

УЧЕТ РАСХОДУЕМОГО РЕСУРСА ИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ОБМОТОК АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Фёдоров М.М., Малеев Д.М.

Донецкий национальный технический университет

In article considered methods of definitions a spent isolation resource of inductions motors windings. Appreciated influence on a spent resource of mean and deviation of temperature in work modes S1 and S3. Given recommendations for algorithm of definition a spent resource of isolation.

Эксплуатация асинхронных двигателей (АД) сопровождается изменением температуры изоляции их обмоток. Превышение температуры изоляции сверх допустимой приводит к сокращению сроков службы АД [1], поэтому учёт расходуемого ресурса изоляционных материалов обмоток АД является актуальной задачей. Применение микропроцессорных систем позволяет осуществлять непрерывный контроль температуры обмоток, осуществлять защиту АД от тепловых перегрузок, производить прогнозирование теплового состояния по заданной диаграмме нагрузок и т.д.

Подобные системы, традиционно, состоят из двух основных блоков – измерительного и вычислительного, соединенных одним или несколькими каналами связи [2]. В качестве вычислительного блока может использоваться персональная ЭВМ или микроконтроллер, обладающий достаточной вычислительной мощностью. В вычислительном блоке по данным, поступившим из измерительного блока, формируются греющие потери, по которым, с помощью тепловой модели, определяются значения приращений температуры $\Delta\theta$ за время Δt и сама температура θ элементов конструкции АД; значения температуры используются в дальнейшем для определения расходуемого ресурса. В данной работе рассмотрены особенности алгоритма системы по определению расходуемого ресурса и остаточного срока службы АД, эксплуатирующихся в различных режимах.

Согласно современным подходам к физике процессов старения изоляции, на основе общих законов кинетики химических реакций, Вант-Гоффом и Аррениусом было получено уравнение [3], с помощью которого можно определить срок службы изоляции D при температуре θ , при известных сроке службы D_n и номинально допустимой температуре $\theta_n = \theta_{доп}$ [4]

$$D = D_n \cdot \exp\left(\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{\theta} - \frac{1}{\theta_n}\right)\right) = D_n \cdot \exp\left(\frac{E_a}{R \cdot \theta_n} \left(\frac{\theta_n}{\theta} - 1\right)\right), \quad (1)$$

где: E_a – энергия активации,

$R = 8.317$ Дж / моль * град – универсальная газовая постоянная.

В общем случае, относительный использованный ресурс изоляции D_i^* за время эксплуатации t_i с температурой θ_i определяется по формуле:

$$D_i^* = \frac{t_i}{D_i} = \frac{t_i}{D_n} \cdot \exp\left(\frac{\theta_i - \theta_n}{\Delta\theta}\right). \quad (2)$$

Суммарный относительный использованный ресурс D^* равен

$$D^* = \sum D_i^* = \sum \left(\frac{t_i}{D_n} \cdot \exp\left(\frac{\theta_i - \theta_n}{\Delta\theta}\right) \right). \quad (3)$$

Относительный остаточный срок службы составит

$$D_{ост}^* = 1 - D^*. \quad (4)$$

Соответственно остаточный срок службы $D_{н ост}$ при номинальной температуре θ_n равен

$$D_{н ост} = D_n \cdot D_{ост}^*. \quad (5)$$

Остаточный срок службы при произвольной температуре θ можно определить по формуле

$$D_{ост} = D_{н ост} \cdot \exp\left(-\frac{\theta - \theta_n}{\Delta\theta}\right). \quad (6)$$

Вышеизложенное позволяет оценить расходуемый ресурс и остаточный срок службы при эксплуатации двигателя на интервалах t_i времени при неизменном значении температуры за все это время. Однако, при подсчете остаточного ресурса изоляции обмоток электрических машин необходимо учитывать тот факт, что их температура непрерывно изменяется в зависимости от нагрузки. Особый интерес представляет учёт температуры в повторно-кратковременных и перемежающихся режимах.

