СКОЛЬЖЕНИЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ПАРАМЕТРАХ НЕСИММЕТРИИ ПИТАЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

Шелехова О. Г.

Несимметрия питающего напряжения является одним из наиболее существенных факторов повреждения асинхронного двигателя (АД). По данным экспериментальных исследований, которые представлены в литературе, до 45 % отказов асинхронных электродвигателей связано с нарушением симметрии напряжения на их зажимах. Одним из диагностических параметров, применяемых в устройствах защиты АД от тепловых перегрузок, является скольжение. По результатам исследования получены аналитические зависимости скольжения АД от параметров несимметрии питающего напряжения. Обоснован более интенсивный рост токов при несимметрии питающего напряжения и одновременном снижении напряжения прямой последовательности. Результаты исследования могут быть использованы при разработке алгоритмов работы устройств защиты АД от тепловых перегрузок.

Несиметрія напруги живлення є одним з найбільш суттєвих факторів пошкодження асинхронного двигуна (АД). За даними експериментальних досліджень, які наведено у літературі, до 45 % відмов асинхронних електродвигунів пов'язано з порушенням симетрії на їх затисках. Одним з діагностичних параметрів, які застосовуються у пристроях захисту АД є ковзання. За результатами дослідження одержано аналітичні залежності ковзання двигуна залежно від параметрів несиметрії напруги живлення. Обґрунтовано більш інтенсивне зростання струмів при порушенні симетрії напруги живлення та одночасному зниженні напруги прямої послідовності. Результати дослідження можуть бути використані при розробці алгоритмів роботи пристроїв захисту АД від теплових перевантажень.

The asymmetry of the power supply is one of the most significant damage to the induction motor (IM). According to experimental studies, which are presented in the literature, up to 45 % failure rate of induction motors due to the symmetry breaking voltages at their terminals. One of the diagnostic parameters used in the protection devices of IM-thermal transition gruzok is slipping. According to the study, analytical glide depending on the parameters of input voltage unbalance. Justified a more intensive growth in the current single-ended supply voltage and geometry while reducing sequence voltage. The results of the study can be used to develop algorithms protection devices induction motors against thermal overload.

Шелехова О. Г.

канд. техн. наук, доц., ДВНЗ «ДонНТУ»

jenjaistorik@mail.ru

ДВНЗ «ДонНТУ» – Державний вищій навчальний заклад «Донецький національний технічний університет»; м. Донецьк.

УДК 621.313.333.018

Шелехова О. Г.

СКОЛЬЖЕНИЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ПАРАМЕТРАХ НЕСИММЕТРИИ ПИТАЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

Одной из распространенных причин аварийности асинхронных двигателей (АД) является несимметрия питающего напряжения [1]. По данным экспериментальных исследований, которые представлены в литературе [2], до 45 % отказов асинхронных электродвигателей связано с нарушением симметрии напряжения на их зажимах. Появление напряжения обратной последовательности приводит к неравномерному распределению токов в обмотках трехфазных АД, росту температур отдельных фаз и – возможному повреждению АД.

В связи с этим актуальным является вопрос оценки влияния несимметрии питающего напряжения на диагностические параметры, одним из которых является скольжение асинхронного двигателях.

Оценка влияния несимметрии на диагностические параметры рассмотрена в работах таких отечественных и российских авторов, как В. Я. Беспалов, И. В. Жежеленко [3], И. П. Копылов, Э. Г. Куренный, В. Ф. Сивокобыленко [4], И. А. Сыромятников, И. И. Трещев, М. М. Федоров [5] и др. Однако влияние параметров несимметрии питающего напряжения на скольжение асинхронного двигателя изучено недостаточно и требует дальнейшего исследования.

Целью данной работы была оценка влияния несимметрии питающего напряжения на скольжения асинхронного двигателя.

В качестве параметров несимметрии питающего напряжения принято использовать [6, 7] напряжение прямой последовательности ($U_{пр}$), обратной последовательности ($U_{обр}$) и угол сдвига между ними ($\Delta\psi$).

Для оценки характера изменения скольжения АД при несимметрии питающего напряжения воспользуемся уравнением равновесия моментов [8]:

$$M_{эм} = M_{пр} - M_{обр} \text{ или:}$$

$$M_{эм} = \frac{m_1 \cdot U_{пр}^2 \cdot r_2'}{s_{нс}\omega_C\left[\left(r_1 + C_1\frac{r_2'}{s_{нс}}\right)^2 + \left(X_1 + C_1 X_2'\right)^2\right]} - \frac{m_1 \cdot U_{обр}^2 \cdot r_2'}{s_н\omega_C\left[\left(r_1 + C_1\frac{r_2'}{2 - s_н}\right)^2 + \left(X_1 + C_1 X_2'\right)^2\right]}, \quad (1)$$

где $s_{нс}$ – скольжение асинхронного двигателя при несимметрии питающего напряжения.

