

КРИТЕРИЙ ОЦЕНКИ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ОТКЛОНЕНИИ НАПРЯЖЕНИЯ ПРЯМОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ В ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОМ РЕЖИМЕ

Шелехова О. Г.

Результаты исследований, представленные в статье, позволили определить безитерационные зависимости тока статора асинхронного двигателя (АД) от напряжения прямой последовательности при различных параметрах Г-образной схемы замещения. В результате чего предложен критерий оценки теплового состояния АД при эксплуатации в условиях снижения напряжения прямой последовательности в продолжительном режиме работы. Полученные результаты могут быть использованы при разработке алгоритмов работы устройств защиты АД от тепловых перегрузок, в системах контроля и прогнозирования теплового состояния АД.

Результати досліджень, представлені в статті, дозволили визначити безітераційні залежності струму статора асинхронного двигуна (АД) від напруги прямої послідовності при різних параметрах Г-подібної схеми заміщення. В результаті чого запропоновано критерій оцінки теплового стану АД при експлуатації в умовах зниження напруги прямої послідовності в тривалому режимі роботи. Отримані результати можуть бути використані при розробці алгоритмів роботи пристроїв захисту АД від теплових перевантажень, в системах контролю і прогнозування теплового стану АД.

The research results presented in the paper allowed of determining non-iterative dependence of the stator current of the induction motor (IM) on voltage of direct sequence at different parameters of G-shaped equivalent circuit. Assessment criterion of the thermal state of IM when operating in conditions of low voltage of direct sequence in continuous mode is suggested. The obtained results can be used in the development of operation algorithms of protection devices of induction motors against thermal overloads and in control and prediction systems of thermal state of IM.

Шелехова О. Г.

канд. техн. наук, доц. ДонНТУ
jenjaistorik@mail.ru

ДонНТУ – Донецкий национальный технический университет, г. Покровск.

УДК 621.313.333.018

Шелехова О. Г.

КРИТЕРИЙ ОЦЕНКИ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ОТКЛОНЕНИИ НАПРЯЖЕНИЯ ПРЯМОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ В ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОМ РЕЖИМЕ

Асинхронный двигатель (АД) в настоящее время является основой большинства промышленных электроприводов. Однако их эффективному применению препятствует достаточно высокая повреждаемость – около 10 – 25 % [1, 2] общего числа электродвигателей ежегодно [1, 2], из них 30 – 55 % связаны с перегревом вследствие низкого качества напряжения [1, 2].

Трудности косвенной оценки теплового состояния АД по токам в обмотках статора связаны с необходимостью как учета параметров электродвигателя и питающего напряжения, так и режима работы АД. Математические методы определения температур [3, 4] предусматривают предварительный расчет токов и потерь АД. Существующие математические модели [3, 4] для нахождения токов в обмотках АД содержат итерационный цикл (для определения скольжения, соответствующего заданному напряжению) и предполагают использование компьютерной техники, что затрудняет их использование при решении задач, связанных с рациональным выбором, контролем и прогнозированием теплового состояния АД. В связи с этим актуальным является вопрос разработки критерия оценки теплового состояния АД.

Целью данной работы разработка критерия оценки теплового состояния асинхронного двигателя при отклонении напряжения прямой последовательности в продолжительном режиме.

В предшествующих публикациях [5, 6] обоснована аналитическая зависимость скольжения асинхронного двигателя от напряжения прямой последовательности [5, 6]:

$$s_U \approx \frac{s_H}{U_{np}^{*2}} \quad (1)$$

где $U_{np}^* = \frac{U_{np}}{U_H}$ – относительное значение напряжения прямой последовательности;

s_H , s_U – скольжение АД в номинальном режиме и при отклонении напряжения прямой последовательности соответственно.

Выражение (1) позволило исключить итерации при определении токов статора, ротора при различных значениях U_{np} с использованием Т-образной или Г-образной (рис. 1) схем замещения, а также получить аналитические зависимости токов статора и ротора от напряжения прямой последовательности ($I_{1np}^* = f(U_{np}^*)$, $I_{2np}^* = f(U_{np}^*)$).

$$I_{0np}^* = \frac{U_{np}^*}{\sqrt{R_o^{*2} + X_o^{*2}}} ; I_{2np}^* = \frac{U_{np}^*}{\sqrt{\left(X_1^* + X_2^{*'}\right)^2 + \left(R_1^* + \frac{R_2^{*'} \cdot U_{np}^{*2}}{s_H}\right)^2}} \quad (2)$$

где I_{0np}^* , I_{2np}^* – относительные значения токов;

$X_0^*, R_0^*, X_1^*, X_2^*, R_1^*, R_2^*$ – относительные значения параметров схемы замещения

АД. В качестве базового значения сопротивления принято $Z_б = \frac{U_H}{\sqrt{3} \cdot I_{1H}}$.