При расчете расходуемого ресурса изоляции рационально пользоваться средним значением температуры за определенные интервалы работы. В этой связи возникает целый комплекс вопросов: выбор интервала осреднения, учёт влияния размаха колебаний на величину расходуемого ресурса, определение поправочных коэффициентов, учитывающих размах температуры и т.д.

Выбор малого времени осреднения t_i связан с малыми значениями расходуемого ресурса D_i , что приводит к увеличению вычислительной мощности системы, т.к. для обеспечения правильности результатов расчета, необходимо применять числа с двойной точностью. Рациональным является осреднение температуры в течение 2-3 рабочих смен (10-20 часов). За это время возможно изменение температуры в достаточно широких пределах, поэтому необходимо учесть влияние этих изменений температуры на величину расходуемого ресурса.

В этой связи возникает необходимость в определении критериев выбора времени осреднения температуры t_i . При этом необходимо, чтобы расходуемый ресурс на интервале отличался от номинального в допустимых пределах. За номинальное значение расходуемого ресурса принимается его величина при эксплуатации АД в продолжительном режиме при номинальной нагрузке (коэффициент нагрузки по току $\beta_1 = 1$). Определение этих критериев требует проведения исследований зависимости расходуемого ресурса на интервале времени t_i от величины математического среднего температуры θ_{cp} и её разброса $\Delta\theta$. Среднюю температуру за выбранный i -й интервал времени можно оценить при помощи её математического ожидания m_{θ} :

$$m_{\theta} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \theta_k, \quad (7)$$

где: θ_k – выборки мгновенных значений температуры на интервале t_i ,
 n – число выборок температуры.

Возможный разброс температуры $\Delta\theta_i$ может быть описан дисперсией D_{θ_i} или среднеквадратичным отклонением (СКО) σ_{θ_i} температуры:

$$\sigma_{\theta} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (m_{\theta} - \theta_k)^2}. \quad (8)$$

Продолжительный режим работы S1 может характеризоваться несколькими интервалами с постоянной нагрузкой. Каждому интервалу времени соответствует своё установившееся значение температуры θ_i и свой коэффициент нагрузки β_i . При этом длительность интервалов может достигать 5-10 часов и на всей длительности интервала температура элементов конструкции может считаться постоянной. На рис. 1 приведена диаграмма нагрузки АД и диаграмма выбранного элемента конструкции АД, работающего в продолжительном режиме S1 с несколькими интервалами постоянных нагрузок.

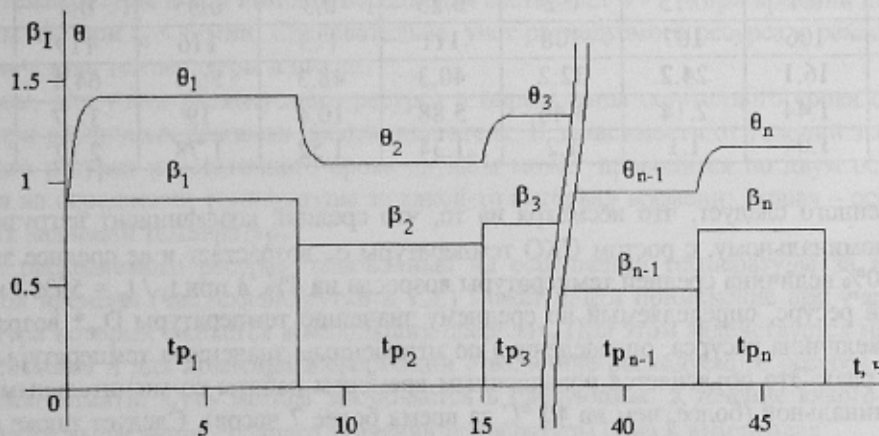


Рисунок 1 – Нагрузочная диаграмма двигателя и график температуры лобовой части обмотки статора в продолжительном режиме

Влияние математического ожидания m_{θ} и СКО температуры σ_{θ} на относительный расходуемый ресурс D^* оценим на примере нагрузочной диаграммы продолжительного режима, включающей в себя два интервала t_1 и t_2 с различными коэффициентами нагрузки по току β_i , причем за все время работы $t_p = t_1 + t_2$ величина среднего значения коэффициента нагрузки по току будет равна номинальному $\beta_{1cp} = 1$.

