

УТОЧНЕННЫЙ РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ И ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

Галиновский А.М., к.т.н., доцент, Дубчак Е.М., старший преподаватель, Ластивка А.В., студент

КПИ им. Игоря Сикорского, кафедра электромеханики

Введение. В технической литературе большое внимание уделяется вопросам совершенствования методик определения параметров и характеристик асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором (АД) как при проектировании, так и при эксплуатации. Большое количество методов определения электромагнитных параметров АД разделены на группы, выделены особенности их применения, преимущества и недостатки [3]. Вместе с тем, в учебнике «Проектирование электрических машин» [2] методы расчетов характеристик АД базируются на системе уравнений токов и напряжений Г-образной схемы замещения. Расчеты проводятся с рядом допущений.

В работах [4, 5] расчеты короткозамкнутых асинхронных машин (АМ) проведены по автоматизированным методикам с учетом нелинейных изменений всех параметров Т-образной схемы замещения. Новые методики позволяют рассчитывать характеристики АМ в режимах двигателя и генератора при изменении параметров сети, при разных законах изменения нагрузки и момента приводного двигателя, разрабатывать рекомендации по изменению параметров базовой АМ для улучшения ее технико-экономических показателей.

Цель работы: сопоставительный анализ параметров и характеристик АД, рассчитанного по автоматизированной методике кафедры электромеханики, с каталожными данными, разработка рекомендаций по дальнейшему совершенствованию методики расчета.

Ниже приведены результаты сопоставительного анализа параметров и характеристик АД типа 4А200S8У3 мощностью 18.5 кВт, проводится анализ влияния некоторых допущений работы [2] на конечные результаты расчетов.

При расчетах применены параметры Г-образной схемы замещения АД серии 4А, приведенные в каталоге [1].

Материалы и результаты исследований. Т-образная и Г-образная схемы замещения АД показаны на рис. 1.

На рис. 1, б: U_{1c} – напряжение сети; E_{δ} – результирующая ЭДС; $I_1, I_2, I_{\delta}, I_{10}, I_{20}$ – токи статора, ротора и намагничивающего контура; x_1, r_1, x_2, r_2 – сопротивления обмоток статора и ротора; s – скольжение; x_m, r_{10}, r_{20} – сопротивления намагничивающего контура. Параметры ротора приведены к статору.

Активные сопротивления намагничивающего контура:

$$r_{10} = r_{1050} \cdot (50/f_1)^{\beta}; \quad r_{20} = r_{2050} \cdot (50/f_2)^{\beta}, \quad (1)$$

где f_1 – частота сети, f_2 – частота ротора, β – показатель степени, зависящий от марки и толщины листа стали магнитопровода. Сопротивления намагничивающего контура при частотах $f_1 = f_2 = 50$ Гц: $r_{1050} = 3 \cdot E_{\delta}^2 / p_{1050}$; $r_{2050} = 3 \cdot E_{\delta}^2 / p_{2050}$, где p_{1050} ; p_{2050} – удельные потери в стали при частотах $f_1 = f_2 = 50$ Гц.

