

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПУСКОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Федоров М.М., Василенко Д.В.

Донецкий национальный технический университет

Вареник Е.А.

УкрВНИИВЭ

*The paper deals with the refinement possibilities of asynchronous motor's starting characteristics with allowance for a minimum power of heat generation. With the concrete example is expounded the verification for rotor winding impedance changing laws during starting.*

*It was considered the refinement possibilities of starting characteristics under fixed starting torque, with allowance for a geometrical slot dimensions, electromagnetic features.*

*It was considered the basic ways of assurance adjustable current deficiency law in the rotor winding circuit to obtain dependence of rotor impedance from slip function, that allows get best performance of starting characteristics.*

Асинхронные двигатели (АД) отличаются простой конструкцией и высокой надежностью при эксплуатации, что обеспечивает их широкое применение (более 90% всех используемых в промышленности электродвигателей) в качестве электропривода различных механизмов). Вместе с тем АД имеют существенный недостаток – плохие пусковые характеристики. Двигатели общепромышленного применения в момент пуска имеют большой ток  $I_n = (6 \div 8) I_n$  и малый момент  $M_n = (0,3 \div 0,6) M_n$ . Повышенным потерям в обмотках  $P_n \equiv I^2$  и длительности пуска  $t_n$  соответствует повышенная мощность источников тепловыделения  $W_n \equiv I_n^2 \cdot t_n$ , а, следовательно, рост температуры обмоток. Это особенно опасно для АД, работающих в повторно-кратковременных режимах с частыми пусками (S4, S5).

Методы улучшения пусковых характеристик АД известны. Прежде всего – это введение добавочного сопротивления в цепь обмоток ротора  $R_{2доб}$ , благодаря чему получают двойной положительный эффект – уменьшение пускового тока  $I_n$  и увеличение пускового момента  $M_n$ . Для этого АД выполняют с фазным ротором, что усложняет его конструкцию и делает более дорогостоящим по сравнению с короткозамкнутыми роторами. Пуск АД с фазным ротором делают многоступенчатым с постепенным уменьшением сопротивления в цепи ротора. Это дает возможность улучшить пусковые характеристики АД. Двигатели с короткозамкнутым ротором выполняют с двойной клеткой или с глубокими пазами. Благодаря эффекту вытеснения тока в роторе в некоторой степени удается регулировать величину сопротивления обмотки ротора и получать улучшенные пусковые характеристики.

Целью данной работы является обоснование законов изменения сопротивления обмотки ротора, при которых мощность источников тепловыделения при пуске  $W_n$  была бы минимальной, а также возможные пути получения этих зависимостей для короткозамкнутых асинхронных двигателей.

Функциональная зависимость сопротивления  $R_2(s)$  обмотки ротора от скольжения  $s$  определяет временную зависимость электромагнитного момента  $M(t)$  в процессе пуска, а, следовательно, и пусковые характеристики такие, как угловое ускорение  $d\omega/dt$ , частоты вращения  $\omega(t)$  и др. При поддержании электромагнитного момента  $M = \text{const}$  и моменте сопротивления на валу  $M_c = \text{const}$  имеет место плавный пуск с постоянным ускорением  $d\omega/dt$  и прямолинейным законом нарастания частоты вращения, что, как правило, является благоприятным фактом для работы системы электропривода. Для получения подобных зависимостей  $R_2(s)$  можно воспользоваться известными соотношениями из теории АД [2]. В табл. 1 в качестве примера приведены величины сопротивления цепи ротора в относительных единицах  $R_2^* = (R_2 + R_{2доб})/R_2$  при различных значениях скольжения  $s$  АД типа 4АК200М4У3. Величины момента в процессе пуска поддерживались постоянными и соответственно равными  $M_n$ ,  $1,5 \cdot M_n$ ,  $2,0 \cdot M_n$ ,  $2,5 \cdot M_n$ ,  $3,0 \cdot M_n$  и  $3,5 \cdot M_n = M_{\text{max}}$ . В табл. 1 приведены также относительные токи обмоток статора  $I_{1n}^* = I_n/I_{1n}$  и ротора  $I_{2n}^* = I_n/I_{2n}$ .

Таблица 1

Пусковые характеристики АД 4АК200М4У3.

