

ПУСКОВЫЕ И РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЯХ СЕТИ

Федоров М.М., Алексеев Е.Р., Горелов М.В.

Донецкий государственный технический университет

aer@dc.dn.ua

Operating and start characteristics of asynchronous motors with decreased voltages of the network are investigated in the given work. The methods of calculation of the start and operating characteristics of asynchronous motors with the help of T-mode scheme of substitution with taking into account of the non-linearity of its are described here. the results and analysis of calculation of the MTH-type motors are presented here.

При эксплуатации асинхронных двигателей (АД) нередко имеет место значительное снижение питающего напряжения, являющееся следствием большой энергоёмкости современного производства и существенной удалённости источников питания от электроприводов. Большая концентрация нагрузок может привести к значительному падению напряжения в сети, превышающему допустимое ГОСТом. При этом в повторно-кратковременных режимах работы крупных синхронных и асинхронных электродвигателей с большими пусковыми токами имеют место периодические колебания напряжения. Известно, что понижение напряжения при неизменном моменте на валу ($M=const$) приводит к увеличению тока статора и ротора, снижению максимальной перегрузочной способности и, как следствие, к повышению тепловых нагрузок.

В данной работе ставится задача более точного определения распределения потерь, а следовательно, и возможных тепловых нагрузок в обмотках АД при пониженном напряжении. Для качественной оценки рабочих и тепловых характеристик асинхронного двигателя следует применять Т-образную схему замещения с учетом нелинейности ее параметров, которая позволит более точно рассчитать рабочие и тепловые характеристики АД в случае пусковых режимов при колебаниях напряжения сети. Ниже предлагается методика расчёта рабочих и пусковых характеристик с учётом нелинейной зависимости параметров намагничивающего контура $r_0(U_0)$ и $x_0(U_0)$, тока $I_0(U_0)$, потерь в стали $p_{ст}(U_0)$ от напряжения намагничивающего контура U_0 , а также параметров вторичного контура ($r_2(s)$, $x_2(s)$) от скольжения s .

Указанные зависимости получаются из: опыта измерения сопротивления r_1 обмотки статора постоянным током почти при холодном состоянии, опыта холостого хода, опыта короткого замыкания [1]. Опыты холостого хода проводят при различных напряжениях, измеряя P_0 , U_1 , I_0 и s_0 , по которым формируют зависимости $U_0(I_0)$, $p_{ст}(U_0)$, а также определяют момент холостого хода M_0 и механические потери.

В опыте под нагрузкой на валу ротора должен быть установлен момент сопротивления M_c , при котором ток в обмотке статора равен номинальному. Результаты опыта под нагрузкой используются для определения вторичных параметров схемы замещения при номинальном продолжительном режиме S1. На этом этапе определяют номинальные токи ($I_{0н}$, $I_{2н}$), комплексное сопротивление $z_{0н}$ намагничивающего контура, комплексное сопротивление $z'_{2нс}$, и сопротивления $r'_{2н}$, $x'_{2н}$. Кроме того, определяют мощности и потери в номинальном режиме.

Опыт короткого замыкания проводится с целью определения пускового тока. Опыт проводится при пониженном напряжении $U_{1фк}$ и токе $I_{1к} = I_{1н}$. Фиксируется также мощность $P_{1к}$. По полученным величинам определяют $z'_{2н}$, $r'_{2н}$ и $x'_{2н}$ и далее для короткозамкнутых двигателей формируется $r'_2(s)$ и $x'_2(s)$.

Расчёт пусковых характеристик осуществляется с использованием итерационного цикла для формирования $r_{0н}$ и $x_{0н}$.

Задаёмся $I_{1н}$ (по кратности пускового тока) и ориентировочно определяем U_0 по формуле:

$$U_{0н} = U_1 - I_{1н} z_1.$$

Далее, с помощью зависимостей $U_0(I_0)$ и $p_{ст}(I_0)$ формируется комплексное сопротивление $z_0 = r_0 + jx_0$ намагничивающего контура и уточняется значение U_1 по формулам:

$$\begin{aligned} r_{0н} &= \frac{p_{ст}}{I_{0н}^2}, & z_{0н} &= \frac{U_{0н}}{I_{0н}}, & x_{0н} &= \sqrt{z_{0н}^2 - r_{0н}^2}, \\ I_{1н} &= \frac{U_1}{z_n}, & U_1 &= U_{0н} - I_{1н} z_{1н}. \end{aligned} \quad (1)$$

