

## Из опыта работы

# К проектированию электродвигателей привода массовых лифтов

АФОНИН В.И., РОДИОНОВ Р.В.

*Рассматриваются общие вопросы проектирования электродвигателей привода массовых лифтов с двухскоростными асинхронными двигателями, редукторными с асинхронными двигателями, безредукторными на базе синхронной машины с постоянными магнитами, безредукторными с асинхронным двигателем.*

**Ключевые слова:** *электропривод, электродвигатель, проектирование, лифт*

Для привода массовых лифтов наиболее распространены двухскоростные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором, имеющие при частоте питания 50 Гц синхронные скорости 1500/375, 1500/250 и 1000/250 мин<sup>-1</sup> и числа пар полюсов, соответственно,  $p=2/8, 2/12$  и  $3/12$ . Вращающий момент электродвигателей выбирается так, чтобы обеспечить вертикальное перемещение груза необходимой массы с заданной скоростью. Во внимание при этом принимаются передаточное число редуктора, наличие полиспаста, степень уравновешенности, диаметр канатоведущего шкива и т.д. В практике проектирования электрических машин главными размерами магнитной системы принято считать внутренний диаметр статора  $D_i$  и длину пакета статора  $l_i$ . Эти размеры наряду с числом пар полюсов  $p$  определяют остальные размеры магнитной системы электродвигателя, а соотношение между длиной и внутренним диаметром статора — его технико-экономические характеристики.

Основными данными для определения главных размеров электродвигателей привода редукторных лебедок являются: номинальный вращающий момент  $M_H$ , соответствующий моменту статической нагрузки  $M_C$  при заданной частоте вращения; номинальная частота вращения  $n_H$  при моменте  $M_H$ ; номинальная мощность  $P_H$ ; электромагнитная нагрузка.

Объем активного ядра магнитной системы, в котором формируется необходимая электромагнитная мощность  $P_e$  или электромагнитный момент  $M_e$ , определяется с учетом особенностей и опыта проектирования электродвигателей для привода лифтов на базе предшествующих единых серий А2 и А4. При этом учитывается наличие на статоре двух обмоток — большой и малой скорости, а так-

*General matters concerned with designing the drive electric motors for mass-produced lifts fitted with two-speed induction motors, gear-type drives with induction motors, gearless drives on the basis of a synchronous machine with permanent magnets, and gearless drives with an induction motor are considered.*

**Key words:** *electric drive, electric motor, designing, elevator*

же то, что мощности и частоты вращения двигателя для этих обмоток соотносятся как 4:1 и 6:1 при постоянном моменте статической нагрузки.

Главные размеры определяются исходя из параметров малой скорости ( $p_M$ ):

$$P_e = C_{\text{л}} D_i^2 l_i n_M, \quad (1)$$

$$C_{\text{л}} = \frac{p^2}{\sqrt{2}} \frac{A_M B_{\text{дм}} k_{\text{обм}}}{60 k_E}, \quad (2)$$

где  $A_M$  — линейная нагрузка, А/м;  $B_{\text{дм}}$  — индукция в воздушном зазоре, Тл;  $k_E$  — коэффициент ЭДС;  $k_{\text{обм}}$  — обмоточный коэффициент;  $n_M$  — частота вращения для обмотки малой скорости, мин<sup>-1</sup>.

После несложных преобразований с учетом  $l_i = l_i D_i$  получим:

$$D_i = 2,053 \sqrt{\frac{M_H n_M k_E}{A_M B_{\text{дм}} k_{\text{обм}} l_i}}. \quad (3)$$

Индукция в воздушном зазоре зависит в первую очередь от внутреннего диаметра статора и номинального вращающего момента электродвигателя (или статического момента нагрузки).

Практика проектирования электродвигателей для привода лифтов показывает, что значения индукции у них ниже индукции электродвигателей общего назначения. Это объясняется более жесткими требованиями к уровню виброшумовых характеристик [1, 2].

Выбор одинаковых радиальных размеров  $D_a$  и  $D_i$  для электродвигателей с разным числом полюсов обусловлен необходимостью унифицировать технологические процессы и оснастку в условиях крупносерийного производства. Длина сердечника

статора выбирается для электродвигателей с наибольшей мощностью (нагрузочным моментом) в габарите; оптимальным следует считать отношение  $l_i / D_i$  примерно 0,85, 1,05. Для примера в табл. 1 приведены основные конструктивные размеры активных частей асинхронных двухскоростных ( $2p = 4/16$ ) двигателей для привода лифтов, выпускаемых ведущими фирмами-производителями лифтового оборудования.

