

## ВЛИЯНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ ОБРАТНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Федоров М.М., Пинчук О.Г.

Донецкий национальный технический университет

*In tendered operation the researches are held with the purpose of an estimation of influence of magnitude of a phase of voltage of a revertive succession on electromechanical and thermal values of an induction motor.*

Ежегодно на долю электродвигателей приходится 25-30% общего числа повреждения электрооборудования. Наиболее часто, в 80-85% случаях, неисправной оказывается обмотка двигателя [1]. Повреждение изоляции может быть вызвано перегрузками по току. Увеличение тока в обмотках асинхронного двигателя (АД) вызывает перегрев – дополнительное превышение температуры элементов конструкции АД по сравнению с рабочим режимом.

Одним из распространённых режимов, вызывающим перегрузки асинхронных двигателей (АД) является несимметрия питающего напряжения. Возможная несимметрия напряжения сети регламентирована ГОСТ 13109-97 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения» в пределах 2-4%. В качестве меры несимметрии напряжений АД используют коэффициент несимметрии обратной последовательности  $K_{2U}$ , который определяют, как отношение напряжения обратной последовательности основной частоты к номинальному линейному напряжению, %. При этом подразумевается, что сдвиг по фазе 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 а величина коэффициента несимметрии при этом может достигать 28% и более [3]. В литературных источниках [4] рассматривались вопросы влияния коэффициента несимметрии на эксплуатационные характеристики АД, при этом не учитывался фактор сдвига по фазе между прямым и обратным напряжением. В предлагаемой работе проведены исследования с целью оценки влияния, как величины, так и фазы напряжения обратной последовательности на электромеханические и тепловые характеристики АД. Для этого был произведен расчёт эксплуатационных характеристик электродвигателя с фазным ротором МТН 111-6. При расчётах использовался метод симметричных составляющих, с применением Г - образной схемы замещения (рис.1), для прямой и обратной последовательностей [5]. Расчёт осуществлялся для различных значений сдвига по фазе между напряжениями прямой и обратной последовательности  $\psi_{Uпр} - \psi_{Uобр} = \Delta\psi_{2U} = 0..360^\circ$  при  $\underline{U}_{пр} = \underline{U}_{1н}$  и  $|\underline{U}_{обр}| = \text{const}$ . Алгоритм расчёта был принят следующим. Далее задаваясь шагом  $\Delta s$  начиная с  $s=1$  до  $s=0$  рассчитывались комплексы токов прямой и обратной последовательности согласно Г - образной схемы замещения. Затем величины токов статора ( $I_{1A}, I_{1B}, I_{1C}$ ) и ротора ( $I_{2A}', I_{2B}', I_{2C}'$ ), что дало возможность определить электрические потери первичной ( $P_{M1}$ ) и вторичной ( $P_{M2}$ ) обмоток. При расчете определялся элетромагнитный момент, моменты прямой и обратной последовательности и результирующий, равный их сумме. Отдельно фиксировались параметры АД при  $M = M_n$ .

Расчёт теплового состояния осуществлялся с помощью системы дифференциальных уравнений, полученных с помощью эквивалентной тепловой схемы (ЭТС), в которых в качестве узлов выделены отдельные фазы обмоток [6]. Для двигателя с фазным ротором в качестве узлов были выбраны: 1а, 1в, 1с – пазовые части обмоток статора; 2а, 2в, 2с - пазовые части обмоток ротора; 3 – пакет статора; 4 – пакет ротора; 5а, 5в, 5с – лобовые части обмоток статора; 6а, 6в, 6с – лобовые части обмоток ротора; 7 – внутренний воздух; 8 – корпус. В результате ЭТС имеет 16 тел.