Векторная диаграмма, построенная в соответствии с Г-образной схемой замещения АД представлена на рис. 2.

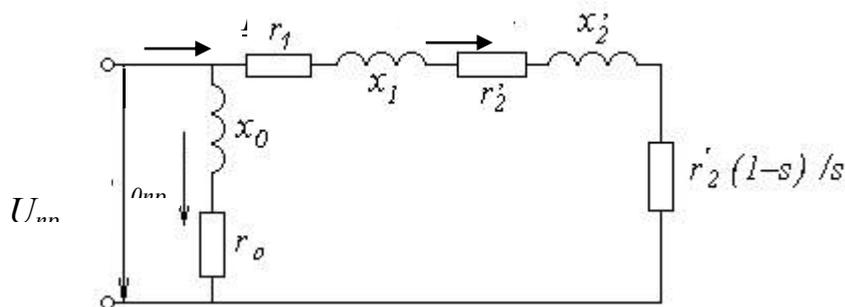


Рис. 1. Г-образная схема замещения АД

Согласно [8] $\varphi_0 \approx \frac{\pi}{2}$, тогда согласно векторной диаграмме величина тока статора

(I_{1np}^*) может быть определена с использованием теоремы косинусов.

$$I_{1np}^* = \sqrt{I_{0np}^{*2} + I_{2np}^{*2} - 2 \cdot I_{0np}^* \cdot I_{2np}^* \cdot \cos(90^\circ + \varphi_2)}, \tag{3}$$

где из ВД (рис.2) $\varphi_2 = \arctg \left(\frac{X_1^* + X_2^*}{R_1^* + \frac{R_2^* \cdot U_{np}^{*2}}{s_H}} \right)$.

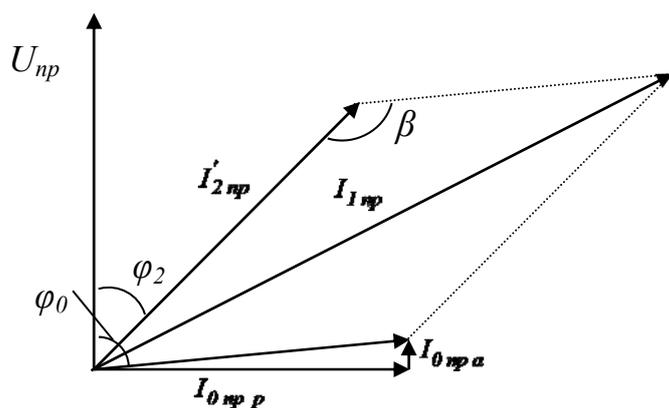


Рис. 2. Векторная диаграмма АД

Выражения (2) представляют собой безитерационные зависимости токов в обмотках статора и ротора в функции напряжения прямой последовательности ($I_{1np}^* = f(U_{np}^*)$, $I_{2np}^* = f(U_{np}^*)$) при различных параметрах Г-образной схемы замещения.

Получение аналитических зависимостей $I_{1np}^* = f(U_{np}^*)$, $I_{2np}^* = f(U_{np}^*)$ с учетом выражения (1) позволило исследовать функции на экстремум. Значения U_{np}^* , при котором производная $I_{1np}^{*'}(U_{np}^*)$ равна нулю [5]:

$$U_{np \min I}^* = \sqrt{\frac{\beta \cdot s_n \cdot X_0^*}{R_2'^*}} = \sqrt{\beta \cdot K_{R \min}}, \quad (3)$$

где $K_{R \min} = \frac{s_n \cdot X_0^*}{R_2'^*}$ – коэффициент сопротивления;

s_n – номинальное скольжение в продолжительном режиме работы;

β – нагрузка на валу АД.

