

ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ РАСХОДА РЕСУРСА ИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ОБМОТОК ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Фёдоров М.М., Денник В.Ф., Михайлов В.Е., Малеев Д.М.

Донецкий национальный технический университет

fedorov@skif.net

The ways of calculation spending resource and definition remaining term of service isolation materials were considered in the long, shot and repeat-shot modes of work. The method of calculation spending resource of isolation materials with uninterruptly changing temperature was offered.

Надёжность работы электрических машин в значительной степени определяется состоянием изоляционных материалов их обмоток. Основной причиной ухудшения свойств изоляционных материалов являются температурные перегрузки, которые определяются величинами превышения температуры материалов обмоток асинхронных двигателей при различных режимах работы [1]. Более того, режим работы электрической машины определяет температуру ее обмоток, которая в общем случае может изменяться по произвольному закону.

ГОСТ 183-79 предусматривает 8 номинальных режимов работы электродвигателей (S1-S8), которые охватывают практически все возможные случаи, имеющие место при эксплуатации электрических машин. Продолжительный режим работы S1 характеризуется постоянством нагрузки двигателя и, следовательно, постоянством токов в его обмотках. В этом режиме через определенное время переходного процесса устанавливается постоянная температура обмоток, соответствующая токовым нагрузкам. Процесс нагрева электрической машины сопряжен с тепловым старением изоляции её обмоток. При номинальной нагрузке двигателя температура его обмоток не должна превышать допустимую для соответствующего класса изоляции температуру τ_0 . Если температура обмоток электрической машины, работающей в режиме S1, будет такой же как и τ_0 , то срок её службы будет равен расчетному и для современных электродвигателей, в которых как правило используется изоляция классов F ($\tau_0=155^\circ\text{C}$) или H ($\tau_0=180^\circ\text{C}$) составляет 7-10 лет.

Превышение температуры обмоток τ над допустимой τ_0 приводит к сокращению срока службы изоляционных материалов по сравнению с расчетным значением, зависящему от временных интервалов, на которых наблюдается это превышение. Вопросам теплового старения изоляции посвящено множество работ, в основе которых лежат уравнения кинематики химических реакций Вант-Гоффа и Аррениуса [2]. Срок службы изоляции D при температуре τ_0 и известных сроке службы D_n и допустимой номинальной температуре τ_n равен:

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

где: $\tau_n = \tau_0$ – допустимая температура для соответствующего класса изоляции,
 E_a – энергия активации,
 $R = 8.317$ Дж/моль · град – универсальная газовая постоянная.
 Относительный срок службы D^* равен:

$$D^* = \frac{D}{D_n} = \exp\left(\frac{E_a \cdot \tau_n}{R} \left(\frac{\tau_n}{\tau} - 1\right)\right). \quad (2)$$

Используемый ресурс изоляционного материала за время t_i при работе двигателя с температурой τ_i составляет t_i / D^* , а за срок эксплуатации электрической машины $\Sigma t_i / D^*$. Интерес представляет также остаточный срок службы изоляционных материалов, который определяется $D_n - \Sigma t_i / D^*$.

В табл. 1 приведены расчетные значения относительного D^* и абсолютного D ($D_n = 8$ лет) сроков службы изоляции обмоток класса F при различной степени превышения температуры τ над допустимой τ_0 в продолжительном режиме S1.

Таблица 1 - Относительный и абсолютный сроки службы изоляции класса F при различных превышениях температуры обмоток над допустимой

$\tau / \tau_{доп}$	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.75	2
D^*	1	0.48	0.26	0.15	0.1	0.07	0.03	0.02
D , лет	8	3.81	2.05	1.22	0.78	0.53	0.24	0.14

Из таблицы видно, что постоянное превышение температуры на 10% над допустимой τ_n (что эквивалентно увеличению нагрузки в $\sqrt{1.1}=1.05$, т.е. на 5%) приводит к сокращению срока службы электродвигателя более, чем в два раза, а превышение температуры на 20% (увеличение нагрузки на 10%) - в четыре раза.

