

**ОЦЕНКА СРОКОВ СЛУЖБЫ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ, РАБОТАЮЩИХ
В ПОВТОРНО-КРАТКОВРЕМЕННЫХ РЕЖИМАХ**

М.М. Федоров, докт.техн.наук, **А.И. Лужнев**, **А.Е. Боев**
Донецкий национальный технический университет,
ул. Артема, 58, Донецк, 83001, Украина.

Приведены результаты исследований влияния параметров повторно-кратковременного режима на тепловое состояние и продолжительность срока службы изоляции асинхронного двигателя. Показано, что кратковременные превышения температуры сверх допустимой в цикле квазиустановившегося состояния оказывают существенное влияние на процессы теплового старения изоляции и должны учитываться при выборе мощности электродвигателей, работающих в повторно-кратковременных режимах. Библ. 6, табл. 1, рис. 4.

Ключевые слова: срок службы, изоляция, тепловое старение, повторно-кратковременный режим, асинхронный двигатель.

Введение. Наибольшие тепловые нагрузки электродвигатели, работающие в повторно-кратковременных режимах, имеют в квазиустановившемся состоянии, которое наступает после определенного количества циклов и характеризуется постоянством законов изменения температуры в элементах конструкции двигателя в течение цикла. К тепловым перегревам наиболее уязвима изоляция обмоток. В асинхронных двигателях (АД) большим тепловым нагрузкам обычно подвержены лобовые части обмоток статора. При повышенных температурах наблюдаются интенсивные процессы теплового старения изоляционных материалов, которые сопровождаются необратимыми изменениями структуры и свойств изоляции, приводят к её постепенному разрушению и сокращению срока службы электродвигателей [1, 3]. Практический интерес представляет исследование влияния параметров повторно-кратковременного режима на тепловое состояние асинхронного двигателя, определение продолжительности срока службы изоляции в условиях изменяющейся температуры обмоток. Динамика тепловых процессов в повторно-кратковременном режиме зависит от нагрузки, длительности цикла, продолжительности включения и других факторов.

Известные методы выбора мощности электродвигателей, работающих в повторно-кратковременном режиме (метод эквивалентного тока, эквивалентного момента и пр.), основываются на приведении режима к эквивалентному длительному, при этом средняя температура цикла не должна превышать допустимую для данного класса изоляции [2]. Однако в ряде случаев на отдельных интервалах цикла квазиустановившегося состояния температура лобовых и пазовых частей обмоток может превышать длительно допустимую по условию нагревостойкости изоляции, что активизирует процессы теплового старения.

Целью статьи является исследование влияния характеристик повторно-кратковременного режима на тепловое состояние и продолжительность срока службы изоляции обмоток АД.

Результаты исследований. Основными характеристиками квазиустановившегося состояния в повторно-кратковременных режимах являются: длительность цикла $t_{ц}$, время работы t_p , время паузы t_n , продолжительность включения (ПВ). Тепловое состояние характеризуется максимальным θ_{max} и минимальным θ_{min} превышением температуры активных частей над температурой окружающей среды в цикле, средним значением превышения температуры θ_{cp} и размахом колебаний $\Delta\theta$ (рис. 1).

Следует учитывать, что форма кривых нагрева и охлаждения зависит от ряда факторов и при допустимой средней температуре мгновенные значения температуры обмоток могут превышать допустимые для изоляции в отдельные моменты времени. При этом работа двигателя на участках с температурой меньше номинально допустимой не может компенсировать относительное уменьшение срока службы изоляции. В этом случае при температурах меньше номинально допустимой над окислительной составляющей процесса старения преобладают необратимые физические процессы усыхания изоляции, растрескивания и расслоения, обусловленные испарением летучих компонентов [1]. Кроме того, не снимается влияние других факторов износа: вибраций, механических усилий, электрических полей, агрессивных сред и т.д. В связи с этим ряд заводов-изготовителей, выпускающих двигатели для работы в повторно-кратковременных режимах, рекомендует, чтобы максимальное значение температуры цикла

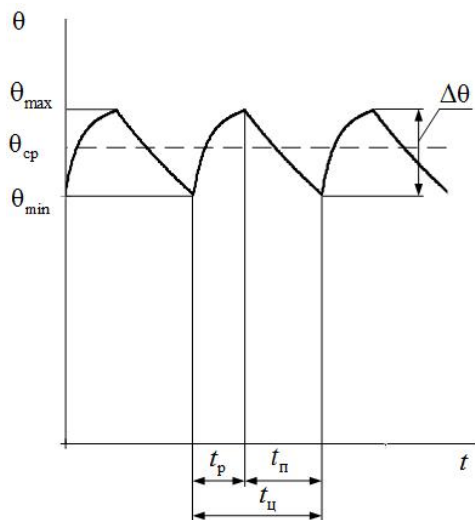


Рис. 1

Проведенный авторами анализ показал, что для расчетов, связанных с определением теплового старения, для всех классов изоляции может использоваться «правило пятнадцати градусов»: при увеличении температуры изоляции на каждые 15°C сверх допустимой срок службы изоляции сокращается в $e=2,72$ раз [6]:

$$D^* = \exp(-\Delta\tau/15), \quad (2)$$

где $D^* = D/D_n$ – относительный срок службы изоляции; $\Delta\tau$ – превышение температуры изоляции над допустимой.