Система алгебраических уравнений в матричной форме, полученная с помощью ЭТС, для расчета температур в установившемся состоянии, имеет вид:  $\Lambda \theta = P$ . Здесь  $\theta = (\theta_1, \dots, \theta_8)^T$  - вектор столбец превышения температур соответствующих узлов над температурой окружающей среды  $\theta_0$ ;  $\Lambda = (\lambda_{ij})$  – матрица теплопроводностей ЭТС АД;  $P = (P_1, \dots, P_8)^T$  – вектор потерь мощности в узлах АД. Расчёт температур в установившемся состоянии осуществлялся для значений фазы напряжения обратной последовательности  $\Delta\psi_{2U} = 0..360^\circ$ .

По изложенной выше методике была проведена серия расчетов для фиксированных значениях напряжения обратной последовательности  $U_{обр}$  и различных значениях фазы напряжения обратной последовательности  $\psi_{2U} = 0..360^\circ$ .

В качестве примера на рис. 1 приведены изменения действующих значений токов статора ( $I_{1A}, I_{1B}, I_{1C}$ ) в функции изменения фазы напряжения обратной последовательности  $\Delta\psi_{2U}$ , при фиксированных  $U_{обр} = 0.05U_{1н}$  (рис.1а) и  $U_{обр} = 0.20U_{1н}$  (рис.1б). Из рис.1 следует, что с изменением  $\Delta\psi_{2U}$  токи в фазах изменяются в широких пределах: при  $U_{обр} = 0.05U_{1н}$   $I = (0.82 \div 1.19)I_{1н}$ , а при  $U_{обр} = 0.20U_{1н}$   $I = (0.35 \div 1.8)I_{1н}$ . В таблице 1 приведено распределение токов в обмотках статора и ротора за пол периода для  $\Delta\psi_{2U}$ , при которых ток первичной обмотки фазы А ( $I_{1A}$ ) принимает свое максимальное ( $\Delta\psi_{2U1}$ , рис.1), минимальное ( $\Delta\psi_{2U3}$ , рис.1) или равное единице ( $\Delta\psi_{2U2}$ , рис.1) значение:

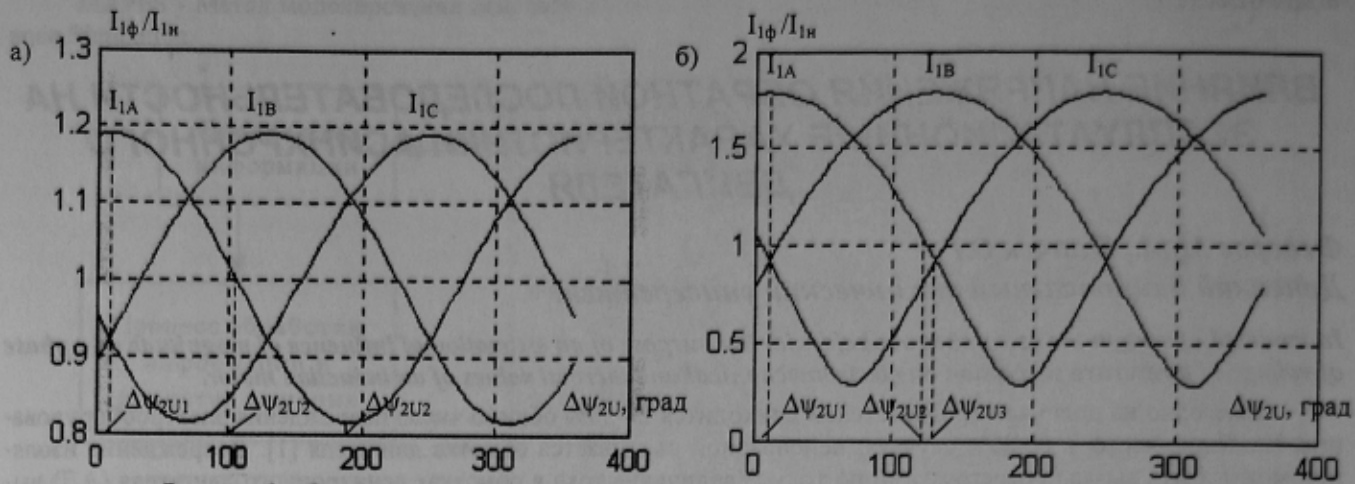


Рисунок 1 – Зависимости фазных токов первичной обмотки от фазы напряжения обратной последовательности при  $U_{obr} = 0.05U_{1n}$  (а) и  $U_{obr} = 0.20U_{1n}$  (б)

