

УДК 621.313

РАСЧЕТ И ПОСТРОЕНИЕ ПУСКОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПО КАТАЛОЖНЫМ ДАННЫМ

Фаттахов К.М.

Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа

Фаттахов Р.К.,

Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа

e-mail: rfattakhov@gmail.com

Аннотация. Приведены выражения для определения сопротивлений схемы замещения и токов ротора и статора асинхронного двигателя с учетом насыщения магнитопровода и вытеснения тока. Рассмотрены основные допущения, позволяющие упростить построение пусковых характеристик. Приводится методика построения механической и токовой характеристик асинхронного двигателя.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, схема замещения, механическая характеристика, пусковые характеристики, частотный пуск

Пусковые характеристики асинхронных двигателей (АД) широко используются для расчетов времени пуска, для исследования процессов самозапуска АД, а также для анализа частотного пуска и регулирования скорости вращения при частотно-регулируемом электроприводе. Однако, пусковые характеристики АД в справочных данных не приводятся. В практике проектирования для их построения выполняется трудоемкий электромагнитный расчет. Целью настоящей статьи является разработка удобного и достаточно точного метода расчета пусковых характеристик АД по паспортным и каталожным данным. Они являются исходными данными для расчета.

В паспортных и каталожных данных АД указываются [1, 2]: номинальная мощность P_n , номинальное напряжение U_n , частота питающей сети f_1 , номинальная частота вращения n_n или номинальное скольжение s_n , номинальный коэффициент полезного действия (КПД) η_n , номинальный коэффициент мощности $\cos \varphi_n$, кратность максимального момента λ , кратность пускового момента $M_{п*}$ и кратность пускового тока $I_{п*}$. Введем относительные величины

$$M_* = M / M_n ; I'_{2*} = I'_2 / I'_{2n} ; I_{1*} = I_1 / I_n . \quad (1)$$

К исходным данным относятся также параметры схемы замещения – сопротивления R_1, R'_2, X_1, X'_2 , коэффициент σ_1 (см. рис. 1а, б), номинальные токи I_n и I'_{2n} обмоток статора и ротора. Если эти величины неизвестны, то они могут быть определены по паспортным и каталожным данным по методу, изложенному в [3...5].

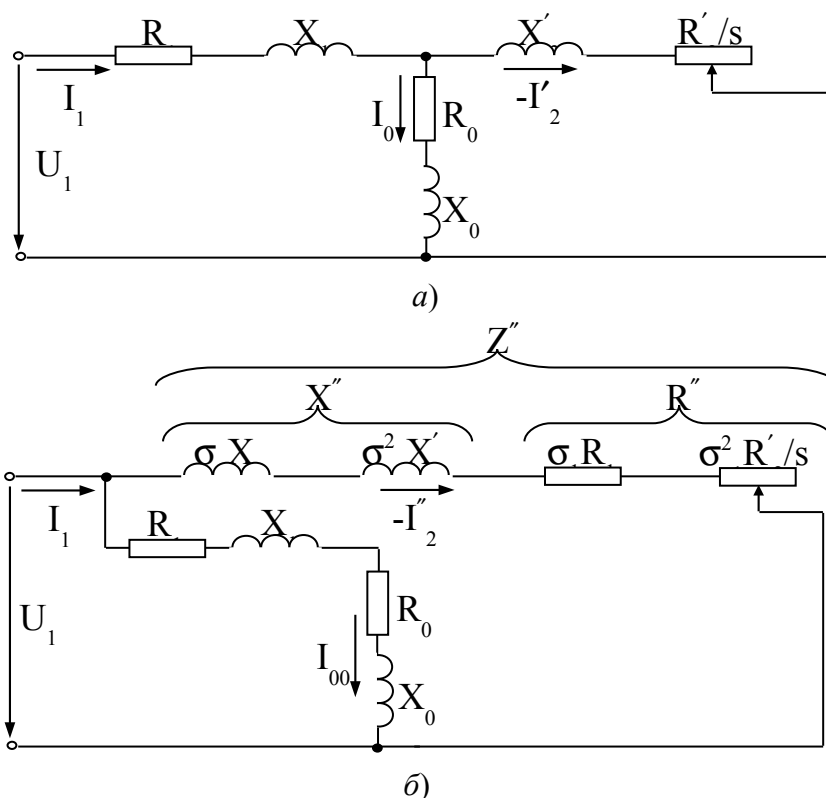


Рис. 1. Т-образная (а) и уточненная Г-образная (б) схемы замещения

С учетом насыщения и вытеснения тока изменяются значения сопротивлений. Схемы замещения для этого случая изображены на рис. 2.

