

УДК 621.3.048.1

М.М. ФЕДОРОВ (д-р техн.наук, проф.), **А.И. ЛУЖНЕВ**, **А.Е. БОЕВ**
Донецкий национальный технический университет
fmm@elf.dgtu.donetsk.ua

ОЦЕНКА СРОКОВ СЛУЖБЫ ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Предложена упрощенная формула для расчета сроков службы изоляции различных классов нагревостойкости. Приведено сравнение результатов расчетов по упрощенной формуле и уравнению Вант-Гоффа – Аррениуса для разных превышений температуры.

Надежная эксплуатация электрических машин в значительной степени определяется качеством изоляционных материалов. 85 – 95 % отказов электродвигателей происходят из-за повреждений изоляции обмоток [1]. Факторы, определяющие надежность изоляции и её долговечность, разнообразны. К ним следует отнести влияние повышенных механических усилий при переходных процессах, вибрации, перенапряжения и пр. В процессе изготовления возможны повреждения изоляции и появление участков с пониженной электрической прочностью. Возможно попадание на поверхностные участки изоляции частиц ферромагнитных материалов, вибрация которых в переменном магнитном поле приводит к образованию местных дефектов и разрушению изоляции.

Одним из важнейших факторов, определяющих надежность эксплуатации электрической машины, является нагрев изоляции обмоток. При электромеханическом преобразовании энергии часть потребляемой энергии преобразуется в тепловую. Разность между потребляемой электрической машиной энергией и отдаваемой составляют потери. В зависимости от вызывающих их физических процессов потери подразделяют на электрические, магнитные, механические, вентиляционные и добавочные. Потери являются источниками тепла и определяют тепловое состояние электрической машины и нагрев изоляции.

В зависимости от тепловых характеристик изоляционные материалы разделяют на семь классов нагревостойкости, которые характеризуются допустимой температурой $\tau_{\text{доп}}$ [2]. Если температура изоляции обмоток не превышает допустимую, то срок службы изоляции номинальный. Обычно для электрических машин он составляет 15–20 лет. В настоящее время в выпускаемых электрических машинах используются изоляционные материалы классов F и H. Однако в эксплуатации находится значительная часть электрических машин, изоляция обмоток которых относится к классам A, E и B. Повышенные температуры приводят к тепловому старению изоляции, которое оказывает определяющее влияние на продолжительность срока службы изоляции электрических машин.

Целью данной работы является получение аналитического выражения для определения продолжительности сроков службы изоляции обмоток электрических машин при различных температурах.

Для определения срока службы изоляционных материалов класса A применяется формула Монтзингера [2, 3, 4]

$$D_{\tau_1} = D_{\tau_2} \cdot 2^{\frac{\tau_2 - \tau_1}{8}},$$

где τ_1, τ_2 – температуры нагрева изоляции, °C;

D_{τ_1}, D_{τ_2} – срок службы изоляции при температуре τ_1 и соответственно τ_2 .

Величина D_{τ_2} определяется экспериментально и составляет 7 лет для материалов класса A при $\tau = 105$ °C.

Данная формула носит эмпирический характер и отражает известное «правило восьми градусов» для изоляционных материалов класса A, и не распространяется на изоляцию других классов. В связи с этим область применения приведенного выше выражения обычно ограничена.

Современный подход к исследованию процессов теплового старения основывается на использовании законов кинетики химических реакций применительно к изоляционным материалам. Согласно уравнению Вант-Гоффа – Аррениуса срок службы изоляции при температуре τ определяется по выражению [2, 3]:

$$D = D_{\text{н}} \exp \left[\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{\tau + 273} - \frac{1}{\tau_{\text{доп}} + 273} \right) \right] = D_{\text{н}} \exp \left[- \frac{E_a}{R} \frac{\tau - \tau_{\text{доп}}}{(\tau + 273)(\tau_{\text{доп}} + 273)} \right], \quad (1)$$

где $D_{\text{н}}$ – срок службы изоляции при номинально допустимой температуре $\tau_{\text{доп}}$;

E_a – энергия активации, Дж/моль;

$R = 8,317$ – универсальная газовая постоянная, Дж/(град · моль).

Формула (1) может быть приведена к следующему виду:

$$D = D_n \exp\left(-B \frac{\Delta\tau}{\tau + 273}\right), \quad (2)$$

где B – безразмерный коэффициент, постоянный для материалов одного класса нагревостойкости;

$\Delta\tau = \tau - \tau_{\text{доп}}$ – превышение температуры нагрева изоляции над допустимой температурой.

В табл. 1 приведены значения коэффициента B для наиболее распространенных классов изоляции А, Е, В, F и Н.

Таблица 1 – Коэффициент B для изоляционных материалов разных классов нагревостойкости

| Класс изоляции | А | Е | В | F | Н |
|----------------|------|------|------|------|------|
| B | 25,1 | 25,1 | 25,3 | 29,7 | 34,2 |

Старение изоляции следует рассматривать как результат протекания взаимосвязанных процессов химического и физического старения. На химическом уровне происходят необратимые процессы термического разложения и термоокислительной деструкции, связанные с изменениями структуры и состава материала, его электрофизических характеристик [2].

