

## ПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕМПЕРАТУРА ОБМОТОК РОТОРОВ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Ширнин И.Г.

Донецкий экономико-гуманитарный институт

Ткачук А.Н.

НПК "Донбасс-электромотор"

[Shirnin@telenet.dn.ua](mailto:Shirnin@telenet.dn.ua)

*Electric motors are manufactured from various conductor materials based on copper and aluminum. The speed of a temperature growth of windings of short-wave rotors from deep-slot and two-cage slots is demonstrated in the present article.*

Асинхронные двигатели изготавливаются с различными проводниковыми материалами, основными из которых являются медь и алюминий. В настоящей статье показана скорость нарастания температуры обмоток короткозамкнутых роторов с глубокими и двухклеточными пазами.

Активные материалы любой электрической машины, предназначенные для прохождения электрического тока, называются проводниковыми материалами, к числу которых относятся медь и её сплавы – бронза, латунь; алюминий и его сплавы – силумин, специальные сплавы повышенного сопротивления.

Бронза – это все сплавы меди с металлами, в которых, кроме сплавов меди с цинком, основной составной частью является медь. Бронза обладает хорошими механическими и антикоррозионными свойствами, не плохо сопротивляется износу.

Латунь – это сплавы меди и цинка с содержанием меди до 70%, причём в состав латуни могут входить добавки других металлов – свинца, олова, марганца, алюминия, железа, никеля. Отличием латуни от бронзы является её удельное сопротивление, которое в 2 – 3 раза меньше, чем у бронзы.

Силумин – это сплав алюминия с кремнием, иногда содержащий небольшое количество меди и марганца для повышения твёрдости.

Итак, основными проводниковыми материалами являются медь, алюминий и цинк, цены на которые на товарных биржах на 22 декабря 2005 года составили: покупка на Лондонской бирже металлов за тонну в долларах: медь – 4555; алюминий – 2238,5; цинк – 1843,5; никель – 13100 [1].

Основные характеристики указанных проводниковых материалов приведены в табл.1. Они применяются:

1) медь для изготовления всех обмоток электрических машин, обладает высокими электрическими, механическими, тепловыми и антикоррозионными свойствами; применение меди ограничивается главным образом её относительной дефицитностью;

2) бронза и латунь применяются для изготовления пусковых короткозамкнутых клеток с целью повышения их теплоёмкости и механической прочности.

В качестве проводникового материала преимущественно применяется электролитическая медь. В отношении степени её чистоты предъявляются очень высокие требования, т.к. загрязняющие примеси оказывают значительное влияние на свойства меди, особенно на её электропроводность.

Катодная медь является непосредственным продуктом электролитического рафинирования меди. Она имеет высокую степень чистоты и служит сырьём для изготовления медных стержней. Если она применяется для изготовления отливок сложной конфигурации, то необходимо применять особые меры. Для предотвращения доступа кислорода во время плавки меди применяются различные раскислительные средства (олово, бериллий и т.д.).

Путём переплавки и дальнейшей обработки катодной меди получают высокопроводящую рафинированную медь в форме стержней и т.д.

Таблица 1

Наименование материала	Марка	Состав	Временное сопротивление разрыву $\sigma_{\text{в}}$ , кг/мм <sup>2</sup>	Предел текучести, $\sigma_s$ , кг/мм <sup>2</sup>	Твёрдость по Бринеллю НВ, кг/мм <sup>2</sup>	Удельное сопротивление при 20°С, Ом·мм <sup>2</sup> /м	Удельный вес, г/см <sup>3</sup>	Температура плавления, °С
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Медь	-	Cu-99,9 %	22÷28	7	40÷50	0,0173	8,9	1083
Бронза алюминиевая	Бр.А5	Cu-95 % Al-5 %	30÷40	40÷50	100÷120	0,1	8,9	1060

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Бронза алюминиевая -марганцевая	Бр.Амц9-2	Cu-89 % Al-9 %	60	30	100÷120	0,11	8,8	1060
Бронза марганцевая	Бр.Мц5	Cu – 95% Mn- 5 %	40	-	70÷90	0,15	8,9	1047
Бронза АЖМц- 10-3-1,5	-	Fe,Mn-5 % Cu-85 %	55	-	125÷140	0,22	8,9	1045
Латунь	Л68	Cu – 68 % Zn – 32 %	28÷33	-	55÷70	0,07	8,9	938
Латунь	Л62	Cu – 62 % Zn – 38 %	30÷35	-	60÷75	0,072	8,9	905
Латунь	Л59	-	34÷42	-	75÷95	0,062	8,9	895
Алюминий	Al	-	8÷11	3,6	31÷37	0,029	2,7	658
Силумин	-	-	20÷29	10	55÷70	0,047÷0,064	2,6	650
Алюминий литой	-	-	-	-	-	0,034	2,7	658

Кислород входит в состав электротехнической меди в виде закиси меди и оказывает на электропроводимость лишь незначительное влияние. Для оценки электротехнической меди решающее значение имеет её электропроводность.