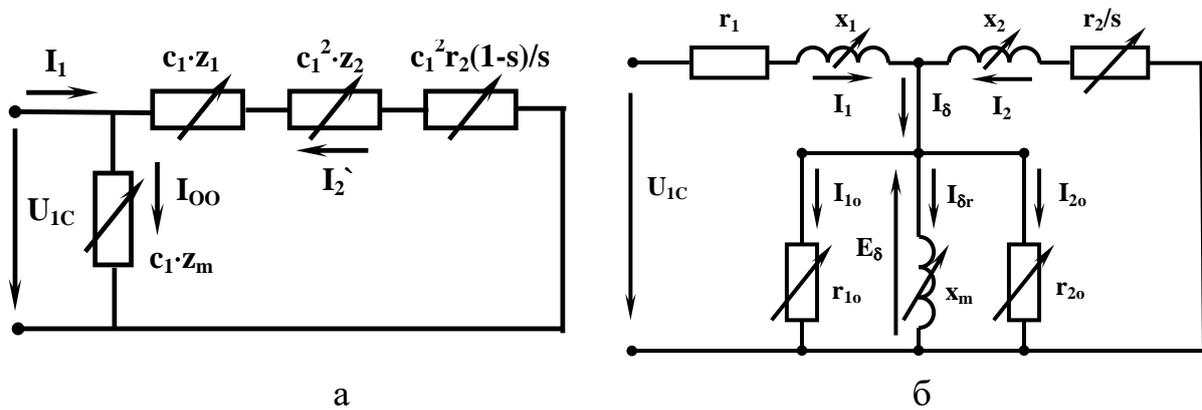


Рисунок 1 – Г-образная (а) и Т-образная (б) схемы замещения АД

Расчет АД проводится при неизменном напряжении сети [4]. Вначале задается массивом скольжения s и начальным значением величины ЭДС $E_{\delta H}$. Для определенных значений величин s и $E_{\delta H}$ рассчитываются токи \dot{I}_{δ} , \dot{I}_2 и \dot{I}_1 .

$$\dot{U}_{1c} = -E_{\delta H} e^{j0} + \dot{I}_1 r_1 + j \dot{I}_1 x_1.$$

$$\text{Уточненное значение ЭДС } E_{\delta} = E_{\delta H} / |U_{1c} / U_1|.$$

Погрешность расчета $\varepsilon_u = |1 - U_{1c} / U_1|$. Если погрешность больше заданной величины, повторяем расчет с уточненным значением E_{δ} .

Основные и добавочные потери в стали АД

В работе [2] параметры характеристики АД рассчитываются по Г-образной схеме замещения (рис. 1, а) с точным ($\dot{c}_1 = 1 + \dot{z}_1 / \dot{z}_m$) или упрощенным значениями коэффициента:

$$c_1 = 1 + z_1 / z_m; \quad \dot{c}_1 = 1 + x_1 / x_m \quad (2)$$

Коэффициент c_1 , рассчитанный для синхронного холостого хода, в рабочем режиме АД принимается неизменным. Небольшая корректировка коэффициента проводится лишь при расчете пусковых характеристик или режимов работы АД с большими скольжениями [2]. На основании этого авторы утверждают: «Теоретически асинхронная машина может работать в диапазоне скольжения $s = -\infty \div \infty$ ».

На рис. 2 показаны коэффициенты c_1 , \dot{c}_1 АД типа 4А200S8У3 при $s = 0 \div 1$. Как видно из рис. 2, в режиме пуска АД величина c_1 практически постоянная. Однако в соответствии с (1) и (2) при $s \rightarrow |\infty|$: $f_2 \rightarrow |\infty|$; $r_{20} \rightarrow 0$; $z_m \rightarrow 0$; $c_1 \rightarrow |\infty|$. Поэтому даже теоретически АД не может работать в диапазоне скольжения $s = -\infty \div \infty$. Это отмечается в работе [4].

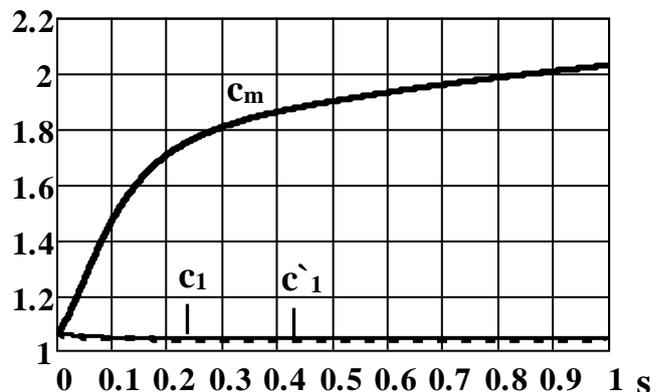


Рисунок 2 – Расчетные коэффициенты c_1 , \dot{c}_1 , c_m в зависимости от скольжения

