

## ПРИМЕНЕНИЕ НОВЫХ УРАВНЕНИЙ АППРОКСИМАЦИИ МЕХАНИЧЕСКОЙ И ТОКОВОЙ ХАРАКТЕРИСТИК ДЛЯ АНАЛИЗА ПУСКОВЫХ СВОЙСТВ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Представлено універсальні співвідношення для апроксимації моментної і струмової характеристик асинхронних двигунів при різній конструкції ротора, наведено приклади використання цих співвідношень для розрахунку й порівняльного аналізу перехідних процесів при пуску АД.

При практическом рассмотрении процесса пуска АД, который в большинстве случаев производится включением обмотки статора на полное напряжение сети, электромагнитные переходные процессы обычно не принимаются во внимание, как имеющие ничтожно малую постоянную времени, и решается уравнение механического равновесия агрегата «двигатель–исполнительный механизм»:

$$M = M_c + M_\delta, \quad (1)$$

где  $M_\delta = J_p \frac{d\Omega}{dt} = J_p \Omega_0 \frac{ds}{dt}$  – динамический момент, пропорциональный моменту инерции  $J$ ;  $M_c$  – момент сопротивления механизма;  $\Omega$  – угловая скорость;  $\Omega_0$  – синхронная угловая скорость;  $s$  – скольжение.

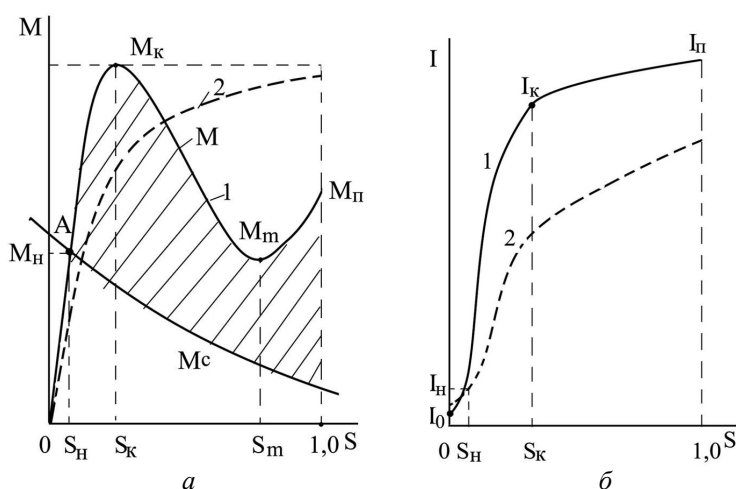


Рис. 1

Графическое представление уравнения (1) показано на рис. 1 а. Точка А на этом рисунке соответствует установившемуся режиму с номинальным моментом  $M_n$ , а заштрихованная область – моменту избыточному. На рис. 1 б показана типичная токовая характеристика серийного АД с короткозамкнутым ротором. Пунктирные кривые на графиках рис. 1 соответствуют механической и токовой характеристикам АД с двухслойным ротором [3]. Они будут востребованы далее при сравнительной оценке влияния конструкции ротора на пусковые свойства АД.

В справочных данных на серийные АД [2] приводятся все основные параметры, относящиеся к названным характеристикам ( $M_n$ ,  $s_n$ ,  $M_k$ ,  $s_k$ ,  $M_m$ ,  $s_m$ ,  $M_n$ ,  $I_0$ ,  $I_n$ , момент инерции ротора  $J_p$ , время пуска вхолостую  $t_{n0}$ , допустимое число пусков в час и другие), а по этим параметрам всегда имеется возможность воспроизвести статические кривые  $M = f(s)$  и  $I = f(s)$  и использовать их для расчетов и анализа режимов работы агрегата.

Для аппроксимации кривой момента АД издавна используется известная формула Клосса:

$$\frac{M}{M_k} \approx 2 \left/ \left( \frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} \right) \right., \quad (2)$$

для которой при  $s_k = 0,15...0,30$  ошибка в определении  $M/M_k$  составляет 25...30 % [5]. Однако фактически в связи с тем, что параметры схемы замещения АД в переходном процессе не остаются постоянными и, кроме того, при пуске всегда имеет место «провал» напряжения на его зажимах, погрешность в реализации соотношения (2) оказывается существенно больше.