При изменяющейся температуре в квазиустановившемся состоянии с учетом (2) относительный срок службы определяется по выражению

$$D^* = t_{\text{ц}}^{-1} \int_{t_i}^{t_i+t_{\text{ц}}} \exp(-\Delta\tau(t)/15) dt, \quad (3)$$

где $t_{\text{ц}}$ – длительность цикла; $\Delta\tau(t)$ – превышение температуры изоляции над допустимой температурой в функции времени.

Зависимости температур активных частей могут быть получены на основе экспериментальных исследований или расчетным путем. Для математического моделирования тепловых процессов широко применяется подход, основанный на использовании схем замещения. Электрическая машина с помощью разветвленной тепловой схемы представляется в виде совокупности однородных элементов с учетом тепловых связей между ними [4]. Тепловые процессы описываются системой дифференциальных уравнений теплового баланса.

Определяющее влияние на продолжительность срока службы изоляции электродвигателей

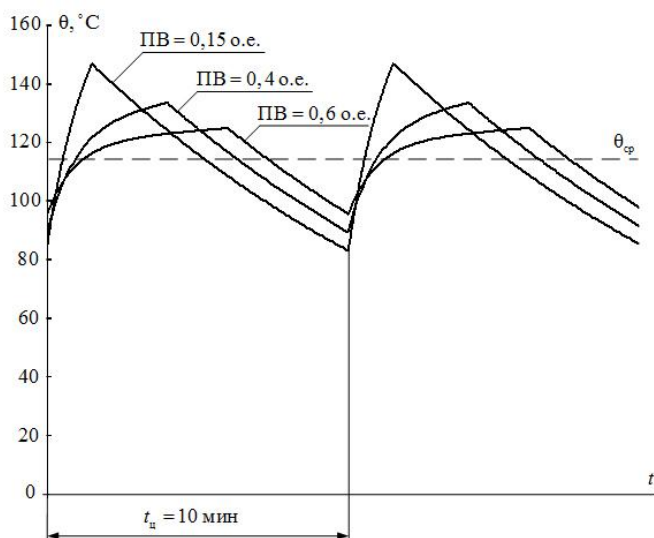


Рис. 2

оказывает температура обмоток. В связи этим целесообразно рассматривать наиболее напряженные в тепловом отношении узлы – лобовые и пазовые части обмоток. В данной работе для исследования теплового состояния АД использовалась динамическая тепловая модель узла электрической машины, которая позволяет анализировать тепловые процессы в выделенных узлах с учетом изменяющихся условий теплообмена, особенностей направления тепловых потоков в объеме машины, характеристик активных и изоляционных материалов [5].

Исходными данными для расчета являются параметры тепловой схемы замещения (теплоемкости и тепловые проводимости) для нагрева и охлаждения, мощности источников тепла, а также характеристики режима. В результате определяются временные зависимости

температур элементов конструкции двигателя. В качестве примера на рис. 2 показаны расчетные зависимости превышений температуры лобовых частей обмоток статора АД 4АМУ225М4 в квазиустановившемся состоянии при длительности цикла $t_{ц}=10$ мин для трех случаев: ПВ=0,15, 0,4 и 0,6 о.е. Величина коэффициента нагрузки принималась из условия равенства средней температуры в цикле и допустимой по нагревостойкости изоляции (класс F).

Из рис. 2 следует, что тепловые характеристики квазиустановившегося состояния имеют существенные отличия при различных ПВ. При уменьшении ПВ наблюдается увеличение размаха колебаний температуры и максимальной температуры в цикле. В таблице представлены результаты расчетов тепловых характеристик и относительного срока службы изоляции обмоток в условиях равенства средней температуры цикла и длительно допустимой температуры изоляции $\theta_{доп}$ для различ-