Выражение (3) позволяет по известным параметрам схемы замещения и нагрузке на валу определить напряжение прямой последовательности ($U_{np \min I}^*$), при котором ток статора АД достигает наименьшего значения. Значение напряжения прямой последовательности, при котором ток статора достигает минимального значения, для большинства АД в продолжительном режиме работы при номинальной нагрузке находится в диапазоне $U_{np \min I}^* = (0.58 \dots 2.1)$.

Из выражения (3) следует, что значение $U_{np \min I}^*$ зависит не только от параметров Г-образной схемы замещения, но и от нагрузки (β) на валу АД. В качестве примера в табл. 1 представлены значения $U_{np \min I}^*$ при различных значениях нагрузки на валу АД ЭДК04-4МУ5.

Таблица 1

Зависимость $U_{np \min I}^*$ от нагрузки на валу (β) АД ЭДК04-4МУ5 $P = 80$ кВт

β	1,0	1,3	1,6
$U_{np \min I}^*$	0,95	1,08	1,19

В качестве примера на рис. 3 представлены зависимости токов прямой последовательности статора и при различных значениях U_{np}^* и β . В качестве базовых значений токов прямой последовательности статора и ротора приняты соответствующие значения при номинальном значении напряжения прямой последовательности ($U_{np} = U_n$) и соответствующем значении нагрузки на валу АД.

Темпы роста токов ротора при снижении напряжения прямой последовательности (рис. 3 б) остаются практически постоянными при различных $U_{np \min I}^*$. Например, при снижении напряжения прямой последовательности на 10%, относительный рост токов в обмотках ротора одинаков при $U_{np \min I}^* = 0,95$, $U_{np \min I}^* = 1,08$, $U_{np \min I}^* = 1,19$ и, составляет 11,5%.

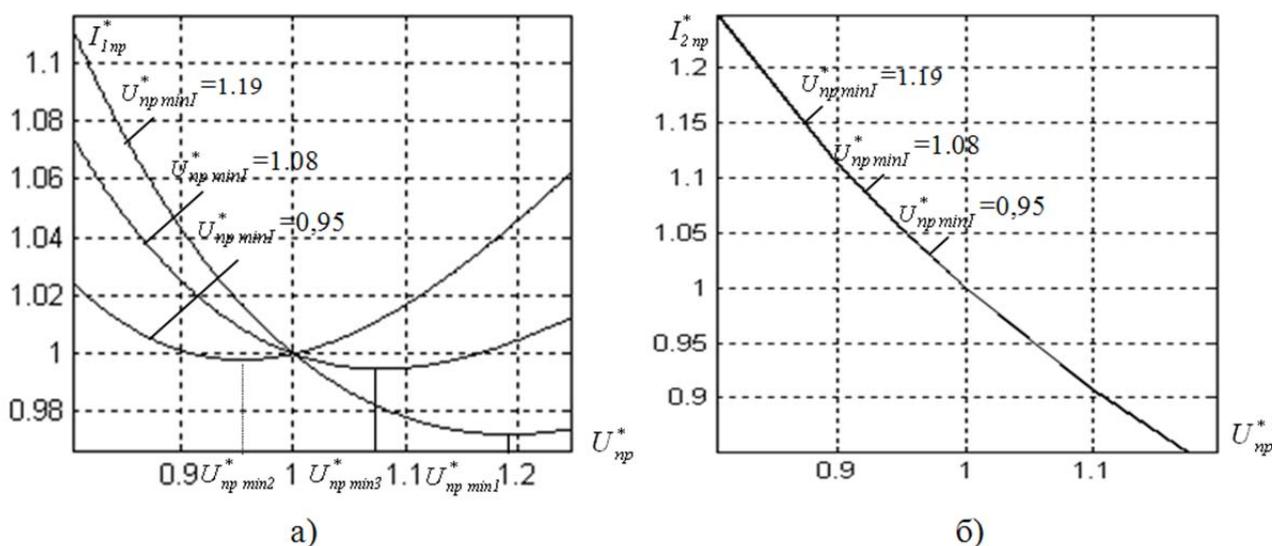


Рис. 3. Зависимости токов статора (а) и ротора (б) при различных значениях напряжения прямой последовательности и различных $U_{np \min I}^*$

Из анализа результатов, представленных в табл. 1 следует, что при увеличении нагрузки на валу электродвигателя (β) значение напряжения, при котором ток статора достигает минимального значения ($U_{np \min I}^*$), смещается в область более высоких напряжений (табл. 1, рис. 3). Например, для АД ЭДК04-4МУ5 при номинальной нагрузке ($\beta = 1$) величина $U_{np \min I}^* = 0,95$, при $\beta = 1,3$ – $U_{np \min I}^* = 1,08$, при $\beta = 1,6$ – $U_{np \min I}^* = 1,19$ и т. д.