Удельное сопротивление чистой отожжённой меди при 20° С должно составлять  $\rho_{20} = 0,01724 \cdot 10^{-6}$  Ом·м. Для наших расчётов принимается  $\rho_{20} = 0,0175 \cdot 10^{-6}$  Ом·м.

Удельное сопротивление в сильной степени зависит от температуры, причём в диапазоне от 0° до 100° С. Эта зависимость выражается формулой

$$\rho_t = \rho_{20} [1 + \beta(t - 20)].$$

Температурный коэффициент  $\beta = 0,00393^\circ \text{C}^{-1}$ . Ввиду высокой электро- и теплопроводности меди, при её электродуговой сварке требуются сильные электрические токи. В противоположность этому, газовая сварка и пайка твёрдым припоем осуществляются сравнительно просто,

вследствие чего на практике в основном применяются эти два метода. Для них раскислённая (восстановленная) медь более пригодна, чем рафинированная медь. Водород, который частично имеется в сварочном пламени, диффундирует в раскислённую медь. Для раскислённой меди эта диффузия никакого значения не имеет, а в случае рафинированной меди водород образует с закисью меди водяные пары внутри медной детали. При достаточно высоком давлении эти пары могут приводить к возникновению трещин, ослаблению меди в районе мест сварки.

Это явление называется “водородной болезнью” меди, может ожидать во всех случаях, когда рафинированная медь нагревается в восстановительной атмосфере до температур свыше 500°С.

Свободная от кислорода высокопроводящая медь изготавливается в широких технических масштабах, медь с очень низким содержанием кислорода изготавливают для определённых целей по специальному методу, например, путём раскисления литием. Свободная от кислорода медь имеет иммунитет против “водородной болезни” и особенно пригодна для автогенной сварки и пайки твёрдым припоем.

Механическая прочность меди зависит от её обработки. Холодотянутая медь имеет предел текучести 35 кг/мм<sup>2</sup> и выше. Предел текучести отожжённой меди равен 5 кг/мм<sup>2</sup>, а предел упругости – только 1,5 кг/мм<sup>2</sup>. Температура рекристаллизации меди равна приблизительно 200° С. По этой причине максимально допустимая температура при коротком замыкании ограничивается согласно нормам величиной 150° С. При пайке мягким припоем температура нагрева меди обычно не превышает 200° С. Если же применяется твёрдый припой, то необходимо повышать температуру рекристаллизации меди путём присадки серебра или кадмия.

Кадмиевая медь практически свободна от кислорода и не склонна к “водородной болезни”. Алюминий наряду с медью применяется для изготовления короткозамкнутых обмоток (беличьих клеток) асинхронных двигателей путём заливки пазов расплавленным металлом.

Силумин применяется при изготовлении короткозамкнутых обмоток (беличьих клеток) асинхронных двигателей для замены алюминия в случае необходимости увеличить сопротивление беличьей клетки и сохранить её достаточную теплоёмкость.

Однако мнения специалистов в отношении пригодности алюминиевых обмоток расходятся. Согласно норм максимально допустимая температура нагрева алюминия ограничивается 200°С. Температура рекристаллизации алюминия колеблется между 400 и 450° С.

Характеристики алюминия и меди приведены в табл. 2.



При изготовлении литых короткозамкнутых обмоток алюминий несколько загрязняется, вследствие растворения в нём железа, и его удельное сопротивление возрастает до  $0,03 - 0,032 \cdot 10^{-6}$  Ом·м.

Сварная короткозамкнутая обмотка ротора состоит из уложенных в пазы медных стержней, которые по обоим лобовым сторонам соединены между собой короткозамыкающими кольцами.

Таблица 2 - Характеристика меди и алюминия при 20° С

Характеристика	Единица измерения	Медь	Алюминий
Плотность	кг/м <sup>3</sup>	8900	2710
Удельное электрическое сопротивление	Ом·м	$0,0173 \cdot 10^{-6}$	$0,0283 \cdot 10^{-6}$
Температурный коэффициент сопротивления	1/°С	$3,93 \cdot 10^{-3}$	$3,70 \cdot 10^{-3}$
Коэффициент линейного расширения	1/°С	$16,7 \cdot 10^{-6}$	$25 \cdot 10^{-6}$
Удельная теплопроводность	Вт/м·град	380	220
Удельная теплоемкость	Вт·с/кг·град	385	925
Предел прочности при растяжении (отожженная)	кг/мм <sup>2</sup>	22	7
То же (в наклепанном состоянии)	- " -	35	13
Предел текучести (отожженная)	- " -	5	2
То же (в полунаклепанном состоянии)	- " -	14	5
Модуль упругости	- " -	11250	6500

