

ОЦЕНКА РЕСУРСА ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТКИ СТАТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ РАБОТЕ В ЦИКЛИЧЕСКИХ РЕЖИМАХ

В.П. Метельков

Надежность изоляции электрической машины в значительной степени определяет ее общую надежность. Это вызывает необходимость разработки более точных методов оценки теплового состояния машины, чем косвенные методы, в большинстве случаев используемые на практике.

В работе получены выражения, позволяющие проводить сравнение различных режимов работы электродвигателей по условию равного термического износа изоляции. Приведены результаты расчета изменения остаточного теплового ресурса изоляции статорной обмотки асинхронных двигателей при работе в режимах S3 и S6 с различной продолжительностью цикла.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, термодинамическая модель, нагрев, электропривод, тепловой ресурс изоляции, износ изоляции.

Надежность изоляции электрической машины в значительной степени определяет ее общую надежность. Согласно [1], доля отказов из-за повреждения обмоток для асинхронных двигателей (АД) мощностью более 5 кВт составляет 85...95 %, при этом около 50 % отказов вызывается эксплуатационными причинами, которые в большинстве случаев приводят к перегреву обмоток. Убытки от выхода из строя обмоток могут составлять до 80 % от стоимости годового выпуска электрических машин [2]. Эти обстоятельства приводят к выводу о необходимости достаточно подробного рассмотрения взаимосвязи срока службы изоляции и режимов работы электрической машины с целью разработки более точных методов оценки теплового состояния машины, чем косвенные методы эквивалентных величин и средних потерь, в большинстве случаев используемые на практике.

Нагревостойкость изоляции определяется скоростью ее старения, которая определяется скоростью протекания химических реакций. Опираясь на выражение, устанавливающее связь между скоростью протекания химической реакции и температурой, можно установить длительность интервала времени T , в течение которого изоляция достигнет своего предельного состояния вследствие температурного старения [1, 3, 4]:

$$T = k \cdot \exp(B/Q - G), \quad (1)$$

где B – отношение энергии активации молекулы к универсальной газовой постоянной; Q – абсолютная температура; G – постоянная, определяемая концентрацией не прореагировавших молекул; k – коэффициент пропорциональности ($k=1$, если срок службы изоляции измеряется в часах).

Усредненные значения постоянных B и G , определенные экспериментально для различных классов изоляции, приведены в таблице [1, 3, 4].

На рис. 1 показаны зависимости срока службы изоляции различных классов нагревостойкости в часах от температуры, построенные по (1).

Усредненные значения постоянных B и G

Класс изоляции	A	E	B	F	H	C
G	15,3	15,1	15,5	19,7	24,2	21,8
$B \cdot 10^{-4}, ^\circ\text{C}$	0,95	0,985	1,02	1,27	1,55	1,55

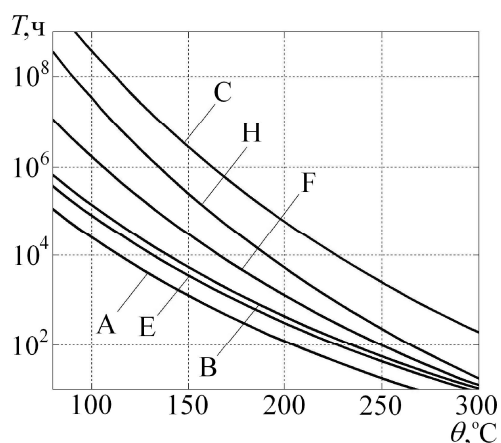


Рис. 1. Зависимость срока службы изоляции в часах от температуры (буквами обозначен класс нагревостойкости)

Если учитывать влияние на срок службы изоляции только температуры без учета других факторов, то можно принять, что мгновенное значение скорости старения изоляции (ν) зависит только от значения ее температуры в данный момент времени. В этом случае будем считать ν величиной, обратно пропорциональной сроку службы изоляции при данной температуре. Это дает возможность представить зависимость ν от абсолютной температуры $Q = 273 + \theta$ с помощью (1) следующим выражением:

$$\nu = k^{-1} \exp(-B/Q + G). \quad (2)$$

В [5] указано на возможность эквивалентирования режимов работы электродвигателей по условию равного термического износа изоляции ис-