В других номинальных режимах работы электрических машин (S2-S8) имеет место постоянное изменение температуры обмоток и этот фактор должен быть учтен при использовании выражений (1) и (2). В кратковременном режиме S2 имеет место постоянное изменение температуры. Согласно данным каталогов, за время работы под нагрузкой (режимы 10, 30, 60 мин и др.) с соответствующим коэффициентом нагрузки β , температура обмоток достигает допустимую температуру τ_{∂} для соответствующего класса изоляции, что означает более низкий расходуемый ресурс изоляционных материалов по сравнению с работой в продолжительном режиме S1 за то же время при температуре обмоток, равной τ_{∂} , так как основной промежуток времени работы двигателя температура обмоток меньше τ_{∂} . Последнее означает, что при равном расходе ресурса изоляционного материала можно допустить некоторое время работу под нагрузкой в режиме S2 с температурой $\tau > \tau_{\partial}$.

При оценке расходуемого ресурса изоляционных материалов обмоток электрических машин, работающих с переменной нагрузкой, а следовательно, с непрерывно изменяющейся температурой $\tau(t)$ можно использовать понятие среднего срока службы D_{cp} изоляционных материалов за время T , равное:

$$D_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T D dt = \frac{\sum D_i \cdot \Delta t_i}{T} = \frac{\sum D_i}{n} \quad (3)$$

В электрических машинах изменение $\tau(t)$ имеет экспоненциальный характер, однако при времени работы $t_p < 60$ мин. закон изменения $\tau(t)$ можно считать практически линейным. Расчеты показывают, что при прямолинейном законе изменения температуры $\tau(t)$ и условии равенства $D_{cp} = D_n$ в режиме S2 допустима работа с превышением температуры $\tau_{макс}$, равным $\tau_{макс} = 1.34 \tau_{\partial}$. С увеличением $t_p > 60$ мин. начинает сказываться экспоненциальный характер $\tau(t)$, когда время работы при температуре $\tau > \tau_n$ увеличивается и, следовательно, средний срок службы D_{cp} , при прочих равных условиях, уменьшается. Например, с учетом экспоненциальной зависимости при времени работы $t_p = 90$ мин. и равенстве $D_{cp} = D_n$ превышение температуры составило $1.26 \tau_{\partial}$.

В табл. 2 приведены относительные средние сроки службы изоляции класса F обмоток электрической машины, работающих в кратковременных режимах S2 при прямолинейном законе изменения $\tau(t)$ до различных значений $\tau_{макс}$.

Таблица 2 - Относительные средние сроки службы изоляционных материалов обмоток при различных значениях $\tau_{макс}$ в режиме S2.

$\tau_{макс} / \tau_{доп}$	1	1.1	1.2	1.34	1.4
$D_{cp} = D/D_n$	10	4.41	2.21	1	0.74

Следует отметить, что работа электродвигателя в режиме S2 до максимальной температуре $\tau_{макс} = 1.34 \tau_{\partial}$ нежелательна с точки зрения отрицательных факторов. Например, расширения стержней обмоток короткозамкнутого АД под действием высоких температур (более 200 °С) могут привести к зацеплению поверхностей статора и ротора. Поэтому можно рекомендовать работу в режиме S2 с превышением температуры в пределах 1.1 – 1.15 τ_{∂} .

Необходимо отметить, что формуле (1) расчетный срок службы электродвигателя при небольших температурах $\tau = 100-120$ °С получается $D = 100$ лет, а при более низких температурах и выше. В известных авторами литературных источниках нет сведений о естественном старении изоляционных материалов не работающих электрических машин, когда температура их обмоток равна температуре окружающей среды. Поэтому, при определении срока службы электродвигателей в режиме S2 использовалось следующее допущение: при изменении температуры от 0 до $\tau = 120$ °С срок службы принимался равным D_n , и после превышения 120 °С использовалось выражение, полученное из (3):

$$D_{cp} = \frac{D_{\tau} \cdot T_{\tau}}{T} + \frac{1}{T} \int_{T_{\tau}}^T D dt \quad (4)$$

где: D_{τ} – расчетный срок службы при температуре $\tau = 120^{\circ}\text{C}$ (100 лет),

T_{τ} – время, за которое температура двигателя достигает $\tau = 120^{\circ}\text{C}$.

Результаты, полученные с учетом вышеизложенного приведены в табл. 3.