Для случая, когда $U_{пр} = U_н$ выражение (1) примет вид:

$$\frac{m_1 \cdot U_н^2 \cdot r_2'}{s_н\omega_C\left[\left(r_1 + C_1\frac{r_2'}{s_н}\right)^2 + \left(X_1 + C_1 X_2'\right)^2\right]} = \frac{m_1 \cdot U_н^2 \cdot r_2'}{s_{нс}\omega_C\left[\left(r_1 + C_1\frac{r_2'}{s_{нс}}\right)^2 + \left(X_1 + C_1 X_2'\right)^2\right]} - \frac{m_1 \cdot U_н^2 \cdot K_{2u}^2 \cdot r_2'}{s_{нс}\omega_C\left[\left(r_1 + C_1\frac{r_2'}{2 - s_{нс}}\right)^2 + \left(X_1 + C_1 X_2'\right)^2\right]}; \quad (2)$$

Разделим левую и правую часть выражения (2) на $\frac{m_1 \cdot U_н^2 \cdot r_2'}{\omega_C}$, тогда:

$$\frac{1}{s_н\left[\left(r_1 + C_1\frac{r_2'}{s_н}\right)^2 + \left(X_1 + C_1 X_2'\right)^2\right]} = \frac{1}{s_{нс}\left[\left(r_1 + C_1\frac{r_2'}{s_{нс}}\right)^2 + \left(X_1 + C_1 X_2'\right)^2\right]} - \frac{K_{2u}^2 \cdot}{s_{нс}\left[\left(r_1 + C_1\frac{r_2'}{2 - s_{нс}}\right)^2 + \left(X_1 + C_1 X_2'\right)^2\right]}; \quad (3)$$

Учитывая, что при глубокой несимметрии напряжения сети:

$$\frac{1}{s_{нс}\left[\left(r_1 + C_1\frac{r_2'}{s_{нс}}\right)^2 + \left(X_1 + C_1 X_2'\right)^2\right]} \gg \frac{K_{2u}^2}{s_{нс}\left[\left(r_1 + C_1\frac{r_2'}{2 - s_{нс}}\right)^2 + \left(X_1 + C_1 X_2'\right)^2\right]},$$

тогда:

$$\frac{1}{s_н\left[\left(r_1 + C_1\frac{r_2'}{s_н}\right)^2 + \left(X_1 + C_1 X_2'\right)^2\right]} \approx \frac{1}{s_{нс}\left[\left(r_1 + C_1\frac{r_2'}{s_{нс}}\right)^2 + \left(X_1 + C_1 X_2'\right)^2\right]} \quad (4)$$

Откуда следует, что при $U_{пр} = U_н$:

$$s_{нс} \approx s_н \quad (5)$$

Для оценки границ применения полученного выражения (5) выполнен расчет скольжения АД различной мощности с использованием общепринятой методики [8] и на основании упрощенного уравнения (5). В качестве примера в табл. 1 представлены скольжения АД различной мощности с сопротивлением короткого замыкания $X_к^* = 0.17 \div 0.25$ при различных значениях K_{2U} и $U_{пр} = U_н$.

Таблица 1

Скольжения АД различной мощности при различных значениях K_{2U} и $U_{пр} = U_н$

K_{2U}, %	$X_к^* = 0,17$	$X_к^* = 0,19$	$X_к^* = 0,21$	$X_к^* = 0,23$	$X_к^* = 0,25$
5	1,01	1,01	1,00	1,00	1,00
10	1,03	1,02	1,01	1,01	1,00
15	1,06	1,05	1,04	1,03	1,02
20	1,12	1,10	1,09	1,07	1,06

Из анализа результатов, представленных в табл. 1 следует, что выражение (5) справедливо для АД любой мощности при несимметрии напряжения менее 10 % (погрешность расчета в этом случае не превышает 1–3%). Итак, при $U_{пр} = U_н$ скольжение асинхронного двигателя остается неизменным при увеличении несимметрии питающего напряжения

(при $K_{2U} \leq 10\%$). Поэтому, при $U_{пр} = U_{1н}$ токи прямой последовательности статора и ротора остаются неизменными $I_{1пр} = const$, $I_{2пр} = const$ и не зависят от K_{2U} (рис. 1 а). Рост результирующих токов (рис 1 б) в этом случае связан только с добавлением токов обратной последовательности.