ходя из равенства средней скорости старения изоляции за определенный промежуток времени и некоторой эквивалентной скорости ее старения, причем скорость старения изоляции принимается равной обратной величине срока ее службы. Таким путем можно для заданного временного интервала получить выражение для некоторой эквивалентной температуры изоляции, при которой ее термический износ за этот интервал времени будет таким же, как при реальном графике температуры. С целью реализации такого подхода используем понятие остаточного теплового ресурса изоляции R_t как безразмерной величины, связывающей скорость старения изоляции при температуре, соответствующей номинальному режиму работы (v_N) и ее остаточный срок службы ($T_{из}$) в режиме $T_{из}=R_t/v_N$. Величина R_t пропорциональна неиспользованному ресурсу срока службы изоляции, измеряемому в именованных единицах времени [6]. В начале эксплуатации двигателя $R_t=1$, но по мере старения изоляции R_t уменьшается на величину ΔR_t , зависящую от скорости старения изоляции при температурах, соответствующих реальным условиям эксплуатации двигателя, то есть текущее значение остаточного ресурса будет определяться следующим выражением: $R_t=1-\Delta R_t$. Уменьшение остаточного теплового ресурса (ОТР), которое происходит за некоторое время работы машины (t_p), связано со скоростью старения изоляции:

$$\Delta R_t = \int_0^{t_p} v(t) dt. \quad (3)$$

С учетом (2) выражение (3) можно переписать в виде:

$$\Delta R_t = \int_0^{t_p} k^{-1} \exp\{-B[273 + \theta(t)]^{-1} + G\} dt. \quad (4)$$

Выражение (4) представляет собой математическую модель термического старения изоляции. Эта модель дает возможность эквивалентировать любые режимы работы электрической машины по критерию равенства уменьшения ОТР изоляции за определенный период времени. Уменьшение ОТР, которое происходит за время t_p при работе в номинальном режиме (ΔR_{tN}), получим исходя из (4) в виде:

$$\Delta R_{tN} = k^{-1} \exp\left[-B(273 + \theta_N)^{-1} + G\right] t_p, \quad (5)$$

где θ_N – температура рассматриваемого узла при работе в установившемся номинальном режиме.

Если при работе в некотором цикле длительностью t_p соблюдается условие $\Delta R_t \leq \Delta R_{tN}$, то этот цикл является допустимым для электрической машины с точки зрения ее теплового состояния.

Рассмотрим процесс нагрева двигателя, достаточно короткий по сравнению со временем достижения установившейся температуры всей машины, а мощность потерь в обмотке будем считать существенно большей, чем номинальная. При

этих условиях интенсивное тепловыделение в обмотке будет значительно превосходить по величине тепловые потоки во внешнюю среду, так как в начальный период времени $\tau_1 \ll \tau_{уст}$ и процесс нагрева обмотки можно считать близким к адиабатическому. В таком случае график температуры будет определяться следующим выражением:

$$\tau_1 = \theta_1 - \theta_0 = t \Delta P_1 / C_1, \quad (6)$$

где θ_1 – температура обмотки; θ_0 – температура охлаждающей среды; ΔP_1 – мощность потерь в обмотке; C_1 – теплоемкость обмотки.

В соответствии с выражением (4) при учете (6) формулу для расчета уменьшения ОТР изоляции, происходящего за время выделения потерь ΔP_1 , запишем в следующем виде:

$$\Delta R_t = k^{-1} \int_0^{t_p} \exp\left[-B(273 + \theta_0 + t \Delta P_1 / C_1)^{-1} + G\right] dt. \quad (7)$$