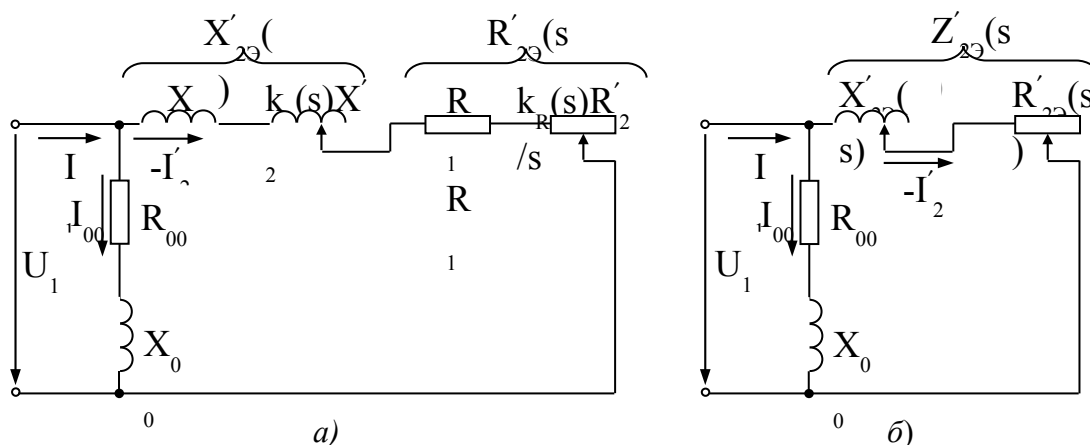


Рис. 2. Полный вид (а) и компактный вид (б) Г-образной схемы замещения, с учетом насыщения и вытеснения тока

Под пусковыми характеристиками АД понимают зависимость $M = f(s)$ (механическую характеристику) и зависимость $I_{1*} = f(s)$, которая в данной статье называется токовой характеристикой. Вид пусковых характеристик приведен на рис. 3.

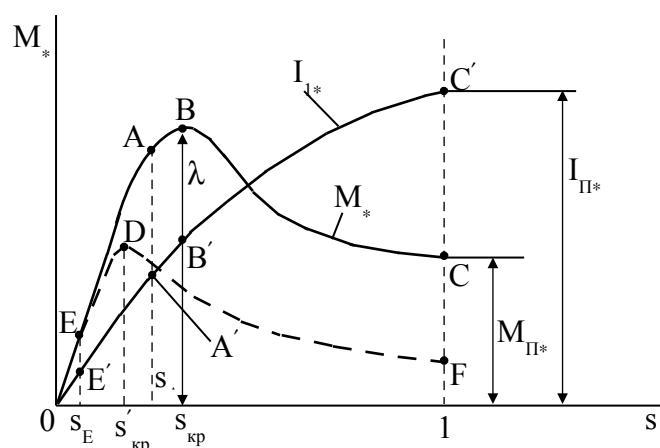


Рис. 3. Механическая и токовая характеристики

Предлагаемый ниже метод расчета пусковых характеристик АД основан на следующих допущениях.

Допущение 1. В интервале скольжений $s_{кр} \leq s \leq 1$ механическая характеристика $M = f(s)$ с учетом насыщения и вытеснения тока может быть рассчитана по формуле

$$M_* = I_{2*}'^2 k_R(s) \frac{s_H}{s}. \quad (2)$$

При проектировании электрических машин [6, 7] эту формулу используют для расчета механической характеристики в интервале скольжений $s_A \leq s \leq 1$, где $s_A = 0,1$.