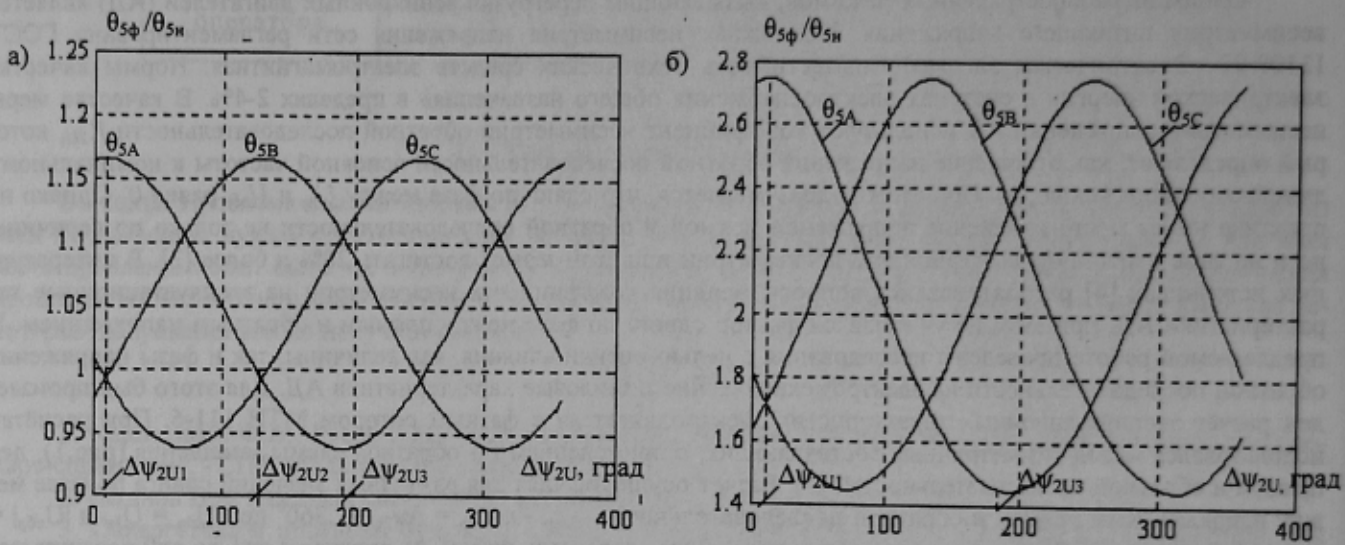


Рисунок 2 – Зависимости превышений температур пазовой части обмотки статора от фазы напряжения обратной последовательности при  $U_{obr} = 0.05U_{1n}$  (а) и  $U_{obr} = 0.20U_{1n}$  (б)