Совместное решение уравнений (5) и (7) позволяет получить значение конечного превышения температуры обмотки (τ_{1k}) при линейном графике нагрева, при котором уменьшение ОТР изоляции будет таким же, как в случае работы при установившемся номинальном режиме в течение того же времени. Так, для двигателя 4A100L4 при работе в режиме короткого замыкания значение τ_{1k} равно $111,4^\circ$ (достигается за 10,8 с работы в этом режиме), что при $\theta_0 = 40^\circ\text{C}$ выше допустимого значения температуры для изоляции класса нагревостойкости В, используемой в этом двигателе. В действительности, при реальном цикле работы, включающем периоды нагружения и паузы, значение τ_{1k} должно отличаться от полученного, и не только из-за отклонения графика нагрева обмотки от адиабатического. Отличие будет связано еще и с тем, что повреждающее действие высокой температуры на изоляцию не прекращается мгновенно по истечении времени t_p , так как температура после окончания нагрева будет снижаться сравнительно медленно, в соответствии с величинами постоянных времени охлаждения машины, оставаясь некоторое время выше уровня номинальной (θ_{1N}). Поэтому допустимое значение τ_{1k} нужно находить не из условия $\Delta R_t = \Delta R_{tN}$, а из условия $\Delta R_t + \Delta R_t' = \Delta R_{tN}$, где $\Delta R_t'$ – ОТР изоляции в период остывания двигателя электропривода.

Величину $\Delta R_t'$ можно определить по (4), используя закон изменения $\theta(t)$ из решения системы дифференциальных уравнений термодинамической модели двигателя. Учитывая весьма сложный ха-

рахтер изменения температуры на этапе после окончания пуска (даже при постоянном значении мощности потерь изменение температуры определяется достаточно сложным выражением, содержащим сумму экспонент с различными постоянными времени, количество которых определяется количеством нагреваемых масс в термодинамической модели), получить простые аналитические оценки допустимого значения τ_{lk} не представляется возможным. Вместе с тем, при использовании комплексной модели (рис. 2), включающей в себя электродинамическую, энергетическую, термодинамическую модель и модель термического старения изоляции, не представляет труда решить эту задачу путем численного моделирования для любого закона изменения мощности потерь ΔP_1 и ΔP_2 во времени. На рис. 2 обозначено: V_3 и V_B – векторы задающих и возмущающих воздействий; ω – скорость двигателя; X – вектор внутренних переменных (токи, напряжения, потокосцепления); ΔP – вектор мощностей потерь в элементах термодинамической модели; θ – вектор температур элементов термодинамической модели. Такая комплексная модель, созданная на кафедре «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Уральского энергетического института (г. Екатеринбург), была использована для исследования зависимости уменьшения остаточного теплового ресурса изоляции статора АД от параметров цикла нагружения при режимах работы S3 и S6, показанных на рис. 3.

На рис. 4 и 5 приведены графики, иллюстрирующие относительное уменьшение ОТР изоляции и диапазон изменения температуры лобовых частей обмотки статора (показан штриховкой) в зависимости от продолжительности рабочего цикла для двигателя 4A225M4 в режиме S3 при условии равенства эквивалентного и номинального моментов ($M_{э\text{кв}}=M_N$), а также при условии равенства средних и номинальных потерь ($\Delta P_{\Sigma, \text{ср}}=\Delta P_{\Sigma N}$). Графики приведены для различных кратностей M_{max} по отношению к номинальному моменту двигателя (M_N). При расчетах использовалась пяти-массовая термодинамическая модель закрытого

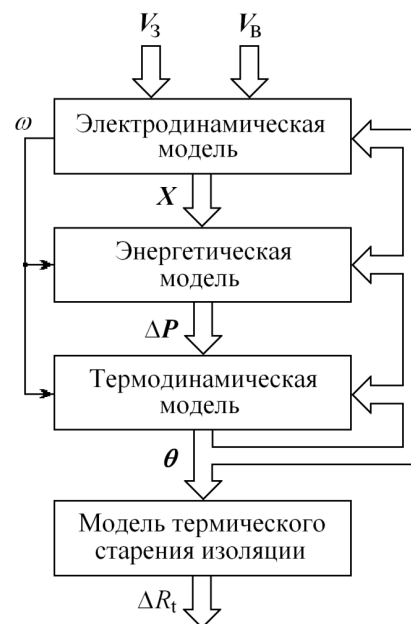


Рис. 2. Блок-схема комплексной модели

АД [7]. Из рис. 4, 5 видно, что уменьшение остаточного теплового ресурса в существенной степени зависит от диапазона колебаний температуры обмотки, что является следствием нелинейной зависимости скорости старения изоляции от температуры в соответствии с выражением (2).