В табл. 1 приведены данные расчета относительного расходуемого ресурса для АД ЭДКО2МУ5 при различных соотношениях t_1/t_p и величинах β_i изменяющихся в пределах (1.05 – 1.50) $\beta_{н.н.}$. Время работы принималось равным $t_p = 20$ часов. В таблице приведены величины математического ожидания m_{θ} и СКО σ_{θ} температуры лобовой части обмотки статора, как наиболее уязвимо в тепловом отношении элемента конструкции АД. Там же приведена величина расходуемого ресурса, определенная по средней температуре за все время работы t_p . Необходимо отметить, что в качестве номинальной температуры принималась установившаяся температура лобовой части обмотки статора АД ЭДКО2МУ5 ($\theta_{уст} = 105$ °С), работающего в продолжительном режиме при коэффициенте нагрузки равном $\beta_1 = 1$.

Таблица 1 – Расчет относительного расходуемого ресурса в продолжительном режиме S1 с различными коэффициентами нагрузки на интервалах.

t ₁ / t _p = 20%										
β ₁₁	1.05	1.1	1.15	1.2	1.25	1.3	1.35	1.4	1.45	1.5
β ₁₂	0.988	0.975	0.962	0.95	0.938	0.925	0.913	0.9	0.887	0.875
σ _β	0.025	0.05	0.075	0.1	0.125	0.15	0.175	0.2	0.225	0.25
m _θ	105	105	105	106	106	107	108	108	109	110
σ _θ	3.81	7.76	11.9	16.1	20.5	25	29.6	34.4	39.4	44.4
D*	1.02	1.11	1.3	1.67	2.34	3.55	5.75	9.83	17.6	32.6
D _{ср} *	0.992	1.01	1.02	1.04	1.07	1.11	1.14	1.2	1.26	1.33
t ₁ / t _p = 30%										
β ₁₁	1.05	1.1	1.15	1.2	1.25	1.3	1.35	1.4	1.45	1.5
β ₁₂	0.979	0.957	0.936	0.914	0.893	0.871	0.85	0.829	0.807	0.786
σ _β	0.0327	0.0654	0.0982	0.131	0.164	0.196	0.229	0.262	0.294	0.327
m _θ	105	105	106	106	107	108	110	111	113	115
σ _θ	5.21	10.6	16.1	21.7	27.5	33.5	39.6	45.8	52.2	58.8
D*	1.04	1.2	1.55	2.22	3.46	5.74	10	18.2	34.1	65.9
D _{ср} *	0.996	1.02	1.04	1.08	1.13	1.19	1.27	1.38	1.5	1.65
t ₁ / t _p = 40%										
β ₁₁	1.05	1.1	1.15	1.2	1.25	1.3	1.35	1.4	1.45	1.5
β ₁₂	0.967	0.933	0.9	0.867	0.833	0.8	0.767	0.733	0.7	0.667
σ _β	0.0408	0.0817	0.122	0.163	0.204	0.245	0.286	0.327	0.367	0.408
m _θ	105	105	106	107	109	110	112	114	117	120
σ _θ	6.59	13.3	20.1	27	34.1	41.2	48.4	55.8	63.3	70.8
D*	1.06	1.31	1.84	2.82	4.65	8.05	14.5	26.9	51.4	101
D _{ср} *	1	1.02	1.06	1.13	1.21	1.32	1.46	1.65	1.88	2.19
t ₁ / t _p = 50%										
β ₁₁	1.05	1.1	1.15	1.2	1.25	1.3	1.35	1.4	1.45	1.5
β ₁₂	0.95	0.9	0.85	0.8	0.75	0.7	0.65	0.6	0.55	0.5
σ _β	0.05	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45	0.5
m _θ	105	106	107	108	111	113	116	119	123	127
σ _θ	8.05	16.1	24.2	32.2	40.3	48.3	56.4	64.4	72.5	80.5
D*	1.1	1.44	2.14	3.46	5.88	10.4	19	35.7	69	137
D _{ср} *	1	1.04	1.1	1.2	1.34	1.52	1.78	2.12	2.6	3.26