Смещения значения $U_{np \min I}^*$ в область более высоких напряжений при увеличении нагрузки на валу АД приводит к тому, что при снижении напряжения прямой последовательности более интенсивный рост токов статора наблюдается при более высоких нагрузках на валу электродвигателя. Например, при снижении напряжения прямой последовательности на 20 % темпы роста токов прямой последовательности статора при $\beta = 1$ составили $I_{1 \text{пр}} = 1.02 \cdot I_{1 \text{н}}$, при $\beta = 1,3$ – $I_{1 \text{пр}} = 1.07 \cdot I_{1 \text{н}}$, при $\beta = 1,6$ – $I_{1 \text{пр}} = 1.15 \cdot I_{1 \text{н}}$ и т.д.

Таким образом, при увеличении нагрузки (β) значение напряжения, при котором ток статора достигает минимального значения ($U_{np \min I}^*$), смещается в область более высоких напряжений, что объясняет более интенсивный рост токов статора АД при снижении напряжения прямой последовательности и увеличении нагрузки на его валу. Рост токов при снижении напряжения приводит к увеличению температур соответствующих узлов (табл. 2).

Из анализа результатов, представленных в табл. 2 и на рис. 4 следует, что чем выше значение $U_{np \min I}^*$, тем более интенсивный рост температур наблюдается при снижении напряжения прямой последовательности. Например, при $U_{np} = 0.95 U_{\text{н}}$ относительный рост установившейся температуры при $U_{np \min I}^* = 0.95$ составил 9%, при $U_{np \min I}^* = 1.08$ составил 14%, при $U_{np \min I}^* = 1.19$ – 28% и т.д.

Таблица 2
Температуры лобовой части наиболее нагруженной фазной обмотки статора
АД ЭДК04-4МУ5 при различных значениях U_{np}^* и β

β	1,0	1,3	1,6
$U_{np}^* \min I$	0.95	1.07	1.19
$U_{np}^* \min \theta$	1.04	1.13	1.27
$U_{np} = U_n$	110/1.00	92.3/1.00	92.3/1.00
$U_{np} = 0.95U_n$	120.0/1.09	105.2/1.14	118.3/1.28
$U_{np} = 0.9U_n$	140.8/1.28	128.2/1.39	156.3/1.69