Поскольку диапазон колебаний температуры зависит от продолжительности периодов выделения потерь, это приводит к различиям в скорости изменения ОТР изоляции при изменении длительности цикла работы ($T_{ц}$) даже при одинаковой относительной продолжительности включения. Столь большой диапазон изменения температуры обмотки статора связан с тем, что динамика ее температуры при работе в повторно-кратковременном режиме существенно выше динамики средней температуры двигателя [8]. Это объясняется сравнительно малой теплоемкостью меди статора по сравнению с теплоемкостью двигателя в целом.

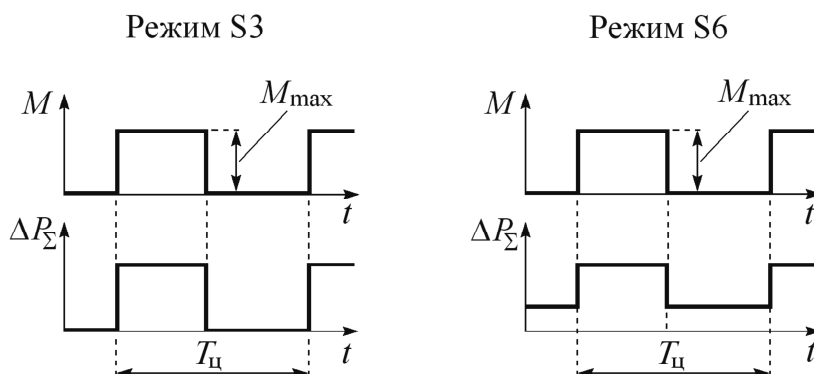


Рис. 3. Режимы работы, использованные для исследования зависимости ОТР изоляции от параметров цикла

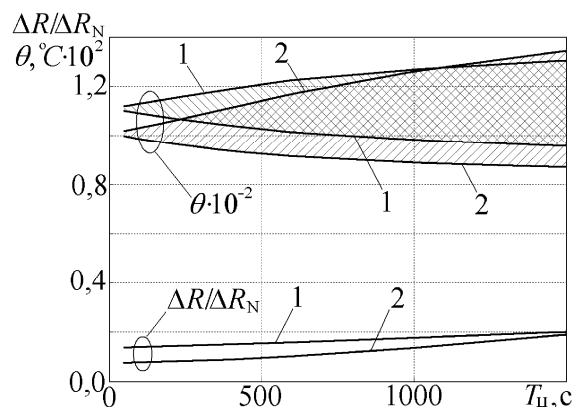


Рис. 4. Зависимости изменения ОТР изоляции и диапазон колебаний температуры обмотки от $T_{ц}$ в режиме S3 (при условии $M_{эв}=M_N$):
1 — при $M_{max}=1,5 M_N$ и 2 — при $M_{max}=2,0 M_N$

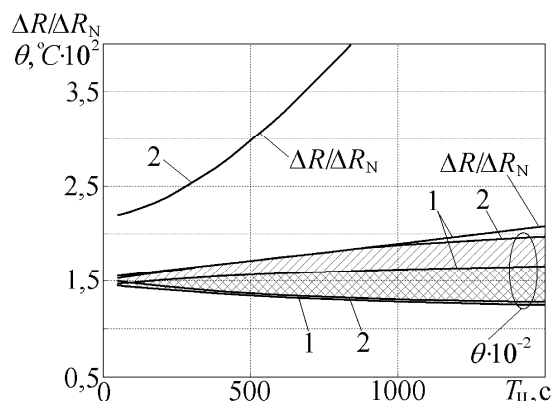


Рис. 5. Зависимости изменения ОТР изоляции и диапазон колебаний температуры обмотки от $T_{ц}$ в режиме S3 (при условии $\Delta P_{\Sigma cp} = \Delta P_{\Sigma N}$):
1 — при $M_{max}=1,5 M_N$ и 2 — при $M_{max}=2,0 M_N$