	S	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
$M_n = M_n$	$R_2^*$	4	8	12	16	20	24	28	32	36	40
	$I_1^*$	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33
	$I_2^*$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$M_n = 1,5 M_n$	$R_2^*$	2,55	5,1	7,65	10,2	12,76	15,31	17,86	20,41	22,96	25,51
	$I_1^*$	1,82	1,82	1,82	1,82	1,82	1,82	1,82	1,82	1,82	1,82
	$I_2^*$	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53

$M_n=2,0M_n$	$R_2^*$	1,81	3,61	5,42	7,22	9,02	10,8	12,6	14,4	16,2	18,1
	$I_1^*$	2,36	2,36	2,36	2,36	2,36	2,36	2,36	2,36	2,36	2,36
	$I_2^*$	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1
$M_n=2,5M_n$	$R_2^*$	1,33	2,67	4	5,33	6,67	8	9,33	10,7	12,0	13,3
	$I_1^*$	2,95	2,95	2,95	2,95	2,95	2,95	2,95	2,95	2,95	2,95
	$I_2^*$	2,74	2,74	2,74	2,74	2,74	2,74	2,74	2,74	2,74	2,74
$M_n=3,0M_n$	$R_2^*$	0,98	2,1	2,97	3,81	4,9	5,89	7,1	8,21	9,11	10,1
	$I_1^*$	3,71	3,71	3,71	3,71	3,71	3,71	3,71	3,71	3,71	3,71
	$I_2^*$	3,53	3,53	3,53	3,53	3,53	3,53	3,53	3,53	3,53	3,53
$M_n=3,5M_n$	$s$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
	$R_2^*$	0,67	1,34	2,01	2,68	3,35	4,03	4,7	5,37	6,04	6,71
	$I_1^*$	4,66	4,66	4,66	4,66	4,66	4,66	4,66	4,66	4,66	4,66
	$I_2^*$	4,57	4,57	4,57	4,57	4,57	4,57	4,57	4,57	4,57	4,57

Из табл. 1 следует, что при поддержании постоянства момента  $M_n$  в процессе пуска изменение сопротивления в цепи ротора  $R_2(s)$  находится в прямой зависимости от скольжения  $s$ , а токи статора и ротора неизменны. При этом следует отметить, что расчеты проводились для двигателей с фазным ротором и индуктивные сопротивления  $X_1$  и  $X_2$  также были приняты постоянными. При учете нелинейной зависимости индуктивных сопротивлений в функции скольжения (из-за насыщения зубцов, эффекта вытеснения и пр.) приведенные выше соотношения были бы несколько иными, однако для суждения о них по средним величинам с определенной степенью допущения можно пользоваться результатами, приведенными в табл. 1.

В табл. 2 приведены расчетные величины времени пуска под нагрузкой  $M_c=M_n$  при различных пусковых моментах. В таблице 2 приведены относительные потери в меди обмотки статора  $P_{M1}^*=I_{n1}^2/I_{n1}^2$  и ротора  $P_{M2}^*=I_{n2}^2/I_{n2}^2$ , а также дана оценка изменения мощности источников тепловыделения в процессе пуска  $W_{п}^*=(P_{M1}+P_{M2})t_{п}/(P_{M1н}+P_{M2н})$ .

Таблица 2

Характеристики источников тепла при пуске АД 4АК200М4У3.

	$1,5M_n$	$2,0M_n$	$2,5M_n$	$3,0M_n$	$3,5M_n$
Время пуска, с	1,48	0,76	0,492	0,372	0,296
$P_{M1}^*$	3,33	5,6	8,71	14,1	21,7
$P_{M2}^*$	2,33	4,41	7,43	12,4	20,7
$W_{п}^*$	11,24	19,92	32,16	52,8	84,8

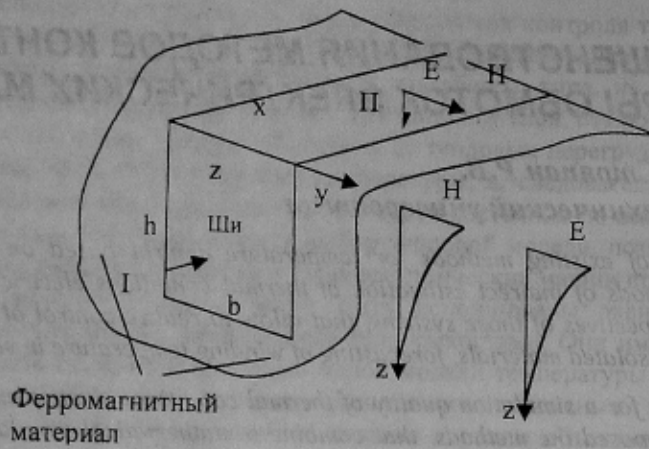
Для получения приведенных выше хороших пусковых характеристик у короткозамкнутых АД необходимо, чтобы закон вытеснения тока ротора у двухклеточных (или глубокопазных) двигателей обеспечил необходимую зависимость  $R_2(s)$  при пуске. Последнее означает, что процесс вытеснения тока должен быть регулируемым и задан на этапе проектирования АД.