Из вышеизложенного следует, что несмотря на то, что средний коэффициент нагрузки по току за все время работы равен номинальному, с ростом СКО температуры σ_θ возрастает и ее среднее значение m_θ. Причем, когда t₁ / t_p = 20% величина средней температуры возросла на 4%, а при t₁ / t_p = 50% - на 20%. Это означает, что расходуемый ресурс, определяемый по среднему значению температуры D_{ср}* возрастёт в несколько раз (от 1.3 до 3.3), а величина ресурса, определенная по мгновенным значениям температуры D* – возрастает значительно (в сотни раз). Это объясняется повышенным временем работы со значительными превышениями температуры над номинальной (более, чем на 40 °С за время более 7 часов). Следует также отметить, что использование критерия поддержания постоянства средней температуры m_θ на уровне допустимой путем уменьшения коэффициента нагрузки β₁ также приводит к росту величины расходуемого ресурса, определяемому по мгновенным значениям температуры.

Вышеизложенное позволяет утверждать, что при эксплуатации АД в продолжительном режиме S1 в диаграмме нагрузок по возможности должны отсутствовать интервалы со значением коэффициента нагрузки β₁ больше 1.

Оценка влияния кратковременных превышений температуры над допустимой была проведена путем анализа расходуемого ресурса в повторно-кратковременном режиме S3. В табл. 2 приведены данные расчета тепловых характеристик АД с короткозамкнутым ротором ЭДКО2МУ5 для повторно-кратковременных режимов S3 при различных длительностях цикла t_ц и продолжительностях включения ПВ. В таблице представлены скорректированные значения коэффициента нагрузки по току β, их относительные уменьшения Δβ в сравнении с коэффициентами, полученными согласно критерию равенства потерь; значения математического ожидания температуры m_θ; СКО температуры σ_θ; относительных расходуемых ресурсов, вычисленных по мгновенной D* и средней температуре D_{ср}.

Таблица 2 - Расчет характеристик повторно-кратковременных режимов S3.

ПВ		$t_{ц} = 10$ мин	$t_{ц} = 5$ мин	$t_{ц} = 2$ мин
60%	β_I	1.09	1.09	1.09
	$\Delta\beta, \%$	4.5	4.5	4.5
	m_e	105	105	105
	σ_{θ}	15.11	7.944	2.96
	D^*	1.03	1.009	0.9999
	D^*_{cp}	1	1.001	0.9988
40%	β_I	1.19	1.18	1.18
	$\Delta\beta, \%$	8.6	9.3	9.3
	m_e	105	105	105
	σ_{θ}	18.8	9.932	3.747
	D^*	1.049	1.011	1
	D^*_{cp}	1.001	0.9992	0.9985
25%	β_I	1.33	1.32	1.32
	$\Delta\beta, \%$	15	15.9	15.9
	m_e	105	105	105
	σ_{θ}	19.86	10.24	3.915
	D^*	1.053	1.012	0.9999
	D^*_{cp}	1.001	0.9989	0.998
15%	β_I	1.53	1.53	1.52
	$\Delta\beta, \%$	22.8	22.8	23.6
	m_e	105	105	105
	σ_{θ}	19.59	9.896	3.842
	D^*	1.051	1.012	1.004
	D^*_{cp}	1	0.9997	1.002

Из табл. 2 следует, что в случае равенства средней температуры в повторно-кратковременном режиме S3 величине установившейся температуры в режиме S1 расхождение при расчете расходуемого ресурса по мгновенным значениям температуры и при помощи осреднения составляет 3 - 5% при времени цикла, равным $t_{ц} = 10$ мин. и не более, чем 2% при $t_{ц} < 5$ мин. Следовательно, учет расходуемого ресурса в режиме S3 можно проводить по среднему значению температуры в цикле.

