

ТЕПЛОВОЕ СОСТОЯНИЕ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В ПОВТОРНО-КРАТКОВРЕМЕННОМ РЕЖИМЕ ПРИ АСИММЕТРИИ ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ

Федоров М.М., Пинчук О.Г.

Донецкий национальный технический университет

Olga-Pinchuk@yandex.ru

Article is devoted to research of a thermal condition of asynchronous engines in a repeatedly - short-term operating mode at asymmetry of the power supply. The lead researches allow to estimate quantitative communication between characteristics of asymmetry of voltage and characteristics of a thermal condition the asynchronous engines in long and repeatedly - short-term operating modes and to execute calculation of necessary sizes of decrease of loadings on a shaft of the electric motor which will allow to keep a resource изоляционных materials.

Тепловое состояние обмоток асинхронных двигателей (АД) является важнейшим фактором, определяющим их надежную эксплуатацию. Прогнозирование теплового состояния обмоток позволяет исключить тепловую перегрузку электродвигателей в тяжелых режимах работы, к числу которых относится эксплуатация АД при нарушении симметрии источника питания.

В качестве меры несимметрии напряжений используют коэффициент несимметрии обратной последовательности K_{2U} равный отношению напряжения обратной последовательности $U_{обр}$ к напряжению прямой последовательности $U_{пр}$ [1]:

$$K_{2U} = \frac{U_{обр}}{U_{пр}} 100\% \quad (1.1)$$

При этом подразумевается, что сдвиг по фазе $\Delta\psi = \psi_{U_{пр}} - \psi_{U_{обр}}$ между $U_{пр}$ и $U_{обр}$ равен 0. Однако на практике имеет место изменение напряжений прямой и обратной последовательности не только по величине, но и по фазе. Практика эксплуатации свидетельствует, что величина напряжения $U_{пр}$ может быть на 10-20% ниже номинального, а величина K_{2U} достигать свыше 28% [2]. Несмотря на то, что существующие математические модели [3, 4] позволяют рассчитывать электромагнитные и тепловые характеристики АД, информация об их изменении при несимметрии ограничена. В литературных источниках подробно исследовано влияние K_{2U} на электромеханические характеристики АД, однако, при постоянном значении K_{2U} и различных значениях $U_{пр}$, $U_{обр}$, $\Delta\psi$ имеет место перераспределение токов и температур в обмотках, и этот вопрос требует дополнительного изучения.

Особый интерес представляет влияние несимметрии на изменение характеристик АД, работающего с непрерывно изменяющейся нагрузкой. В повторно-кратковременном режиме S3 нагрузка на рабочем интервале выше, чем в режиме S1. Изменение электромеханических и тепловых характеристик при несимметричном источнике питания может существенно отличаться при различных уровнях нагрузки на валу АД. Анализ научных работ показал, что в литературе отсутствуют сведения о влиянии K_{2U} и его составляющих $U_{пр}$, $U_{обр}$, $\Delta\psi$ при различных уровнях нагрузки на температуры элементов конструкции обмоток, А вопросы надежной эксплуатации АД в различных повторно-кратковременных режимах работы при асимметричном питающем напряжении практически не рассмотрены в литературе.

Целью данной работы было исследование теплового состояния АД в повторно-кратковременном режиме работы при несимметричном источнике питания.

Исследование теплового состояния АД осуществлялось с помощью эквивалентной тепловой схемы (ЭТС) [4]. Особенностью тепловой схемы является тот факт, что в виде отдельных узлов выделена каждая фаза статора [4]. Это связано с тем, что мощность источников тепла в обмотках при несимметрии может иметь существенные отличия. Для двигателя с короткозамкнутым ротором в качестве узлов были выбраны: 1, 2, 3 – пазовые части обмоток статора; 4, 5, 6 – лобовые части обмоток статора; 7 – ротор; 8 – зубцы железа статора; 9 – корпус над пакетом; 10 – корпус статора над лобовыми частями, 11 – внутренний воздух. Система дифференциальных уравнений в матричном виде, полученная с помощью ЭТС, описывающих тепловые процессы при нагреве и охлаждении в узлах АД, имеет вид

$$C \frac{du}{dt} + Lu = C, \quad (1.2)$$

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 $P = P_n$, при работе под нагрузкой $P = P_{ном}$, а в режиме охлаждения $P = 0$. Определение вектора потерь в переходном и установившемся режиме при несимметричном питающем напряжении позволит исследовать температурное поле электродвигателя

в различных режимах работы. Для расчета токов и потерь использовалась математическая модель в реальных фазных координатах статора и ротора, которая была реализована в среде MATLAB/Simulink [3].