Таблица 1

Фирма	Параметры						
	$D_a$ , мм	$D_i$ , мм	$l_i$ , мм	$Z_a$	$Z_z$	$D_i / D_a$	$l_i / D_i$
Cone (Финляндия)	252	170	—	48	58	0,675	—
Wittur (ФРГ)	240	172	180	48	58	0,717	1,047
Otis (США)	298,4	175	116	48	58	0,587	0,663
	340	240	120	48	58	0,706	0,50
Sicor (Италия)	220	135	160	48	58	0,6136	1,185
	240	150	160	48	58	0,625	1,067

Зубцовая зона активного ядра электродвигателей проектировалась с учетом того, что электромагнитные нагрузки в зубцах статора  $B_{zi}$  максимальны при малой скорости ( $p_M$ ), а в ярме статора  $B_{a1}$  — при большой скорости ( $P_G$ ).

Ширина зубца  $b_{zi}$  статора определяется из соотношения

$$B_{zi} = B_d \frac{t_1}{b_{zi} k_3}, \tag{4}$$

Число пар полюсов $2p$	Электромагнитная нагрузка, Тл				
	$B_d$	$B_{zi}$	$B_{a1}$	$B_{z2}$	$B_{a2}$
4/16; 6/18	$\frac{0,60, 0,65}{0,65, 0,75}$	$\frac{1,30, 1,50}{1,65, 1,80}$	$\frac{1,20, 1,40}{0,35, 0,45}$	$\frac{1,00, 1,40}{1,20, 0,60}$	$\frac{0,60, 0,80}{0,20, 0,40}$
4/24	$\frac{0,55, 0,60}{0,70, 0,75}$	$\frac{1,35, 1,55}{1,70, 1,85}$	$\frac{1,20, 1,40}{0,25, 0,35}$	$\frac{1,10, 1,30}{1,40, 1,60}$	$\frac{0,60, 0,80}{0,15, 0,20}$
6/24	$\frac{0,60, 0,75}{0,70, 0,80}$	$\frac{1,30, 1,50}{1,70, 1,85}$	$\frac{0,70, 1,00}{0,25, 0,35}$	$\frac{0,90, 1,00}{1,40, 1,60}$	$\frac{0,40, 0,50}{0,15, 0,35}$

Примечание:  $B_\delta$  — индукция в воздушном зазоре;  $B_{z1}, B_{z2}$  — индукция в зубцах статора и ротора;  $B_{a1}, B_{a2}$  — индукция в ярме статора и ротора.

Таблица 2

Число пар полюсов $2p$	Размерные соотношения			
	$D_i / D_a$	$b_{z1} / b_{n1}$	$h_{z1} / h_{a1}$	$l_i / D_i$
4/16, 4/24	0,625, 0,690	0,70, 0,75	0,90, 1,10	0,75, 0,85
6/18, 6/24	0,645, 0,745	0,70, 0,75	0,90, 1,20	0,80, 1,00

Примечание:  $D_a, D_i$  — наружный и внутренний диаметры статора;  $b_{z1}, b_{n1}$  — значения ширины зубца и паза статора;  $h_{z1}, h_{a1}$  — значения высоты зубца и ярма статора.

откуда определяем предварительное значение ширины зубца:

$$b_{zi} = 0,5p \frac{D_i}{z_1}. \tag{5}$$

Высота ярма статора с учетом нагрузки для обмотки большой скорости

$$h_{a1} = \frac{B_d}{B_{a1}} \frac{D_i}{p_6 k_E k_3}, \tag{6}$$

тогда

$$h_{a1} \gg 0,54 \frac{D_i}{2p_6}. \tag{7}$$

Электромагнитные нагрузки электродвигателей приведены в табл. 2.

Выполненные по (4), (5) и (7) расчеты позволили получить (предварительно) основные размерные соотношения для активного ядра магнитной системы двухскоростных электродвигателей для привода лифтов (табл. 3).

Как сказано выше, электродвигатели имеют две отдельные обмотки для большой и малой скорости, каждая из которых соединена в «звезду». Геометрия зубцовой зоны ротора во многом определяет форму механической характеристики электродвигателя и соотношения координат точек, ее определяющих (скорость-момент). Нужная форма характеристики «скорость-момент» была получена прямым расчетом электродвигателей на обеих скоростях с различными формами и размерами зубцовой зоны ротора методом планирования эксперимента [3].

Таблица 3

Вращающий момент электродвигателя в безредукторном приводе передается непосредственно на канатоведущий шкив, размещенный на валу (редуктор отсутствует), при этом частота вращения электродвигателя (и канатоведущего шкива) обычно не превышает  $300 \text{ мин}^{-1}$ , а вращающий момент составляет  $150 \text{ Нж}$  и более. Поскольку подобные приводы управляются автоматическими регуляторами скорости на базе статических преобразователей частоты, то к механическим характеристикам приводных асинхронных двигателей предъявляется требование высокой перегрузочной способности.

