

ТЕПЛОВОЕ СОСТОЯНИЕ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В ПОВТОРНО-КРАТКОВРЕМЕННЫХ РЕЖИМАХ С ЧАСТЫМИ ПУСКАМИ ПРИ НЕСИММЕТРИИ ПИТАЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

Пинчук О.Г.

Донецкий национальный технический университет

The paper deals with the purpose of sectional operation was a research of a thermal state a AD in intermittent duties with often startings at an asymmetrical supply voltage.

Тепловое состояние обмоток асинхронных двигателей (АД) является важнейшим фактором, определяющим их надежную эксплуатацию. Прогнозирование теплового состояния обмоток позволяет исключить их тепловую перегрузку в тяжелых режимах работы, одним из которых является повторно-кратковременный режим с частыми пусками при несимметричном питающем напряжении.

В повторно-кратковременных режимах с частыми пусками АД непрерывно работают в переходных режимах, при этом время пуска t_n зачастую соизмеримо со временем рабочего участка. На нагрев двигателя влияют время пуска t_n и средние значения потерь в обмотках в период пуска P_n и на рабочем участке $P_{ном}$. Несимметрия питающего напряжения в значительной степени влияет как на время пуска t_n , так и на распределение потерь P_n и $P_{ном}$ в элементах конструкции АД [1].

Целью данной работы было исследование теплового состояния АД в повторно-кратковременных режимах с частыми пусками при несимметричном питающем напряжении.

В качестве меры несимметрии напряжений АД используют коэффициент несимметрии обратной последовательности K_{2U} , который определяют, отношением напряжения обратной последовательности основной частоты к номинальному линейному напряжению, %. При этом подразумевается, что сдвиг по фазе $\Delta\psi = \psi_{Uпр} - \psi_{Uобр}$ между $\underline{U}_{пр}$ и $\underline{U}_{обр}$ равен 0. Однако на практике имеет место изменение напряжений прямой и обратной последовательности не только по величине, но и по фазе. Проведенные в [1] исследования показали, что при исследовании влияния несимметрии питающего напряжения на эксплуатационные характеристики АД необходимо принимать сдвиг по фазе между напряжениями прямой и обратной последовательности $\Delta\psi$ равным $\Delta\psi_{1max}$, что соответствует максимальным тепловым нагрузкам в статорной обмотке при заданном уровне несимметрии. Предложена методика [1], позволяющая определить $\Delta\psi_{1max}$, а также распределение потерь в элементах конструкции АД, соответствующее $\Delta\psi_{1max}$.

В качестве примера был произведен расчет теплового состояния двигателя типа МТН 111-6 в повторно-кратковременном режиме с частыми пусками ($\Pi В=0,4$, $t_n=1$ мин) при фиксированном значении $\underline{U}_{пр} = U_{1н}$, и различных значениях напряжения обратной последовательности $|\underline{U}_{обр}| = [0,05U_{1н}, 0,1U_{1н}, 0,15U_{1н}, 0,2U_{1н}, 0,25U_{1н}]$, при $\Delta\psi = \Delta\psi_{1max}$.

Расчет действующих значений токов при пуске и в установившемся режиме осуществлялся с помощью математической модели [2]. В табл.1 для различных значений напряжения обратной последовательности приведены величины действующих значений токов в о. е. при пуске: в первичной ($I_{1А, п}$, $I_{1В, п}$, $I_{1С, п}$) и вторичной обмоток ($I_{2А, п} = I_{2В, п} = I_{2С, п} = I_{2ф, п}$) и в принужденном режиме: в первичной ($I_{1А, уст}$, $I_{1В, уст}$, $I_{1С, уст}$) и вторичной ($I_{2А, уст} = I_{2В, уст} = I_{2С, уст} = I_{2ф, уст}$) обмоток. Для каждого уровня несимметрии фиксировалось время переходного процесса t_n . В качестве базовых были приняты номинальные значения токов статорной $I_{1н}$ и роторной обмоток $I_{2н}$.

