

## ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ С ПОВЫШЕННОЙ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТЬЮ

Проф. Яковлев А.И., с.н.с. Головчинер И.Г.

Повышение срока службы и энергетических характеристик необходимо, как для электродвигателей с безотходным и комбинированным сердечником, так и для двигателей, эксплуатируемых в условиях повышенных термических нагрузок, агрессивных и влажных сред.

Исследования позволили установить, что эффективным способом достижения поставленной цели является капсулирование обмоток высокотеплопроводными, влаго- и химостойкими компаундами [1].

Технические требования к системам изоляции двигателей позволили определить основной состав исходных компонентов при подборе рецептуры заливочных компаундов, с требуемыми прочностными, температурными и технологическими характеристиками. Причем компаунды должны обеспечивать полную совместимость с обмотками и ремонтпригодность капсулированных электродвигателей, а также иметь достаточную механическую и диэлектрическую прочность.

В качестве основных исходных компонентов служат смолы ЭД-20 и УП-643, синтетический каучук СКТН-I-A, отвердители УП-0633М, УП-607/2, изо-МТГФА, ускорители УП-606/2 и К-18, а в качестве наполнителя применены пылевидный кварцевый песок (ПКП) нитрид бора (НБ) и железный порошок (ПЖ).

Компаунды на основе смолы ЭД-20 и отвердителя УП-0633М в использовании в качестве наполнителя ПКП и компаунды на основе каучука СКТН-I испытаны на двигателях, выпускаемых на предприятиях Украины. Это двигатели для бытовых центробежных насосов, которые могут быть надежно защищены от действия влаги, двигатели для сельского хозяйства и спецназначения.

Эффективность капсулирования по снижению температуры обмоток зависит от теплопроводности капсулирующего состава, интенсивности теплопередачи в машине, соотношения термических сопротивлений по различным ветвям теплоотода.

Критерием эффективности капсулирования  $K_{\text{эф,к}}$  может служить отношение термических сопротивлений между лобовой частью обмотки и оболочкой двигателя при обычном и капсулированном исполнении. Приняв, что теплота переносится только к станине и только от наружного слоя лобовых частей, получим простейшую формулу

$$K_{\text{эф,к}} = \lambda_{\text{к}} (S_{\text{л,вш}} + S_{\text{с}})^2 / \alpha_{\text{л,вш}} \delta_{\text{к}} S_{\text{л,вш}} S_{\text{с}} \quad (I)$$

$\lambda_{\text{к}}$  - коэффициент теплопроводности капсулирующей массы;  
 $\alpha_{\text{л,вш}}$  - коэффициент теплоотдачи в внешней поверхности лобовых частей обмотки;  $S_{\text{л,вш}}$  - площадь этой поверхности;  $\delta_{\text{к}}$  - толщина капсулы между лобовыми частями и станиной;  $S_{\text{с}}$  - площадь внутренней поверхности "висящих" частей станины.

Уменьшение нагрева электродвигателя 4АХ90L4 с обмотками, закапсулированными компаундами на основе эпоксидных смол с наполнителями, видно на рис. I - на 35<sup>0</sup>С снижена температура обмотки за счет капсулирования ее высокотеплопроводным компаундом с увеличенным значением . Такая повышенная эффективность по снижению нагрева в исходном исполнении обмотки статора двигателей 4АХ90L4 была достигнута за счет капсулирования обмоток лаками КП и эпоксидными компаундами с нитридом бора, маршалитом. Двигатели с комбинированной капсулой успешно выдержали испытания на влажно-, тепло-, холодо- и вибростойкость.

Запас по нагреву обмотки, обеспечиваемый комбинированной капсулой лобовых частей, можно использовать для прямого уменьшения материалоемкости закрытых электромашин. Уменьшение сечения меди в пазу и размера паза фактически увеличивает ширину зубца и высо-

ту спинки, что дает возможность уменьшить длину сердечника при сохранении мощности машины. При этом существует оптимальная длина, которая соответствует минимуму затрат на производство и эксплуатацию машины (рис. 2). Возможен и другой подход - принимают длину сердечника статора такой, при которой суммарные затраты на двигателя обычного и капсулированного исполнений одинаковы. В этом случае достигается экономия активных и конструктивных материалов, соответствующая уменьшению длины сердечника. Например, по расчетным данным [1], на один двигатель 4АХ90L4 может быть сэкономлено до 0,31 кг меди и 2,14 кг электротехнической стали.