Допущение 2. Токовая характеристика $I_{1*} = f(s)$ в интервале скольжений $s_{кр} \leq s \leq 1$ может быть рассчитана по приближенному соотношению:

$$I_{1*} \approx \frac{I_{2*}'}{k_{in}}, \quad (3)$$

где коэффициент k_{in} определяется в номинальном режиме:

$$k_{in} = \frac{I_H}{I_{2H}'}$$

Допущение 3. Коэффициенты учета насыщения и вытеснения тока $k_R(s)$ и $k_X(s)$ в интервале скольжений $s_{кр} \leq s \leq 1$ могут быть представлены следующими функциями:

$$\begin{aligned} k_R(s) &= 1 + b(s - s_{кр}); \\ k_X(s) &= k_X(1) + c(1 - s). \end{aligned} \quad (4)$$

$$s_{кр} = \frac{s_H}{\alpha} (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - \alpha}), \quad (5)$$

$$\alpha = 1 + 2as_H(1 - \lambda). \quad (6)$$

$$b = \frac{k_R(1) - 1}{1 - s_{кр}}. \quad (7)$$

$$c = \frac{k_X(s_{кр}) - k_X(1)}{1 - s_{кр}}. \quad (8)$$

$$k_X(1) = \frac{X'_{2\exists}(1) - X_1}{X'_2}. \quad (9)$$

Формулы (5) и (6) взяты из [8]. В формулах (7) и (8)

$$k_R(1) \approx \frac{M_{\Pi*}}{(k_{in} I_{\Pi*})^2 s_H}. \quad (10)$$

$$k_X(s_{кр}) = \frac{X'_{2\exists}(s_{кр}) - X_1}{X'_2}. \quad (11)$$

Из формул (2) и (3) следует, что при принятых допущениях для построения пусковых характеристик в интервале скольжений $s_{кр} \leq s \leq 1$ необходимо найти значения тока I'_{2*} и коэффициент $k_R(s)$. Коэффициент $k_R(s)$ определяется по первому выражению (4). При расчете тока I'_{2*} могут возникнуть следующие случаи.

Случай 1. Участок ABC механической характеристики $M=f(s)$ (рис. 3) известен либо в отдельных своих точках, либо полностью. В этом случае токовая характеристика строится по формуле (3), где ток I'_{2*} определяется по следующему выражению, полученному из формулы (2):

$$I'_{2*} = \sqrt{\frac{M_*}{k_R(s) \frac{s_H}{s}}}. \quad (12)$$

Случай 2. Участок ABC механической характеристики неизвестен. В этом случае ток ротора определяется по схеме замещения, представленной на рис. 2б:

$$I'_2 = \frac{U_1}{Z'_{2\exists}(s)}. \quad (13)$$

Затем по второй формуле (1) определяется ток I'_{2*} и далее по выражению (3) строится токовая характеристика. Механическая характеристика строится по выражения (2).

Порядок расчета и построения пусковых характеристик в интервале скольжений $s_{кр} \leq s \leq 1$.

Сначала по формулам (5) - (11) определяются коэффициенты $s_{кр}$, a , b , c , $k_R(1)$, $k_X(1)$ и $k_X(s_{кр})$. Затем по формулам (4) для ряда значений скольжений s определяются коэффициенты $k_R(s)$ и $k_X(s)$. Для тех же значений скольжений s определяются сопротивления $R'_{2\exists}(s)$, $X'_{2\exists}(s)$, $Z'_{2\exists}(s)$ в схеме замещения рис. 2:

$$\begin{aligned}
 R'_{2\Omega}(s) &= R_1 + k_R(s) \frac{R'_2}{s}; \\
 X'_{2\Omega}(s) &= X_1 + k_X(s) X'_2; \\
 Z'_{2\Omega}(s) &= \sqrt{R'^2_{2\Omega}(s) + X'^2_{2\Omega}(s)}.
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

Затем по второй формуле (2) определяется ток ротора I'_{2*} . После этого подстановкой значений тока I'_{2*} в формулу (2) и (3) вычисляются соответствующие точки характеристик $M_* = f(s)$ и $I_{1*} = f(s)$.

Порядок расчета и построения пусковых характеристик в интервале скольжений $0 \leq s \leq s_{кр}$.