В работе [2] принимается, что дополнительные потери холостого хода ($P_{сдΣ}$) практически не изменяются при нагрузке машины. Отмечено, что дополнительные потери при нагрузке могут достигать 1...2 % (и даже больше) от подведенной мощности. Однако в соответствии ГОСТ 11828-86 расчетные дополнительные потери при номинальной нагрузке (p_{dN}) принимают равными 0,5 % от номинальной потребляемой мощности. Это значит, что ГОСТ необоснованно рекомендует повышать КПД проектируемой машины. При расчетах потерь АД в режимах, отличных от номинального, дополнительные потери при нагрузке пропорциональны квадрату тока статора: $p_d = p_{dN} (I_1/I_{1N})^2$.

На рис. 3 показаны основные (а) и добавочные (б) потери в стали АД типа 4А200S8У3 при $s = 0 \div 1$. Принятые обозначения: P_{CO1} , P_{CO2} , $P_{COΣ}$ – основные потери в стали статора, ротора и суммарные; P_{C2P} , P_{C2S} – пульсационные и поверхностные потери в стали ротора. Пульсационные потери существенно изменяются при изменении скольжения.

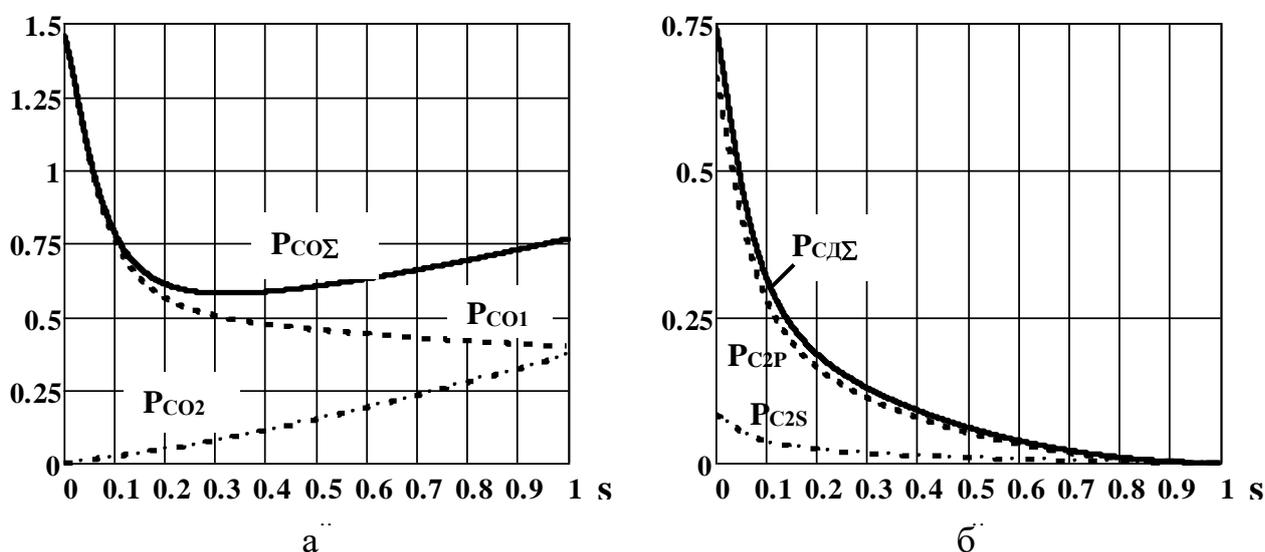


Рисунок 3 – Основные (а) и добавочные (б) потери в стали АД в % от P_{2N}

Пусковые характеристики АД

Электромагнитный момент [4]:

$$M_{ЭМ} = \frac{m_1 \cdot p}{\omega_1} \cdot \frac{k_E^2 \cdot U_{1c}^2 \cdot r_2 / s}{x_2^2 + (r_2 / s)^2}, \text{ где } k_E = 1/c_m \text{ (} c_m \text{ определяется по рис. 2).}$$

$$\text{В номинальном режиме } M_{ЭМN} = \frac{m_1 \cdot p}{\omega_1} \cdot \frac{k_{EN}^2 \cdot U_{1c}^2 \cdot r_2 / s_N}{x_2^2 + (r_2 / s_N)^2}.$$