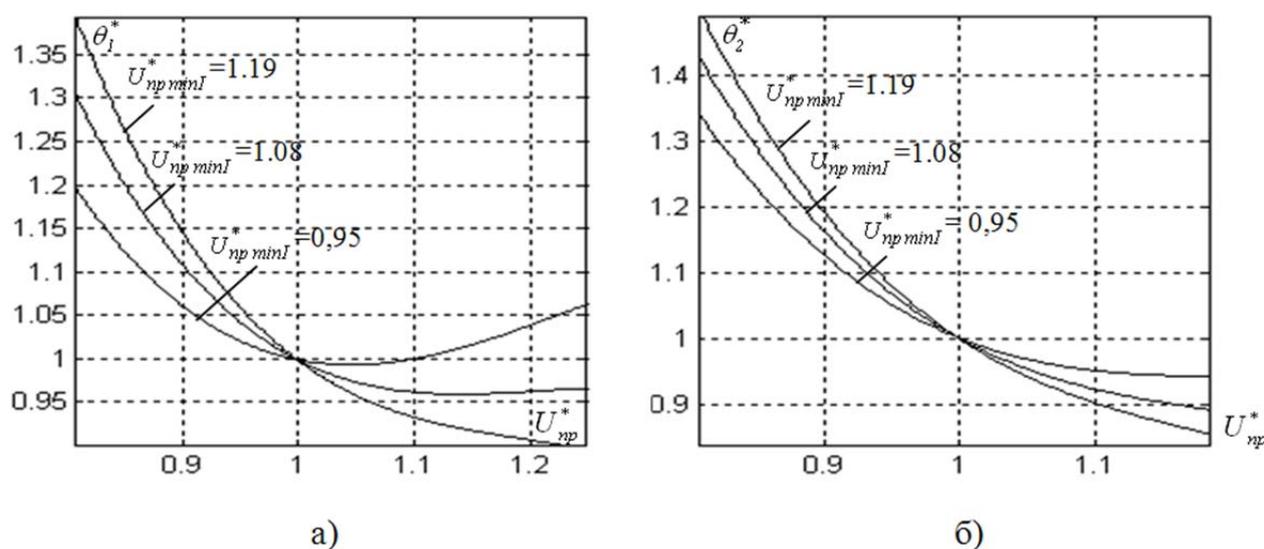


Рис. 4. Температуры статора (а) и ротора (б) фазной обмотки статора АД ЭДК04-4МУ5 при различных значениях напряжения прямой последовательности и различных $U_{np}^* \min I$

Значения напряжения прямой последовательности, при которых наблюдаются минимумы температур обмоток статора и токов статора различаются. Например, при номинальной нагрузке $\beta = 1,0$ минимум тока статора наблюдается при $U_{np}^* \min I = 0,95$, а минимум – при $U_{np}^* \min \theta = 1,05$. Чем выше значение $U_{np}^* \min I$, тем выше значение напряжения прямой последовательности $U_{np}^* \min \theta$, при котором наблюдается минимум температур, и тем выше темпы роста температур при снижении напряжения прямой последовательности.

Темпы роста токов ротора при снижении напряжения прямой последовательности остаются постоянными при различных нагрузках на валу АД. Однако большим значениям $U_{np}^* \min I$ соответствуют более высокие темпы роста температур ротора при снижении напряжения прямой последовательности. Например, при снижении напряжения прямой последовательности на 10 % рост температуры обмоток ротора составил 12%, 16%, 19% соответственно при $U_{np}^* \min \theta = 0,95$, $U_{np}^* \min \theta = 1,08$ и $U_{np}^* \min \theta = 1,19$.

Таким образом, чем выше значение $U_{np \min I}^*$, тем выше тепы роста температур в обмотках статора и ротора, поэтому величина $U_{np \min I}^*$ может быть использована в качестве критерия оценки теплового состояния АД.

Рассмотрим тепловое состояние различных АД с одинаковыми значениями $U_{np \min I}^*$. Например, напряжение прямой последовательности, при котором ток статора принимает минимальное значение АД ЭДК4Р5МК67У5 при $\beta = 1$ равно $U_{np \min I}^* = 0.94$. Для АД ЭДК4-1МУ5 при $\beta = 1,3$ $U_{np \min I}^*$ также равно 0.94. В качестве примера на рис. 5, 6 представлены зависимости токов (рис. 5) и температур (рис. 6) статора и ротора от напряжения прямой последовательности АД с равными значениями $U_{np \min I}^*$.

Из анализа результатов, представленных на рис. 5, 6 следует, что АД с равными значениями $U_{np \min I}^*$ испытывают одинаковые токовые и тепловые перегрузки. Значит, величина $U_{np \min I}^*$ может быть использована в качестве критерия оценки теплового состояния АД.

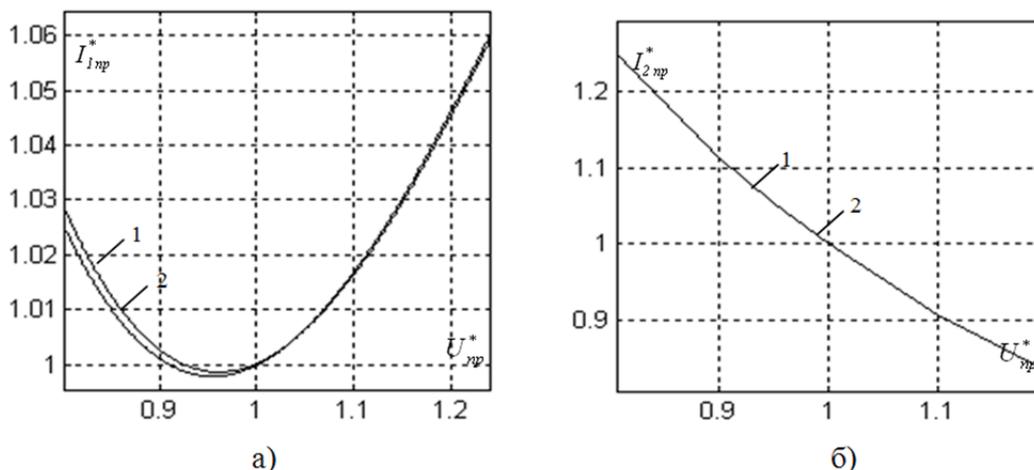


Рис. 5. Токи статора (а) и ротора (б) при различных значениях U_{np} граф. 1 (АД ЭДК4Р5МК67У5, $U_{np \min I}^* = 0.94$), граф. 2 (АД ЭДК4-1МУ5, $U_{np \min I}^* = 0.94$)