Таблица 1

Действующие значения токов в фазах первичной и вторичной обмоток при пуске и в установившемся режиме в о.е. при различных уровнях K_{2U} и $\Delta\psi = \Delta\psi_{1max}$

| K_{2U} , % | 0 | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 |
|----------------------|------|------|------|------|------|------|
| $I_{1А, п}$, о.е. | 3.00 | 3.13 | 3.22 | 3.31 | 3.54 | 3.77 |
| $I_{1В, п}$, о.е. | 3.00 | 2.81 | 2.58 | 2.44 | 2.41 | 2.38 |
| $I_{1С, п}$, о.е. | 3.00 | 2.84 | 2.67 | 2.58 | 2.61 | 2.64 |
| $I_{2ф, п}$, о.е. | 3.75 | 3.79 | 3.83 | 3.86 | 3.90 | 3.94 |
| $I_{1А, уст}$, о.е. | 1.00 | 1.24 | 1.42 | 1.63 | 1.86 | 2.08 |
| $I_{1В, уст}$, о.е. | 1.00 | 0.95 | 0.86 | 0.84 | 0.87 | 0.95 |
| $I_{1С, уст}$, о.е. | 1.00 | 0.98 | 0.92 | 0.94 | 1.02 | 1.15 |
| $I_{2ф, уст}$, о.е. | 1.00 | 1.02 | 1.06 | 1.14 | 1.34 | 1.60 |
| t_n , о.е. | 1.00 | 1.04 | 1.07 | 1.11 | 1.15 | 1.19 |

тенсивный рост токов при асимметрии имеет место в установившемся режиме. Так при изменении напряжения обратной последовательности на 5% токи в фазах В и С статорной обмотки уменьшатся соответственно в 1.02 и 1.01 раз – для пускового и в 1.05 и 1.02 – для принужденного режима, а в фазе А выросли соответственно в 1.08 и 1.24 раз. А при изменении напряжения обратной последовательности на 15% токи в фазах В и С статорной обмотки уменьшатся соответственно в 1.19 и 1.12 раз – для пускового и в 1.19 и 1.06 – для принужденного режима, а в фазе А выросли соответственно в 1.14 и 1.63 раз. В следствие неравномерности распределения токов потери в различных фазах могут существенно отличаться, что приводит к тому, что температура одной из фаз может оказаться значительно больше, чем двух других.

Потери в пазовых и лобовых частях обмоток статора и ротора пропорциональны квадрату тока в соответствующих фазах первичной и вторичной обмоток. Далее в соответствии с методикой [3] по известным относительным значениям токов первичной и вторичной обмоток выполнялся расчет векторов потерь при пуске $P_{п}$ и в принужденном режиме $P_{ном}$.

По полученному распределению потерь вычислялись значения температур узлов АД. Динамика тепловых процессов описывается системой дифференциальных уравнений, полученных с помощью эквивалентной тепловой схемы (ЭТС), в которой в качестве узлов выделены отдельные фазы обмоток статора [3]. Для двигателя с фазным ротором в качестве узлов были выбраны: 1, 2, 3 – пазовые части обмоток статора; 4 – пазовые части обмоток ротора; 5 – пакет статора; 6 – пакет ротора; 7, 8, 9 – лобовые части обмоток статора; 10 – лобовые части обмоток ротора; 11 – внутренний воздух; 12 – корпус. Система дифференциальных уравнений в матричном виде, полученная с помощью ЭТС, описывающих тепловые процессы при нагреве и охлаждении в узлах АД, имеет вид: $C \frac{d\theta}{dt} + \Lambda \theta = P$, где $(\theta_1, \dots, \theta_8)^T$ – вектор столбец превышения температур соответствующих узлов над температурой окружающей среды θ_0 ; C – диагональная матрица теплоемкостей узлов двигателей; $\Lambda = (\lambda_{ij})$ – матрица теплопроводностей ЭТС АД; $P = (P_1, \dots, P_8)^T$. При пуске элементы вектора потерь равны $P = P_{п}$, при работе под нагрузкой $P = P_{ном}$, а в режиме охлаждения $P = 0$.