В различных температурных интервалах количественные соотношения между факторами, влияющими на скорость теплового старения изоляционных материалов, различны. При температуре меньше номинально допустимой $\tau_{\text{доп}}$ процессы усыхания и усадки изоляции, расслоения и растрескивания вследствие постепенного испарения летучих компонентов преобладают над термоокислительной составляющей процесса старения [3] и поэтому использование приведенных выше выражений оправдано при температуре изоляции $\tau > \tau_{\text{доп}}$.

На рис. 1 показаны зависимости относительного срока службы $D^* = \frac{D}{D_n}$ в функции превышения температуры $\Delta\tau$ для изоляционных материалов разных классов, рассчитанные по выражению (1).

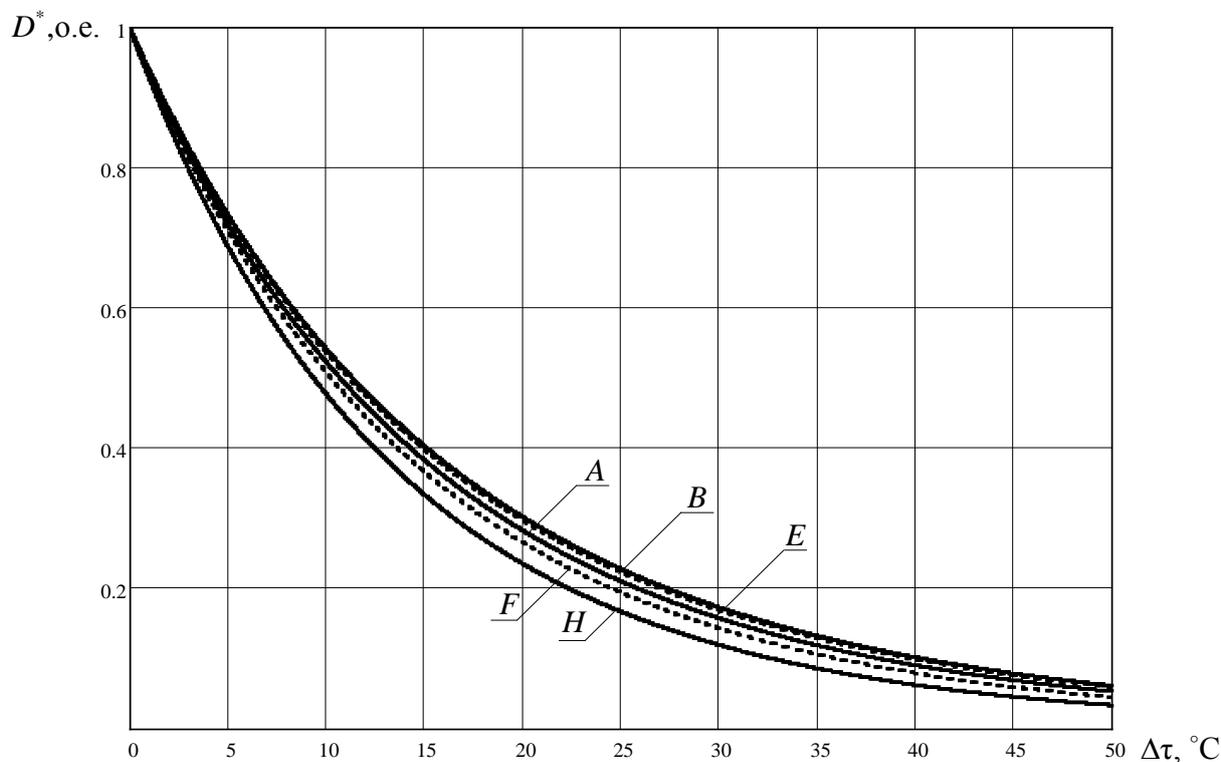


Рисунок 1 – Зависимости относительного срока службы D^* изоляционных материалов классов А, В, Е, F и Н от превышения температуры $\Delta\tau$

Из представленных на рис. 1 зависимостей следует, что максимальное расхождение между кривыми $D^* = f(\Delta\tau)$ для разных классов изоляции при изменении $\Delta\tau$ от 0 до 50 °С не превышает 7 % и зависимости могут быть аппроксимированы усредненной кривой для расчетов сроков службы изоляции различных классов нагревостойкости в функции превышения температуры.

Выражение (2) может быть приведено к виду:

$$D^* = \exp\left[-\frac{\Delta\tau}{\tau_6}\right], \quad (3)$$

где τ_6 – базовая температура, величина которой зависит от свойств изоляции и рассчитывается из предположения, что $\tau = \tau_{\text{доп}}$. Тогда $\tau_6 = \frac{R(\tau_n + 273)^2}{E_a}$.

При превышении допустимой температуры изоляции на величину τ_6 срок службы изоляционного материала сокращается в $e = 2,72$ раз.