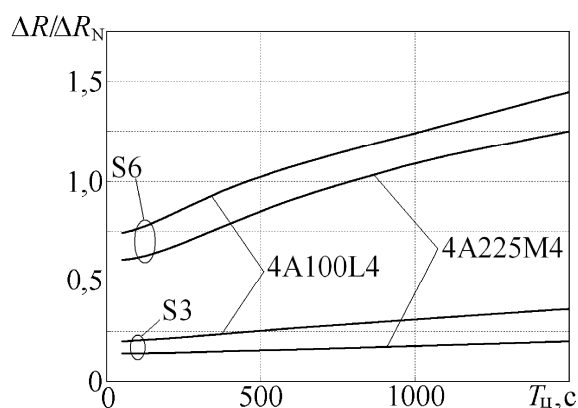


Рис. 6. Зависимости изменения ОТР изоляции от $T_{ц}$ в режимах S3 и S6 (при условии $M_{эв}=M_N$)

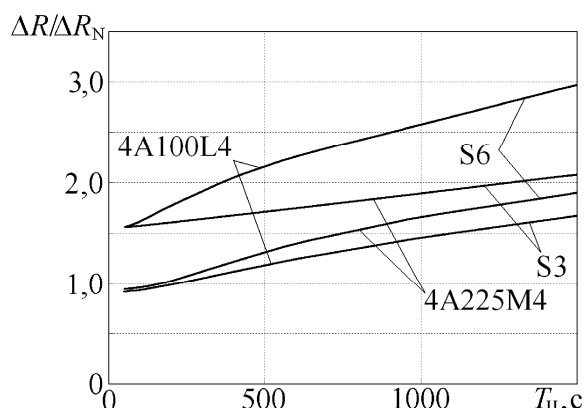


Рис. 7. Зависимости изменения ОТР изоляции от $T_{ц}$ в режимах S3 и S6 (при условии $\Delta P_{\Sigma cp} = \Delta P_{\Sigma N}$)

На рис. 6 и 7 приведены графики, иллюстрирующие относительное изменение ОТР изоляции лобовых частей обмотки статора в зависимости от продолжительности рабочего цикла для двух различных двигателей в режимах S3 и S6 (графики построены для $M_{max}=1,5 M_N$).

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. При формальном выполнении условия проверки по методу эквивалентного момента и методу средних потерь скорость уменьшения остаточного теплового ресурса изоляции может быть как существенно выше, так и существенно ниже той, которая соответствует отработке двигателем нормативного срока службы (см. рис. 6 и 7). Это обстоятельство подчеркивает целесообразность использования прямых методов выбора и проверки электродвигателя, основанных на расчете изменения ОТР изоляции.

2. Использование прямых методов выбора и проверки электродвигателя, основанных на расчете изменения ОТР изоляции, требует использования более подробных термодинамических моделей

двигателя, чем обычно используемая одномассовая модель.

3. Использование многомассовых термодинамических моделей, в свою очередь, требует разработки методов расчета их параметров при условии ограниченной информации о данных двигателя. В связи с этим желательно, чтобы производители электрических двигателей указывали в клиентских формулярах хотя бы минимальный набор данных, позволяющих рассчитать параметры термодинамических моделей, включающих обмотку статора в качестве одного из своих узлов.

Литература

1. Котеленец, Н.Ф. Испытания и надежность электрических машин: учеб. пособие для вузов / Н.Ф. Котеленец, Н.Л. Кузнецов. — М.: Высш. шк., 1988. — 232 с.
2. Гольдберг, О.Д. Надежность электрических машин общепромышленного и бытового назначения / О.Д. Гольдберг. — М.: Знание, 1976. — 55 с.

