

**ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ НЕСИММЕТРИИ ПИТАЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ****Федоров М. М., Ивченков Н. В., Ткаченко А. А.**

Выполнен анализ механических, электромеханических и тепловых характеристик асинхронного двигателя в несимметричных режимах работы. Оценка теплового состояния в установившихся режимах выполнена с использованием эквивалентной тепловой схемы замещения. Представлены графики зависимостей средних температур узлов от коэффициента обратной последовательности по напряжению. Выполнена качественная оценка возможности дальнейшей эксплуатации двигателя при несимметриях питающего напряжения с различными коэффициентами несимметрии  $k_{2U}$ . Показано, что несимметрия с  $k_{2U} = 6\%$  и более вызывает перегрев статорных обмоток сверх максимально допустимых величин.

Виконано аналіз механічних і електромеханічних характеристик асинхронного двигуна при несиметрії напруги живлення. Аналіз теплового стану асинхронного двигуна в сталих режимах виконано із застосуванням еквівалентної теплової схеми заміщення. Представлені графіки залежностей середніх температур вузлів від коефіцієнта зворотної послідовності за напругою. Виконано якісну оцінку можливості подальшої експлуатації електродвигуна в несиметричних режимах із різними величинами коефіцієнту  $k_{2U}$ . В розглянутому випадку за величини  $k_{2U} = 6\%$  та вище лобові частини фазних обмоток перевищують максимально припустимі величини.

In the paper is presented calculation of mechanical and electromechanical characteristics of the induction motor with input voltage unbalance. Considered a theoretical method for calculating the average temperatures of induction motor basic nodes in steady state, based on an equivalent thermal equivalent circuit. The calculation of average temperatures of nodes, depending on the coefficient of reverse voltage is provided. Made a qualitative assessment of the possibility of further engine operation at input voltage unbalance. It was shown, that asymmetry with  $k_{2U} = 6\%$  and more causes overheating of stator winding.

Федоров М. М.

д-р техн. наук, проф. ДонНТУ

Ивченков Н. В.

канд. техн. наук, ст. преп. каф. ЭСА ДГМА  
kolk\_ivchenkov@mail.ru

Ткаченко А. А.

канд. техн. наук, доц. каф. ЭСА ДГМА

ДонНТУ – Донецкий национальный технический университет, г. Донецк.

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

УДК 621.313.333.1

Федоров М. М., Ивченков Н. В., Ткаченко А. А.

### ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ НЕСИММЕТРИИ ПИТАЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

Нагрузка в трехфазной электрической сети металлообрабатывающих цехов может быть существенно несимметричной. Так зачастую применяют станки, сварочные аппараты, компрессоры и пр. с однофазным питанием. Наличие однофазной нагрузки не всегда можно компенсировать – график работы станков заранее неизвестен, а количество переносного оборудования, обычно с однофазным питанием, возрастает. Это приводит к тому, что несимметрия питающих сетей становится постоянно действующим фактором [1].

Эксплуатация асинхронных двигателей (АД) металлорежущих станков в условиях несимметрии питающего напряжения приводит к изменению величины максимального вращающего момента, скольжения и токов в обмотках. В результате фазные токи могут существенно превысить номинальные величины, что приводит к перегреву обмоток сверх максимально допустимой температуры и сокращению ресурса изоляционных материалов обмоток. В связи с этим вопрос оценки теплового состояния АД при несимметрии питающего напряжения является актуальным.

Оценка допустимых тепловых нагрузок обмоток электрических машин осуществляется в основном косвенными методами путем оценки суммарной величины мощности источников тепла (потерь в элементах конструкции машин). Более точно тепловое состояние электрических машин можно анализировать с использованием эквивалентных тепловых схем замещения (ЭТС) [2]. Данная методика основана на аналогии тепловых процессов электрическим, протекающим в электрической схеме замещения. Использование эквивалентных тепловых схем позволяет применить для расчета теплового состояния хорошо разработанные методы расчета электрических цепей [3]. В качестве узлов принимают конструктивные элементы (тела) электрической машины. Такими, как правило, являются: пазовые и лобовые части обмоток, активная сталь, станина, корпус и др. Система алгебраических уравнений, описывающих тепловое состояние двигателя, может быть составлена с помощью метода узловых потенциалов. В работе [4] рассмотрены тепловые процессы АД при различных несимметричных режимах работы, связанных с неисправностями электродвигателей.