Это осуществляется в два этапа. На первом этапе пусковые характеристики $M_* = f(s)$ и $I_{1*} = f(s)$ рассчитываются без учета влияния явлений насыщения и вытеснения тока по формулам, приведенным в табл. 1.

Механическая характеристика АД без учета влияния явлений насыщения и вытеснения тока имеет вид кривой OEDF (рис. 3).

Таблица 1. Формуляр расчета пусковых характеристик $M_* = f(s)$, $I_{1*} = f(s)$ без учета влияния явлений насыщения и вытеснения тока

№ п/п	Расчетная величина	Размерность	Скольжение s												
			s_1	s_2	s_3	...	s_H	...	$s_{кр}$...	1				
1	$R'' = \sigma_1 R_1 + \sigma_1^2 R'_2 / s$	Ом													
2	$X'' = \sigma_1 (X_1 + \sigma_1 X'_2)$	Ом													
3	$Z'' = \sqrt{R''^2 + X''^2}$	Ом													
4	$I''_2 = U_1 / Z''$	А													
5	$\cos \varphi''_2 = R'' / Z''$														
6	$\sin \varphi''_2 = X'' / Z''$														
7	$I_{1a} = I_{00a} + I''_2 \cos \varphi''_2$	А													
8	$I_{1p} = I_{00p} + I''_2 \sin \{ \varphi''_2 \}$	А													
9	$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2}$	А													
10	$P_1 = m_1 U_1 I_{1a}$	Вт													
11	$P_{\Omega 1} = m_1 R_1 I_1^2$	Вт													
12	$P_{\Omega M} = P_1 - P_{\Omega 1} - P_C$	Вт													
13	$M = P_{\Omega M} / (2\pi n_1 / 60)$	Нм													
14	$M_* = M / M_H$														
15	$I_{1*} = I_1 / I_H$														

Второй этап расчета в *случае 1* производится следующим образом. Сначала выделяется точка E кривой OEDF и точка A кривой ABC. Затем эти точки соединяются (сопрягаются) между собой плавной кривой EA. На участке OE механическая характеристика близка к прямолинейной. Поэтому точку E следует выбирать так, чтобы этот участок был наиболее протяженным. Точки E и A в настоящей статье названы точками сопряжения кривых OEDF и ABC. Этим точкам соответствуют скольжения s_E и s_A . На графике токовой характеристики $I_{1*} = f(s)$ этим скольжениям соответствуют точки E' и A' (рис. 3). При этом момент в точке E' определяется по формулам табл. 1 при $s = s_E$, а момент в точке A' – по формуле (2), в которой следует положить $M_* = M_{*A}$, $s = s_A$. Далее, точки E' и A' (аналогично точкам E и A) соединяются плавной кривой. В результате описанных построений получим полный вид механической и токовой характеристик.

Выполнение второго этапа расчета в *случае 2* отличается только тем, что вместо координат точки A берутся координаты точки B максимального момента (см. рис. 3), а вместо точки A' берется точка B'.

Таким образом, изложен метод расчета и построения пусковых характеристик АД по паспортным и каталожным данным. Метод является приближенным, но позволяет построить пусковые характеристики АД с достаточной для практики точностью без проведения электромагнитного расчета.

При подготовке статьи использованы результаты исследований, выполненных при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ по комплексному проекту «Разработка и организация серийного производства мощных высоковольтных частотно-регулируемых приводов (ВЧРП)» (договор №13.G25.31.0060).

Литература

1. Электрические машины: справочник в 2-х т.; под ред. И.П.Копылова и Б.К. Клокова. М.: Энергоатомиздат; Т. 1. 1988. 568 с.; Т. 2. 1989. 688 с.
2. Кацман М.М. Справочник по электрическим машинам. М.: Академия, 2005. 480 с.
3. Фаттахов К.М., Фаттахов Р.К. Метод определения параметров схемы замещения асинхронной машины по паспортным и каталожным данным // Электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий: сб. ст. / УГНТУ. Уфа, 2011. С. 123 - 131.
4. Фаттахов К.М., Фаттахов Р.К. Обоснование возможности использования метода определения параметров схемы замещения асинхронной машины по паспортным и каталожным данным // Электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий: сб. ст. / УГНТУ. Уфа, 2011. С. 131 - 139.