Комплексы сопротивлений в пусковом режиме рассчитываются по следующим формулам

$$z_1 = r_1 + jx_1, \quad z_{0н} = r_0 + jx_0, \quad z_{2н} = r'_{2н} + jx'_{2н}.$$

$$\underline{z}_n = \underline{z}_1 + \frac{\underline{z}_{2n} \cdot \underline{z}_{0n}}{\underline{z}_{2n} + \underline{z}_{0n}} = z \exp(j\varphi) \quad (2)$$

Далее, сравнивают полученное значение U_1 с заданным и при необходимости повторяем цикл. По окончании итерационного цикла определяют пусковые токи: $I'_{2n} = U_0 / z_{2n}$, $I_0 = U_0 / z_{0n}$ и рассчитывают пусковые мощности, момент и потери.

Рабочие характеристики рассчитывают в следующем порядке: задаемся шагом изменения скольжения Δs , так что $s_i = s_{i-1} - \Delta s$ и рассчитываем параметры последующих i участков. Формируем сопротивление z , для вычисления которого необходимо сформировать значение $z_0 = r_0 + jx_0$, для этого в расчёте предусмотрен следующий итерационный цикл.

Примем $z_0(s_i) = z_0(s_{i-1})$, сформируем общее сопротивление контура

$$\underline{z} = \underline{z}_1 + \frac{\underline{z}_2(s) \cdot \underline{z}_0}{\underline{z}_2(s) + \underline{z}_0} \quad (3)$$

пересчитаем I_1 и U_0 по формулам:

$$I_1 = \frac{U_1}{\underline{z}}, \quad U_0 = U_1 - I_1 z_1 \quad (4)$$

Зная значение U_0 , по кривым $U_0(I_0)$ и $p_{CT}(I_0)$ формируем I_0 и p_{CT} , а затем вычисляем новое значение комплексного сопротивления по формулам $z_0 = r_0 + jx_0$

$$r_0 = \frac{p_{CT}}{3I_0^2}, \quad z_0 = \frac{U_0}{I_0}, \quad x_0 = \sqrt{z_0^2 - r_0^2} \quad (5)$$

По окончании итерационного цикла формируем z_{0i} и рассчитываем комплексы I_{1i} , I_{0i} , I'_{2i} , напряжение U_{0i} , соответствующее скольжению s_i :

$$\underline{z}_i = \underline{z}_1 + \frac{\underline{z}_{2si} \cdot \underline{z}_{0i}}{\underline{z}_{2si} + \underline{z}_{0i}} = z_i \exp(j\varphi_i), \quad \underline{I}_{1i} = \frac{U_1}{\underline{z}_i} \quad (6)$$

$$\underline{U}_{0i} = U_1 - \underline{I}_{1i} z_{1i}, \quad \underline{I}_{0i} = \frac{U_{0i}}{z_{0i}}, \quad \underline{I}'_{2i} = \frac{U_{0i}}{z_{2si}} \quad (7)$$

Мощности и потери, соответствующие точке s_i , определяют по формулам, приведенным в таблице:

Таблица 1. Формулы расчёта электромеханических характеристик асинхронного двигателя с фазным ротором

Название параметра	Формула расчёта
Потребляемая из сети мощность, Вт	$P_{1i} = \text{Re}(3 \underline{I}_{1i}^* \underline{U}_1)$
Потери в меди статора, Вт	$p_{M1i} = 3 I_{1i}^2 r_1$
Электромагнитная мощность, Вт	$P_{ЭМi} = P_{1i} - p_{cmi} - p_{M1i}$
Электромагнитный момент, Н/м	$M_{ЭМi} = P_{ЭМi} / \omega_1$
Потери в меди ротора, Вт	$p_{M2i} = P_{ЭМi} s_i$
Механическая мощность, Вт	$P_{мехi} = P_{ЭМi} - p_{M2i}$
Момент на валу, Н/м	$M_i = M_{ЭМi} - M_0$
Мощность на валу, Вт	$P_{2i} = M_i \omega_2$
Суммарные потери, Вт	$\sum p_i = P_{1i} - P_{2i}$
КПД	$\eta_i = P_{2i} / P_{1i}$
Кратность токов	$\beta_{1i} = I_{1i} / I_{1н}, \beta_{2i} = I_{2i} / I_{2н}$
Добавочные потери в статоре $p_{доб1}$, Вт	$p_{доб1} = p_{добн} (\beta_{1i}^2) / 2$