В зависимости от используемого проводникового материала асинхронного двигателя скорость нарастания температуры литой или сварной короткозамкнутой обмотки ротора можно определить по формулам, приведенным в табл.3 [2], в которых:

Таблица 3

№ п/п	Тип короткозамкнутой обмотки ротора	$K_i$
1.	Пазы без вытеснения тока при пуске, материал обмотки :  медь  алюминий	$\frac{(K_i \Delta_{H2})^2}{150}$  $\frac{(K_i \Delta_{H2})^2}{52}$
2.	Пазы глубокие, с вытеснением тока при пуске, величина роста сопротивления стержня при пуске равна $A_1$ , материал обмотки :  медь  алюминий	$A_1 \frac{(K_i \Delta_{H2})^2}{150}$  $A_1 \frac{(K_i \Delta_{H2})^2}{52}$
3.	Пазы двухклеточные, в обеих клетках материал одинаковый, величина роста сопротивления стержней пазы ротора при пуске равна $A_2$ , материал обмотки :  медь  алюминий	$\approx \frac{(A_2 K_i \Delta_{H2})^2}{150}$  $\approx \frac{(A_2 K_i \Delta_{H2})^2}{52}$
4.	Пазы двухклеточные, материалы обмоток рабочей и пусковой клеток разные	$\frac{\rho}{c\gamma} \left( \frac{A_2 \cdot K_i I_c}{1+\beta \cdot q_6} \right)^2$

$\Delta_{H2}$  - плотность тока в стержне ротора при номинальной нагрузке

$$\Delta_{H2} = \frac{I_c}{q_c} ;$$

$I_c$  - величина тока в стержне ротора при номинальной нагрузке,

$q_c$  - сечение стержня ротора,

$K_i$  - кратность пускового тока

$$K_i = \frac{I_{П1}}{I_H} ,$$

$I_{П1}$  - пусковой ток статора ,

$I_H$  - номинальный ток статора ,

$A_1$  - коэффициент роста сопротивления ротора при пуске определяется следующим образом

$$A_1 = \frac{q_c}{q_{сн}} ,$$

где  $q_c$  - сечения стержня в рабочем режиме,

$q_{сн}$  - эквивалентная площадь стержня , по которой протекает ток в пусковом режиме,

$A_2$  - коэффициент увеличения активного сопротивления двухклеточного паза ротора в пусковом режиме ,

$\rho, \gamma, c$  - удельное сопротивление , удельная масса, удельная теплоемкость материала стержней клетки,

$\beta$  - отношение активного сопротивления верхнего стержня к активному сопротивлению нижнего стержня, т.е. соотношение сопротивлений верхнего и нижнего стержней двухклеточного паза равно соотношению сечений этих пазов

$$\beta = \frac{r_B}{r_H} ,$$

$q_B$  - сечение стержня верхней клетки .

Скорость нарастания температуры обмоток короткозамкнутых роторов должна быть не выше 60-70 ° С/с.

При пуске двигателя с короткозамкнутым ротором с глубоким пазом  $S = 1$  , тогда  $K_r$  и  $K_x$  можно определить по формулам:

$$K_r = 1 + \beta \left( 1 - \frac{\beta^2}{\beta^2 + \mu^2 s^2} \right) = 1 + \beta \left( 1 - \frac{\beta^2}{\beta^2 + \mu^2} \right) = 1 + \beta(1 - B) = A ;$$

$$K_x = \frac{\beta^2}{\beta^2 + \mu^2 s^2} = \frac{\beta^2}{\beta^2 + \mu^2} = B ,$$

где  $K_r$  - коэффициент вытеснения , равный коэффициенту увеличения сопротивления при пуске , т.е. при  $S = 1$  , прямо пропорционален высоте паза и равен

- для медного провода  $K_r \approx \xi = 0,095 h$  ;

- для алюминиевого провода  $K_r \approx \xi = 0,067 h$  ;

где  $\xi$  - приведенная высота проводника , равная

$$\xi = h \sqrt{\pi \cdot \mu_0 \frac{b_c \cdot f_2}{b_H \cdot \rho}} ,$$

где  $b_c$  и  $b_H$  - ширина стержня и ширина паза ,

$f_2$  - частота тока в роторе ,

$\rho$  - удельное сопротивление проводника ,

$\mu_0$  - магнитная проницаемость воздуха .

При высоте медного провода до 12 мм , а алюминиевого до 18 мм вытеснение тока практически отсутствует , поэтому глубокий паз должен иметь большую высоту : для медного стержня  $h = 20-25$  мм , а для алюминиевого  $h = 25-30$  мм . По найденной высоте и известному сечению паза по допустимой плотности тока определяем ширину стержня  $b_c = q_c / h$  .