Поставлена задача анализа теплового состояния асинхронных двигателей при несимметрии питающего напряжения: характер распределения токов в фазных обмотках, оценка теплового состояния основных частей АД. Результаты исследований позволят судить о влиянии несимметрии питающего напряжения на срок эксплуатации двигателя, при которых температуры обмоток не превысят максимально допустимых величин.

Для асинхронных двигателей с фазным ротором можно использовать ЭТС, приведенную на рис. 1.

Схема рис. 1 состоит из следующих тел: 1 – пазовая часть обмотки статора, 2 – пазовая часть обмотки ротора, 3 – сердечник статора, 4 – сердечник ротора, 5 – лобовая часть обмотки статора, 6 – лобовая часть обмотки ротора, 7 – внутренний воздух, 8 – станина. Установившиеся значения температур узлов электрической машины при постоянных (усредненных) во времени потерях и теплоотдаче описывается системой линейных алгебраических уравнений (2). Источники тепла  $P_i$  соответствуют потерям в узлах.

Для расчета тепловых процессов с использованием эквивалентной тепловой схемы замещения применялся метод узловых потенциалов.

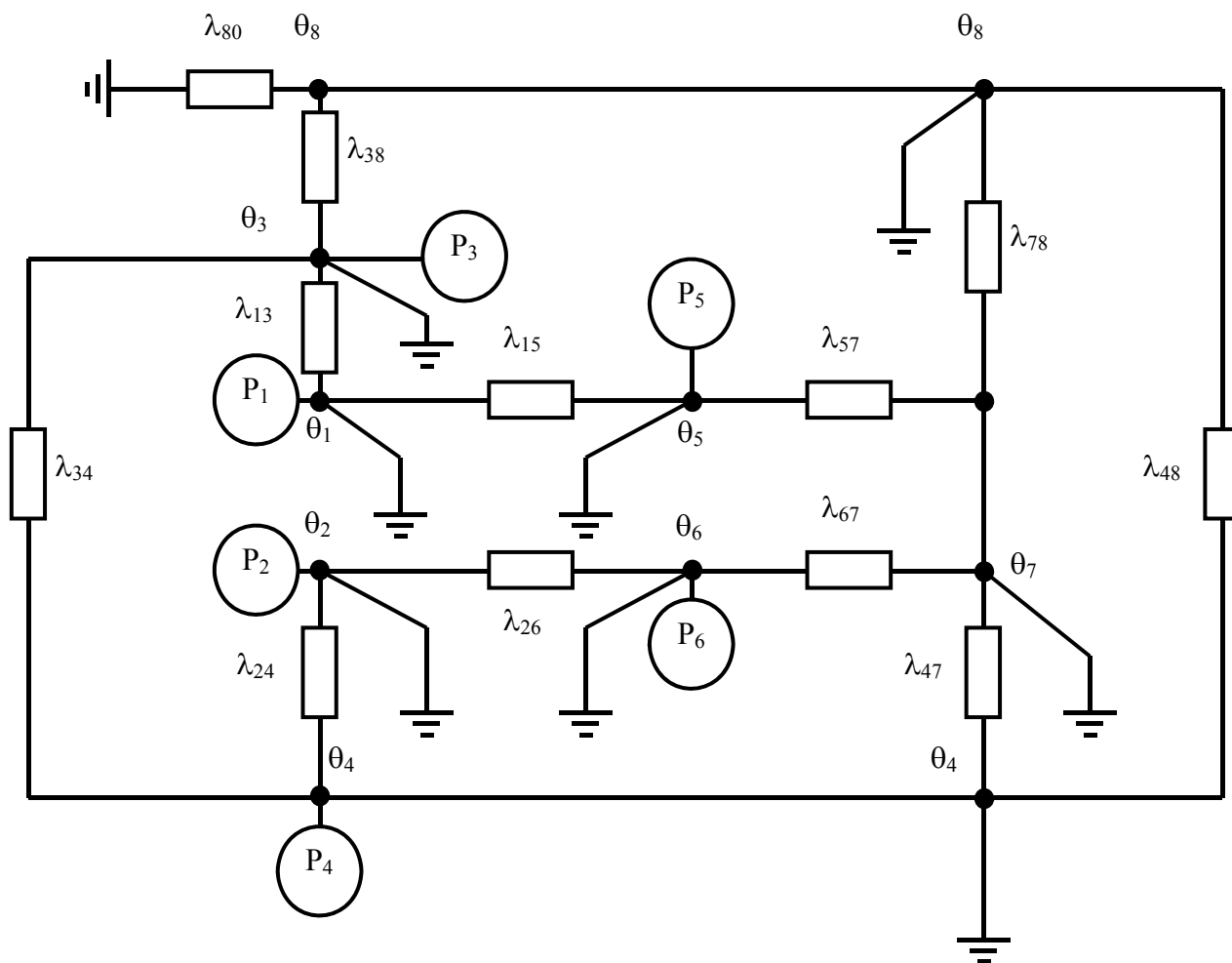


Рис. 1. Эквивалентная тепловая схема замещения асинхронного двигателя с фазным ротором типа МТФ-111-6.

Система уравнений для расчета средних температур тел схемы с восемью узлами имеет вид:

$$\begin{cases}
 \theta_1(\lambda_{13} + \lambda_{15}) - \theta_3\lambda_{13} - \theta_5\lambda_{15} = P_1, \\
 \theta_2(\lambda_{24} + \lambda_{26}) - \theta_4\lambda_{24} - \theta_6\lambda_{26} = P_2, \\
 \theta_3(\lambda_{13} + \lambda_{34} + \lambda_{38}) - \theta_1\lambda_{13} - \theta_6\lambda_{26} = P_3, \\
 \theta_4(\lambda_{24} + \lambda_{34} + \lambda_{47} + \lambda_{48}) - \theta_2\lambda_{24} - \theta_3\lambda_{34} - \theta_7\lambda_{47} - \theta_8\lambda_{48} = P_4, \\
 \theta_5(\lambda_{15} + \lambda_{57}) - \theta_1\lambda_{15} - \theta_7\lambda_{57} = P_5, \\
 \theta_6(\lambda_{26} + \lambda_{67}) - \theta_2\lambda_{26} - \theta_7\lambda_{67} = P_6, \\