Таким образом, для учёта расходуемого ресурса и определения остаточного срока службы следует различать интервалы при различных режимах работы двигателя. В зависимости от условий эксплуатации двигателя учет расходуемого ресурса и остаточного срока службы может проводиться по двум основным методикам: первая - основанная на осреднении температуры за какой-то интервал времени; вторая - основанная на использовании мгновенных значений температуры.

Метод учёта расходуемого ресурса, основанный на осреднении температуры за какой-то достаточно большой промежуток времени (час, смена, сутки и т.д.) может найти применение при учете расходуемого ресурса АД, температура которых меняется в небольших пределах. При этом задействуется малая часть вычислительных ресурсов системы и для хранения информации о величине расходуемого ресурса достаточно задействовать малые объемы памяти. Суть метода заключается в следующем: в течение какого-то i -го промежутка времени t_i производится вычисление среднего значения температуры θ_i на k интервалах:

$$\theta_{i,cp} = \frac{\sum \theta_k \cdot t_k}{t_i}, \quad (9)$$

далее вычисляется расходуемый за это время средний ресурс $D_{cp,i}$. Методика его расчета рассмотрена ранее. Остаточный срок службы $D_{ост,n}$ может определяться, например, в конце смены, по следующему выражению:

$$D_{ост,n} = D_{ост,n-1} - \sum D_{cp,i}, \quad (10)$$

где: $D_{ост,n-1}$ - величина остаточного срока службы определенная в конце предыдущей смены; у двигателей не бывших в эксплуатации начальное значение $D_{ост}$ равно сроку службы D_n .

Недостатком подобного метода является то, что в итоге мы получаем только величину расходуемого ресурса и остаточного срока службы, однако, не можем судить о статистике работы двигателя при различных температурах. Кроме того, точность определения расходуемого ресурса при использовании осреднения температуры колеблется в достаточно широких пределах в зависимости от выбора времени осреднения t_i .

Если необходимо учитывать расходуемый ресурс изоляционных материалов с большей точностью или иметь более полную информацию о температурных процессах в АД за достаточно большие промежутки времени, то предпочтительным является накопление информации о температуре двигателя за всё время его работы.

При этом формируется так называемая температурно-временная диаграмма, показывающая суммарное количество времени, которое двигатель проработал при той или иной температуре.

Температурно-временная диаграмма представляет собой график зависимости времени пребывания изоляционного материала обмоток под воздействием какой-то температуры t_{θ_i} от этой температуры θ_i . При этом считается, что изоляционный материал пребывал под воздействием температуры θ_i в течение того времени, пока его температура находилась в пределах какого-то разброса температур θ' , т.е. температура изменялась от $(\theta_i - \theta')$ до $(\theta_i + \theta')$.

На рис. 3 приведена температурно-временная диаграмма квазиустановившегося состояния для лобовой части обмотки статора АД с короткозамкнутым ротором ЭДКО2МУ5, проработавшего в повторно-кратковременном режиме S3 (ПВ=0.4, $t_{\text{н}} = 10$ мин.) в течение 100 часов при номинальной нагрузке. Разброс температур при построении диаграммы составлял $\theta' = 1^\circ\text{C}$.