При частоте сети  $f_1 = 50$  Гц частота тока в роторе  $f_2 = f_1 s$  , а также  $b_c = b_H$  , так как у короткозамкнутых роторов ширина паза и проводника отличаются незначительно , то для медного проводника получим

$$\xi = 0,095 h \sqrt{S} ,$$

а для алюминиевого проводника

$$\xi = 0,067 h \sqrt{S} ,$$

где  $h$  - выражено в мм ,  $S$  - скольжение в относительных единицах .

Рассмотрим какие параметры двухклеточного ротора изменяются в пусковом режиме, когда  $S=1$ . Активное сопротивление первичной обмотки  $r_1$  и сопротивление лобовых частей  $r_k$  ротора не изменяются, поэтому вытеснением тока в них у асинхронных двигателей можно пренебречь.

Эквивалентное сопротивление  $r_{23} = r_c k_r$  (т. к.  $S = 1$ ) изменяется в связи с изменением  $k_r$ , которое в рабочем режиме было равно 1. Тогда  $r_{23п} = r_c k_r = r_c A$ ;  $r'_{23п} = r_{2п} K_r$ ; полное активное сопротивление вторичной обмотки  $r_{2п} = r_{23п} + r_k$ , где  $r_k = 2 r'_k$ ,  $r'_{2п} = r_{2п} K_r$ ;

полное активное сопротивление фазы обмотки двигателя

$$r_{кп} = r_1 + r'_{2п}.$$

Величина индуктивного сопротивления рабочей клетки ротора зависит от скольжения и она равна  $X'_{2п} K_x$ , а  $K_x$  зависит от скольжения

$$K_x = \frac{\beta^2}{\beta^2 + \mu^2 S^2}.$$

В момент пуска, когда  $S=1$ ,

$$K_x = \frac{\beta^2}{\beta^2 + \mu^2} = B$$

и индуктивное сопротивление рабочей клетки будет  $X'_{2п} = X'_{2п} \cdot B$ .

Величину  $K_r$ ,  $K_x$  удобно определять по кривым на рисунке 1 в зависимости от  $\xi$ .

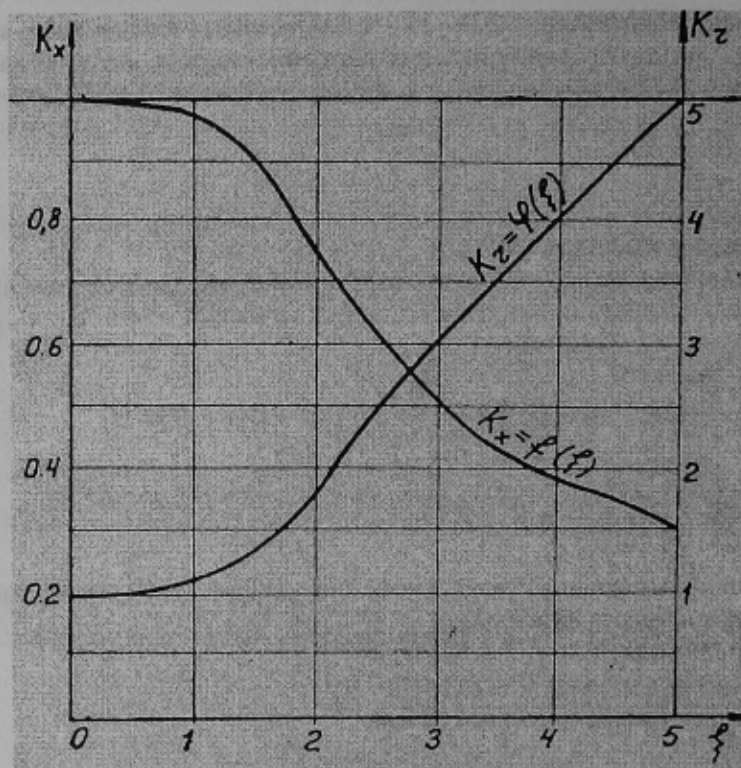


Рисунок 1 - Кривые для определения  $K_r$  и  $K_x$

Полученные расчетным путем скорости нарастания температуры обмоток короткозамкнутых роторов с глубокими и двухклеточными пазами с разными проводниковыми материалами асинхронных двигателей близки по значениям, определенным экспериментальным путем.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Украинский деловой журнал "Эксперт Украина", 26 декабря 2005-1 января 2006, № 49(52).
2. Поволоцкий М.Е. Проектирование асинхронных электродвигателей. - Куйбышевское книжное издательство, 1970. - 375 с.

Рекомендовано проф., д.т.н. Сивокобыленко В.Ф.