

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ПОТЕРИ МОЩНОСТИ ЧАСТОТНО-УПРАВЛЯЕМОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ОТ ВЫСШИХ ГАРМОНИК НАПРЯЖЕНИЯ

Виконаний огляд додаткових втрат у частотно-керуваного асинхронного двигуна АИР 160S4 від вищих гармонік напруги. Пропонуються заходи для зменшення додаткових втрат за рахунок зміни геометрії зубцевого проширарку ротора.

Рассмотрены вопросы определения дополнительных потерь в частотно-управляемом асинхронном двигателе АИР 160S4 от высших гармоник напряжения. Предложены мероприятия по снижению дополнительных потерь за счет изменения зубцовой зоны ротора.

Введение. Применение регулируемых электроприводов позволяет повысить эффективность производства, расширяет возможность механизации и автоматизации технологических процессов, при этом улучшить энергетический коэффициент ($\eta \cdot \cos\varphi$) асинхронного двигателя. В эксплуатации находится большое количество электроприводов на базе частотно-управляемых асинхронных двигателей, которые питаются напряжением ступенчатой формы от полупроводникового преобразователя частоты с автономным инвертором (ППЧ с АИН).

Несинусоидальность напряжения при частотном регулировании приводит к возникновению дополнительных потерь в обмотках и магнитопроводе от высших гармоник тока и магнитного потока, созданных высшими гармониками питающего напряжения [1].

В данной статье приводятся результаты исследования потерь мощности в зависимости от назначения и режимов работы асинхронного электропривода. Объектом исследования является асинхронный двигатель АИР 160S4 исполнения IP44, IСО 141. $P_{2N}=15$ кВт, $U_{1N}=380$ В, $f_{1N}=50$ Гц, $2p=4$, режим работы S1 (длительный).

Исследование потерь мощности. В общем случае при частотном управлении двигателем напряжение на зажимах статора регулируется как в функции относительной частоты $\alpha = f_1/f_{1N}$ (коэффициента регулирования), абсолютного скольжения $\beta = f_2/f_{1N}$, определяемого нагрузкой на валу, а относительное напряжение $\gamma = U_1/U_{1N}$ есть функция α и β .

Основные потери мощности электрические, магнитные и механические зависят от коэффициента регулирования и определялись по известным методикам [3], при этом определяющими факторами, влияющими на изменение намагничивающего тока и магнитных потерь, являлись магнитный поток и частота питающего напряжения.

Для определения дополнительных потерь выполнен расчет высших гармоник с использованием метода "гармонических двигателей", основанном на принципе наложения. Согласно этому методу каждой высшей гармонике напряжения соответствует свой "гармонический двигатель" [2, 3].

При соединении обмотки статора в звезду третьи и кратные трем гармоники тока отсутствуют, т.е. имеют место гармоники с номерами $v = 6K \pm 1$ (где $K = 1, 2, 3, \dots$). Практикой проектирования установлено, что необходим учет высших гармоник с номерами не выше 19. Таким образом, при некоторой частоте f_1 будем рассматривать шесть "гармонических двигателей" с частотами на выходе соответственно $(5, 7, 11, 13, 17, 19) \cdot f_1$, где f_1 – частота напряжения на выходе инвертора напряжения $f_1 = f_{1N} \cdot \alpha$.

Частота вращения магнитных полей, создаваемых высшими гармониками тока $n_v = n_1 \cdot v$, где v – номер гармоники. Тогда относительное скольжение

$$S_v = \frac{n_1 \cdot v \pm n_2}{n_1 v} \approx 1 + \frac{1}{v}. \quad (1)$$

В первом приближении можно принять, что относительное скольжение для высших гармоник равно единице, т.е. для них ротор неподвижен. При расчете дополнительных потерь в обмотках учитывается изменение активных и индуктивных составляющих сопротивлений за счет эффекта вытеснения тока с помощью коэффициента Филда K_{rv}, K_{xv} [3]. Для обмотки статора коэффициентом вытеснения пренебрегаем, а для обмотки ротора влияние вытеснения тока необходимо учитывать во всех случаях. Таким образом:

$$r'_{2v} = K_{2r} \cdot r'_2; \quad X'_{2v} = K_{2xv} \cdot X'_{2N} \cdot v \cdot \alpha,$$

где X'_{2N} – индуктивное сопротивление рассеяния ротора при частоте f_{1N} .