Работа АД в режиме S1 характеризуется асимметричным распределением токов в фазах статора. Действующие значения токов в фазах обмотки ротора [5] равны между собой и несимметрия питающего напряжения сопровождается одновременным ростом токов ротора. На рис.1 приведена зависимость действующих значений токов в наиболее нагруженной фазе статора (1а) и в обмотках ротора (1б) от величины напряжения прямой последовательности при различных значениях K_{2U} и $\Delta\psi = \Delta\psi_{\max}$. ($\Delta\psi_{\max}$ – сдвиг по фазе между напряжениями прямой и обратной последовательности, при котором имеют место наибольшие токовые нагрузки в обмотках статора. Методика определения величины $\Delta\psi_{\max}$ подробно описана в [6]). Из приведенных характеристик следует, что увеличение K_{2U} , и снижение величины $U_{\text{пр}}$ сопровождаются ростом токов в обмотках статора и ротора. При $U_{\text{пр}} < U_n$ имеет место более интенсивный рост токов в обмотках ротора. Например, при $U_{\text{пр}} = 0.75 U_n$ темпа роста токов первичной и вторичной обмоток составили 35% и 50% соответственно. Нарушение симметрии источника питания сопровождается более интенсивным ростом тока в наиболее нагруженной фазе статора. Например, при $U_{\text{пр}} = U_n$ и $K_{2U} = 10\%$ темп роста токов первичной и вторичной обмоток составили 42% и 10% соответственно.

Полученные зависимости позволяют определить распределение потерь, с помощью которого был произведен расчет теплового состояния двигателя с короткозамкнутым ротором типа АИУМ225М4 в продолжительном режиме работы. В режиме S1 несимметрия питающего напряжения сопровождается ростом температур всех узлов, однако, наибольшие тепловые нагрузки испытывает лобовая часть наиболее нагруженной фазы статора. В качестве примера в табл. 1 приведены значения температуры ротора (θ_7) и лобовой части наиболее нагруженной фазы статора (θ_4) в абсолютных и относительных единицах при $\Delta\psi = \Delta\psi_{\max}$ и различных значениях K_{2U} и $U_{\text{пр}}$. В качестве базового значения температуры для всех режимов работы была принята величина температуры наиболее нагретого узла в режиме S1 – лобовой части обмотки статора $\theta_{\text{уст}} = 110^\circ\text{C}$.

Таблица 1 - Значения температуры ротора (θ_7) и лобовой части наиболее нагруженной фазы статора (θ_4) в абсолютных и относительных единицах при $\Delta\psi = \Delta\psi_{\max}$ и различных значениях K_{2U} и $U_{\text{пр}}$

$K_{2U}, \%$	0	1	4	10	15	20
$U_{\text{пр}} = U_n$	110.0/1.00	113.1/1.03	122.0/1.11	169.0/1.53	240.5/2.16	370.2/3.23
$U_{\text{пр}} = 0.96U_n$	122.0/1.11	124.3/1.13	128.6/1.15	179.8/1.64	249.8/2.27	375.0/3.37
$U_{\text{пр}} = 0.92U_n$	132.0/1.20	134.4/1.22	138.8/1.26	188.8/1.72	256.4/2.33	376.2/3.42
$U_{\text{пр}} = 0.88U_n$	155.2/1.41	157.7/1.43	162.7/1.48	214.5/1.95	283.3/2.58	401.0/3.65
$U_{\text{пр}} = 0.84U_n$	178.5/1.62	181.1/1.65	186.7/1.70	239.3/2.18	309.5/2.81	432.7/3.93
$U_{\text{пр}} = 0.80U_n$	219.0/2.00	222.4/2.02	229.2/2.08	286.3/2.60	363.6/3.31	500.0/4.55

Из табл. 1 следует, что увеличение напряжения обратной последовательности сопровождается ростом температур узлов АД. Например, при $U_{\text{пр}} = U_n$ темпы роста температуры в наиболее нагруженной фазе статора при $U_{\text{обр}}$ равное $0.01U_n$, $0.04U_n$ и $0.10U_n$ составили соответственно 3%, 11% и 53%. Асимметрия источника питания, как правило, сопровождается пониженными значениями напряжения прямой последовательности. При значениях $U_{\text{пр}} < U_n$ темпы роста температур с ростом $U_{\text{обр}}$ возрастают. Так при $U_{\text{пр}} = 0.92 U_n$ и тех же значениях коэффициента несимметрии 1%, 4%, 10% темпы роста температур составили 22%, 26%, 72%, при $U_{\text{пр}} = 0.8 U_n$ – 102%, 108%, 160%.