3. Кузнецов, Н.Л. Надежность электрических машин: учеб. пособие для вузов / Н.Л. Кузнецов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 432 с.
4. Ермолин, Н.П. Надежность электрических машин / Н.П. Ермолин, И.П. Жерихин. – Л.: Энергия, 1976. – 248 с.
5. Ильинский, Н.Ф. Тепловые модели электродвигателей в неноминальных циклических режимах / Н.Ф. Ильинский, В.Н. Ипатенко // Электричество. – 1984. – № 7. – С. 37–41.
6. Филиппов, И.Ф. Теплообмен в электрических машинах: учеб. пособие / И.Ф. Филиппов. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 256 с.
7. Зюзев, А.М. Использование термодинамических моделей для проверки асинхронного двигателя по нагреванию / А.М. Зюзев, В.П. Метельков // Труды Международной пятнадцатой научно-технической конференции «Электроприводы переменного тока», 12–16 марта 2012 г. – Екатеринбург: УрФУ, 2012. – С. 183–186.
8. Зюзев, А.М. Термодинамические модели для проверки асинхронного двигателя по нагреванию / А.М. Зюзев, В.П. Метельков // Электротехника. – 2012. – № 9. – С. 48–52.

Метельков Владимир Павлович, кандидат технических наук, доцент, кафедра «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Уральского энергетического института, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург. Тел.: +7(343)3754646, v.p.metelkov@ustu.ru

**Bulletin of the South Ural State University
Series "Power Engineering"
2013, vol. 13, no. 2, pp. 96–100**

ESTIMATION OF A RESOURCE OF INDUCTION MOTORS STATOR WINDING INSULATION IN CYCLIC OPERATION

V.P. Metelkov, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russian Federation, v.p.metelkov@ustu.ru

The insulation of the electric machine to a large extent determines its overall reliability. This necessitates the development of more accurate methods of evaluation of the motor thermal state than the indirect techniques used in most cases in practice.

We obtain expressions for the comparison of different modes of operation of electric motors under the condition of equal thermal insulation deterioration. The results of the calculation the change of the residual thermal insulation resource stator induction motors when operating in S3 and S6 modes with different duration of the cycle are presented.

Keywords: induction motor, thermodynamic model, heating, thermal insulation resource, insulation deterioration.

References

1. Kotelenets N.F., Kuznetsov N.L. *Ispytaniya i nadezhnost elektricheskikh mashin* [Testing and Reliability of Electrical Machines], Moscow, 1988, 232 p.
2. Goldberg O.D. *Nadezhnost elektricheskikh mashin obshchepromyshlennogo i bytovogo naznacheniya* [The Reliability of Electric Machines for General Industrial and Domestic Purposes], Moscow, 1976, 55 p.
3. Kuznetsov N.L. *Nadezhnost elektricheskikh mashin* [The Reliability of Electric Machines], Moscow, 2006, 432 p.
4. Ermolin N.P., Zherikhin I.P. *Nadezhnost elektricheskikh mashin* [The Reliability of Electric Machines], Leningrad, 1976, 248 p.
5. Ilinskiy N.F., Ipatenko V.N. Thermal Models of Electric Motors in the Unrated Cyclic Mode [Teplovye modeli elektrodvigatelay v nenominalnykh tsiklicheskh rezhimakh], *Electrical Technology Russia*, 1984, no. 7, pp. 37–41.
6. Filippov I.F. *Teploobmen v Elektricheskikh Mashinakh* [Heat Transfer in Electrical Machines], Leningrad, 1986, 256 p.
7. Zyuzev A.M., Metelkov V.P. The Use of Thermodynamic Models for Checking an Induction Motor on the Heating [Ispolzovanie termodinamicheskikh modeley dlya proverki asinkhronnogo dvigatelya po nagrevaniyu]. Proc. of the Fifteenth International Scientific-Technical Conference Trudy «Alternating Current Electrical Drives». Ekaterinburg, 2012, pp. 183–186.
8. Zyuzev A.M., Metelkov V.P. Thermodynamic Models for Checking an Induction Motor on the Heating [Termodinamicheskie modeli dlya proverki asinkhronnogo dvigatelya po nagrevaniyu], *Russian Electrical Engineering*, 2012, no. 9, pp. 512–515.

Поступила в редакцию 27.05.2013 г.