 \theta_7(\lambda_{47} + \lambda_{57} + \lambda_{67} + \lambda_{78}) - \theta_4\lambda_{47} - \theta_5\lambda_{57} - \theta_6\lambda_{67} - \theta_8\lambda_{78} = 0, \\
 \theta_8(\lambda_{38} + \lambda_{48} + \lambda_{78} + \lambda_{80}) - \theta_3\lambda_{38} - \theta_4\lambda_{48} - \theta_7\lambda_{78} = 0,
 \end{cases} \quad (1)$$

где  $\theta_1 \div \theta_n$  – соответственно температуры узлов;

$\lambda_{mn} = \lambda_{nm}$  – проводимости ветвей, соединяющих  $m$  и  $n$  узлы;

$P_l \div P_n$  – соответственно суммарные мощности потерь узлов.

Система уравнений (1) в матричной форме имеет вид:

$$\lambda \cdot \theta = \mathbf{P}, \quad (2)$$

где  $\lambda = (\lambda_{ij})$  – квадратная, симметричная матрица взаимных и собственных проводимостей размерностью  $(n \times n)$ ;

$\theta = (\theta_1, \dots, \theta_n)$  – матрица-столбец (вектор) температур узлов;

$\mathbf{P} = (P_1, \dots, P_n)$  – матрица-столбец (вектор) мощностей источников тепла.

Несимметричные режимы работы трехфазных систем целесообразно анализировать с помощью метода симметричных составляющих. Суть данного подхода состоит в представлении несимметричного режима как результата наложения трех симметричных. Первый симметричный режим характеризуется только прямыми составляющими всех токов, ЭДС и сопротивлений, второй – только обратными (с обратным чередованием фаз). В третьем симметричном режиме все токи, ЭДС и сопротивления содержат только составляющие нулевой последовательности и имеют одинаковую начальную фазу. При отсутствии замыканий на землю принимают допущение об отсутствии токов нулевой последовательности. Таким образом, анализ несимметричных режимов работы АД сводят к исследованию двух симметричных [4].

Расчет механических и электромеханических характеристик при несимметричном режиме работы выполняется в соответствии с Т-образной схемой замещения фазы АД.

На рис. 2 представлены схемы для прямой и обратной последовательности.