Повторно-кратковременные режимы работы характеризуются периодическими нагрузками. В повторно-кратковременном режиме S3 среднее значение температуры в квазиустановившемся состоянии определяется продолжительностью включения (ПВ) и потерями на рабочем участке. Нарушение симметрии источника питания сопровождается повышенными тепловыделениями в обмотках на рабочем участке. На рис.2 приведена зависимость действующих значений токов в наиболее нагруженной фазе статора (2а) и в обмотках ротора (2б) от нагрузки на валу двигателя при $K_{2U} = 5\%$, $\Delta\psi = \Delta\psi_{\max}$ и различных значениях напряжения прямой последовательности. Из приведенных характеристик следует, что $U_{\text{пр}} < U_n$ имеет место более интенсивный рост токов при увеличении нагрузки. Например, при $\beta = 1.2$ темпа роста токов в обмотке статора составили 1.4, 1.5, 1.75, в роторе – 1.3, 1.5, 1.75 - соответственно при $U_{\text{пр}} = U_n$, $U_{\text{пр}} = 0.9 U_n$, $U_{\text{пр}} = 0.8 U_n$.

На рис.3 приведена зависимость действующих значений токов в наиболее нагруженной фазе статора (3б) и в обмотках ротора (3а) от нагрузки на валу двигателя при $U_{\text{пр}} = U_n$, $\Delta\psi = \Delta\psi_{\max}$ и различных значениях коэффициента K_{2U} . Из приведенных характеристик следует, что темпы роста температуры в обмотках ротора несколько снижаются при увеличении K_{2U} . Например, при номинальной нагрузке на валу двигателя действующие значения токов в обмотках ротора равны $1.0 I_{2н}$, $1.1 I_{2н}$, $1.2 I_{2н}$ соответственно для симметричного режима и $K_{2U} = 10\%$ и $K_{2U} = 15\%$. При $\beta = 1.5$ действующие значения токов в обмотках при тех же уровнях несимметрии увеличились соответственно в 1.55, 1, 45, 1.25 раз и составили $1.55 I_{2н}$, $1, 60 I_{2н}$, $1, 8 I_{2н}$.

В качестве примера в табл.2 представлены средние значения температуры ($\theta_{\text{ср}}$) узлов АД АИУМ225М4 в квазиустановившемся состоянии в режиме S3 (ПВ=0.4, $t_{\text{ц}}=10$ мин) при $\Delta\psi = \Delta\psi_{\max}$ и различных значениях K_{2U} и $U_{\text{пр}}$ в абсолютных и относительных единицах.

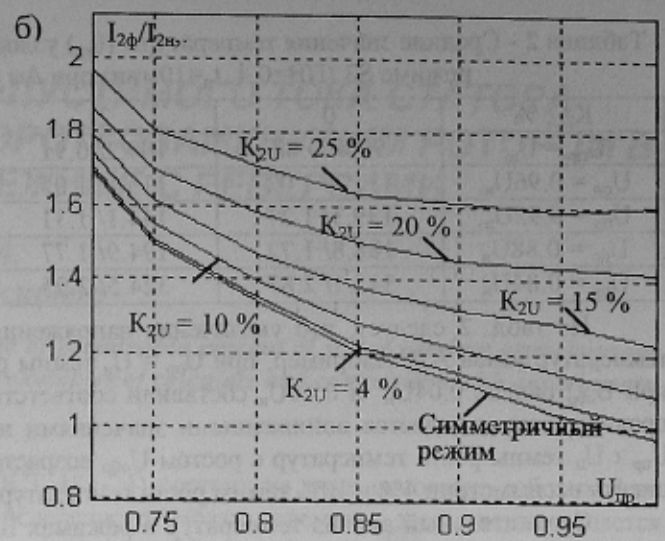
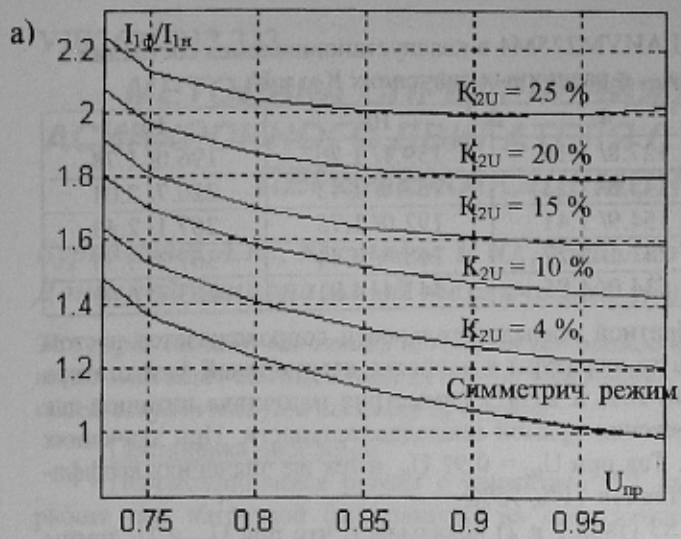