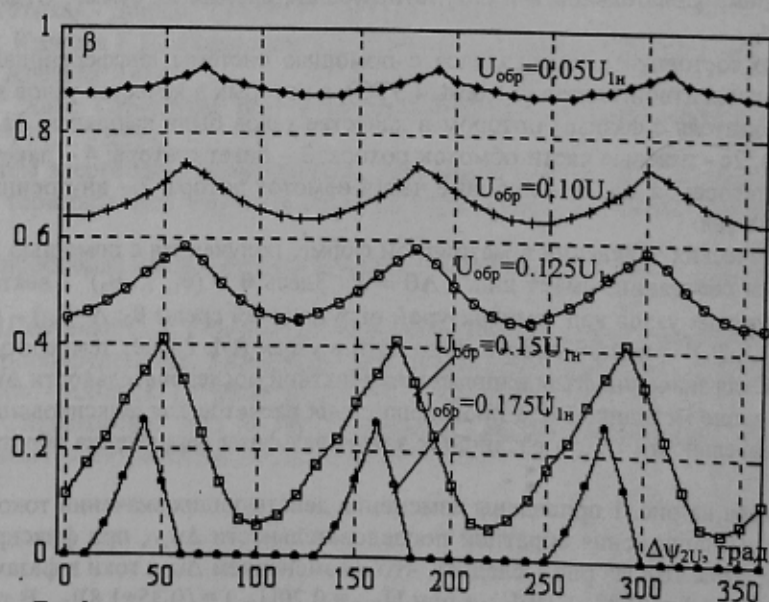


Рисунок 3 – График зависимости коэффициента нагрузки от фазы напряжения обратной последовательности при различных уровнях напряжения обратной последовательности

*Распределение действующих значений токов статорной и роторной обмоток*

Таблица 1

| $K_{2U}, \%$    | $\Delta\psi_{2U}, \text{град}$ | $I_{1A}, \text{отн. ед.}$ | $I_{1B}, \text{отн. ед.}$ | $I_{1C}, \text{отн. ед.}$ | $I'_{2A}, \text{отн. ед.}$ | $I'_{2B}, \text{отн. ед.}$ | $I'_{2C}, \text{отн. ед.}$ |
|-----------------|--------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| $K_{2U} = 5\%$  | 5                              | 1.19                      | 0.92                      | 0.92                      | 1.22                       | 0.77                       | 1.08                       |
|                 | 106                            | 1.00                      | 1.18                      | 0.85                      | 1.15                       | 1.16                       | 0.75                       |
|                 | 185                            | 0.82                      | 1.10                      | 1.10                      | 0.82                       | 1.00                       | 1.25                       |
| $K_{2U} = 20\%$ | 5                              | 1.79                      | 0.95                      | 0.95                      | 1.97                       | 1.59                       | 0.39                       |
|                 | 125                            | 1.00                      | 1.79                      | 0.85                      | 1.59                       | 1.97                       | 0.39                       |
|                 | 185                            | 0.30                      | 1.55                      | 1.55                      | 0.70                       | 2.06                       | 1.36                       |

Аналогичное распределение токов в обмотках (за пол периода для  $\Delta\psi_{2U}$ ) статора и ротора имеет место для  $\Delta\psi_{2U}$  (табл.2), при которых ток вторичной обмотки фазы А ( $I'_{2A}$ ) принимает свое максимальное ( $\Delta\psi_{2U1}$ ), минимальное ( $\Delta\psi_{2U3}$ ) и равное единице ( $\Delta\psi_{2U2}$ ) значение. Следует отметить, что максимальные или минимальные значения токов статорной и роторной обмоток достигаются при различных  $\Delta\psi_{2U}$ .

*Распределение действующих значений токов статорной и роторной обмоток*

Таблица 2

| $K_{2U}, \%$    | $\Delta\psi_{2U}, \text{град}$ | $I'_{2A}, \text{отн. ед.}$ | $I'_{2B}, \text{отн. ед.}$ | $I'_{2C}, \text{отн. ед.}$ | $I_{1A}, \text{отн. ед.}$ | $I_{1B}, \text{отн. ед.}$ | $I_{1C}, \text{отн. ед.}$ |
|-----------------|--------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| $K_{2U} = 5\%$  | 44                             | 1.26                       | 0.90                       | 0.90                       | 1.16                      | 1.03                      | 0.84                      |
|                 | 142                            | 1.00                       | 1.25                       | 0.81                       | 0.88                      | 1.18                      | 0.96                      |
|                 | 224                            | 0.75                       | 1.18                       | 1.18                       | 0.85                      | 1.00                      | 1.17                      |
| $K_{2U} = 20\%$ | 44                             | 2.15                       | 1.05                       | 1.05                       | 1.72                      | 1.32                      | 0.50                      |
|                 | 167                            | 1.00                       | 2.08                       | 1.09                       | 0.47                      | 1.70                      | 1.34                      |
|                 | 224                            | 0.05                       | 1.80                       | 1.80                       | 0.59                      | 1.24                      | 1.75                      |