У современных глубокопазных и двухклеточных двигателей удалось повысить величину пускового момента до  $1,5M_n$ . Однако, пусковой ток остался равным  $(6\div 8)I_n$  [1]. Это можно объяснить тем, что эквивалентное активное сопротивление в цепи ротора  $R_{23}$  в момент пуска недостаточно велико. Максимальный момент  $M_{\max}$  имеет место при скольжениях  $s_{\max}<1$ . Как следует из табл. 1 даже при  $M_n=M_{\max}$  величина пускового тока находится в пределах  $(4\div 5)I_n$  и для его уменьшения требовалось обеспечить в цепи ротора большое увеличение  $R_2$  (см. табл. 1), так что  $M_{\max}$  имело место при скольжениях  $s_{\max}>1$ . Кроме того, в момент пуска имеет место уменьшение  $X_2$ , что также способствует увеличению токов в обмотке.

Рассмотрим возможные случаи получения необходимого закона  $R_2(s)$  в пазу короткозамкнутого двигателя. В общем случае картина движения электромагнитной волны в пазу при питании синусоидальным током  $I$  имеет вид (рис. 1)

	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
$R_2$	0,67	1,34	2,01	2,68	3,35	4,03	4,7	5,37	6,04	6,71	7,38
$I_1$	4,66	4,66	4,66	4,66	4,66	4,66	4,66	4,66	4,66	4,66	4,66
$I_2$	4,57	4,57	4,57	4,57	4,57	4,57	4,57	4,57	4,57	4,57	4,57
$s$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1





Ферромагнитный материал

Рис. 1. – Характеристики электромагнитной волны в пазу.

Здесь  $\vec{H}$  и  $\vec{E}$  – комплексные векторы напряженности магнитного и электрического полей.  $\vec{\Pi} = [\vec{E} \cdot \vec{H}]$  – вектор Умова-Пойнтинга. Электромагнитная волна распространяется в направлении вектора  $\vec{\Pi}$ . По мере ее распространения в сечении стержня проводника обмотки ротора создаются условия для протекания тока. При этом комплексное сопротивление обмотки  $Z$  постепенно изменяется, так что активная его составляющая уменьшается. Глубина проникновения волны  $\Delta$  может быть определена с помощью выражения

$$\Delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \gamma \cdot \mu_a}}, \quad (1)$$

где:  $\omega = 2\pi f$  – угловая частота тока  $I$ ,  $\gamma$  – удельная электрическая проводимость материала обмотки ротора,  $\mu_a$  – абсолютная магнитная проницаемость материала обмотки ротора.

Из вышеизложенного следует, что имеется объективная возможность получения требуемого закона  $R_2(s)$ . Пути реализации этой задачи могут быть разнообразными. Например, выполнение стержней обмотки в виде многослойных. При этом необходимо обосновать величины  $\gamma$  и  $\mu_a$  материала слоя, а также его толщину. Получение необходимого закона  $R_2(s)$  может быть выполнено путем изменения различных геометрических размеров паза и прочее. Решение этих задач связано с расчетами электромагнитных полей с различными граничными условиями, при решении которых можно использовать широко применяемые в настоящее время пакеты прикладных программ. Кроме того, важную роль играет и получение материалов для изготовления стержней обмотки ротора с соответствующими характеристиками. Немаловажную роль играют вопросы технологии при выполнении обмоток короткозамкнутых роторов с многослойными стержнями.

Используя полученные выше зависимости  $R_2(s)$  и основные пути получения этих зависимостей в короткозамкнутых обмотках создают объективную возможность создания АД со значительно улучшенными пусковыми характеристиками.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кравчик А.Э., Шлаф М.М., Афонин В.И., Соболенская Е.А. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник // Энергоиздат, - Москва - 1982.
2. Копылов И.П. Электрические машины // Высшая школа, - Москва – 2000.