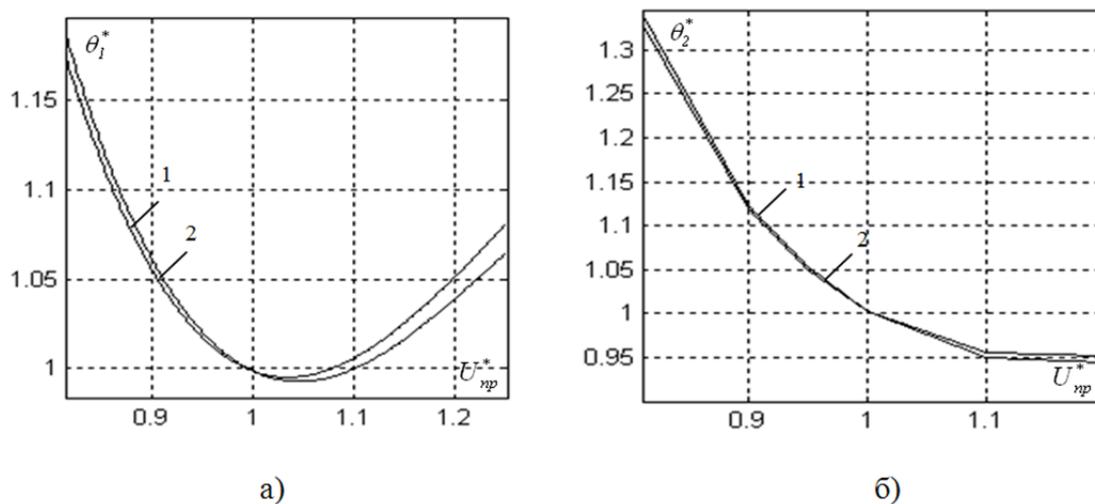


Рис.6. Температуры статора (а) и ротора (б) при различных значениях U_{np} граф. 1 (АД ЭДК4Р5МК67У5, $U_{np \min I}^* = 0.94$), граф. 2 (АД ЭДК4-1МУ5, $U_{np \min I}^* = 0.94$).

В качестве примера в табл. 3 представлены значения дополнительного нагрева статора АД в продолжительном режиме при предельно допустимом согласно ГОСТ 32144 – 2013 [8] значении напряжения прямой последовательности $U_{np} = 0.9U_n$ [8] для АД с различными значениями критерия $U_{np \min I}^*$. В качестве базового значения (θ_B) принята температура при соответствующей нагрузке и номинальном питающем напряжении $U_{np} = 0.9U_n$.

Таблица 3

Значения дополнительного нагрева статора ($\Delta\theta_I$) АД с различными $U_{np \min I}^*$
в продолжительном режиме при $U_{np} = 0.9U_n$

		4A50A4	4A56A	4A71A4	ЭДКОЗ,5	4A80A4	4A132A4	4A200A4	4A225A4	4A250A4
$U_{np \min I}^*$	0.4	0.58	0.79	1.00	1.00	1.18	1.54	1.83	2.02	2,03
$\Delta\theta_I / \theta_B$	-0.06	-0.03	0	0.07	0.07	0.16	0.23	0.27	0.32	0.34

Из анализа результатов, представленных в табл. 3 следует, что чем выше значение $U_{np \min I}^*$, тем более высокие тепловые перегрузки испытывает АД при снижении напряжения прямой последовательности. Асинхронные двигатели с равными значениями критерия $U_{np \min I}^*$ (табл. 3) испытывают одинаковые тепловые перегрузки. Например, при снижении напряжения последовательности на 10 % дополнительный рост температур АД с $U_{np \min I}^* = 1.0$ (например, АД 4A71A4) составляет 7 %. Тепловые перегрузки, АД с $U_{np \min I}^* = 2.02$ (например, АД 4A225A4, АД 4A250A4) достигают 32% и более. Поэтому АД с $U_{np \min I}^* > 1.5$ необходимо эксплуатировать при снижении питающего напряжения не более, чем на 5%, или осуществлять снижение нагрузки на его валу. Как следует из табл. 3 АД с $U_{np \min I}^*$ не испытывают тепловых перегрузок при снижении напряжения прямой последовательности в пределах допустимых ГОСТ 32144 – 2013 значений.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке алгоритмов работы устройств защиты АД от тепловых перегрузок, при выборе АД, в системах контроля и прогнозирования теплового состояния АД.