В исследуемом двигателе АИР 160S4 ротор выполнен из алюминиевого сплава А7. Приведенная высота стержня ротора

$$\xi_{v2} = (q_{cr}/b_{cr}) \cdot \left(1 / \sqrt{\frac{2\rho_t}{\omega \cdot \mu_0}} \right), \quad (2)$$

где q_{cr}, b_{cr} – сечение и средняя ширина стержня; ρ_t – удельное сопротивление материала стержня при расчетной температуре; $\omega = 2\pi f_{1N} \cdot \alpha \cdot 6K$, где $K=1, 2, 3$; $\mu = 12,56 \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Если приведенная высота стержня $\xi_{v2} > 2$, то коэффициенты увеличения активного сопротивления и уменьшения индуктивного сопротивления рассеяния ротора будут

$$K_{2rv} = 1 + (\xi_{v2} - 1) \cdot \frac{l_2}{l_{w2}}; \quad K_{2xv} = 1 + (\varphi_X(\xi_{v2}) - 1) \cdot \frac{l_2}{l_{w2}},$$

где $\varphi_X(\xi_{v2}) = 1,5/\xi_{v2}$.

При расчете высших гармоник тока намагничивающим контуром в схеме замещения можно пренебречь ввиду малости амплитуд высших гармоник и повышенной частотой.

$$I_{1v} = I''_{2v} = \frac{U_{1N} \cdot \gamma}{v^2 (X_{1N} \cdot \alpha \cdot K_{2xv})}, \quad (3)$$

где $U_{1N} \cdot \gamma$ – действующее значение первой гармоники напряжения.

Электрические потери в обмотках статора и ротора от высших гармоник тока будут:

$$P_{эл1v} = \sum_{v=6K \pm 1}^{v=19} (m_1 \cdot I_{1v}^2 \cdot r_1 \cdot K_{t1}), \quad (4)$$

$$P_{эл2v} = \sum_{v=6K \pm 1}^{v=19} \left(m_1 (I_{2v}'')^2 \cdot r_2' \cdot K_{2rv} \cdot K_{t2} \right), \quad (5)$$

где K_{t1} и K_{t2} – температурные коэффициенты обмоток статора и ротора.

Высшие гармоники напряжения создают магнитные поля, обуславливающие дополнительные потери в магнитопроводе. Поскольку скольжение ротора по отношению к этим полям будет близко к единице, то магнитные потери будут иметь место и в роторе.

$$P_{магv} = P_{маг\alpha} \left(\frac{B_v}{B_1} \right)^2 \cdot \left(\frac{f_v}{f_{1N} \cdot \alpha} \right) \cdot \frac{m_c + m_p}{m_c}, \quad (6)$$

где $P_{маг\alpha}$ – основные магнитные потери при $f_1 = f_{1N} \cdot \alpha$; B_v , B_1 – индукция от потока высших гармоник и от основной гармоники; f_v , $\alpha \cdot f_{1N}$ – частота напряжения высшей и основной гармоники; m_c , m_p – масса стали статора и ротора.

В первом приближении

$$B_v = \frac{U_v}{f_v} = \frac{U_1}{f_1} \cdot \frac{1}{v^2} = B_1 \cdot \frac{1}{v^2}.$$

Суммируя потери от всех гармоник, получим

$$P_{магv} = P_{маг\alpha} \cdot \frac{m_c + m_p}{m_c} \cdot \sum_{v=6K \pm 1}^{\infty} v^{-(4-n)}. \quad (7)$$

Дополнительные магнитные потери от высших гармоник магнитного потока при различных законах регулирования и значениях коэффициента регулирования α проводились в соответствии с (7), принимая $n=1,6$, $m_c=24,2$ кг, $m_p=18$ кг.

Суммарные дополнительные потери

$$\sum P_{допv} = P_{эл1v} + P_{эл2v} + P_{магv}. \quad (8)$$

Результаты расчета суммарных дополнительных потерь в зависимости от закона регулирования для двигателя АИР 160S4 приведены в табл. 1.