В табл.2 в качестве примера представлены рассчитанные средние значения температуры ($\theta_{ср}$) узлов АД МТН 111-6 в квазиустановившемся состоянии в режиме S4 (ПВ=0.4, $t_u=1$ мин) при несимметричном питающем напряжении в абсолютных и относительных единицах. В качестве базового значения температуры была принята величина температуры наиболее нагретого узла в режиме S1 – лобовой части обмотки статора $\theta_{уст} = 114^\circ\text{C}$.

Таблица 2

Средние значения температур ($\theta_{ср}$) в режиме S4 (ПВ=0.4, $t_u=1$ мин) при несимметричном питающем напряжении АД МТН111-6.

| $K_{2U}, \%$ | θ | № узла | | | | | | | |
|--------------|---------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 0 | $\theta_{ср}$ | 94.2 | 94.2 | 94.2 | 112.4 | 111.5 | 111.5 | 111.5 | 114.0 |
| | | 0.83 | 0.83 | 0.83 | 0.99 | 0.98 | 0.98 | 0.98 | 1.00 |
| 5 | $\theta_{ср}$ | 99.2 | 94.2 | 95.1 | 114.3 | 118.3 | 110.6 | 111.9 | 118.0 |
| | | 0.86 | 0.83 | 0.83 | 0.99 | 1.02 | 0.97 | 0.98 | 1.02 |
| 10 | $\theta_{ср}$ | 108.5 | 98.2 | 100.0 | 121.8 | 130.7 | 114.8 | 117.5 | 125.7 |
| | | 0.94 | 0.85 | 0.86 | 1.05 | 1.13 | 1.01 | 1.02 | 1.08 |
| 15 | $\theta_{ср}$ | 121.6 | 105.5 | 108.3 | 133.6 | 147.7 | 123.0 | 127.3 | 138.0 |
| | | 1.05 | 0.91 | 0.93 | 1.15 | 1.27 | 1.06 | 1.10 | 1.19 |
| 20 | $\theta_{ср}$ | 142.7 | 119.8 | 123.8 | 155.0 | 174.9 | 139.5 | 145.7 | 160.0 |
| | | 1.23 | 1.03 | 1.07 | 1.34 | 1.51 | 1.20 | 1.26 | 1.38 |
| 25 | $\theta_{ср}$ | 172.5 | 141.1 | 146.9 | 186.3 | 213.0 | 164.4 | 173.2 | 192.6 |
| | | 1.49 | 1.22 | 1.27 | 1.61 | 1.84 | 1.42 | 1.49 | 1.66 |

Из табл. 2 следует, что в режиме S4 при симметричном питающем напряжении ($K_{2U}=0$) наиболее нагретым узлом является обмотка ротора, что можно объяснить худшими условиями теплоотвода в роторе.

При несимметричном питающем напряжении происходит рост температур всех узлов, однако, наибольшие тепловые нагрузки испытывает лобовая часть наиболее нагруженной фазы статора (узел 7). Это можно объяснить тем, что при несимметричном питающем напряжении происходит перераспределение потерь, и потери в одной из фаз статора значительно больше, чем в двух других. При $K_{2U} = 10\%$ температура в узлах лобовой части обмотки статора выросла на 17% - в наиболее нагруженной фазе А, и на 3% и 5% соответственно в фазах В и С. Темп роста температуры в обмотках ротора при этом составил 10%. При уровне несимметрии $K_{2U} = 20\%$ температуры в узлах лобовой части обмотки статора выросли на 57%, 25%, 31% соответственно для фаз А, В и С, а в лобовой части обмотки ротора - на 43%. Необходимо отметить, что нарушение симметрии питающего напряжения менее чем на 15% сопровождается снижением потерь в фазах В и С первичной обмотки (табл.1), однако температуры соответствующих узлов повышаются при увеличении асимметрии (табл.2).

