соответственно добавочные магнитные потери проявляются в меньшей мере. Даже при использовании экспериментальных данных от анализатора гармоник разложение кривой напряжения при каждой частоте является трудоемкой задачей и лишено практического смысла.

Наибольшие трудности возникают при расчете добавочных электрических потерь от высших гармоник тока. При известном гармоническом составе напряжения на выходе ПЧ определение амплитуд высших гармоник тока сопряжено с большими погрешностями, так как точный учет вытеснения тока при расчете активных и индуктивных сопротивлений токам высших гармоник практически невозможен. Даже если при наличии сложной измерительной аппаратуры возможно получение спектрального состава тока, расчет электрических потерь, созданных высшими гармониками тока весьма затруднителен, так как для этого требуются величины активных сопротивлений. Очевидна трудоемкость такого метода, который может быть использован только при научных исследованиях.

Практический метод расчета добавочных электрических потерь рассмотрен в [2]. При пренебрежении намагничивающим током основные гармоники тока определяются по схеме замещения:

$$I_1 \approx I_2' = \frac{U_{1i}}{\sqrt{(r_1 + r_2' / s)^2 + \alpha^2 \cdot (x_{\sigma 1} + x_{\sigma 2}')^2}}. \quad (2)$$

Можно считать, что при известном гармоническом составе напряжения на выходе ПЧ имеет место аналогичный состав тока. Тогда токи высших гармоник определяются по формулам, аналогичным (2):

$$I_{1v} \approx I_{2v}' = \frac{U_{iv}}{\sqrt{(r_1 + r_2'_{\xi v} / s_v)^2 + \alpha^2 \cdot v^2 \cdot (x_{\sigma 1} + x_{\sigma 2}'_{\xi})^2}},$$

где $r_2'_{\xi v}$, $x_{\sigma 2}'_{\xi}$ – параметры ротора с учетом вытеснения для каждой гармоники; $s_v \approx 1$, $U_{iv} = U_{1i} / v$ – при прямоугольной форме кривой напряжения на выходе ПЧ.

Добавочные электрические потери при каждой частоте определяются суммированием потерь от всех нечетных гармоник, исключая кратные трем при соединении обмотки звездой:

$$\begin{aligned} p_{\text{д.в.}} &= \sum_{v=3}^k p_{\text{д.в.}} = m_1 \cdot I_{1v}^2 \cdot (r_1 + r_2'_{\xi v}) = \\ &= \frac{m_1 \cdot U_{iv}^2 \cdot (r_1 + r_2'_{\xi v})}{[(r_1 + r_2'_{\xi v})^2 + \alpha^2 \cdot v^2 \cdot (x_{\sigma 1} + x_{\sigma 2}'_{\xi})^2]}. \end{aligned}$$

Достаточно ограничиться порядком высшей гармоники $v = 11$ или $v = 13$.

Принятое в работе [2] допущение, что для учета вытеснения токами высших гармоник активное сопротивление ротора принимается пропорциональным частоте, считаем неприемлемым. К тому же, все высшие гармоники тока протекают по одним и тем же стержням ротора. Поэтому можно принять, что коэффициенты вытеснения для всех высших гармоник одинаковы и равны коэффициентам при скольжении $s = 1$.

Совершенствование расчетных методик возможно только на основе экспериментальных исследований. В работе [4] рассмотрена возможность определения параметров частотно-регулируемых двигателей на основе экспериментальных исследований, проведенных в лаборатории электрических машин Бранденбургского ТУ (Германия). Для этого снимались рабочие характеристики двигателя мощностью 4,5 кВт фирмы Сименс (1РН 6101 4НФ56) при питании от сети и от ПЧ. Измерения момента и частоты вращения производилось измерительным валом типа ТМ 211. Для достижения высокой точности частота вращения контролировалась также тахометром ДНО 907 фирмы JAQUET, а измерения напряжений, токов и мощностей производились во всех трех фазах.

Полученные экспериментальные данные можно использовать для того, чтобы определить влияние формы кривой напряжения на выходе ПЧ и импульсов несущей частоты на потери в двигателе. Для этого были рассчитаны при всех нагрузках суммарные потери Σp как разность мощностей потребляемой P_1 и на валу P_2 как при питании от сети, так и от ПЧ. Полученные результаты при питании от сети представлены в табл. 1, а при питании от ПЧ – в табл. 2.