Рисунок 1 - Зависимости тока в наиболее нагруженной фазе статора (1а) и в обмотках ротора (1б) от напряжения прямой последовательности $U_{пр}$ при $\Delta\psi = \Delta\psi_{max}$ и различных значениях K_{2U} .

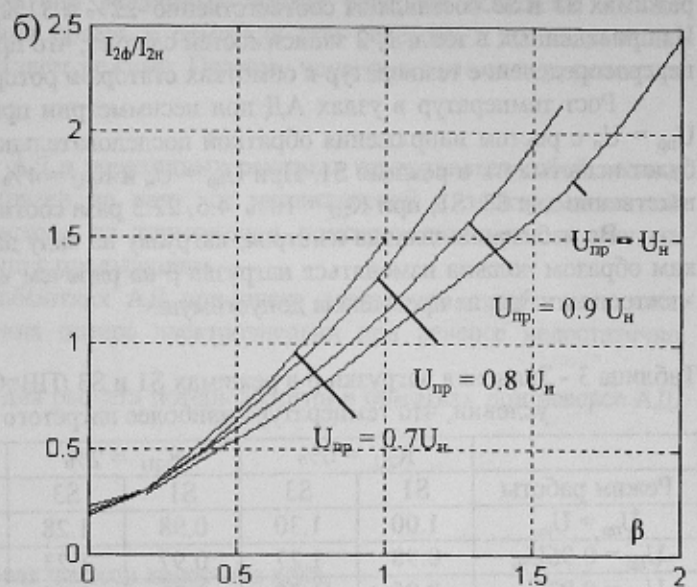
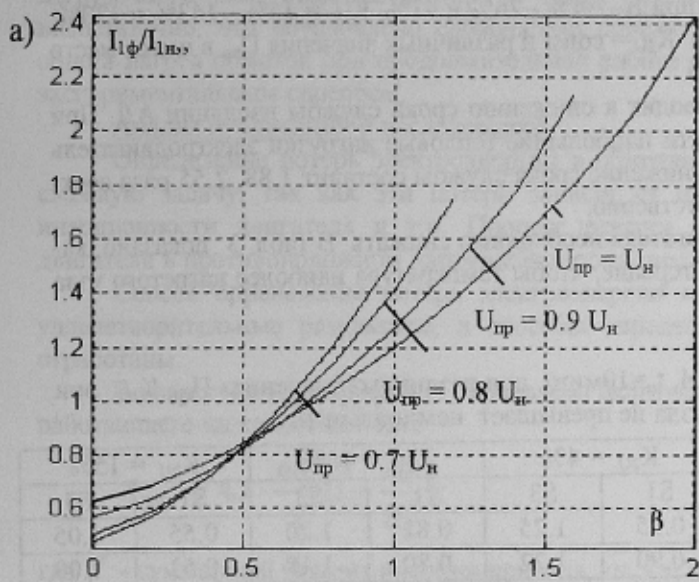


Рисунок 2 - Зависимости тока в наиболее нагруженной фазе статора (2а) и в обмотках ротора (2б) от нагрузки на валу двигателя β при $K_{2U} = 5\%$, $\Delta\psi = \Delta\psi_{max}$ и различных значениях $U_{пр}$.