Название параметра	Формула расчёта
Добавочные потери в роторе $P_{доб2i}$, Вт	$P_{доб2i} = P_{добн} (\beta_{i2}^2) / 2$
Коэффициент нагрузки β_i	$\beta_i = M_i / M_n$
Коэффициент мощности $\cos(\phi_i)$	$\cos(\phi_i) = P_{i1} / (U_1 I_{i1})$

В ходе расчета фиксируем максимальный электромагнитный момент M_{max} и критическое скольжение $s_k = s_{max}$. При $\beta < 1.5$ (на прямолинейном участке механической характеристики $M(s)$) можно одновременно рассчитывать параметры рабочих характеристик при заданных коэффициентах нагрузки β .

В таблице 2 приведены результаты расчета пусковых характеристик АД МТН 111 - 6. В таблицах 3, 4 рабочие характеристики асинхронного двигателя типа МТН 312-6 при напряжениях $U_1 = U_n$ и $U_1 = 0.9U_n$. В таблицах приведены значения в абсолютных и относительных единицах. За базисные приняты величины при $U_1 = U_n$.

Результаты таблицы 2 подтверждают квадратичную зависимость пускового момента от напряжения. Токи обмоток статора и ротора пропорциональны напряжению U_1 , при этом кратность пускового тока обмотки статора при $U_1 = U_n$ составляет 3.15, а в обмотке ротора существенно выше - $\beta_{i2n} = 4.87$. Ток намагничивающего контура заметно уменьшается и при $0.7U_n$ его величина составляет $0.5I_{0n}$. При номинальном напряжении ток холостого хода при пуске невелик ($0.115I_n$) и при расчетах его можно не учитывать.

Таблица 2. Пусковые характеристики двигателя МТН 111 - 6.

U	M_n	β_{Mn}	I_{1n}	β_{i1n}	I_{2n}	β_{i2n}	I_{0n}	β_{i0n}
0.7 U_n	31.7	1.10	20.3	2.21	18.2	3.41	2.4	0.32
0.8 U_n	41.5	1.44	23.2	2.52	20.8	3.90	2.7	0.36
0.9 U_n	52.5	1.82	26.1	2.84	23.4	4.38	3.0	0.41
U_n	64.8	2.25	29.0	3.15	26.0	4.87	3.4	0.45
1.1 U_n	78.3	2.71	31.9	3.47	28.6	5.36	3.8	0.50
1.2 U_n	92.9	3.22	34.9	3.79	31.1	5.83	4.2	0.57

Таблица 3. Рабочие характеристики двигателя МТН 312-6 при $U = U_n$.

β	I_1	β_{i1}	I_2	β_{i2}	I_0	U_0	$P_{ст}$	$P_{м1}$	$P_{м2}$	$P_{мех}$	$P_{доб1}$	$P_{доб2}$	$P_{доб}$
1.5	153.7	1.52	143.1	1.57	25	203.6	503	4678	2139	691	541	577	1118
1.3	131.7	1.3	121.5	1.33	25.6	206.1	515	3436	1523	691	397	413	810
1.1	111.2	1.1	101.2	1.11	26.2	208.2	526	2450	1044	691	283	289	572
1.0	101.3	1.0	91.3	1	26.5	209.2	531	2032	845	691	235	235	470
0.9	91.2	0.9	81.1	0.89	26.7	210.2	536	1647	663	691	190	185	375
0.8	82.5	0.81	72.3	0.79	26.9	211.1	540	1347	523	691	156	147	303
0.6	64.9	0.64	53.9	0.59	27.4	212.4	548	833	288	691	96	82	178
0.4	48.4	0.48	35.6	0.39	27.8	214.2	557	464	194	691	54	36	90

Таблица 4. Рабочие характеристики двигателя МТН 312-6 при $U = 0.9U_n$.