Кроме существенного снижения уровня нагрева обмоток капсулирование позволяет резко (в 2-4 раза) снизить скорость нарастания температуры  $\Delta T$  в обмотке статора при коротком замыкании, пуске, стоянке под током заторможенного ротора. Как известно, скорость нарастания температуры напрямую указывает на качество двигателя и является важным эксплуатационным показателем. Для двигателей общего назначения она рассчитывается по формуле  $\Delta T = j / 200, \text{K/s}$ , где  $j$  - плотность тока,  $\text{A/mm}^2$ , в обмотке статора при трехфазном коротком замыкании. Эта формула вытекает из уравнения адиабатического нагрева обмотки  $C_m = \frac{dT_m}{dt} = P_m$  с начальным условием  $T_m = 0$  ( $t=0$ ) в предположении, что потери в обмотке  $P_m = \text{const}$ , а теплоемкость обмотки (медной)  $C_m$  определяется только теплоемкостью проводников [2], [3].

Уравнение адиабатического нагрева обмотки с указанным начальным условием имеет вид

$$\int_0^{\theta} dT_m / P_m = T / C_m \quad (2)$$

откуда

$$T_m = P_m t / C_m \quad \text{при } P_m = \text{const} \quad (3)$$

Соответствующая скорость нарастания температуры равна

$$T' = P_M / C_M \quad (4)$$

Под  $C_M$  понимается суммарная теплоемкость обмотки, которая рассчитывается по формуле

$$C_M = C_{уд.пр.} G_{пр.} + C_{уд.из.} G_{из.} + C_{уд.л.} G_{л.}$$

где  $C_{уд.пр.}$ ,  $C_{уд.из.}$ ,  $C_{уд.л.}$  - теплоемкости меди проводников, из изоляции и пропиточного лака;  $G_{пр.}$ ,  $G_{из.}$ ,  $G_{л.}$  - масса проводов, изоляции и лака.

Более точные результаты дает формула, учитывающая зависимость потерь в обмотке статора от температуры  $T_M$ , т.е.  $P_M = P_{M,0}(1 + \beta T_M)$  через температурный коэффициент  $\beta$  и потери при исходной температуре  $P_{M,0}$ .

Тогда

$$T_M = 1/\beta \left( e^{P_{M,0} \beta t / C_M} - 1 \right) \quad (5)$$

$$T' = \frac{P_{M,0}}{C_M} e^{P_{M,0} \beta t / C_M} \quad (6)$$

Для случая, когда теплоемкость лака  $C_{уд.л.}$  заменена на теплоемкость капсулирующего состава  $C_{уд.з.}$  в первом приближении (линейная зависимость тока короткого замыкания от времени, т.е.  $i = a - bt$ ) потери в обмотке  $P_M = 3R_x(a - bt)^2(1 + \beta \theta_M)$  где  $a$  и  $b$  - постоянные величины;  $R_x$  - сопротивление обмотки в "холодном" состоянии. Решение уравнения нагревания обмотки при таком законе изменения тока имеет вид

$$T_M = \frac{1}{\beta} \left[ e^{3R_x \beta t (a^2 - abt + b^2 t^2 / 3) C_M^{-1}} - 1 \right] \quad (7)$$

а скорость нарастания температуры -

$$T' = \frac{3R_x}{C_M} (a - bt)^2 e^{3R_x \beta t (a^2 - abt + b^2 t^2 / 3) C_M^{-1}} \quad (8)$$

Расчет с учетом теплопередачи по каналу обмотка-сердечник,

а для капсулированных двигателей и по каналу обмотка-капсула.

В первом случае рассматривается система двух уравнений

$$\left. \begin{aligned} C_M &= \frac{dT_M}{dt} + (T_M - T_c) \Lambda_{M,c} + T_M \Lambda_{M,o} = 3R_x (a - \beta t)^2 (1 + \beta T_M) \\ C_c &= \frac{dT_c}{dt} + (T_c - T_M) \Lambda_{M,o} + T_o \Lambda_{c,o} = P_c \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

с граничным условием  $T_M = T_c = 0$  при  $t = 0$ . Здесь индекс "м" относится к медной обмотке, "с" - к сердечнику, под  $\Lambda_{M,c}$  понимается тепловая проводимость между обмоткой и сердечником, а под  $\Lambda_{M,o}$  и  $\Lambda_{c,o}$  - тепловые проводимости обмотки и сердечника к внешней среде. Проводимость  $\Lambda_{M,o}$  соответствует каналу отвода тепла от лобовых частей через внутренний воздух и оболочку машины; она обычно невелика, поэтому последним слагаемым в первом уравнении можно пренебречь.