ВЫВОДЫ

1. Получено аналитическое выражение значения напряжения прямой последовательности ($U_{np \min I}^*$), при котором ток статора достигает наименьшего значения. Установлено, что величина $U_{np \min I}^*$ прямо пропорциональна корню квадратному из индуктивного сопротивления намагничивающего контура и нагрузки на валу АД и обратно пропорциональна корню квадратному из активного сопротивления ротора.

2. Установлено, что при увеличении нагрузки на валу двигателя значение напряжения, при котором ток статора достигает минимального значения ($U_{np \min}^*$), смещается в область более высоких напряжений, что объясняет более интенсивный рост токов статора в повтор-

но-кратковременном режиме при снижении напряжения прямой последовательности и росте нагрузки на валу АД.

3. Обосновано, что асинхронные двигатели с равными значениями $U_{np\min I}^*$ испытывают одинаковые токовые и тепловые перегрузки.

4. Показано, что значение $U_{np\min I}^*$ может быть использовано в качестве критерия оценки теплового состояния АД.

5. Определены значения дополнительного нагрева АД в продолжительном режиме при предельно допустимом согласно ГОСТ 32144 – 2013 значении снижения напряжения прямой последовательности на 10%. Установлено, что АД с $U_{np\min I}^*$ менее 0.8 не испытывают тепловых перегрузок при снижении напряжения прямой последовательности в пределах допустимых ГОСТ 32144 – 2013 значений.

6. Установлено, что тепловые перегрузки АД с $U_{np\min I}^* > 1.5$ при предельно допустимом согласно ГОСТ 32144 – 2013 значении снижения напряжения прямой последовательности на 10% приводит к росту температуры наиболее нагруженной фазной обмотки статора на 25 – 32 % и более. Поэтому АД с $U_{np\min I}^* > 1.5$ необходимо эксплуатировать при снижении питающего напряжения более, чем на 5%.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Жежеленко И. В. Влияние качества электроэнергии на надежность асинхронных двигателей / И. В. Жежеленко, Ю. Л. Саенко, А. В. Горпинич // *Промэлектро*. – 2004. – № 1. – С. 15–21.
2. Савина Н.В. Качество электроэнергии: учебное пособие / Н.В. Савина. - Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2014. – 182 с.
3. Особенности моделирования и анализа пусковых и рабочих характеристик асинхронных двигателей при различных напряжениях сети / М. М. Федоров, Е. Р. Алексеев, В. Ф. Денник, М. В. Горелов // *Компьютерные технологии в инженерной и управленческой деятельности. Материалы Всероссийской научно-технической конференции с международным участием 19.05 – 21.05.1999. – Таганрог. – 2000. – С. 230–235.*
4. Сипайлов Г.А. Тепловые, гидравлические и аэродинамические расчеты в электрических машинах / Г.А. Сипайлов, Д.И. Санников, В.А. Жадан. - М.: Высшая школа, 1989. – 239 с.
5. Шелехова О.Г. Функциональная зависимость токов асинхронного двигателя от напряжения прямой последовательности, полученная безитерационным способом / О. Г. Шелехова // *Проблемы повышения эффективности электромеханических преобразователей в электроэнергетических системах. Междунар. научн.-техн. конф. Севастополь, 11–19 сентября 2015.* – С. 63–64.
6. Шелехова О.Г. Ковзання асинхронного двигуна при різних параметрах несиметрії напруги живлення / О. Г. Шелехова // *Науковий вісник ДДМА. – 2013. – №1 (16E).* – С. 100–107.
7. Васильева Л.В. Высшая математика. Краткий справочник / Л. В. Васильева, В. В. Мухранова, О. А. Романчук. Сост.– Хабаровск: Издательство Хабаровского государственного технического университета, 2000 г. – 52 с.
8. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. – М.: Энергия, 1980. – 928 с.
9. ГОСТ 32144 – 2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в СЭС общего назначения».