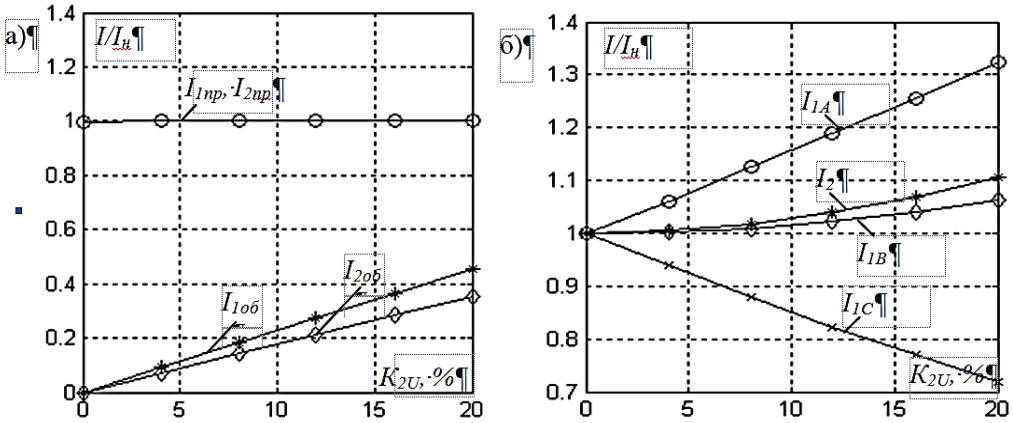

Рис. 1 Симметричные составляющие токов прямой ($I_{1пр}$, $I_{2пр}$) и обратной ($I_{1обр}$, $I_{2обр}$) последовательностей (рис. 1, а) результирующие токи статора (I_{1A}, I_{1B}, I_{1c}) и ротора (I_2) (рис. 1, б) при различных значениях K_{2U}

Сдвиг по фазе между напряжениями прямой и обратной последовательностей не влияет на момент асинхронной машины, поэтому его скольжение остается постоянным и не зависит от $\Delta\psi$.

В случае, когда $U_{пр} \neq U_н$ уравнение равновесия моментов (1) имеет вид:

$$\frac{m_1 \cdot U_н^2 \cdot r_2'}{s_н \omega_C \left[\left(r_1 + C_1 \frac{r_2'}{s_н}\right)^2 + \left(X_1 + C_1 X_2'\right)^2\right]} = \frac{m_1 \cdot U_{пр}^2 \cdot r_2'}{s_{нс} \omega_C \left[\left(r_1 + C_1 \frac{r_2'}{s_{нс}}\right)^2 + \left(X_1 + C_1 X_2'\right)^2\right]}$$

$$\frac{m_1 \cdot U_{обр}^2 \cdot K_{2u}^2 \cdot r_2'}{s_{нс} \omega_C \left[\left(r_1 + C_1 \frac{r_2'}{2 - s_{нс}}\right)^2 + \left(X_1 + C_1 X_2'\right)^2\right]}; \quad (6)$$

Разделив левую и правую часть уравнения (6) на $\frac{m_1 \cdot U_н^2 \cdot r_2'}{\omega_C}$ и учитывая, что

$K_U = \frac{U_{пр}}{U_н}$, получим:

$$\frac{1}{s_н\left[\left(r_1 + C_1\frac{r_2'}{s_н}\right)^2 + \left(X_1 + C_1 X_2'\right)^2\right]} = \frac{K_и^2}{s_{нс}\left[\left(r_1 + C_1\frac{r_2'}{s_{нс}}\right)^2 + \left(X_1 + C_1 X_2'\right)^2\right]} - \frac{K_{2и}^2}{s_{нс}\left[\left(r_1 + C_1\frac{r_2'}{2 - s_{нс}}\right)^2 + \left(X_1 + C_1 X_2'\right)^2\right]}; \quad (7)$$

Учитывая, что при несимметрии напряжения сети менее 10 % величина $K_{2и}^2$ не превышает, 0,01 имеем:

$$\frac{1}{s_{нс}\left[\left(r_1 + C_1\frac{r_2'}{s_{нс}}\right)^2 + \left(X_1 + C_1 X_2'\right)^2\right]} » \frac{K_{2и}^2}{s_{нс}\left[\left(r_1 + C_1\frac{r_2'}{2 - s_{нс}}\right)^2 + \left(X_1 + C_1 X_2'\right)^2\right]},$$

тогда:

$$\frac{1}{s_н\left[\left(r_1 + C_1\frac{r_2'}{s_н}\right)^2 + \left(X_1 + C_1 X_2'\right)^2\right]} \approx \frac{K_и^2}{s_{нс}\left[\left(r_1 + C_1\frac{r_2'}{s_{нс}}\right)^2 + \left(X_1 + C_1 X_2'\right)^2\right]} \quad (8)$$