β	I_1	β_{i1}	I_2	β_{i2}	I_0	U_0	$P_{ст}$	$P_{м1}$	$P_{м2}$	$P_{мех}$	$P_{доб1}$	$P_{доб2}$	$P_{доб}$
1.5	169.2	1.67	164.3	1.8	21.3	181.4	400	5667	2378	702	655	761	1416
1.3	143.8	1.42	138.8	1.52	21.7	184.1	412	4097	1952	702	474	543	1017
1.1	120.5	1.19	115	1.25	21.8	185.2	417	2878	1342	702	333	373	706
1.0	109.4	1.08	103.2	1.13	22	187.1	426	2370	1079	702	274	300	574
0.9	99.3	0.98	92.2	1.01	22.1	187.5	430	1952	865	702	226	237	463
0.8	88.1	0.87	81.3	0.89	22.2	187.9	432	1538	670	702	178	186	364
0.6	68.9	0.68	60.3	0.66	22.5	190.6	442	940	368	702	109	102	211
0.4	49.6	0.49	40.2	0.44	22.8	193.1	458	489	165	702	56	45	101

Сравнивая результаты расчетов, приведенных в таблицах 3 и 4, можно сделать вывод, что уменьшение напряжения U_1 приводит к росту токов в обмотках.

При номинальной нагрузке ($\beta = 1$) ток в обмотке статора возрастает на 8%, в обмотке ротора имеет место больший рост – на 13%.

С увеличением нагрузки темп роста токов возрастает и при $\beta = 1.3$ – на 12% и 18% соответственно, а при $\beta = 1.5$ – на 15% и 23%. Уменьшению нагрузки соответствует меньший темп роста токов: при $\beta = 0.8$ – на 6% и 10%, а при $\beta = 0.6$ – на 4% и 7%. При малых нагрузках ($\beta < 0.5$) токи в обмотках практически совпадают с токами при номинальном напряжении U_n .

В случае изменения значения напряжения U_1 “на ходу” (в процессе работы АД) можно воспользоваться следующей методикой. В продолжительном режиме с заданной нагрузкой для расчета распределения потерь в установившемся режиме при различных напряжениях U_1 прежде всего необходимо определить скольжение АД, соответствующее режиму работы с заданным значением коэффициента β . Из условия постоянства нагрузки ($M_c = \text{const}$) имеем

$$P_{эм} = M \cdot \omega_1 = \text{const}.$$

Принимая во внимание, что

$$P_{эм} = 3 \cdot (I_2')^2 \cdot (r_2'/s) = \frac{3 \cdot U_0^2 \cdot (r_2'/s)}{\left((r_2'/s)^2 + (x_2')^2 \right)},$$

определяем r_2'/s по формуле

$$\frac{r_2'}{s} = K + \sqrt{K^2 - (x_2')^2},$$

где $K = 0.5(3U_0^2 \cdot P_{эм}^{-1})$.

Далее, используя зависимость $(r_2'/s) = f(s)$ определяем скольжение s .

Для более точного расчёта значения s можно организовать итерационный цикл по описанной выше методике.

Выводы

1. Выявлено, что распределение потерь в узлах АД, а следовательно, и их температура существенно изменяются при колебаниях напряжения.
2. Установлено, что при этом наибольшим нагрузкам подвергаются узлы обмотки ротора, что особенно важно для асинхронных двигателей с фазным ротором. При понижении напряжения следует уменьшать нагрузку на валу или отключать АД.

ЛИТЕРАТУРА:

1. “Разработка микропроцессорной системы автоматизированных испытаний электродвигателей и прогнозирования их электромеханических и тепловых характеристик в аномальных режимах работы”. Отчет, Госрегистрация № 0195U006905, Донецк, 1997.
2. Силайлов Г.А., Санников Д.И., Жадан В.А. Тепловые, гидравлические и аэродинамические расчеты в электрических машинах. М., ВШ, 1989, 341 с.
3. Сыромятников Н.А. Режимы работы асинхронных электродвигателей. М., Энергоиздат, 1987, 513 с.

β	I_1	I_2	I_2'	r_2'/s	s	$P_{эм}$	$P_{ст}$	$P_{р}$	$P_{св}$	$P_{св}$	$P_{св}$	$P_{св}$	$P_{св}$	$P_{св}$	$P_{св}$	$P_{св}$	$P_{св}$	$P_{св}$	$P_{св}$
0.4	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02
0.6	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05
0.8	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08
1.0	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10
1.1	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12
1.3	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15
1.5	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18
2.0	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25