$t_{ц}$, МИН		10	5	2	1
ПВ=0,6 о.е.	$\theta_{мин}$, °С	95,4	105,7	111,7	113,6
	θ_{max} , °С	124,8	120,9	117,9	116,7
	$\Delta\theta$, °С	29,4	15,2	6,2	3,1
	D^* , о.е.	0,799	0,885	0,947	0,967
ПВ=0,4 о.е.	$\theta_{мин}$, °С	89,5	102,5	110,1	112,7
	θ_{max} , °С	133,9	125,3	119,3	117,3
	$\Delta\theta$, °С	44,4	22,8	9,2	4,6
	D^* , о.е.	0,739	0,844	0,931	0,962
ПВ=0,25 о.е.	$\theta_{мин}$, °С	86,2	100,3	109,0	112,0
	θ_{max} , °С	142,5	128,9	120,6	117,8
	$\Delta\theta$, °С	56,3	28,6	11,6	5,8
	D^* , о.е.	0,717	0,82	0,915	0,953
ПВ=0,15 о.е.	$\theta_{мин}$, °С	84,0	98,6	108,5	111,8
	θ_{max} , °С	148,6	131,7	121,6	118,4
	$\Delta\theta$, °С	64,6	33,1	13,1	6,6
	D^* , о.е.	0,707	0,8	0,9	0,943

ных значений ПВ и $t_{ц}$.

Из результатов, представленных в таблице, следует, что при уменьшении длительности цикла максимальная температура лобовых частей обмоток статора снижается. С увеличением ПВ размах колебаний температуры и максимальная температура в цикле также уменьшаются. Например, при увеличении ПВ с 0,15 до 0,6 о.е. при $t_{ц}=10$ мин максимальная температура снижается в 1,2 раза, а размах в 2,2 раза оказывает существенное влияние на продолжительность срока службы изоляции.

Из представленных в таблице результатов следует, что при всех значениях ПВ с ростом $t_{ц}$ относительный срок службы D^* изоляции обмоток статора АД уменьшается, что объясняется увеличением максимальной температуры в цикле и продолжительностью ее воздействия на изоляцию.

Для иллюстрации влияния тепловых характеристик повторно-кратковременного ре-

жима на расход ресурса изоляции на рис. 3 показаны зависимости для четырех вариантов: при средней температуре цикла $1,0\theta_{доп}$, $0,95\theta_{доп}$, $0,9\theta_{доп}$ и $0,85\theta_{доп}$ при $t_{ц}=10$ мин и на рис. 4 – при $t_{ц}=5$ мин для различных значений ПВ. Сопоставление результатов показывает, что на тепловое состояние АД в повторно-кратковременном режиме и износ изоляции при изменяющейся температуре обмоток существенно влияют характеристики квазиустановившегося состояния: длительность цикла $t_{ц}$, продолжительность включения и средняя температура цикла.

Уменьшение длительности цикла с $t_{ц}=10$ мин до 5 мин при постоянной средней температуре позволяет значительно уменьшить расход ресурса изоляции обмоток: относительный срок службы изоляции увеличивается в зависимости от ПВ и средней температуры цикла от 1,03 до 1,2 раз для рассмотренных случаев. При дальнейшем уменьшении средней температуры и длительности цикла температура изоляции не превышает допустимую.

Выводы. Общепринятый подход к выбору мощности электродвигателей для повторно-кратковременного режима по эквивалентному току или эквивалентному моменту, основанный на приведении режима к эквивалентному длительному, учитывает среднюю температуру в квазиустановившемся состоянии. Результаты исследований указывают на необходимость учета влияния динамики теплового состояния и максимальной температуры цикла на тепловое старение и сроки службы изоляции электродвигателей. Следует учитывать, что продолжительность включения и длительность цикла оказывают существенное влияние на величину размаха колебаний температуры и максимальную температуру, которая может превышать среднюю температуру в цикле. Увеличение длительности цикла и уменьшение продолжительности включения приводят к увеличению размаха колебаний, максимальной температуры цикла и снижению срока службы изоляции электродвигателей.