Как видно из приведенных данных, при нагрузках в пределах 0,7-1,05 номинальной суммарные потери при питании от ПЧ превышают значения потерь при питании от сети на 1,0-1,2 %, несмотря на то, что испытуемый двигатель относится к специально спроектированным, предназначенным для работы от ПЧ или от управляемого инвертора при векторном управлении. Разность величин потерь при питании от ПЧ и от сети может быть обусловлена только потерями от высших гармоник.

Неожиданным оказался тот факт, что на холостом ходу и при нагрузках ниже 0,4 номинальной суммарные потери при питании от сети больше, чем при питании от ПЧ. Снятые характеристики холостого хода при обоих видах питания подтвердили это обстоятельство при напряжениях, превышающих 0,8 номинальное. Это превышение составляет несколько процентов от потерь холостого хода, так что потери холостого хода в обоих случаях можно считать практически равными. Можно предположить, что это отличие обусловлено изменением формы кривой напряжения при разных его значениях и влиянием импульсов несущей частоты на процесс перемагничивания стали. Влияние импульсов несущей частоты, прежде всего, состоит в том, что они вызывают добавочные электрические потери в изоляции обмоток и появление перенапряжений, что приводит к понижению надежности частотно-регулируемых двигателей [5].

Таблица 1

U_1 , В	I_1 , А	P_1 , Вт	M_2 , Нм	n , 1/м	P_2 , Вт	Σp , Вт
188,8	6,46	430	0	1496	0	430
188,2	6,66	1158	5,0	1488	779,1	378,9
188,7	7,26	1924	10,0	1477	1546,7	377,3
188,4	8,13	2780	15,0	1465	2301,2	478,8
188,4	9,33	3661	20,0	1452	3041,2	619,9
188,3	10,7	4548	25,0	1437	3762,1	785,9
188,2	12,2	5491	30,0	1422	4467,2	1024
187,9	13,0	5925	32,0	1412	4731,7	1193

Таблица 2

U_1 , В	I_1 , А	P_1 , Вт	M_2 , Нм	n , 1/м	P_2 , Вт	Σp , Вт
191,5	5,73	353	0	1502	0	353
191,1	6,03	1092	5,0	1490	780,2	311,8
191,2	6,83	1919	10,0	1478	1547,8	371,2
191,3	7,93	2785	15,0	1464	2299,6	485,4
191,0	9,23	3668	20,0	1449	3034,8	633,2
191,3	10,7	4589	25,0	1432	3749,0	840
190,8	12,6	5590	30,0	1411	4432,8	1157
190,8	13,3	5951	32,0	1406	4711,0	1239

ВЫВОД

Аналитический расчет добавочных магнитных потерь с определенными допущениями возможен при известном гармоническом составе напряжения на выходе преобразователя частоты. Но расчет добавочных электрических потерь от высших гармоник тока аналитическими средствами крайне затруднителен, и для их определения требуется привлечение экспериментальных методов, один из которых рассмотрен в данной работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петрушин В.С. Асинхронные двигатели в регулируемом электроприводе. – Одесса: Наука и техника. 2006. – 319 с.
2. Радин В. И., Брускин Д. Э., Зорохович А. Е. Электрические машины. Асинхронные машины. М.: Высшая школа, 1988. – 328 с.
3. Под ред. Копылова И. П. Проектирование электрических машин. – М.: Энергия, 1980. – 495 с.
4. Андриенко В.М., Клиндер К. Исследование параметров управляемых асинхронных двигателей // Электричество. – 2006. – №8. – с. 41-44.
5. Рехенберг К., Фишер Ц. Определение перенапряжений в частотно-регулируемых асинхронных машинах низкого напряжения // Техн. электродинамика. – 2001. – №3. – С. 59-62.

Поступила 26.10.2009

Андриенко Валентин Михайлович, к т.н., доц.
Национальный технический университет Украины
"Киевский политехнический институт"
Украина, 03056, Киев, пр. Победы, 37
НТУУ "КПИ", кафедра электромеханики
тел. (044) 241-76-38

Andriyenko V.M.

Determination of asynchronous motor power indexes under feeding from static frequency converters.

Realization difficulties and features of calculation methods for additional magnetic losses in asynchronous motors under their operation from static frequency converters are analyzed, the losses conditioned by feeding voltage ultraharmonics and feasibility of their determination through experimental research.

Key words – asynchronous motors, frequency converter, additional magnetic losses, calculation.