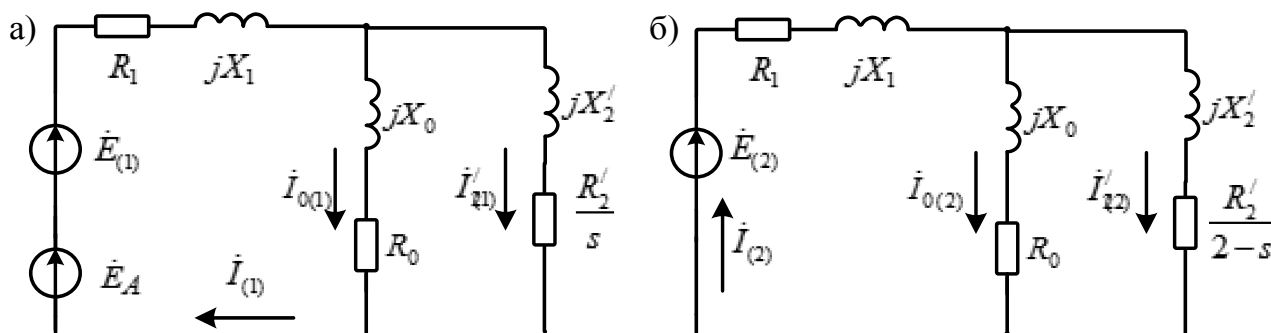


Рис. 2. Т-образная схема замещения фазы АД:

а – для прямой последовательности; б – для обратной последовательности

В схемах рис. 2 приняты обозначения:

$R_l$  и  $X_l$  – активное сопротивление обмотки статора и индуктивное сопротивление рассеяния соответственно;

$R_0$  – активное сопротивление, учитывающее потери в стали;

$X_0$  – индуктивность цепи намагничивания;

$X_2', R_2'$  – приведенные к статору индуктивности рассеяния и активного сопротивления ротора соответственно;

$s$  – скольжение;

$I_A^{(1)}, I_A^{(2)}$  – токи фазной обмотки прямой и обратной последовательностей соответственно;

$U_A^{(1)}, U_A^{(2)}$  – напряжения прямой и обратной последовательностей, введенных в место несимметрии.

Степень несимметрии питающего напряжения АД определяется коэффициентом обратной последовательности  $K_{2U}$  – отношения действующего значения напряжения обратной последовательности основной частоты трехфазной системы напряжения к соответствующему напряжению прямой последовательности. Стандартом допускается вместо напряжения прямой последовательности использовать номинальное напряжение. Коэффициент обратной последовательности определяется как:

$$K_{2U} = \frac{U_2}{U_{НОМ}} \cdot 100\%, \quad (3)$$

где  $U_2$  – действующее значение напряжения обратной последовательности основной частоты питающего напряжения, В;

$U_{НОМ}$  – номинальное значение междуфазного напряжения, В.

Для значений  $K_{2U}$  в пределах от 0 до 20 % рассчитаны механические и электромеханические характеристики, а также значения тепловых потерь основных узлов АД относительно номинального режима работы при постоянном моменте нагрузки. Кратность токов статорных обмоток ( $K_{I_1}$ ), роторных обмоток ( $K_{I_2}$ ), электрических потерь в статоре ( $K_{P_1}$ ) и роторе ( $K_{P_2}$ ) представлены в табл. 1.

Таблица 1

Величины механических и электромеханических характеристик АД при несимметрии питающего напряжения

$K_{2U}, \%$	$K_{I_1}$	$K_{I_2}$	$K_{P_1}$	$K_{P_2}$
0	1	1	1	1
2	1.059	1.089	1.004	1.001
4	1.118	1.179	1.015	1.005
6	1.177	1.271	1.034	1.012
8	1.237	1.363	1.061	1.022
10	1.297	1.456	1.095	1.034
12	1.358	1.549	1.136	1.049
14	1.418	1.644	1.186	1.067
16	1.480	1.740	1.243	1.088
18	1.541	1.837	1.307	1.112
20	1.603	1.935	1.379	1.14

Механические и электромеханические характеристики для номинального и несимметричного режима работы АД представлены на рис. 3.

Из рис. 3 следует, что при увеличении  $K_{2U}$  критический момент АД снижается незначительно, однако скольжение на рабочем участке по отношению к номинальному изменяется существенно, как следствие, ток статора увеличивается. Так при  $K_{2U} = 20\%$  ток статора возрос на 60 %, что приводит к росту греющих потерь более, чем в 2,5 р.