Электромагнитный момент в относительных единицах (о.е.):

$$M_{o.e.} = \frac{M_{ЭМ}}{M_{ЭМN}} = \frac{k_E^2 \cdot s_N \cdot r_2}{k_{EN}^2 \cdot s \cdot r_{2N}} \cdot \frac{x_{2N}^2 + (r_{2N} / s_N)^2}{x_2^2 + (r_2 / s)^2}. \quad (3)$$

Механические характеристики исследуемого АД показаны на рис. 4. Моменты M_{Π} и M'_{Π} рассчитаны при $P_{сд\Sigma} = 0$, $p_d = 0$. Момент M'_{Π} рассчитан по (3). Момент M_w рассчитан с учетом дополнительных потерь нагрузки при $p_{д,N} = 0.5\%$ от P_{1N} .

В таблице 1 приведено сопоставление расчетных параметров АД с данными каталога [1]. Расчетные величины критического и пускового моментов намного меньше каталожных данных. Существенно отличаются и величины номинального и критического скольжений.

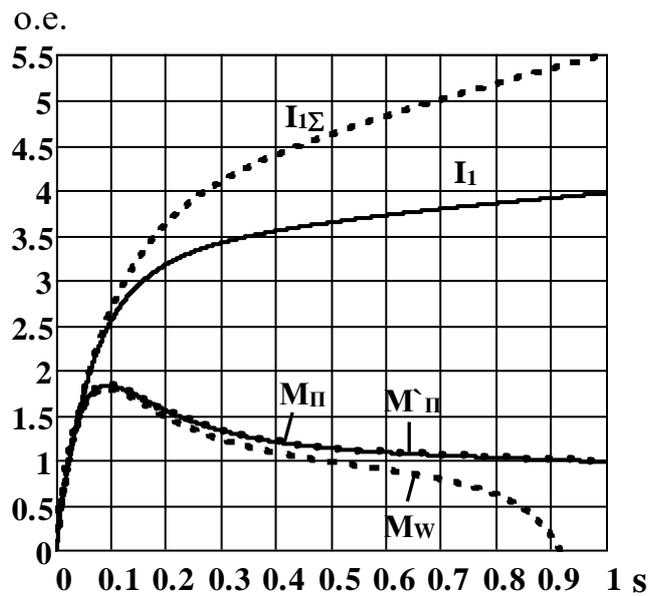


Рисунок 4 – Пусковые характеристики АД типа 4A200S8Y3

Таблица 1

Данные	Параметры схемы замещения в номин. режиме, Ом					КПД, %	$\cos\varphi_N$	Момент о.е.		Скольжение, %		Ток статора, А	
	X_m	R_1	X_1	R'_2	X'_2			M_k	M_{Π}	s_N	s_k	I_{1N}	$I_{1\Sigma\Pi}$
каталог	15.1	0.316	0.72	0.137	0.846	88.5	0.84	2.2	1.2	2.3	13	37.81	189.5
расчет	15.2	0.323	0.78	0.136	0.969	86.53	0.83	1.83	0.98	2.36	9.3	37.77	189.5

Дополнительные потери мощности в о.е. приблизительно равны коэффициенту гармоник переменного тока (k_g) [6]. Принимаем $p_d = k_g$.

Определим дополнительные потери мощности в номинальном режиме.

