

ВЛИЯНИЕ КОЛЕБАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ СЕТИ НА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ И ТЕПЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Федоров М.М., Алексеев Е.Р.

В процессе эксплуатации асинхронных двигателей (АД) колебания напряжения сети распространенное явление, поэтому вопрос о безаварийной работе АД в таких условиях является актуальным. Прежде всего, рассмотрим изменение характеристик АД при колебаниях напряжения сети и неизменном моменте нагрузки ($M_c = \text{const}$). При расчете электромеханических характеристик используем Т-образную схему замещения, которая по сравнению с Г-образной схемой замещения, более точно отражает физические процессы, имеющие место в АД. Кроме того, принимая во внимание, что параметры намагничивающего контура (R_0 и X_0) нелинейны и находятся в функциональной зависимости от тока холостого тока I_0 (или напряжения намагничивающего контура U_0), при расчете используем вольт-амперную характеристику $U_0(I_0)$ намагничивающего контура, а также зависимость потерь в стали $p_{ст}(U_0)$, которая более точно определяет физический смысл $p_{ст}$. Характеристики $U_0(I_0)$ и $p_{ст}(U_0)$ получены по результатам опытов холостого хода, проведенных при различных напряжениях обмотки статора U_1 . Эти характеристики рационально использовать в относительных единицах

$$U_0^* = U_0/U_{0н}, I_0^* = I_0/I_{0н} \text{ и } p_{ст}^* = p_{ст}/p_{стн}.$$

Базисные величины $U_{0н}$, $I_{0н}$ и $p_{стн}$ получены по результатам опыта холостого хода, проведенного при номинальном напряжении $U_{1н}$. Остальные параметры Т-образной схемы (R_1 , X_1 , R_2 , X_2) могут быть получены по известным методикам [1, 2], при этом необходимо учитывать, что для короткозамкнутых АД, особенно для глубокопазных и двухклеточных двигателей, активное сопротивление R_2 находится в функциональной зависимости от скольжения s , из-за влияния скин-эффекта. Зависимость $R_2(s)$ можно получить по результатам опыта короткого замыкания и опыта под нагрузкой.

При расчете характеристик АД при произвольном напряжении U_1 используется итерационный метод. Расчет ведется в следующем порядке. Задаем произвольным значением напряжения \bar{U}_0

$$U_0 = U_{0н} \frac{U_1}{U_{1н}}. \quad (1)$$

Определяем скольжение s , соответствующее напряжению U_0 . Из условия постоянства электромагнитного момента ($M=\text{const}$) следует, что электромагнитная мощность $P_{эм}$ при любом напряжении U_1 постоянна и равна

$$P_{эм} = M\omega_1, \quad (2)$$

где ω_1 — угловая частота вращения поля статора

С другой стороны из Т-образной схемы имеем

$$P_{эм} = 3U_0 I_2' \cos\psi_2 = \frac{3U_0^2 \left(\frac{r_{2s}'}{s}\right)}{z_{2s}'}, \quad (3)$$

где

$$z_{2s}' = \sqrt{\left(\frac{r_{2s}'}{s}\right)^2 + (x_2')^2}. \quad (4)$$

Из выражения (3) определяем величину

$$\frac{r_{2s}'}{s} = k + \sqrt{k^2 - (x_2')^2}, \quad \text{где } k = \frac{1}{2} \left(\frac{3U_0^2}{P_{эм}} \right) \quad (5)$$

и скольжение s .

Далее расчет ведется в комплексной форме.

Комплекс тока I_2'

$$I_2' = \frac{U_0}{z_{2s}'}, \quad (6)$$

где $z_{2s}' = \left(\frac{r_{2s}'}{s} + jx_2' \right)$, $U_0 = U_0$.

С помощью зависимостей $U_0(I_0)$ и $p_{ст}(U_0)$ определяют ток холостого хода I_0 и потери в стали $p_{ст}$, а затем формируют комплексное сопротивление намагничивающего контура Z_0 .

$$R_0 = \frac{p_{ст}}{3I_0^2}; \quad z_0 = \frac{U_0}{I_0}; \quad X_0 = \sqrt{z_0^2 - R_0^2}; \quad Z_0 = R_0 + jX_0. \quad (7)$$

Комплексы токов \underline{I}_0 и \underline{I}_1

$$\underline{I}_0 = \frac{\underline{U}_0}{\underline{Z}_0}, \quad (8)$$

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_0 + \underline{I}_2. \quad (9)$$

Комплекс напряжения \underline{U}_1 , соответствующее предварительно выбранному значению U_0 , равно

$$\underline{U}_1' = \underline{E} + \underline{I}\underline{Z}_1, \quad (10)$$

где
$$\underline{Z}_1 = r_1 + jx_1. \quad (11)$$

Далее сравнивают значение \underline{U}_1' с данным напряжением U_1 и при необходимости корректируют величину U_0 и расчет повторяется.