Таблица 3 - Относительные средних сроки службы изоляционных материалов обмоток при различных значениях τ_{\max} в режиме S2 с учетом срока службы при малых температурах

$\tau_{\max} / \tau_{\text{дон}}$	1	1.1	1.2	1.33	1.34	1.4
$D_{cp}^* = D/D_N$	8.63	4.14	2.15	1	0.98	0.73

Из табл. 2 и 3 следует, что при τ_{\max} больше $\tau_{\text{дон}}$ в 1.2 раза сроки службы D_{cp}^* практически совпадают, а при номинале ($\tau_{\max} = \tau_{\text{дон}}$) практический срок службы уменьшается на 14%.

Расходуемый ресурс изоляционных материалов в кратковременном режиме S2 определяется отношением t_p / D_{cp}^* . Так как величина D_{cp}^* практически постоянна, то расходуемый ресурс зависит от времени работы t_p , определяемый коэффициентом нагрузки для соответствующего режима S2 (10, 30, 60 мин. и т.п.). В качестве примера в табл. 1.4 приведены величины t_p ,

Таблица 4 - Расходуемый ресурс изоляционных материалов при различных режимах S2.

t_p , мин	60	30	20	10	5
β_I	1.26	1.43	1.54	1.76	2
t_p / D_{cp}^*	21.7	10.86	7.24	3.62	1.82

Из табл. 4. следует, что величина t_p / D_{cp}^* зависит от времени работы t_p , однако расход изоляции в единицу времени остается практически неизменным и не зависит от величины токовой нагрузки β_I .

В общем случае, вышеуказанный подход определения относительного среднего срока службы D_{cp}^* может быть использован при непрерывно изменяющейся температуре. В повторно-кратковременных режимах интерес представляет определение срока службы в квазиустановившемся состоянии.

В качестве критерия при определении срока службы можно использовать среднее значение температуры в квазиустановившемся состоянии τ_{cp} , однако, при значительных длительностях цикла ($t_{\text{ц}} > 5$ мин.) размах колебаний температуры $\Delta\tau = \tau_{\max} - \tau_{\min}$ в течение цикла может быть значительным. Если при этом исходить из предположения, что $\tau_{cp} = \tau_{\text{дон}}$, то в определенные промежутки времени $\tau > \tau_{\text{дон}}$, что может привести к уменьшению относительного среднего срока службы D_{cp}^* .

В табл. 5 приведены расчеты D_{cp}^* для повторно-кратковременных режимов с различными длительностями цикла $t_{\text{ц}}$, а, следовательно, и различными значениями размаха температур $\Delta\tau$. Расчет осуществлялся для различных значений ПВ. Величина нагрузки для каждого случая принималась равная номинальной, когда средняя температура в цикле равнялась допустимой $\tau_{cp} = \tau_{\text{дон}} = 155^{\circ}\text{C}$ для класса изоляции F. Необходимо отметить, что определение номинального режима работы по критерию $\tau_{cp} = \tau_{\text{дон}}$ принято не всеми заводами – изготовителями. Например, на заводе «Динамо» (г. Москва), изготавливающим крановые двигатели серий МТ и МТН значение допустимой температуры принимаются равными максимальной температуре в цикле $\tau_{\text{дон}} = \tau_{\max}$. Закон изменения $\tau(t)$ в цикле аппроксимировался отрезками прямых. Средняя температура в цикле равнялась $\tau_{cp} = (\tau_{\max} + \tau_{\min}) / 2$.

Таблица 5 - Относительный средний срок службы изоляционных материалов в различных повторно-кратковременных режимах S3 с аппроксимацией зависимости $\tau(t)$

$t_{\text{ц}}$, мин		1	2	5	10	20
ПВ = 0.6	$\Delta\tau / \tau_{cp}$	0.05	0.09	0.19	0.29	0.35
	D_{cp}^*	0.99	0.99	0.93	0.85	0.79
ПВ = 0.4	$\Delta\tau / \tau_{cp}$	0.08	0.13	0.27	0.38	0.45
	D_{cp}^*	0.99	0.97	0.87	0.77	0.70
ПВ = 0.25	$\Delta\tau / \tau_{cp}$	0.09	0.16	0.31	0.45	0.56
	D_{cp}^*	0.98	0.95	0.83	0.70	0.60
ПВ = 0.15	$\Delta\tau / \tau_{cp}$	0.11	0.17	0.34	0.52	0.67
	D_{cp}^*	0.98	0.94	0.80	0.64	0.51

Из табл. 5 следует, что в случае, когда форма кривой нагрева и охлаждения аппроксимируется прямой линией, относительный срок службы изоляционных материалов D_{cp}^* зависит только от размаха температур $\Delta\tau$. При малых значениях $\Delta\tau / \tau_{cp}$ (менее 15%) значение относительного срока службы практически равно 1, а при $\Delta\tau / \tau_{cp} > 15\%$ в расчет сроков службы необходимо вводить коррекцию, т.е. уменьшать значение нагрузки.