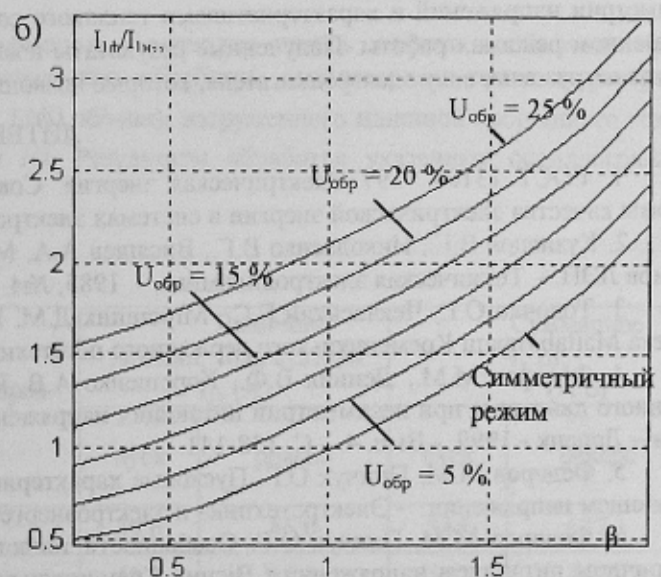
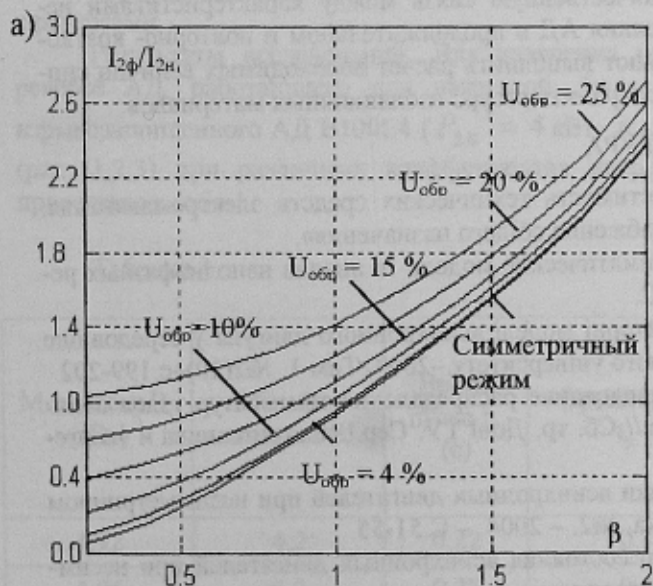


Рисунок 3 - Зависимости тока в обмотках ротора (3а) и в наиболее нагруженной фазе статора (3б) от нагрузки на валу двигателя β при $U_{пр} = U_n$, $\Delta\psi = \Delta\psi_{max}$ и различных значениях $U_{обр}$.

Таблица 2 - Средние значения температуры (θ_{cp}) узлов АД АИУМ225М4 в квазиустановившемся состоянии в режиме S3 ($PB=0.4$, $t_{ц}=10$ мин) при $\Delta\psi = \Delta\psi_{max}$ и различных значениях K_{2U} и U_{np}

$K_{2U}, \%$	0	2	4	10	15
$U_{np} = U_n$	96.4/ 0.88	100.2/ 0.91	127.8/ 1.16	139.1/ 1.26	196.0/ 1.78
$U_{np} = 0.96U_n$	111.7/ 1.02	115.8/ 1.05	145.8/ 1.33	157.8/ 1.43	220.7/ 2.01
$U_{np} = 0.92U_n$	139.3/ 1.27	144.1/ 1.31	154.9/ 1.41	192.0/ 1.75	267.1/ 2.43
$U_{np} = 0.88U_n$	188.8/ 1.72	194.9/ 1.77	241.1/ 2.27	268.4/ 2.44	367.3/ 3.33
$U_{np} = 0.84U_n$	315.1/ 2.87	324.5/ 2.95	534.0/ 4.85	441.4/ 4.01	663.7/ 6.03

Из табл. 2 следует, что увеличение напряжения обратной последовательности сопровождается ростом температур узлов АД. Например, при $U_{np} = U_n$ темпы роста температуры в наиболее нагруженной фазе статора при $U_{обр}$ равное $0.04U_n$ и $0.10U_n$ составили соответственно 16% и 26%. Асимметрия источника питания, как правило, сопровождается пониженными значениями напряжения прямой последовательности. При значениях $U_{np} < U_n$ темпы роста температур с ростом $U_{обр}$ возрастают. Так при $U_{np} = 0.92 U_n$ и тех же значениях коэффициента несимметрии 4% и 10% темпы роста температур составили 41%, 75%.