В табл. 1 приведены результаты расчета электрических характеристик кранового асинхронного двигателя типа МТН312-6 при различных напряжениях U_1 и моменте нагрузки, равном номинальному ($M_c = M_{сн}$). Характеристики представлены в относительных единицах. За базисные приняты величины при $U_1 = U_{1н}$.

Таблица 1 – Рабочие характеристики АД МТН312-6 при различных напряжениях

Напряжение, $K_u = U/U_n$	0,8	0,9	1,00	1,1	1,2
Ток статора, $K_{i1} = I_1/I_{1н}$	1,17	1,02	1,00	1,02	1,08
Ток ротора, $K_{i2} = I_2/I_{2н}$	1,53	1,26	1,00	0,82	0,73
Ток I_0 , $K_{i0} = I_0/I_{0н}$	0,65	0,8	1,00	1,3	1,8
Подведенная мощность, $K_{p1} = P_1/P_{1н}$	1,16	1,04	1,00	0,99	1,04
Полезная мощность $K_{p2} = P_2/P_{2н}$	0,94	0,98	1,00	1,02	1,07
Потери в стали $K_{ст} = P_{ст}/P_{стн}$	0,55	0,77	1,00	1,25	1,5
КПД	0,51	0,59	0,63	0,65	0,65
Скольжение, s	0,11	0,08	0,06	0,04	0,03

Из результатов, приведенных в табл. 1, следует, что колебания напряжения сети оказывает существенное влияние на электромеханические характери-

стики АД. Ток намагничивающего контура I_0 растет с увеличением напряжения. При $U_1 > 1,1U_{1н}$, попадая в зону насыщения характеристик $U_0(I_0)$, рост I_0 более интенсивен. Ток обмотки ротора I_2' имеет обратную зависимость, с уменьшением напряжения он увеличивается. При этом рост его значителен. Решающую роль в данном случае оказывает увеличение скольжения s и, следовательно, уменьшение R_2/s . Ток статора имеет минимум при напряжениях $(1 \div 1,1)U_{1н}$. При уменьшении напряжения он растет за счет тока ротора, однако, темп роста I_1 меньше, чем тока ротора I_2' . При увеличении напряжения U_1 на рост I_1 оказывает влияние увеличение тока намагничивающего контура I_0 , а при уменьшении U_1 — рост I_2' . В соответствии с изменениями токов I_1 и I_2' изменяются и потери в обмотках $r_{м1}$ и $r_{м2}$ АД. Потери в стали изменяются в большей степени, по сравнению с общепринятым соотношением $P_{ст} \equiv (U_1/U_{1н})^2$ [2], так как $(U_0/U_{0н}) < (U_1/U_{1н})$. Подобные изменения приводят к существенному изменению температурного поля АД.

Температура узлов θ_i АД при колебаниях напряжения сети можно рассчитать с помощью эквивалентной тепловой схемы замещения (ЭТС) [3]. Их величины определяются путем решения системы линейных алгебраических уравнений, которая в матричном виде имеет вид

$$\lambda\theta = P, \quad (11)$$

где $\theta = (\theta_1, \dots, \theta_n)$ — матрица-столбец температур узлов (тел) ЭТС АД, $\lambda = (\lambda_{ij})$ — матрица тепловых проводимостей ЭТС, $P = (P_1, \dots, P_n)$ — матрица-столбец потерь в узлах АД, n — количество тел ЭТС.

В табл. 2 приведены температуры узлов АД типа МТН312-6 при различных напряжениях U_1 . При расчете температур использовалась восьмительная ЭТС. В качестве тел выбраны следующие узлы АД: 1 и 2 — соответственно пазовые части обмоток статора и ротора, 3 и 4 — железо статора и ротора, 5 и 6 — соответственно лобовые части обмоток статора и ротора, 7 — внутренний воздух, 8 — корпус. При решении системы уравнений (11) матрица потерь P формировалась на основе данных, приведенных в табл. 1. Величины температур в табл. 3 представлены в относительных единицах. Базисные величины температур $\theta_{бi}$ узлов АД, приведенные в табл. 2 при номинальном моменте нагрузки $M_{сн}$ и номинальном напряжении.