В то же время современные вычислительные возможности ПК снимают ограничения в формировании уравнений, которые воспроизводили бы любые характеристики электрических машин с точностью, необходимой для реализации интеллектуальных систем управления режимами их работы. Это было показано, например, в работе [4] при аппроксимации статических кривых намагничивания различных магнитных материалов или в [1] – для специальных двигателей.

Таковыми уравнениями для рассматриваемых характеристик АД могут быть следующие зависимости:

- для тока статора  $I = f(s)$

$$I_1(s) = \kappa_0 \cdot \arctg a_0(s - x_1) + p_0 s + c_0; \quad (3)$$

- для электромагнитного момента  $M = f(s)$ , при  $0 \leq s \leq s_k$  – полиномиальная

$$M_1(s) = a_1 s^5 + b_1 s^4 + c_1 s^3 + r_1 s^2 + p_1 s + q_1 \quad (4)$$

и при  $s_k \leq s \leq 1,0$  – гиперболическая

$$M(s) = a_2 s + b_2 + \frac{\kappa_2}{s - c_2} \quad (5)$$

зависимости.

Зона сочленения двух участков механической характеристики  $M(s)$  составляет  $\Delta s = 0,01...0,02$ . Степень зависимости вращающего момента АДКР от напряжения принимается квадратичная, для тока статора она составляет 1,3.

Кривая момента сопротивления ряда механизмов (центробежных насосов, гребных винтов)  $M = f(s)$  (рис. 1 а) аппроксимируется квадратичной параболой

$$M_c(s) = a_3 s^2 + b_3 s + c_3. \quad (6)$$

Входящие в уравнения (3)...(6) постоянные коэффициенты определяются с использованием справочных или реальных экспериментальных данных исследуемого двигателя по специальной программе в среде Mathcad.

Приведем для примера результаты аппроксимации характеристик АД серии 4АН315S4 (200 кВт, 1500 об/мин), имеющего исходные параметры [2]:  $M_H=1; I_H=1; s_H=0,018; M_k=2,0; s_k=0,06; M_m=0,9; s_m=0,9; I_n=6,5; M_n=1,2; t_{n0}=0,3$  с. Значение пускового тока для зоны критического скольжения определено по результатам осциллографирования процесса пуска типичного АД и принято равным  $I_k=5,8$ .

Результаты аппроксимации характеристик в относительных единицах приведены на рис. 2 а и б (сплошные линии), погрешности на всем диапазоне скольжений по отношению к справочным не превышают 1 %.

Имея инструмент столь точного представления стати-

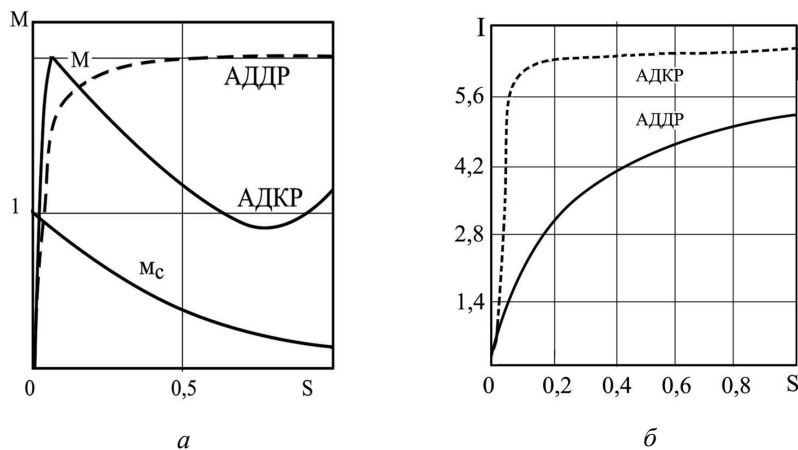


Рис. 2

ческих механической и токовой характеристик АД, можно также достаточно точно рассчитать его основные пусковые свойства – время пуска и потери энергии для реальных условий, сравнить эти показатели для различных типов АД и т.д.

Длительность пуска АД при наличии статического и динамического моментов на валу определяется по соотношению [2]

$$t_n = t_{n0} \frac{F_1}{\kappa_m}, \quad (7)$$

где  $t_{n0}$  – длительность пуска при отсутствии момента сопротивления (вхолостую);  $F_1 = (J_p + J_m)/J_p$  – коэффициент инерции;  $J_p$  и  $J_m$  – динамический момент инерции ротора и приведенный к валу динамический момент инерции исполнительного механизма;  $\kappa_m$  – коэффициент, определяемый обычно зависимостью статического момента сопротивления  $M_c$  от частоты вращения двигателя,  $m_c = \frac{M_c}{M_H} = f(n/n_c)$ , и механической характеристикой АД.