Для машин с капсулированными обмотками следует рассматривать систему трех уравнений:

$$\left. \begin{aligned} C_M \frac{dT_M}{dt} + (T_M - T_c) \Lambda_{M,c} + (T_k - T_M) \Lambda_{M,k} &= 3R_x (a - \beta t)^2 (1 + \beta T_M) \\ C_c \frac{dT_c}{dt} + (T_c - T_M) \Lambda_{M,c} + T_c \Lambda_{c,o} &= P_c ; \\ C_k \frac{dT_k}{dt} + (T_k - T_M) \Lambda_{M,k} + T_k \Lambda_{k,o} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

с граничным условием  $T_M = T_c = T_k = 0$  при  $t = 0$ . Индекс "к" относится здесь к капсуле. При этом капсула и станина представляют собой совокупную тепловую проводимость между этими частями и окружающей средой  $\Lambda_{k,o}$ .

Систему (10) с указанным граничным условием можно записать в векторной форме:

$$C \frac{d\vec{T}}{dt} + A \vec{T} = P \quad (11)$$

$$\vec{T} = 0 \text{ при } t = 0 \quad (12)$$

где  $C$  - диагональная матрица теплоемкостей;  $A$  - симметричная матри-

на проводимостей;  $\vec{P}$  - вектор греющих потерь. Решение (II) при условии (I2) имеет вид (если  $\vec{P} = \vec{P}_0 + \beta \vec{T}$ ):

$$\vec{T} = A^{-1} \vec{P} + \vec{B}_1 e^{\alpha_1 t} + \vec{B}_2 e^{\alpha_2 t} + \vec{B}_3 e^{\alpha_3 t} ; A_1 = A - \beta \quad (13)$$

где  $\alpha_{1,2,3}$  - корни уравнения  $|C dE + A_1| = 0$ , в котором  $E$  - единичная матрица.

Результаты расчетов, в сравнении с опытом выполненных для двигателей 4АХ90 L 4, представлены на рис. 3, откуда видно удовлетворительное совпадение кривых, отражающих расчетную и опытную скорость нарастания температуры в двигателях с пропитанными и капсулированными обмотками. Например, конкретно для двигателя 4АХ90 L 4 скорость нарастания температуры за счет капсулирования для класса нагревостойкости изоляции обмоток "В" уменьшилась с  $119^{\circ}\text{C}$  до  $71^{\circ}\text{C}$  за 12 сек, т.е. уменьшилась на 70%, что совместно с общим снижением температуры и защите обмотки от агрессивных воздействий среды свидетельствует о существенном эксплуатационном запасе и надежности капсулированного электродвигателя.

В соответствии с заданием по проекту разработаны рецептуры компаундов для различных классов нагревостойкости изоляции, соответствующие технологии и устройства для капсулирования обмоток и пазов электродвигателей.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Яковлев А.И. Электрические машины с уменьшенной материалоемкостью. - М.: Энергоатомиздат, - 240 с., ил.
2. Мосина И.И., Яковлев А.И. Скорость нарастания температуры в капсулированных обмотках статора асинхронного электродвигателя-об. Аэродинамика и теплопередача в электрических машинах. Харьков: ХАИ, 1978, № 8, с.129-137.
3. А.с. 1770993 СССР, МКИ Н01 I/33. Эластичный магнитодиэлектрик/ Н.П.Белоус, И.Г.Головчинер, Н.Н.Прихода, А.И.Яковлев// Открытия. Изобретения. 1992, бюл. № 39.
4. А.с. 1188228 СССР, МКИ Н02К 9/22, 5/24. Статор электрической машины/ А.И.Яковлев//. Открытия. Изобретения. 1985. Бюл. № 40.
5. А.с. 1310961 СССР, МКИ Н02Ж 15/12. Устройство для магнитокапсулирования пазов статора электромашины/ В.И.Балюра, Н.П.Белоус, А.Н.Шошин, А.И.Яковлев// Открытия. Изобретения. 1987. Бюл. № 18

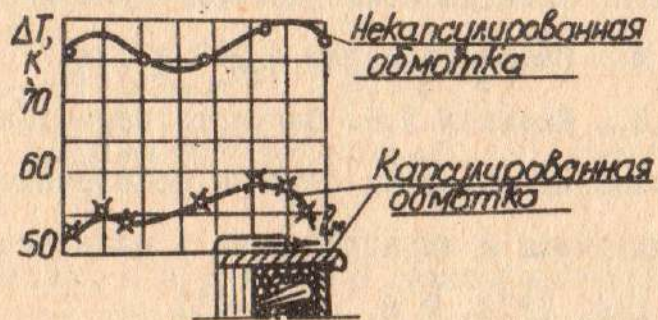


Рис. 1. Снижение температуры закапсулированной обмотки статора электродвигателя 4АХ90 4 при мощности 2,2 кВт.