Нарушение симметрии питающего напряжения вызывает несимметрию токов статора и ротора, которые характеризуются коэффициентами несимметрии  $K_{2i} = \frac{I_{\text{обр}}}{I_{\text{пр}}}$ ,  $K_{1i} = \frac{I_{2\text{обр}}}{I_{2\text{пр}}}$  соответственно. При чем соотношение токов прямой и обратной последовательности постоянно и не зависит от фазы напряжения обратной последовательности, а определяется величиной  $K_{2U}$  (табл.3):

*Зависимости коэффициентов несимметрии по току статора и ротора от коэффициента несимметрии питающего напряжения:*

Таблица 3

| $K_{2U}, \%$ | 5    | 10   | 15   | 20   | 25    |
|--------------|------|------|------|------|-------|
| $K_{1i}, \%$ | 18.8 | 37.3 | 55.3 | 72.6 | 88.9  |
| $K_{2i}, \%$ | 25.6 | 50.6 | 74.3 | 96.3 | 116.2 |

Суммарные электрические потери всех трех фаз первичной ( $P_{1MA}+P_{1MB}+P_{1MC}$ ) и вторичной ( $P_{2MA}+P_{2MB}+P_{2MC}$ ) обмоток одинаковы при всех  $\Delta\psi_{2U}$  и зависят только от величины напряжения обратной последовательности. Однако в силу неравномерности распределения токов в фазах первичной и вторичной обмоток имеет место неравномерность распределения электрических потерь. При этом суммарные электрические потери в обмотках ( $P_{1M}$  и  $P_{2M}$ ) не зависят от фазы напряжения обратной последовательности и растут при увеличении величины коэффициента несимметрии  $K_{2U}$  (табл.4).

*Зависимости потерь в меди первичной и вторичной обмоток от величины коэффициента несимметрии.*

Таблица 4

| $K_{2U}, \%$        | 5    | 10   | 15   | 20   | 25   |
|---------------------|------|------|------|------|------|
| $P_{1M} / P_{1Mн}$  | 1.04 | 1.16 | 1.36 | 1.64 | 2.01 |
| $P_{1MA} / P_{1Mн}$ | 0.47 | 0.64 | 0.84 | 1.07 | 1.33 |
| $P_{1MB} / P_{1Mн}$ | 0.28 | 0.26 | 0.29 | 0.29 | 0.34 |
| $P_{1MC} / P_{1Mн}$ | 0.28 | 0.26 | 0.29 | 0.29 | 0.34 |
| $P_{2M} / P_{2Mн}$  | 1.07 | 1.30 | 1.67 | 2.19 | 2.87 |
| $P_{2MA} / P_{2Mн}$ | 0.53 | 0.78 | 1.09 | 1.46 | 1.90 |
| $P_{2MB} / P_{2Mн}$ | 0.27 | 0.26 | 0.29 | 0.37 | 0.48 |
| $P_{2MC} / P_{2Mн}$ | 0.27 | 0.26 | 0.29 | 0.37 | 0.48 |

Перераспределение потерь вызывает неравномерный нагрев фаз обмоток статора и ротора. В исследуемом АД с фазным ротором с ростом несимметрии наиболее интенсивно растут токи роторной обмотки. Однако наиболее высокую температуру во всем диапазоне изменения  $\Delta\psi_{2U}=0..360^\circ$  имеет пазовая часть обмотки статора (температура  $\theta_5$ ).