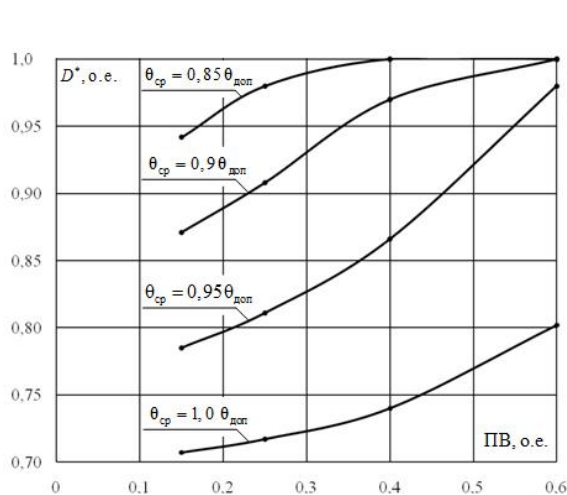


Рис. 3

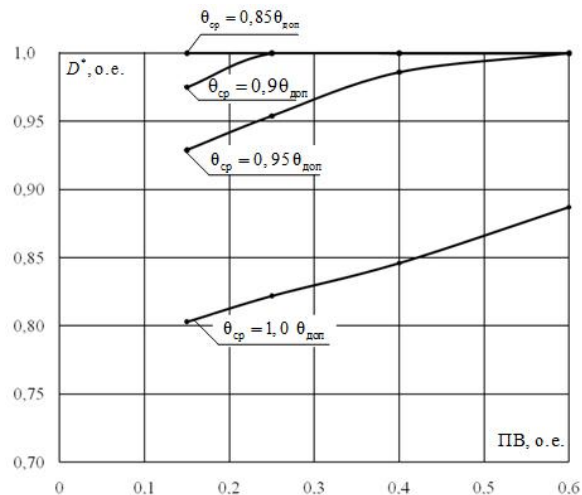


Рис. 4

1. Ермолин Н.П., Жерихин И.П. Надежность электрических машин. – Л.: Энергия, 1976. – С. 241–246.
2. Копылов И.П., Клоков Б.К. Справочник по электрическим машинам. Т. 1. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 446 с.
3. Котеленец Н.Ф., Кузнецов Н.Л. Испытания и надежность электрических машин : учеб. пособие для вузов по спец. «Электромеханика». – М.: Высшая школа, 1988. – 231 с.
4. Сипайлов Г.А., Санников Д.И., Жадан В.А. Тепловые, гидравлические и аэродинамические расчеты в электрических машинах. – М.: Высшая школа, 1989. – 239 с.
5. Федоров М.М. Динамические тепловые модели узлов электрических машин // Электромашинобудування та електрообладнання. – 1999. – № 53. – С. 70–73.
6. Федоров М.М., Лужнев А.И., Боев А.Е. Оценка сроков службы изоляции электрических машин // Збірник наукових праць Донецького національного технічного університету. Серія: Електротехніка і енергетика. – 2011. – Вип. 10 (180). – С. 200–203.

УДК 621.313.333

ОЦІНКА ТЕРМІНІВ СЛУЖБИ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ, ЯКІ ПРАЦЮЮТЬ У ПОВТОРНО-КОРОТКОЧАСНИХ РЕЖИМАХ

М.М.Федоров, докт. техн. наук, А.І.Лужнев, А.Є.Боев

Донецький національний технічний університет,
вул. Артема, 58, Донецьк, 83001, Україна.

Наведено результати досліджень впливу параметрів повторно-короткочасного режиму на тепловий стан і тривалість терміну служби ізоляції асинхронного двигуна. Показано, що короткочасні перевищення температури понад допустиму в циклі квазівстановленого стану суттєво впливають на процеси теплового старіння ізоляції і повинні враховуватися при виборі потужностей електродвигунів, які працюють в повторно-короткочасних режимах. Бібл. 6, табл. 1, рис. 4.

Ключові слова: строк служби, ізоляція, теплове старіння, повторно-короткочасний режим, асинхронний двигун.

ELECTRIC MOTORS LIFETIME ESTIMATION IN INTERMITTENT OPERATION

M.M.Fedorov, A.I.Luzhnev, A.E.Boev

Donetsk National Technical University,
Artema, 58, Donetsk, 83001, Ukraine.

This paper presents results of researches of intermittent mode ratings influence on thermal state and insulation lifetime of asynchronous motor. It is shown that short-term overheating in steady-state regime has an essential impact on insulation thermal aging and should be taken into account for electric motors in intermittent modes. References 6, table 1, figures 4.

Key words: lifetime, insulation, thermal aging, intermittent mode, asynchronous motor.

1. Ermolin N.P., Zherikhin I.P. Reliability of electric machines. – Leningrad: Energiia, 1976. – 248 p. (Rus)
2. Kopylov I.P., Klokov B.K. Electric machinery handbook. – Moskva: Energoatomizdat, 1989. – 456 p. (Rus)
3. Kotelenets N.F., Kuznetsov N.L. Tests and reliability of electric machines. – Moskva: Vysshiaia shkola, 1988. – 231 p. (Rus)
4. Sipailov G.A., Sannikov D.I., Zhadan V.A. Thermal, hydraulic and aerodynamic calculations in electric machinery. – Moskva: Vysshiaia shkola, 1989. – 239 p. (Rus)
5. Fedorov M.M. Dynamic thermal models of electric machines units // Elektromashinobuduvannia ta elektroobladnannia. – 1999. – № 53. – Pp. 70–73. (Rus)
6. Fedorov M.M., Luzhnev A.I., Boev A.E. Insulation lifetime estimation of electric machines // Zbirnyk naukovykh prats Donetskogo Natsionalnogo Tekhnichnogo Universytetu. Serii: Elektrotekhnik i energetika. – 2011. – Vol. 10 (180). – Pp. 200–203. (Rus)

Надійшла 25.01.2012

Received 25.01.2012