Максимальный вращающий момент, необходимый безредукторному приводу, предлагается рассчитывать по формуле

$$M_{\max} = \frac{9,81(Q / 2i_{\text{п}} + q)D_{\text{ш}}}{K_{\text{ш}} h}, \quad (8)$$

где  $Q$  — полезная нагрузка в кабине, кг;  $i_n$  — кратность полиспастной подвески;  $q$  — масса кабеля, кг;  $D_{\text{ш}}$  — диаметр шкива, мм;  $K_{\text{ш}}$  — коэффициент приведения;  $h$  — КПД шахты ( $\approx 0,80$ );  $K_{\text{ш}} = 1330$  ( $V=1 \text{ м/с}$ );  $1190$  ( $V=1,6 \text{ м/с}$ );  $1100$  ( $V=2 \text{ м/с}$ ).

Максимальная мощность, требуемая приводу,

$$P_{\max} = \frac{0,736(Q / 2i_{\text{п}} + q)V}{75h}, \quad (9)$$

где  $V$  — линейная скорость перемещения, м/с.

В табл. 4 приведены основные параметры для массовых пассажирских лифтов с безредукторными лебедками.

Таблица 4

Грузоподъемность $Q$ , кг	Параметры			
	скорость перемещения $V$ , м/с	кратность полиспаста $i_n$	момент нагрузочный $M_{\text{н}}$ , Нж	частота вращения $n$ , $\text{мин}^{-1}$
400	1,0	2:1	200	122
400	1,0	1:1	370	61
630	1,0	2:1	300	122
630	1,0	1:1	585	61

Объем активного ядра магнитной системы асинхронного двигателя для привода безредукторной лифтовой лебедки

$$D_i^2 l_i = \frac{1}{c} \frac{P_{\text{н}}}{n}, \quad (10)$$

где  $D_i$ ,  $l_i$  — внутренний диаметр и расчетная длина сердечника статора, м;  $P_{\text{н}}$  — номинальная мощность, кВт;  $n$  — частота вращения,  $\text{мин}^{-1}$ ;  $c$  — коэффициент, зависящий от отношения  $P_{\text{н}} / n$ ,  $\text{м}^3 \cdot \text{мин}^{-1} / \text{кВт}$  (рис. 1).

Предварительные расчетные данные приведены в табл. 5.

Данные расчета сравнивались с максимальными значениями вращающих моментов электродвигателей общего назначения при выборе базы для электродвигателей безредукторных приводов (рис. 2).

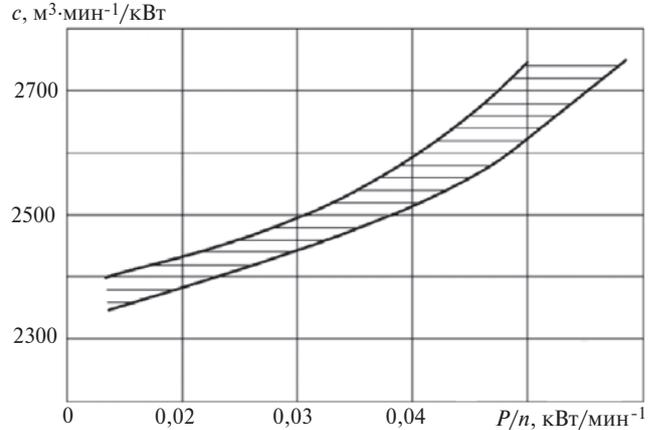


Рис. 1. Зависимость коэффициента  $c$  от отношения  $P/n$

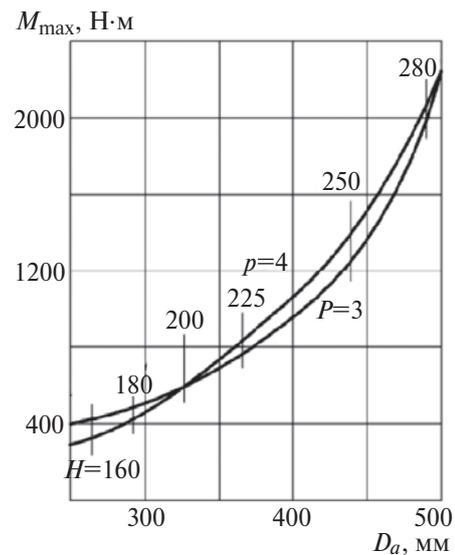


Рис. 2. Максимальные значения вращающего момента электродвигателей общего назначения

Учитывая что  $P_{\text{н}} = 0,1047 M_{\text{н}} \omega_{\text{н}}$ , из (10) получаем формулу для определения длины сердечника статора:

$$l_i = \frac{0,1047 M_{\text{н}}}{D_i^2 c}. \quad (11)$$

На этапе эскизного проектирования радиальные размеры активного ядра ( $D_a$ ,  $D_i$ ) приняты такими, как у электродвигателей общего назначения (табл. 6).