Следует отметить, что реальная форма кривых нагрева и охлаждения может отличаться от прямых, особенно при малых значениях ПВ на участке охлаждения. Были проведены расчеты D_{cp}^* для повторно-кратковременных режимов, аналогичные расчетам, проведенным выше, но учитывающие форму кривых нагрева и охлаждения. Для каждого случая подбиралось такое значение токовой нагрузки $\beta_I = I_p / I_n$, чтобы $\tau_{cp} < \tau_{доп}$. Расчет D_{cp}^* велся с учетом формы кривых нагрева и охлаждения. Кроме того, среднее значение температуры в квазиустановившемся состоянии τ_{cp} определялось из следующего выражения: $\tau_{cp} = (\sum \tau_i * t_i) / t_u$.

Результаты проведенных расчетов показывают, что при всех ПВ с ростом размаха температур $\Delta\tau$ происходит уменьшение относительного среднего срока службы D_{cp}^* . Сравнивая данные расчетов с аппроксимацией кривых и расчетов с учетом формы кривых, можно сделать вывод, об их идентичности. Характер зависимости D_{cp}^* ($\Delta\tau / \tau_{cp}$) в обоих случаях повторяется.

Как отмечалось выше, для значений $\Delta\tau / \tau_{cp} > 15\%$ необходимо корректировать величину коэффициента токовой нагрузки β_I , чтобы значения среднего срока службы D_{cp}^* было равно 1. В табл. 6 приведены результаты расчета средней температуры τ_{cp} и относительных изменений токовой нагрузки β_I / β_{In} , для повторно-кратковременных режимов S3 с $t_u = 1, 2, 5, 10$ и 20 мин, и ПВ = 0.6, 0.4, 0.25 и 0.15 при условии $D_{cp}^* = 1$.

Таблица 6 - Средние значения температуры τ_{cp} в повторно-кратковременном режиме S3 при относительном среднем сроке службы $D_{cp}^* = 1$

t_u , мин		1	2	5	10	20
ПВ = 0.6	τ_{cp}	155	154.8	153.7	151.4	149.5
	β_I / β_{In}	1	0.99	0.98	0.97	0.96
ПВ = 0.4	τ_{cp}	155	154.1	151.5	147.9	143.8
	β_I / β_{In}	1	0.99	0.98	0.96	0.94
ПВ = 0.25	τ_{cp}	155	154.0	150.5	144.4	137.5
	β_I / β_{In}	1	0.99	0.97	0.94	0.91
ПВ = 0.15	τ_{cp}	155	153.8	149.6	141.8	131.4
	β_I / β_{In}	1	0.99	0.97	0.93	0.88

Из табл. 6 видно, с уменьшением ПВ для сохранения относительного среднего срока службы $D_{cp}^* = 1$ значение средней температуры в цикле уменьшаются. Для ПВ = 0.6 уменьшение τ_{cp} составляет для $t_u = 20$ мин. 5 °С, а для ПВ = 0.15 уменьшение τ_{cp} при таком же времени цикла составляет 25 °С. Уменьшение нагрузок, ведущее к увеличению D_{cp}^* и понижению τ_{cp} на относительный размах температур $\Delta\tau / \tau_{cp}$ влияния не оказывает.

Используя предложенные методики можно определить сроки службы изоляционных материалов и их остаточный ресурс в различных режимах работы. Расчеты можно вести как учитывая нелинейный характер кривых нагрева и охлаждения, так и аппроксимируя их отрезками прямых. Основываясь на предложенных выше методиках можно рассчитать необходимые величины уменьшения нагрузок, позволяющие сохранить ресурс изоляционных материалов, что продлит срок службы электрических машин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ермолин Н.П., Жерихин И.П. Надежность электрических машин. Л., 1984.-426 с.
2. Котеленец Н.Ф. Кузнецов Н.Л. Испытания и надежность электрических машин. М., 1988.-380 с.