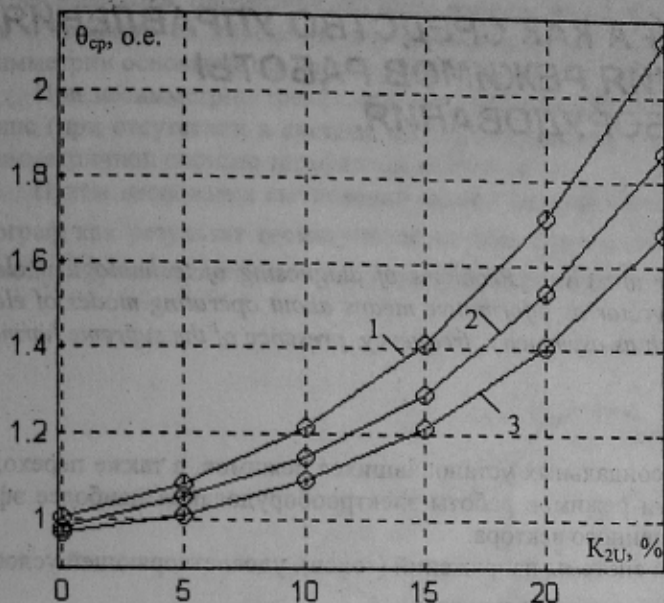


Рис. 1 Залежність середньої температури лобової частини найбільш навантаженої фази А первинної обмотки в о. е. от уровня несимметрии при различных продолжительностях включения: 1 – ПВ-60; 2 – ПВ-40; 3 – ПВ-25 ($t_{\text{в}}=1$ мин)

температури лобової частини обмотки статора (фази А) збільшилися по порівнянню з симетричним режимом – в 1,2, 1,3, 1,4 раз відповідно для ПВ-25, 40 і 60.

Рост температур в вузлах АД при несиметрії приводить до зниження строку служби ізоляції АД. Так при експлуатації АД в режимі S4 при рівні несиметрії $K_{2U} = 5\%$ строк служби двигателя по порівнянню з номінальним знизиться в 1,3, 1,4 і 1,5 раз відповідно для ПВ 25, 40 і 60. Зниження строку служби по порівнянню з номінальним при $K_{2U} = 10\%$ склало 2,1, 2,8, 3,2 раз, а при рівні $K_{2U} = 20\%$ – 14,1, 28,1, 63,9 раз відповідно для ПВ 25, 40 і 60.

Результати розрахунок дозволили оцінити вплив несиметрії живлячого напруги на теплове стан АД в повторно-кратковремених режимах з частими пусками. В статті показано, що при асиметрії живлячого напруги відбувається зростання температур всіх вузлів АД, однак, найбільші теплові навантаження відчуває лобова частина найбільш навантаженої фази статора. Результати розрахунок дозволили оцінити строк служби АД для різних значень ПВ. По отриманих результатах можна виконати розрахунок необхідних величин зниження навантажень, які дозволять зберегти ресурс ізоляційних матеріалів.

ЛИТЕРАТУРА

1. Федоров М.М., Пинчук О.Г. Особенности теплового состояния асинхронных двигателей при несимметричном питающем напряжении / Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – 2004, Вып. 2 / 2004 (25) – с.122 – 125.
2. Толочко О.І., Чекавський Г.С., Мірошник Д.М. Векторні моделі асинхронного двигуна у середовищі пакета Matlab./ праці Кременчуцького державного політехнічного університету. – 2003, Том 1, №2 (19) – с.199 – 202.
3. Федоров М.М., Денник В.Ф., Корощенко А.В. Исследование распределения температур узлов асинхронного двигателя при несимметрии питающих напряжений // Сб. тр. ДонГУ. Сер. электротехника и энергетика – Донецк - 1999. - Вып. 4. - С. 138-141.
4. Федоров М.М., Денник В.Ф., Михайлов В.Е., Малеев Д.М. Основы построения систем контроля расхода ресурса изоляционных материалов обмоток электрических машин. – Наукові праці Донецького Державного технічного університету. – Донецк. – 2002. – с.57-60.
5. Федоров М.М. Моделирование динамики теплового состояния электрических машин при повторно-кратковременных режимах работы // Техническая электродинамика. – К. - 2000. - № 4. - С. 38-42.

Рекомендовано д.т.н. проф. Дудніком М.З.