Оценка теплового состояния узлов АД в зависимости от  $K_{2U}$  и в соответствии с (2) представлена в табл. 2.

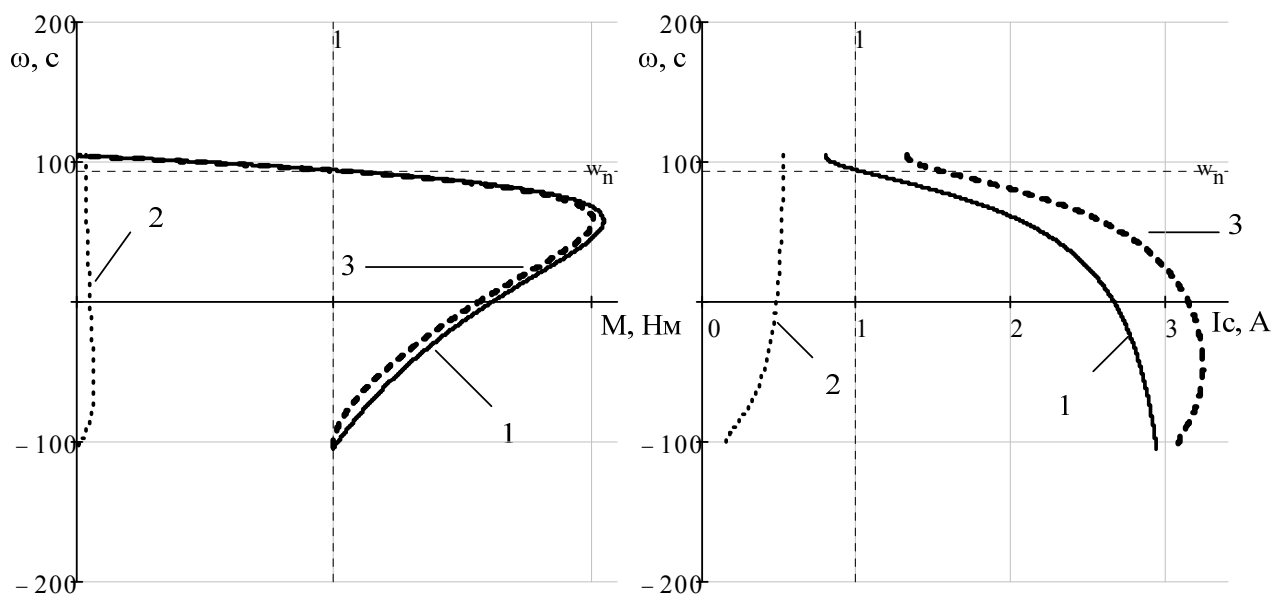


Рис. 3. Механические и электромеханические характеристики АД при разном  $K_{2U}$ :  
 1 – при симметричном питающем напряжении; 2 – обратной последовательности ( $K_{2U} = 20\%$ ); 3 – результирующий при несимметричном питающем напряжении ( $K_{2U} = 20\%$ )

Таблица 2

Величины средних установившихся температур узлов АД при несимметрии питающего напряжения

$K_{2U}$	$\theta_1, ^\circ\text{C}$	$\theta_2, ^\circ\text{C}$	$\theta_3, ^\circ\text{C}$	$\theta_4, ^\circ\text{C}$	$\theta_5, ^\circ\text{C}$	$\theta_6, ^\circ\text{C}$	$\theta_7, ^\circ\text{C}$	$\theta_8, ^\circ\text{C}$
0	99,7	101,3	82,1	92,5	105,7	101,3	82,1	48,5
2	112,8	117,1	91,9	106,3	120,3	117,1	93,8	54,5
4	127,9	135,5	103,2	122,4	137,1	135,5	107,4	61,4
6	145,5	157,1	116,4	141,2	156,7	157,2	123,3	69,6
8	166,2	182,6	131,9	163,3	179,8	182,8	142,1	79,1
10	190,7	213	150,2	189,5	207,2	213,3	164,3	90,3
12	219,9	249,6	172	220,8	239,9	250,0	191,0	103,8
14	255,4	294,3	198,5	259	279,7	294,9	223,4	120,2
16	299,3	349,7	231,2	306,2	329	350,7	263,6	140,4
18	354,7	420	272,3	365,8	391,1	421,5	314,4	165,8
20	426,5	511,5	325,7	443,1	471,9	513,8	380,5	198,8

Наиболее нагретыми узлами являются лобовые части обмоток статора и ротора. Графики зависимостей температур этих узлов от величины коэффициента  $K_{2U}$  представлены на рис. 4. Температура этих узлов в целом определяет срок службы изоляции обмоток статора и ротора. Из графиков так же можно сделать вывод о том, что температура обмоток ротора возрастает быстрее температуры обмоток статора при увеличении коэффициента обратной последовательности  $K_{2U}$ .