В качестве примера на рис.2 приведены изменения превышений установившихся температур пазовой части статорной обмотки ( $\theta_{5A}, \theta_{5B}, \theta_{5C}$ ) от фазы напряжения обратной последовательности  $\Delta\psi_{2U}$  при  $U_{\text{обр}} = 0.05U_{1н}$  (рис.2а) и  $U_{\text{обр}} = 0.20U_{1н}$  (рис.2б). Из рис.2 следует, что с изменением  $\Delta\psi_{2U}$  температуры фазных обмоток изменяются в широких пределах: при  $U_{\text{обр}} = 0.05U_{1н}$   $\theta_5 = (0.94 \div 1.16)\theta_{5н}$ , а при  $U_{\text{обр}} = 0.20U_{1н}$   $\theta_5 =$

$(1.45 \div 2.75)\theta_{5н}$ . В таблице 5 приведены превышения температур за пол периода для  $\Delta\psi_{2U}$ , при которых превышение температуры пазовой части обмотки статора фазы А ( $\theta_{5A}$ ) принимает свое максимальное ( $\Delta\psi_{2U1}$ , рис.2), минимальное ( $\Delta\psi_{2U3}$ , рис.2) или равное единице ( $\Delta\psi_{2U2}$ , рис.1) значение:

Распределение превышений установившихся температур обмоток статора и ротора

Таблица 5

| $K_{2U}, \%$    | $\Delta\psi_{2U}, \text{град}$ | $\theta_{5A}, \text{отн. ед.}$ | $\theta_{5B}, \text{отн. ед.}$ | $\theta_{5C}, \text{отн. ед.}$ | $\theta_{6A}, \text{отн. ед.}$ | $\theta_{6B}, \text{отн. ед.}$ | $\theta_{6C}, \text{отн. ед.}$ |
|-----------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| $K_{2U} = 5\%$  | 5                              | 1.17                           | 0.98                           | 0.98                           | 1.01                           | 0.91                           | 0.97                           |
|                 | 106                            | 1.00                           | 1.17                           | 0.99                           | 0.97                           | 1.01                           | 0.91                           |
|                 | 185                            | 0.94                           | 1.11                           | 1.11                           | 0.92                           | 1.01                           | 0.95                           |
| $K_{2U} = 20\%$ | 5                              | 2.75                           | 1.71                           | 1.71                           | 2.25                           | 1.69                           | 2.02                           |
|                 | 185                            | 1.45                           | 2.35                           | 2.35                           | 1.73                           | 2.30                           | 1.92                           |

По аналогии в таблице 6 приведены превышения температур за пол периода для  $\Delta\psi_{2U}$ , при которых превышение температуры пазовой части обмотки ротора фазы А ( $\theta_{6A}$ ) принимает свое максимальное, минимальное или равное единице значение. При этом максимальные и минимальные значения токов и температур для статорной и роторной обмоток соответственно, достигаются при одинаковых  $\Delta\psi_{2U}$ .

Распределение превышений установившихся температур обмотки ротора

Таблица 6

| $K_{2U}, \%$    | $\Delta\psi_{2U}, \text{град}$ | $\theta_{6A}, \text{отн. ед.}$ | $\theta_{6B}, \text{отн. ед.}$ | $\theta_{6C}, \text{отн. ед.}$ | $\theta_{5A}, \text{отн. ед.}$ | $\theta_{5B}, \text{отн. ед.}$ | $\theta_{5C}, \text{отн. ед.}$ |
|-----------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| $K_{2U} = 5\%$  | 44                             | 1.02                           | 0.93                           | 0.93                           | 1.17                           | 0.99                           | 0.99                           |
|                 | 93                             | 1.00                           | 0.98                           | 0.91                           | 1.06                           | 1.14                           | 0.95                           |
|                 | 224                            | 0.91                           | 0.99                           | 0.99                           | 0.96                           | 1.04                           | 1.16                           |
| $K_{2U} = 20\%$ | 44                             | 2.34                           | 1.82                           | 1.82                           | 2.60                           | 2.04                           | 1.50                           |
|                 | 224                            | 1.67                           | 2.15                           | 2.15                           | 1.53                           | 1.96                           | 2.65                           |

В ходе исследований было выявлено, что  $\Delta\psi_{2U}$ , при которых имеются максимальные или минимальные значения тока или температуры одной из фаз двигателя не являются постоянными для различных АД, а зависят от типа и номинальных параметров двигателя. В общем случае, при  $\Delta\psi_{2U}=0$  никакая из исследуемых функций не достигает ни своего максимального, ни минимального значений.