Частота вращения вала электродвигателя

$$n = \frac{60 v i_{\text{п}} m}{\rho D_{\text{ш}}}, \quad (12)$$

где  $v$  — скорость перемещения кабины лифта, м/с;  $i_{\text{п}}$  — кратность полиспаста;  $m$  — коэффициент ре-

Таблица 5

Расчетные данные	Грузоподъемность, кг					
	400	630	1000	400	630	1000
Скорость перемещения, м/с	1,0			1,6		
Диаметр шкива, мм	320					
Масса кабеля, кг	40					
Полиспаг	Отсутствует					
Момент максимальный, Нж	708	1047	1593	793	1170	1780
Мощность максимальная, кВт	2,944	4,355	6,624	4,71	6,967	10,60
Полиспаг	2:1					
Момент максимальный Нж	424	598	878	474	668	981
Мощность максимальная, кВт	1,762	2,486	3,649	2,818	3,976	5,838

дукции при наличии редуктора в приводе лифта;  
 $D_{ш}$  — диаметр канатоведущего шкива, м.

Частота вращения асинхронного двигателя:

$$n = (1 - s)n_c, \quad (13)$$

где  $n_c = 60f/p$  — синхронная частота вращения;  
 $s = f_p/f$  — скольжение;  $f_p$  — частота тока ротора,  
 Гц.

С учетом (12) и (13) получаем взаимосвязь частоты питания и числа полюсов двигателя с параметрами лифта:

$$\frac{f - f_p}{p} = \frac{v_{II} m}{p D_{ш}}. \quad (14)$$

Выражение (14) справедливо для всех типов приводов лифтов: редукторных, безредукторных, с двухскоростными и односкоростными асинхронными двигателями, с синхронными двигателями с постоянными магнитами. Для последних частота тока ротора в (14) принимается равной нулю.

Число витков обмотки статора зависит от потока в воздушном зазоре (или значения максимального вращающего момента), частоты вращения и т.п. Эффективное значение числа витков проектируемого электродвигателя можно определить по формуле

$$w_{эфф.п} = w_{эфф.б} \sqrt{\frac{M_M n_б}{M_{м.б} n_{II}}}, \quad (15)$$

Таблица 6

Высота оси вращения, мм	Диаметр сердечника статора, мм	
	наружный	внутренний
180	295	209,5
200	327	235,5
225	368	257,5
250	437	317

где  $w_{эфф.б}$  — эффективное число витков базового двигателя;  $M_{м.б}$ ,  $M_M$  — максимальный вращающий момент базового и проектируемого электродвигателей.

При выборе числа витков обмотки статора необходимо ориентироваться на наибольшее значение частоты вращения.

Предложенный в статье подход может быть использован при проектировании различных подъемных механизмов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Афонин В.И., Балабанов И.Н.** Регулируемый электропривод лифтов с асинхронными электродвигателями. — Электротехника, 2006, № 5.
2. **Афонин В.И., Родионов Р.В.** Моделирование работы безредукторного электропривода лифта. — Лифт, 2009, № 2.
3. **Афонин В.И.** К вопросу о проектировании активного ядра электродвигателей для безредукторных лифтовых приводов. — Лифт, 2011, № 1.
4. **Афонин В.И., Кругликов О.В., Родионов Р.В.** Энергопотребление лифтовых электроприводов с различными системами управления. — Электротехника, 2011, № 3.

[21.06.12]

*Авторы: Афонин Валерий Иванович окончил факультет электромеханики МЭИ в 1967 г. Защитил кандидатскую диссертацию «Исследование и вопросы проектирования двухскоростных двигателей для привода лифтов» в 1979 г. Ведущий научный сотрудник ОАО «Научно-исследовательский проектнотехнологический институт электромашиностроения».*

*Родионов Роман Вячеславович окончил в 1999 г. Владимирский государственный университет. В 2005 г. защитил кандидатскую диссертацию «Исследование и совершенствование методов и средств испытания по определению энергетических показателей систем приводов с частотно-регулируемыми асинхронными двигателями». Старший научный сотрудник ООО «Русэлпром-Электропривод».*