Таблица 1

Регулирование "вниз"				
α , о.с	1,0	0,9	0,7	0,5
$\Sigma P_{доп,v}$, Вт	331	308	268	221
$\gamma = \alpha$, %	17,27	15,9	14,4	11,9
$\Sigma P_{доп,v}$, Вт	331	250	131	55,4
$\gamma = \alpha^2$, %	17,27	15,9	14,1	11,1
Регулирование "вверх"				
α , о.с	1,0	0,9	0,7	0,5
$\Sigma P_{доп,v}$, Вт	331	314,5	293,4	276,5
$\gamma = \sqrt{\alpha}$, %	17,27	17,51	17,83	17,88
$\Sigma P_{доп,v1}$, Вт	331	286,5	225,6	184
$\gamma = 1$	17,27	15,12	11,31	8,81

ВЫВОДЫ

1. Анализ результатов расчета дополнительных потерь частотно-управляемого асинхронного двигателя при питании от ППЧ с АИН со ступенчатой формой напряжения подтвердил наличие всех составляющих основных и дополнительных электрических и магнитных потерь мощности в обмотках и сердечниках статора и ротора, обусловленных высшими гармоническими напряжениями.

2. Величина дополнительных электрических потерь зависит от закона регулирования и коэффициента регулирования и не зависят от нагрузки двигателя. Суммарные дополнительные потери от высших гар-

моник тока и магнитного потока составляют (8-17)% от суммы основных потерь, однако влияние этих потерь на нагрев отдельных элементов двигателя может быть существенным, особенно при малых нагрузках.

4. Дополнительные электрические потери от высших гармоник тока в обмотке ротора существенно уменьшаются за счет ослабления эффекта вытеснения тока при изменении геометрии зубцовой зоны ротора с учетом ограничений по величине индукции в зубце ротора и площади сечения стержня. В исследуемом двигателе высота паза уменьшена с 31 мм до 25 мм, диаметры в верхней и нижней частях паза увеличились с 7,4 мм до 8,22 мм и с 3,5 мм до 5,31 мм соответственно, что позволило уменьшить дополнительные потери при $\gamma = \alpha = 1,0$ на 29 %. При этом индукция в зубце ротора увеличилась с 1,66 Тл до 1,905 Тл, суммарная МДС на пару полюсов увеличилась на 0,8%, таким образом изменением намагничивающего тока можно пренебречь.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волков А.В. Математическая модель общих потерь мощности в частотно-регулируемом асинхронном электроприводе / А.В. Волков, Ю.С. Сколько // Электротехника і електромеханіка. – 2006. – № 2. – С. 22-77.
2. Малафеев С.И., Захаров А.В. Исследование потерь в асинхронном двигателе с частотным регулированием при переходных процессах / С.И. Малафеев, А.В. Захаров // Электротехника. – 2008. – № 7. – С. 2-6.
3. Осташевский Н.А. Потери частотно-управляемого асинхронного двигателя при различных законах регулирования и типах преобразователей частоты./ Н.А. Осташевский, В.И. Иваненко, А.Н. Петренко // Электротехніка і електромеханіка. – 2009. – № 3. – С. 37-41.

Bibliography (transliterated): 1. Volkov A.V. Matematicheskaya model' obschih poter' moschnosti v chastotno-reguliruemom asinhronnom `elektroprivode / A.V. Volkov, Yu.S. Skol'ko // Elektrotehnika i elektromehanika. - 2006. - № 2. - S. 22-77. 2. Malafeev S.I., Zaharov A.V. Issledovanie poter' v asinhronnom dvigatele s chastotnym regulirovaniem pri perhodnyh processah / S.I. Malafeev, A.V. Zaharov // `Elektrotehnika. - 2008. - № 7. - S. 2-6. 3. Ostashevskij N.A. Poteri chastotno-upravlyаемого asinhronnogo dvigatelya pri razlichnyh zakonah regulirovaniya i tipah preobrazovatelej chastoty./ N.A. Ostashevskij, V.I. Ivanenko, A.N. Petrenko // Elektrotehnika i elektromehanika. - 2009. - № 3. - S. 37-41.

Поступила 18.06.2012

Петренко Александр Николаевич,
начальник расчетного отдела СКБ ХЭЛЗ "Укрэлектромаш"
61050, Харьков, ул. Искринская, 37

Тянянский Владислав Юрьевич,
Петренко Николай Яковлевич, к.т.н., доц.
Национальный технический университет
"Харьковский политехнический институт"
каф. "Электрические машины"
61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21

Petrenko A.N., Tanyanskyi V.I., Petrenko N.Y.

Additional power loss in a frequency-controlled induction motor due to voltage higher harmonics.

Problems of calculating additional power loss in a frequency-controlled induction motor AIP 160S4 resulted from voltage higher harmonics are considered. Ways of the loss reduction through changing the rotor tooth zone are suggested.

Key words – frequency-controlled induction motor, additional power loss, rotor tooth zone variation.