Принятое при расчете τ_6 допущение, что $\tau = \tau_{\text{доп}}$, приводит к тому, что расчетная продолжительность срока службы изоляции оказывается меньше по сравнению со значением, полученным по выражению (2). При этом отклонение не превышает 5 % при превышении температуры от 0 до 50 °С для всех классов изоляции. В табл. 2 приведены значения τ_6 .

Таблица 2 – Значения τ_6 для изоляционных материалов различных классов нагревостойкости

| Класс изоляции | А | Е | В | Ф | Н |
|--------------------------|------|------|------|------|------|
| $\tau_6, ^\circ\text{C}$ | 15,0 | 15,7 | 15,9 | 14,4 | 13,2 |

Принимая во внимание вышеизложенное, величину τ_6 можно принять постоянной для разных классов изоляции и равной 15 °С. Тогда выражение (3) запишется в виде:

$$D^* = \exp\left[-\frac{\Delta\tau}{15}\right]. \quad (4)$$

Таким образом, в соответствии с полученным выражением при увеличении температуры изоляции на каждые 15 °С сверх допустимой температуры срок службы сокращается в e раз.

В табл. 3 приведены данные, которые позволяют оценить расхождения при определении относительного срока службы изоляционных материалов ΔD^* по формуле (2) и по полученному выражению (4) при превышении температуры от 0 до 50 °С.

Таблица 3 – Расхождения при расчете относительного срока службы изоляции по выражению (4) и по уравнению Вант-Гоффа – Аррениуса (2) для разных $\Delta\tau$

| | $\Delta\tau, ^\circ\text{C}$ | 5 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 |
|---------------------------|------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $\Delta D^*, \text{о.е.}$ | А | -0,004 | -0,010 | -0,019 | -0,022 | -0,021 | -0,017 |
| | Е | -0,013 | -0,023 | -0,033 | -0,034 | -0,029 | -0,023 |
| | В | -0,017 | -0,028 | -0,039 | -0,038 | -0,032 | -0,026 |
| | Ф | 0,007 | 0,006 | -0,002 | -0,008 | -0,010 | -0,009 |
| | Н | 0,028 | 0,036 | 0,028 | 0,016 | 0,007 | 0,002 |

Сравнение результатов расчетов показывает, что расхождение между сроком службы изоляции, рассчитанным по выражениям (2) и (4), не превышает по абсолютному значению 0,04 о.е., что значительно меньше возможных отклонений внутри классов изоляции, связанных с естественным разбросом характеристик, вызванным различными причинами (например, особенностями технологического процесса [2]).

Выводы. Из приведенного выше анализа следует, что для расчетов, связанных с оценкой сроков службы изоляции обмоток электрических машин, можно использовать упрощенное аналитическое выражение (4), которое условно можно назвать «правилом пятнадцати градусов»: при превышении температуры сверх допустимой на 15°C срок службы изоляции уменьшается в $e = 2,72$ раз. При этом, как показывают результаты расчетов, отклонения между значениями сроков службы, рассчитанными по уравнению Вант-Гоффа – Аррениуса (2) и по полученному выражению (4) при изменении превышения температуры от 0 до 50°C не превышают 0,04 о.е. для всех классов изоляции.

Результаты исследований могут быть использованы для расчетов продолжительности сроков службы изоляции обмоток электрических машин и оценки остаточного ресурса изоляционных материалов электрических машин в условиях эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Справочник по электрическим машинам: в 2 т. / И. П. Копылов, Б. К. Клоков. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – Т. 1. - 456 с: ил. - Библиогр.: с. 446.
2. Бернштейн, Л. М. Изоляция электрических машин общего назначения / Л. М. Бернштейн. – М. : Энергоиздат, 1981. – 376 с. : ил. - Библиогр.: с. 367-373.
3. Ермолин, Н. П. Надежность электрических машин / Н. П. Ермолин, И. П. Жерихин. – Л. : Энергия, 1976. – 248 с.: ил. - Библиогр.: с. 241-246.
4. Котеленец, Н. Ф. Испытания и надежность электрических машин : учеб. пособие для вузов по спец. «Электромеханика» / Н. Ф. Котеленец, Н. Л. Кузнецов. – М. : Высш. шк., 1988. – 231 с. : ил.

Надійшла до редколегії 17.11.2010

Рецензент: С.Ф.Жуков

М. М. ФЕДОРОВ, А.І. ЛУЖНЕВ, А.С. БОЄВ
Донецький національний технічний університет

M. FEDOROV, A. LUZHNEV, A. BOYEV
Donetsk National Technical University

Оцінка термінів служби ізоляції електричних машин. Запропонована спрощена розрахункова формула для обчислення терміну служби ізоляції різних класів нагрівостійкості. Наведено порівняння результатів обчислень за спрощеною формулою та рівнянням Вант-Гоффа – Аррениуса для різних перевищень температури.

Insulation Lifetime Estimation of Electric Machines. Simplified equation for lifetime calculations of various insulation thermal classes is offered in this article. Comparison of results of simplified expression and Van't Hoff - Arrhenius equation for different temperature rise is presented.