Сравнительный анализ температур в режимах S1 и S3 (табл.1 и 2) показывает, что при $U_{np} = U_n$ темпы роста установившейся температуры в режиме S1 превосходят темпы роста среднего значения температуры в режиме S3. Например, $K_{2U} = 4\%$ и $U_{np} = U_n$ среднее значение температуры в режиме S3 составило 16%, в режиме S1 – 20%, при $K_{2U} = 15\%$ - соответственно 78% и 119%. При снижении напряжения U_{np} наибольшие тепловые нагрузки наблюдаются в режиме S3. Например, при $U_{np} = 0.92U_n$ и $K_{2U} = 2\%$ темпы роста температуры в режимах S1 и S3 составляют соответственно –22% и 31%, при $K_{2U}=4\%$ - 26% и 41%, $K_{2U} = 15\%$ - 143% и 133%. Из приведенных в табл. 1, 2 зависимостей следует, что при $K_{2U} = const$ и различных значения U_{np} в имеет место перераспределение температур в обмотках статора и ротора.

Рост температур в узлах АД при несимметрии приводит к снижению срока службы изоляции АД. При $U_{np} = U_n$ с ростом напряжения обратной последовательности наибольшие тепловые нагрузки электродвигатель будет испытывать в режиме S1. При $U_{np} = U_n$ и $K_{2U} = 4\%$ снижение срока службы составит 1.88, 2.55 раза соответственно для S3, S1, при $K_{2U} = 10\%$ 4.6, 22.3 раза соответственно.

Во избежания выхода из строя, нагрузку на валу двигателя необходимо снижать. В табл. 3 показано, каким образом должна изменяться нагрузка β на рабочем интервале, чтобы температура наиболее нагретого узла электродвигателя не превышала допустимую.

Таблица 3 - Значения нагрузки β в режимах S1 и S3 ($PB=0.4$, $t_{ц}=10$ мин), при различных значениях U_{np} , K_{2U} , при условии, что температура наиболее нагретого узла не превышает номинальную.

Режим работы	$K_{2U} = 0\%$		$K_{2U} = 2\%$		$K_{2U} = 4\%$		$K_{2U} = 10\%$		$K_{2U} = 15\%$	
	S1	S3	S1	S3	S1	S3	S1	S3	S1	S3
$U_{np} = U_n$	1.00	1.30	0.98	1.28	0.95	1.25	0.82	1.20	0.55	1.05
$U_{np} = 0.96U_n$	0.98	1.27	0.97	1.23	0.90	1.22	0.80	1.18	0.53	1.00
$U_{np} = 0.92U_n$	0.95	1.25	0.92	1.16	0.85	1.15	0.76	1.12	0.52	0.95
$U_{np} = 0.88U_n$	0.93	1.15	0.87	1.13	0.81	1.10	0.74	1.05	0.50	0.85
$U_{np} = 0.84U_n$	0.89	1.07	0.82	1.06	0.78	1.05	0.72	1.00	0.48	0.80

Проведенные исследования позволяют оценить количественную связь между характеристиками несимметрии напряжений и характеристиками теплового состояния АД в продолжительном и повторно- кратковременном режимах работы. Полученные результаты позволяют выполнить расчет необходимых величин снижения нагрузок на валу электродвигателя, которые позволят сохранить ресурс изоляционных материалов.

ЛИТЕРАТУРА

- ГОСТ 13109 – 97 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения».
- Кузнецов В.Г., Николаенко В.Г., Висящев А.А. Математические модели и анализ неполнофазных режимов ЛЭП. – Техническая электродинамика. - 1985, №4. – С.
- 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
- Федоров М.М., Денник В.Ф., Корощенко 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.
- Федоров М.М., Пинчук О.Г. Пусковые характеристики асинхронных двигателей при несимметричном питающем напряжении. - Электротехника и электроэнергетика, №2. – 2004. – С.51-55
- 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.