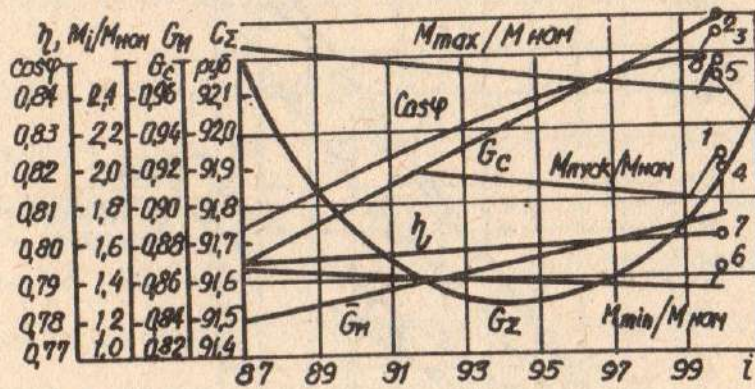


Рис. 2. Расчетно-графический анализ зависимости суммарных затрат  $C_{\Sigma}$ ; относительных расходов меди  $\bar{C}_m$  и стали  $\bar{C}_c$ ; отношений пускового  $M_{\text{пуск}}$ , максимального  $M_{\text{max}}$  и минимального  $M_{\text{min}}$  моментов к номинальному  $M_{\text{ном}}$ ; КПД  $\eta$  и коэффициента мощности  $\cos \varphi$  двигателей 4АХЭОЛ 4 с капсулированной обмоткой статора от длины сердечника  $l$  (1 - 8 - значения соответствующих параметров у серийного двигателя)

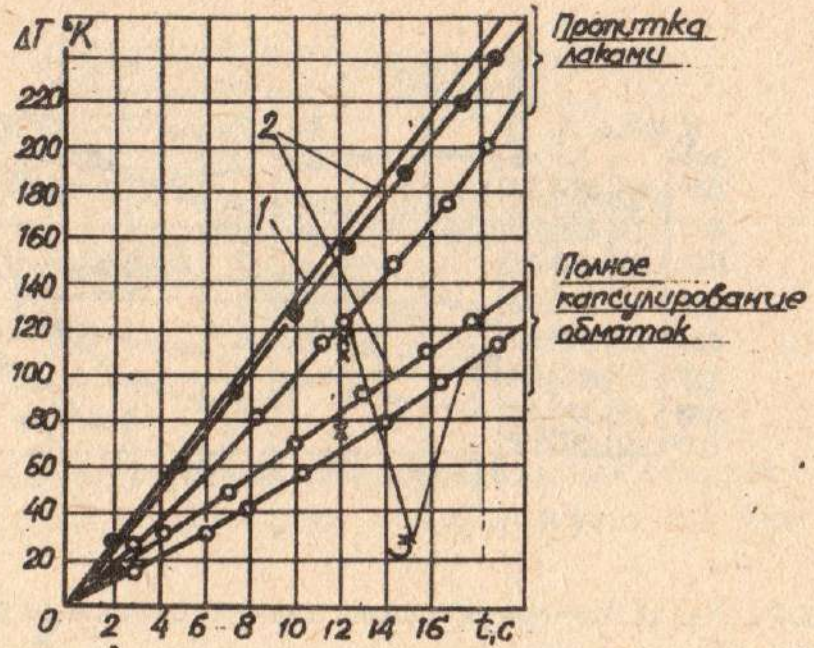


Рис. 3. Зависимость среднего превышения температуры обмотки статора электродвигателя 4AX90L4  $\Delta T$  от времени  $t$  при коротком замыкании (стоянка под током в момент пуска):  
 1 - по формуле  $T = j^2/200$ ; 2 - расчет по (7); 3 - расчет по (14); x - экспериментальные точки