Применительно к рис. 2 а выражение для коэффициента  $\kappa_m$  может быть записано в виде

$$\kappa_m = \int_{s_H}^1 [M(s) - M_c(s)] ds, \quad (8)$$

а с учетом квадратичной зависимости вращающего момента АД с короткозамкнутым ротором от подводимого напряжения соотношение (7) приобретает вид

$$t_n = t_{n0} \frac{F_1}{\kappa_{m1} \kappa_U^2 - \kappa_{m2}}, \quad (9)$$

где  $\kappa_{m1} = \int_{s_H}^1 M(s) ds$ ;  $\kappa_{m2} = \int_{s_H}^1 M_c(s) ds$ .

Результаты решения этого уравнения для АД 4АН315S4 (200 кВт, 1500 об/мин) представлены на рис. 3 а, из которого ясно видно решающее влияние на время пуска коэффициента инерции  $F_1$  и падения напряжения  $\kappa_U$ . При пуске вхолостую, например, при падении напряжения на 20 % ( $\kappa_U = 0,8$ ) время пуска возрастает до 1 с (точка А), а при увеличении коэффициента инерции до значения  $F_1 = 3$  время пуска составляет 2,45 с (точка В на рис. 3 а).

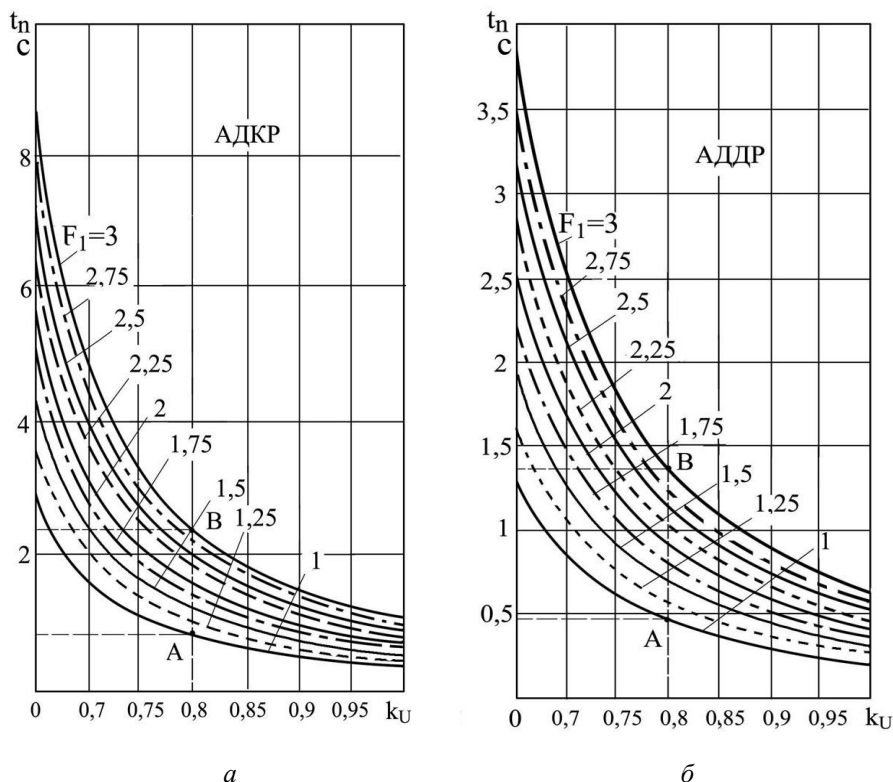


Рис. 3

Еще более наглядное представление о качестве пуска АД и влиянии на него различных факторов можно получить, если учесть особенности конструкции ротора. Вернемся к рис. 1, на котором пунктиром показаны типичные характеристики АД с двухслойным ротором. При замене короткозамкнутого ротора двухслойным механическая характеристика становится «мягкой», несколько увеличиваются номинальные скольжение и ток холостого хода, однако в начальный момент пуска (при  $s = 1$ ) существенно увеличивается вращающий момент  $M_n$  (до значений  $M_k$  АДКР) и снижается ток  $I_n$  (на 30...35 %), при этом важно отметить изменение характера кривой тока с плавным его снижением по мере разгона АД. Для АД 4АН315S4 при замене короткозамкнутого ротора двухслойным основные его параметры приобретают следующие значения:  $I_0=0,5$ ;  $s_n=0,025$ ;  $I_n=1,2$ ;  $s_k=0,4$ ;  $I_k=4,0$ ;  $M_k=1,65$ ;  $I_n=5,5$ ;  $M_n=2,0$ .