5. Фаттахов К.М., Фаттахов Р.К. Расчет рабочих характеристик асинхронной машины по паспортным и каталожным данным // Электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий: сб. ст. / УГНТУ. Уфа, 2011. С. 148-157.

6. Проектирование электрических машин; под ред. И.П. Копылова. М.: Высшая школа, 2002. 757 с.

7. Проектирование электрических машин; под ред. П.С. Сергеева. М.: Энергия, 1969. 632 с.

8. Фаттахов К.М. Формула Клосса, полученная с использованием уточненной Г-образной схемы замещения асинхронной машины // Электричество. 2005. № 8. С. 48-51.

**CALCULATION AND CONSTRUCTION OF THE STARTING
CHARACTERISTICS OF THE ASYNCHRONOUS MOTOR
BY CATALOG DATA**

K.M. Fattakhov

Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

R.K. Fattakhov

Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia

e-mail: rfattakhov@gmail.com

Abstract. *The article gives an expression for determining the resistance and the equivalent circuit of magnitude of the rotor and stator induction motor considering magnetic saturation and displacing of-current. The article considers the basic assumptions to simplify the construction of the starting characteristics. The methods for the construction of mechanical and current characteristics of an induction motor are provided.*

Keywords: *induction motor equivalent circuit, speed-torque characteristic, starting characteristics*

References

1. Elektricheskie mashiny: spravochnik (Electrical machines: handbook). In 2 volumes. Eds.: I.P. Kopylov, B.K. Klokov. Moscow, Energoatomizdat. Volume 1. 1988. 568 p.; Volume 2. 1989. 688 p.
2. Katsman M.M. Spravochnik po elektricheskim mashinam (Handbook of electric machines). Moscow, Academiya, 2005. 480 p.
3. Fattakhov K.M., Fattakhov R.K. Metod opredeleniya parametrov skhemy zameshcheniya asinkhronnoi mashiny po pasportnym i kataloghnym dannym (The method of determining the parameters of the equivalent circuit of induction machine by specification and catalog details: sb. st.), *Elektroprivod, elektrotekhnologii i elektrooborudovanie predpriyatii (Electric drives, electrical technology and electrical equipment of enterprises: a collection of articles)*, Ufa, UGNTU, 2011. PP. 123 - 131.
4. Fattakhov K.M., Fattakhov R.K. Obosnovanie vozmozhnosti ispol'zovaniya metoda opredeleniya parametrov skhemy zameshcheniya asinkhronnoi mashiny po pasportnym i kataloghnym dannym (Justification of the possibility of using the method of parameters determination of the equivalent circuit for induction machine by passport and catalog details), *Elektroprivod, elektrotekhnologii i elektrooborudovanie predpriyatii (Electric drives, electrical technology and electrical equipment of enterprises: a collection of articles)*, Ufa, UGNTU, 2011. PP. 131 - 139.
5. Fattakhov K.M., Fattakhov R.K. Raschet rabochikh kharakteristik asinkhronnoi mashiny po pasportnym i kataloghnym dannym (The calculation of performance curves of asynchronous machine by passport and catalog details). *Elektro-*

privod, elektrotekhnologii i elektroobo-rudovanie predpriyatii (Electric drives, electrical technology and electrical equipment of enterprises: a collection of articles), Ufa, UGNTU, 2011. PP. 148 - 157.

6. Proektirovanie elektricheskikh mashin (Design of electric machines). Ed.: I.P. Kopylov. Moscow, Vysshaya shkola, 2002. 757 p.

7. Proektirovanie elektricheskikh mashin (Design of electric machines). Ed.: P.S. Sergeev. Moscow, Energiya, 1969. 632 p.

8. Fattakhov K.M. Formula Klossa, poluchennaya s ispol'zovaniem utochnennoi G-obraznoi skhemy zameshcheniya asinkhronnoi mashiny (The Kloss formula obtained using a refined L-shaped equivalent circuit of an asynchronous machine), *Elektrichestvo - Electrical Technology Russia*, 2005, Issue 8, pp. 48 - 51.