Из табл. 2 следует, что при повышении напряжения имеет место рост температуры во всех узлах АД. Наибольшие температурные нагрузки имеют место в элементах конструкции ротора. Уже при понижении напряжения до $0,9U_{1н}$ температура обмотки ротора возрастает на 28%. Для двигателей с фазным ротором такая ситуация может быть аварийной, так как температура обмотки ротора становится выше предельно допустимой для ее изоляции. Понижение напряжения до $0,8U_{1н}$ может привести к быстрому выходу из строя АД, так температура обмотки ротора увеличивается на 73%, что означает десяти-

кратное уменьшение срока службы изоляции обмотки ротора. Рост температуры в обмотке статора при пониженном напряжении не так интенсивен как в роторе. При напряжении $0,9U_{1н}$ он составляет 6%, но при $0,8U_{1н}$ уже высок 39%. Увеличение напряжения $U_1 > U_{1н}$ приводит к росту температуры в сердечнике и обмотке статора. В элементах конструкции ротора температура даже несколько уменьшается. Существенный рост температуры обмотки статора имеет место при $U_1 \geq 1,15U_{1н}$.

Таблица 2 – Температуры узлов АД МТН312-6 при различных напряжениях

Номер тела	1	2	3	4	5	6	7	8	
$\theta_6, ^\circ\text{C}$	98	96	78	90	104	96	78	46	
K_u	0,8	1,39	1,73	1,41	1,93	1,38	2,05	1,76	1,5
	0,9	1,06	1,28	1,07	1,24	1,06	1,28	1,19	1,1
	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	1,1	1,03	0,89	1,03	0,91	1,03	0,87	0,95	1,02
	1,2	1,14	0,9	1,14	0,94	1,15	0,9	1,01	1,1

Перегревы обмоток, имеющие место при понижении напряжения U_1 свидетельствуют о том, что для обеспечения безаварийной работы АД при пониженном напряжении необходимо снизить момент M_c нагрузки на валу. В табл. 3 приведены значения коэффициента нагрузки $K_{нг} = M_c / M_{сн}$ при пониженном напряжении, соответствующие номинальному току статора $I_1 = I_{1н}$, а также температуры обмоток статора и ротора в относительных единицах.

Таблица 3 – Коэффициенты нагрузки АД МТН312-6 при пониженных напряжениях

K_u	0,7	0,8	0,9	1
$K_{нг}$	0,67	0,86	0,98	1
$\theta_1^* = \theta_1 / \theta_{61}$	1,06	1,04	1,01	1
$\theta_2^* = \theta_2 / \theta_{62}$	1,55	1,39	1,2	1

Из табл. 3 следует, что при снижении нагрузки до уровня поддержания тока статора $I_1 = I_{1н}$, температура в обмотках статора увеличивается незначительно при понижении напряжения до $0,7U_{1н}$. Однако в роторе сохраняется значительный рост температуры, что является особенно опасным для двигателей с фазным ротором, поэтому критерием снижения нагрузки для таких двигателей должен быть не ток статора, а ток ротора.

Расчет механических характеристик осуществляется с помощью той же методики. При этом первоначально задаются различными значениями скольжения s , при выбранном напряжении U_1 , кроме того, для короткозамкнутых АД

необходимо учитывать зависимость $R_2(s)$. При расчете следует зафиксировать значения максимального M_{\max} и пускового $M_{\text{п}}$ моментов. В табл. 4 приведены величины кратности максимального $K_{M_{\max}} = M_{\max}/M_{\text{п}}$ при различных напряжениях U_1 , а также степень изменения этих моментов по сравнению с ними при напряжении $U_1 = U_{1\text{н}}$.

Из табл. 4 следует, что изменение максимального и пускового моментов находится в практически квадратичной зависимости от напряжения.

Таблица 4 – Кратности максимального и пускового моментов АД МТНЗ12-6 при различных напряжениях

K_U	0,7	0,8	0,9	1,0	1,10	1,1
$K_{M_{\max}}$	1,54	2,05	2,63	3,27	3,99	4,77
$M_{\max}/M_{\text{пн}}$	0,47	0,63	0,8	1	1,22	1,46
$M_{\text{п}}/M_{\text{пн}}$	0,47	0,62	0,8	1	1,22	1,46

Приведенные выше результаты свидетельствуют о значительном влиянии колебания напряжения сети на электромеханические и тепловые характеристики АД. Особо следует отметить повышенные тепловые нагрузки в роторе при пониженном напряжении в сети.

Список литературы

1. Сыромятников Н.А. Режимы работы асинхронных электродвигателей. М.: Энергоиздат, 1987.
2. Копылов Н.П. Электрические машины. М.: Энергоиздат, 1986.
3. Силайлов Г.А., Санников Д.И., Жадан В.А. Тепловые, гидравлические и аэродинамические расчеты в электрических машинах. М.: ВШ., 1989.