Уравнения для аппроксимации характеристик АДДР могут быть записаны в следующем виде:

$$\text{- для тока} \quad I_\partial(s) = \kappa_{\partial\partial} \cdot \arctg[a_{0\partial}(s - x_{1\partial}) + p_{0\partial}s + c_{0\partial}]; \quad (10)$$

$$\text{- для момента} \quad M_\partial(s) = \kappa_\partial \cdot \arctg[a_\partial(s - x_\partial)] + c_\partial. \quad (11)$$

Для приведенных параметров аппроксимированные кривые  $M_\partial = f(s)$  и  $I_\partial = f(s)$  представлены на рис. 2 (пунктирные линии), при этом необходимо учитывать, что степень зависимости электромагнитного вращающего момента АДДР от напряжения составляет 2,4, а для тока – 1,5 [3].

На рис. 3 б показаны кривые времени пуска АДДР в зависимости от изменения параметров  $\kappa_U$  и  $F_1$ ; как видно, по сравнению с короткозамкнутым ротором при одинаковых начальных условиях (значениях  $F_1$  и  $\kappa_U$ ) время пуска АДДР примерно в два раза меньше, чем у АДКР.

Рассмотрим теперь возможность использования аппроксимированных кривых для расчета пусковых потерь. Как известно, потери энергии в обмотках статора  $A_1$  и ротора  $A_2$  за время пуска равны

$$A_1 = 3 \int_0^{t_n} I_1^2 r_1 dt; \quad A_2 = 3 \int_0^{t_n} (I_2')^2 r_{2n}' dt, \quad (12)$$

где  $r_1$  и  $r_2'$  – активные сопротивления обмотки статора и приведенной обмотки ротора при пуске.

При больших скольжениях токами холостого хода можно пренебречь и принять, что  $I_1 \approx I_2'$ , поэтому общие потери получатся равными

$$A_n = 3 \int_0^{t_n} I_1^2 (r_1 + r_{2n}') dt. \quad (13)$$

Использовать зависимости (12) и (13) для оценки потерь энергии при пуске возможно, представив их в виде

$$A = 3 \cdot I_{ncp}^2 \cdot r \cdot t_n, \quad (14)$$

$$\text{где} \quad I_{ncp} = I_n \cdot \frac{K^n U}{1 - s_n} \cdot \int_s^1 I(s) ds; \quad (15)$$

$n=1,3$  – для короткозамкнутого ротора;  $n=1,5$  – для двухслойного ротора.

Можно также преобразовать зависимости (12) и (13) путем замены переменной  $t$  на переменную  $s$ . Если в уравнении (1) дифференциал времени выразить через дифференциал скольжения

$$dt = J\Omega \frac{1}{M - M_c} ds,$$

а ток – через вращающий электромагнитный момент из уравнения

$$M = \frac{P_{эм}}{\Omega_0} = 3(I'_2)^2 \frac{r'_2}{s} \frac{1}{\Omega_0},$$

то потери энергии составят

$$A_1 = J\Omega_0^2 \int_{s_H}^{1,0} \frac{M}{M - M_c} \frac{r_1}{r'_{2n}} ds; \quad A_2 = J\Omega_0^2 \int_{s_H}^{1,0} \frac{M}{M - M_c} ds; \quad A = J\Omega_0^2 \int_{s_H}^{1,0} \frac{M}{M - M_c} (1 + \frac{r_1}{r'_{2n}}) ds. \quad (16)$$

Потери энергии в роторе при пуске вхолостую определяются кинетической энергией вращающихся масс и равны

$$A = \frac{1}{2} \cdot J_p \cdot \Omega_0^2. \quad (17)$$

Таким образом, потери энергии при пуске АД при прочих равных условиях (момент инерции, угловая скорость вращения поля статора) определяются как характером изменения электромагнитного момента, так и величиной избыточного момента и соотношением параметров ротора и статора и могут быть рассчитаны по аппроксимированным кривым тока и момента.