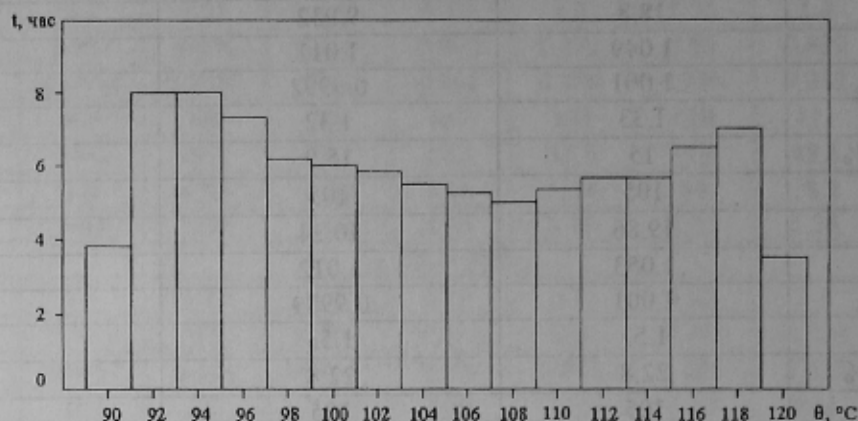


Рисунок 3 - Температурно-временная диаграмма квазиустановившегося состояния для лобовой части обмотки статора АД ЭДКО2МУ5

При построении этой температурно-временной диаграммы учитывались только температурные процессы в квазиустановившемся состоянии, т.к. нагрев АД до квазиустановившегося состояния и его охлаждение до практически холодного состояния не оказывают особого влияния на износ изоляции обмоток.

Определение расходуемого ресурса и остаточного срока службы в этом случае осуществляется по приведенным ранее выражениям (1-7); при этом значение $D_{\text{ср}}$ определяется для каждого значения температуры θ_i и времени t_{θ_i} . Подобный подход позволяет с большей степенью точности оценить величину расходуемого ресурса, однако требует применения больших вычислительных мощностей и использования большего объема памяти ВК, поскольку возникает необходимость анализа зависимости температуры $\theta(t)$ в каждом цикле.

Из вышеизложенного следует, что при учете расходуемого ресурса в продолжительном режиме S1 необходимо использовать средние значения температуры за промежутки времени не более 10 часов (осреднение в течение рабочей смены). Тогда при равенстве математического ожидания температуры допустимому значению, и, если СКО температуры будет менее 10%, расходуемый ресурс будет незначительно отличаться от номинального (в пределах 5-10 %). Кроме того, рекомендуется, при эксплуатации АД в продолжительном режиме, избегать даже кратковременных интервалов работы со значением коэффициента нагрузки β_1 больше 1.

В повторно-кратковременных режимах, при квазиустановившемся состоянии, осреднение температуры может производиться за промежутки времени более 10 часов, поскольку при условии равенства математического ожидания температуры m_{θ} за время работы её допустимому значению $\theta_{\text{доп}}$ и величины СКО на более 20%, значения расходуемого ресурса будут отклоняться от номинального не более, чем на 5%.

Предложенные методики могут быть использованы при построении алгоритма работы систем контроля и прогнозирования температурного состояния асинхронных двигателей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Справочник по электрическим машинам / под ред. Копылова И.П. – М.: Энергоатомиздат, 1989, Т 1,2.
2. Федоров М.М., Денник В.Ф., Малеев Д.М. Микропроцессорная система контроля и прогнозирования теплового состояния электродвигателей в повторно-кратковременных режимах работы. - Сборник трудов по материалам Всероссийской научно-технической конференции с международным участием "Компьютерные технологии в инженерной и управленческой деятельности", г. Таганрог 2000г., с 248-254.
3. Гольдберг О. Д. Качество и надежность асинхронных двигателей. М., 1968. 176 с.
4. Фёдоров М.М. Совершенствование методов прогнозирования теплового состояния электродвигателей переменного тока в нестационарных режимах их работы. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук, Национальный технический университет «ХПИ», г. Харьков, 2003. – 457 с.