Обозначения величин: I_1 , $I_{1\Sigma}$ – действующие значения первой гармоники и полного тока статора АД; $\lambda = I_1/I_{1\Sigma}$ – коэффициент искажения тока. В обозначения величин номинального режима работы прибавлен нижний индекс «N», а в обозначения величин при $s = 1$ – индекс «П».

На рис. 4 показана зависимость $I_1 = f(s)$. Пусковой ток $I_{1\Pi} = 4$ о.е.

Принимаем по каталогу [1] $I_{1\Sigma\Pi} = 5.5$ о.е.

Коэффициент искажения тока и коэффициент гармоник при $s = 1$:

$$\lambda_{g\Pi} = I_{1G}/I_{1G\Pi} = 0.727; \quad k_{g\Pi} = \frac{1}{\lambda_{g\Pi}} \cdot \sqrt{1 - \lambda_{g\Pi}^2} = 0.944.$$

Дополнительные потери мощности в номинальном режиме

$$p_{dN} = k_{gN} = \lambda_{g\Pi}^2 / I_{1\Sigma\Pi}^2 = 0.0312.$$

Величина p_{dN} включает дополнительные потери в стали и дополнительные потери при нагрузке.

Коэффициент искажения тока в номинальном режиме [6].

$$\lambda_{gN} = \sqrt{\frac{1}{1+k_{gN}^2}} = 0.9995.$$

Как показано в табл. 1, расчетный КПД ниже каталожной величины примерно на 2 %. Это связано с увеличенной величиной дополнительных потерь в номинальном режиме.

Следует отметить: ток считается практически синусоидальным при $k_g \leq 0.05$ [6]. Это необходимо учитывать при проектировании АД.

По данным табл. 1 расчетная величина индуктивного сопротивления ротора X_2 превышает каталожную величину на 14.5 %. Остальные параметры схемы замещения близки по величине.

Выводы

1. В методике расчетов АД [2] имеются допущения, которые существенно влияют на конечные результаты расчетов. Отметим некоторые из них:

пренебрежение на схеме замещения основными потерями в стали приводит к ошибочному утверждению «...теоретически асинхронная машина может работать в диапазоне скольжения $s = -\infty \div \infty$ »;

в соответствии ГОСТ 11828-86 принимают $p_{dN} = 0.005 P_{1N}$, что приводит к необоснованному повышению КПД проектируемой машины.

2. При учебном проектировании асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором целесообразно:

применять автоматизированную методику расчета по Т-образной схеме замещения с учетом нелинейных изменений всех параметров схемы;

уточнять величину p_{dN} по данным предприятий Украины;

использовать результаты новых исследований параметров и характеристик АД, приведенных в технической литературе.

Перечень ссылок

1. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник/ А.Э. Кравчик, М.М. Шлаф, В. И. Афонин, Е. А. Соболенская. – М.: Энергоиздат, 1982. – 504 с.

2. Проектирование электрических машин: учебник для вузов / под ред. И.П. Копылова. – 4-е изд., перер. и доп. – М.: Издательство Юрайт, 2011. – 767 с.

3. Родькин Д.И. Классификация методов оценивания параметров асинхронных двигателей / Д.И. Родькин, Ю.В. Ромашихин, Н.А. Руденко // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Щоквартальний науково-виробничий журнал.– Кременчук: КрНУ, 2015.– № 4.– С. 25-32.

4. Галиновский А.М., Бобер В.А., Гижицкий Н.А. Расчет механических характеристик асинхронного двигателя при частотном регулировании / Електричні машини та апарати. – НТУУ «Київський політехнічний інститут», 1918 р.

5. Галиновский А.М., Бобер В.А., Баран С.Л. Диаграммы токов и напряжений короткозамкнутой асинхронной машины / Гірничі електромеханіка та автоматика: наук.-техн. зб. – 2019. – Вип. 102.

6. studfile.net/preview/5432908.