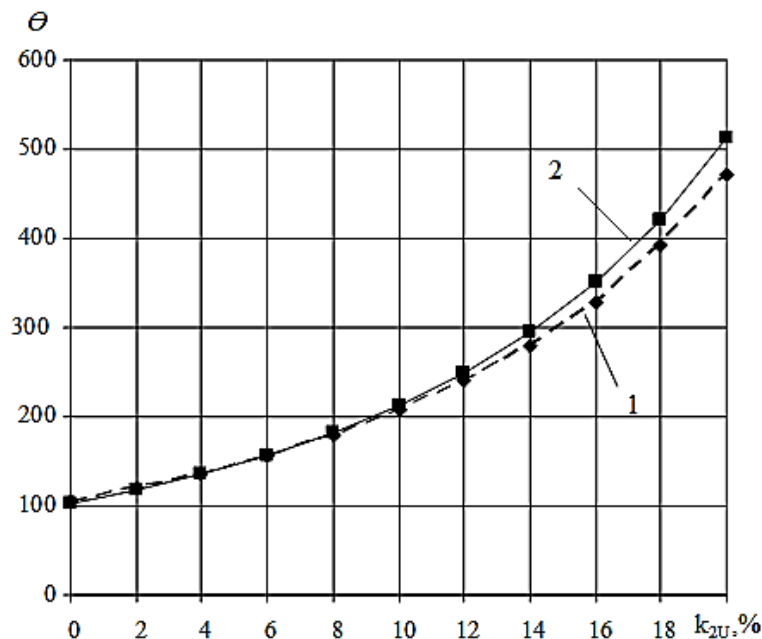


Рис. 4. Средние установившиеся температуры лобовых частей обмоток статора и ротора в зависимости от  $K_{2U}$ :

1 – температура лобовой части обмотки статора; 2 – температура лобовой части обмотки ротора

Исходя из табл. 2 и графиков рис. 3, можно сделать вывод о нелинейном возрастании значений температур узлов АД при увеличении коэффициента  $K_{2U}$ . Следует отметить, что температура лобовых частей статора и ротора достигает максимально допустимой при значении  $K_{2U}$  равном 6 %, при  $K_{2U} = 12$  % срок службы сокращается на величину порядка 36 %, при  $K_{2U} = 20$  % двигатель выйдет из строя в течение нескольких минут.

## ВЫВОДЫ

Результаты исследования теплового состояния асинхронных двигателей показали, что несимметрия питающих напряжений может привести к существенному росту температур обмоток. Так в рассмотренном случае при коэффициенте  $K_{2U}$ , превышающем 6 %, лобовые части обмоток статора нагреваются до температур, превышающих максимально допустимые величины, что приводит к существенному сокращению ресурса изоляционных материалов.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Герлига В. А. Показатели качества электроэнергии / В. А. Герлига, П. Г. Гуржий // *Збірник наукових праць Севастопольського національного університету ядерної енергії та промисловості*. – 2011. – Випуск 2(38). – С. 177–184.
2. Счастливый Г. Г. Нагревание закрытых асинхронных электродвигателей / Г. Г. Счастливый. – К. : Наукова думка, 1966. – 196 с.
3. Федоров М. М. Моделирование теплового состояния узлов электрических машин в различных режимах / М. М. Федоров // *Збірник наукових праць ДонДТУ*. – Донецьк : ДонДТУ, 1999. – Вип. 10. – С. 90–95.
4. Федоров М. М. Особенности электрохимических и тепловых процессов в асинхронных электродвигателях при аномальных режимах работы / М. М. Федоров, А. А. Ткаченко // *Научные труды Донецкого национального технического университета*. – 2006. – № 112. – С. 29–32.
5. Сыромятников И. А. Режимы работы асинхронных электродвигателей / И. А. Сыромятников. – М. : Энергоиздат, 1955. – 303 с.