На рис. 4 показаны кривые изменения суммарных потерь при пуске АД 4АН315 (200 кВт, 1500 об/мин), рассчитанные по соотношениям (13)...(15) при принятых диапазонах момента инерции  $F_1$  и напряжения на зажимах  $\Delta U$ , а также при различных роторах – короткозамкнутом и двухслойном.

Из рис. 4 ясно видны зависимости этих потерь от названных параметров, при этом воздействие «провала» напряжения проявляется в том большей степени, чем больше относительный момент инерции вращающихся масс. Что же касается влияния конструкции ротора, то для варианта двухслойного ротора суммарные потери энергии в АД снижаются в среднем более чем в два раза, а потери в обмотке статора  $A_1$ , рассчитанные по соотношению (12) для АДДР, более чем в 4 раза меньше, чем в АДКР.

### Выводы

1. Приведенные соотношения для аппроксимации позволяют с высокой точностью воспроизвести механические и токовые характеристики АД, используя доступные справочные или экспериментальные данные реальных двигателей. Подобные же зависимости могут быть использованы и для аппроксимации других характеристик электрических машин.

2. Предложенные уравнения аппроксимации могут быть эффективно использованы для расчета параметров переходных процессов в АД – пусков, реверсов, торможений с учетом реальных параметров сети и особенностей исполнительного механизма.

3. Задачами дальнейших исследований в этом направлении мы видим поиски соотношений для аппроксимации реально действующих в ЭП переходных и установившихся параметров – токов, моментов, частоты, напряжения и других, что позволит в реальном масштабе времени выстраивать алгоритмы управления режимом работы электропривода.

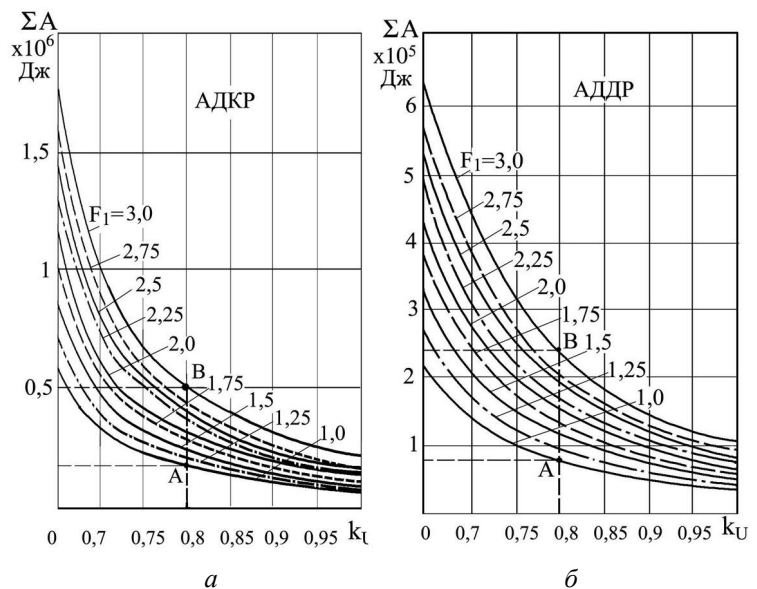


Рис. 4

*Представлены универсальные соотношения для аппроксимации моментной и токовой характеристик асинхронных двигателей при различной конструкции ротора, приведены примеры использования этих соотношений для расчета и сравнительного анализа переходных процессов при пуске АД.*

*Universal correlations are presented for approximation of moment and current descriptions of asynchronous engines at the different construction of rotor, the examples of the use of these correlations are resulted for a calculation and comparative analysis of transients at starting AD.*

1. Зинченко Е.Е., Финкельштейн В.Б. Методика аппроксимации кривых намагничивания вентильных индукторно-реактивных двигателей // *Електротехніка і електромеханіка*. – № 1. – С. 16.
2. Кравчик А.Э., Шлаф М.М., Афонин В.И., Соболенская Е.А. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник. – М.: Энергоиздат, 1982. – 504 с.
3. Могильников В.С., Олейников А.М. Асинхронные двигатели с двухслойными роторами (теория, технология и режимы работы) – Севастополь. – Изд. СевНТУ. – 2008. – 350 с.
4. Никитин О.П., Олейников А.М. Использование машинных методов для аппроксимации кривых намагничивания // *Изв. ВУЗов «Электромеханика»*, 1986. – № 6. – С. 33–35.
5. Петров Л.П. Управление пуском и торможением асинхронных двигателей. – М.: Энергоиздат, 1981. – 184 с.

Надійшла 23.10.2009