В случаях перегрева перечисленных выше отрицательных факторов можно избежать снижением нагрузки на валу электродвигателя. На рис. 8 приведен график коэффициента нагрузки двигателя  $\beta=M/M_n$  от фазы напряжения обратной последовательности для  $U_{обр} = [0.05U_{1н} \ 0.10U_{1н} \ 0.125U_{1н} \ 0.15U_{1н} \ 0.175U_{1н}]$  при условии, что температура наиболее нагретого узла не превышает номинальную.

Приведенные кривые показывают, что наличие на входе АД напряжения обратной последовательности  $U_{обр} = 0.05U_{1н}$  требует снижения момента на валу двигателя на величину от 8% (при  $\Delta\psi_{2U} \approx 10^\circ$ ), до 13% (при  $\Delta\psi_{2U} \approx 70^\circ$ ) номинального в зависимости от фазы напряжения обратной последовательности. При  $U_{обр} = 0.10U_{1н}$  снижение нагрузки составляет от 37% (при  $\Delta\psi_{2U} \approx 0^\circ$ ) до 26% (при  $\Delta\psi_{2U} \approx 60^\circ$ ). Дальнейший рост несимметрии ( $U_{обр} = 0.15U_{1н}$ ) требует снижения момента уже на 60% (при  $\Delta\psi_{2U} \approx 100^\circ$ ), а при  $\Delta\psi_{2U} \approx 50^\circ$  требуется снизить момент на 89%, то есть двигатель будет работать вхолостую. При  $U_{обр} = 0.175U_{1н}$  для  $\Delta\psi_{2U}$  от  $50^\circ$  до  $140^\circ$  коэффициент нагрузки  $\beta$  принимает значения меньше 0.1, и двигатель не сможет разогнаться даже вхолостую, а при  $\Delta\psi_{2U} \approx 50^\circ$  двигатель может быть нагружен на 15%.

Предложенная методика позволяет получить распределение токов и температур в элементах конструкции АД для любых значений фазы и амплитуды напряжения обратной последовательности. А также определить закон изменения нагрузки при несимметрии питающего напряжения, позволяющий избежать перегрева обмоток.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Справочник по электрическим машинам: В 2т./ С74 под общ. Ред. И.П. Копылова и Б.К. Клокова Т. 1. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 456с.: ил.
2. ГОСТ 13109 – 97 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
3. Кузнецов В.Г., Николаенко В.Г., Висяшев А.А. Математические модели и анализ неполнофазных режимов ЛЭП. – Техническая электродинамика, 1985, №4.
4. Федоров М.М., Пинчук О.Г. К вопросу о влиянии напряжения обратной последовательности на электромеханические характеристики асинхронного двигателя. / Збірник наукових праць Донецького національного технічного університету. Серія: «Електротехніка і енергетика». Випуск 50. – Донецьк: ДонНТУ, 2002ю – 190с.
5. Вольдек А.И. Электрические машины. – Л.: Энергия, 1974, 839с.
6. Федоров М.М., Денник В.Ф., Корошенко А.В. Исследование распределения температур узлов асинхронного двигателя при несимметрии питающих напряжений // Сб. тр. ДонГТУ. Сер. электротехника и энергетика – Донецк - 1999. - Вып. 4. - С. 138-141.

Надано до редакції:

Рекомендовано до друку:

10.10.2003

д.т.н., проф. Дудник М.З.