Откуда следует, что:

$$\frac{s_{нс}}{K_и^2 s_н} \approx \frac{\left[\left(r_1 + C_1\frac{r_2'}{s_н}\right)^2 + \left(X_1 + C_1 X_2'\right)^2\right]}{\left[\left(r_1 + C_1\frac{r_2'}{s_{нс}}\right)^2 + \left(X_1 + C_1 X_2'\right)^2\right]} \quad (9)$$

или:

$$s_{нс} \approx s_н K_и^2 \cdot L \quad (10)$$

где

$$L = \frac{\left[\left(r_1 + C_1\frac{r_2'}{s_н}\right)^2 + \left(X_1 + C_1 X_2'\right)^2\right]}{\left[\left(r_1 + C_1\frac{r_2'}{s_{нс}}\right)^2 + \left(X_1 + C_1 X_2'\right)^2\right]}. \quad (11)$$

Для асинхронных машин единых серий коэффициент $L \approx 1.02 \div 1.04$.

Из выражения (10) следует, что при несимметрии питающего напряжения и одновременном снижении напряжения прямой последовательности скольжение АД растет прямо

пропорционально квадрату напряжения прямой последовательности. В этом случае рост токов в обмотках АД связан как с добавлением симметричных составляющих токов обратной последовательности, так и с ростом симметричных составляющих токов прямой и обратной последовательностей вследствие роста скольжения АД.

Таким образом, результаты исследования позволяют обосновать более интенсивный рост токов при несимметрии питающего напряжения и одновременном снижении напряжения прямой последовательности.

ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований получены аналитические зависимости скольжения асинхронного двигателя от параметров несимметрии питающего напряжения.

Установлено, что при постоянном значении напряжения прямой последовательности скольжение асинхронного двигателя мало изменяется при росте несимметрии в пределах 10 %. Поэтому величины токов прямой последовательности статора и ротора также остаются неизменными и не зависят от коэффициента несимметрии на зажимах электродвигателя.

Сдвиг по фазе между напряжениями прямой и обратной последовательности не влияет на скольжение АД.

При несимметрии питающего напряжения и одновременном снижении напряжения прямой последовательности скольжение АД растет прямо пропорционально квадрату напряжения прямой последовательности. В этом случае рост токов в обмотках АД связан как с добавлением симметричных составляющих токов обратной последовательности, так и с ростом симметричных составляющих токов прямой и обратной последовательностей вследствие роста скольжения АД. Таким образом, результаты исследования позволяют обосновать более интенсивный рост токов при несимметрии питающего напряжения и одновременном снижении напряжения прямой последовательности.

Результаты исследования могут быть использованы при разработке алгоритмов работы устройств защиты АД от тепловых перегрузок.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гетманенко В. М. Устройство для защиты асинхронного двигателя/В. М. Гетманенко, М. А. Иваница // Научный журнал КубГАУ. – 2011. – № 73(09). – С. 11 –18.

2. Данилов В. Н. Классификация устройств защиты электродвигателей от аварийных режимов /В. Н. Данилов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1987. – № 6. – С. 34 – 37.

3. Жежеленко И. В. Влияние несимметрии параметров линии электропередачи на частотне характеристики входных сопротивлений и проводимостей электрических сетей/И. В. Жежеленко, В. В. Нестерович //Вісник Приазовського державного технічного університету. – Маріуполь. – 2003. – Вип. 13. – С. 8 –16.

4. Сивокобыленко В. Ф. Диагностика асинхронного электропривода по данным измерения рабочего режима / В. Ф. Сивокобыленко, Д. В. Полковниченко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет». Збірник наукових праць. Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика» .– Харків:НТУ «ХПІ», 2001., № 10. – Т.1. – С. 502 – 505.

5. Особенности моделирования и анализ пусковых и рабочих характеристик при различных напряжениях сети/ М. М. Федоров и др. // Известия ТРТУ. Компьютерные технологии в инженерной и управленческой деятельности. – Таганрог – 2000. – С. 237 – 241.

6. Пинчук О. Г. Моделирование токов и температур асинхронных двигателей при различных характеристиках несимметрии сети: методические подходы/ О. Г. Пинчук// Моделирование и компьютерная графика: Материалы 2-й междунар. научн.-технич. конф. Донецк, 10 - 12 октября 2007 г. - Донецьк, 2007. – С. 347 – 353.

7. Пинчук О. Г. Защита от тепловых перегрузок обмоток асинхронных двигателей при несимметрии питающего напряжения / О. Г. Пинчук// Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Електротехніка і енергетика», випуск 7 (128). – Донецьк, 2007. – С. 193 – 196.

8. Копылов И. П. Математическое моделирование электрических машин: Учеб. для вузов / И. П. Копылов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 2001. – 327с.

Статья поступила в редакцию 30.11.2013 р.