

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ ТРЕХФАЗНЫХ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

В.С. Осипов, В.И. Котенёв, В.В. Кочетков

Самарский государственный технический университет
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Рассматривается задача определения параметров схем замещения асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым и фазным ротором по каталожным данным с целью построения их механических характеристик. Разработана методика определения параметров схем замещения с последующей оценкой сходимости результатов решения.

Ключевые слова: электродвигатель, асинхронный, статор, ротор, скольжение, момент, напряжение, ток статора, ток ротора приведенный, сопротивление статора, сопротивление ротора приведенное.

Разработка методики расчета параметров схемы замещения асинхронных электродвигателей является актуальной проблемой, так как существующие методики [1] не имеют однозначного решения либо позволяют решить эту задачу с большой погрешностью [2].

Расчет параметров схемы замещения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в [1] производится методом подбора: задаются определенной величиной отношения β -активного сопротивления статора к приведенному активному сопротивлению ротора, и если в подкоренном выражении последующих расчетов получаются отрицательные числа, то задаются другим отношением в пределах (0,3...2,5). Для двигателей с фазным ротором малой мощности затруднительно подобрать это отношение, и кроме того, в рассматриваемом примере не выполняется баланс реактивных мощностей схемы замещения.

Вычисление активного приведенного сопротивления ротора в [2] на основании упрощенной формулы Клосса при $\beta = 0$ приводит к завышенному значению. Определение индуктивных сопротивлений статора и ротора методом подбора существенно усложняет расчет.

В данной работе графоаналитическим способом в плоскости параметров схемы замещения определяется область, в которой отношение активного сопротивления статора к приведенному активному сопротивлению ротора β находится в узких пределах. Расчет тока, активного и индуктивного сопротивлений цепи намагничивания производится на основании баланса активных и реактивных мощностей, затем производится проверочный расчет.

Определение параметров схем замещения асинхронных электродвигателей производится для Т-образной схемы замещения [3], приведенной на рис. 1, векторная диаграмма приведена на рис. 2.

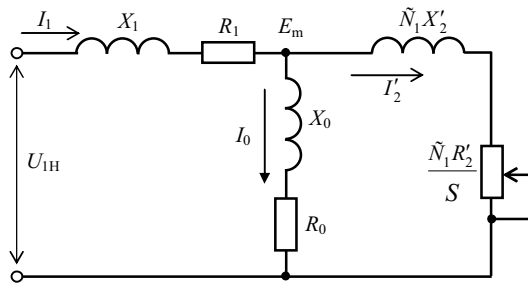
На схеме замещения и на векторной диаграмме приняты следующие обозначения: U_{1H} – фазное номинальное напряжение статора; I_1 – фазный ток статора;

Вячеслав Семенович Осипов (к.т.н.), доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

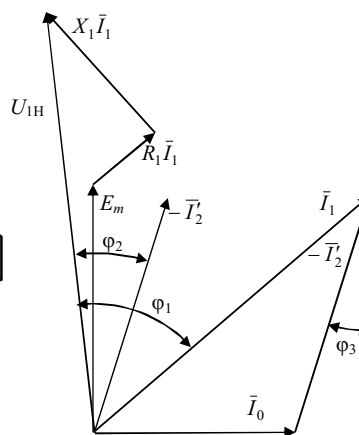
Виктор Иванович Котенёв (д.т.н., проф.), профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

Владимир Валерьевич Кочетков, аспирант.

I'_2 – приведенный ток ротора; I_0 – ток цепи намагничивания; X_1 – реактивное сопротивление статора; X'_2 – приведенное реактивное сопротивление обмотки ротора к обмотке статора; R_0 и X_0 – активное и реактивное сопротивления контура намагничивания; R_1 – активное сопротивление обмотки статора; R'_2 – приведенное активное сопротивление обмотки ротора к обмотке статора; C_1 – коэффициент потерь напряжения в сопротивлениях статора от тока цепи намагничивания; E_m – ЭДС контура намагничивания; S – скольжение двигателя.



Р и с. 1. Схема замещения асинхронного двигателя



Р и с. 2. Векторная диаграмма асинхронного двигателя

Эта схема справедлива при следующих допущениях: параметры всех цепей постоянные, при определении электромагнитной мощности магнитные и механические потери в двигателе принимаются равными 2 % от номинальной мощности.

На основании схемы замещения можно записать три уравнения Кирхгофа:

$$\dot{U}_{1H} = \dot{I}_1(R_1 + jX_1) + \dot{I}'_2 \left(\frac{R'_2}{S_1} + jX'_2 \right); \quad (1)$$

$$\dot{U}_{1H} = \dot{I}_1(R_1 + jX_1) + \dot{I}_0 jX_0; \quad (2)$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}'_2 + \dot{I}_0. \quad (3)$$

В этих уравнениях неизвестных больше, чем уравнений, поэтому расчет параметров производится с использованием формул, отражающих характеристики двигателя.

После возведения в квадрат критического скольжения [3]

$$S_K = \frac{C_1 R'_2}{\sqrt{R_1^2 + X_{KH}^2}} \quad (4)$$

получим

$$\gamma = \frac{X_{KH}}{C_1 R'_2} = \sqrt{\frac{1}{S_K^2} - \beta^2}, \quad (5)$$

где $X_{KH} = X_1 + C_1 X'_2$, $\beta = R_1 / C_1 R'_2$.

Задавая ряд значений β , при фиксированных значениях S_K производим вычисление γ по (5). Результаты расчетов приведены в табл. 1.

По данным таблицы построены графики (рис. 3), на которых выделена зона $ABCD$, в которой отношение активного сопротивления статора R_1 к суммарному индуктивному сопротивлению X_{KH} находится в пределах 0,25...0,35, что соответствует средним значениям, полученным на основании анализа справочных данных [4].

Если на рис. 3 в тех же координатах по каталожным данным двигателя, на основании формул, не зависящим от критического скольжения, при наименьшем и наибольшем значениях приведенного активного сопротивления ротора R'_2 построить дополнительные графики, например MN и KL , то по их пересечению с зоной $ABCD$ получим узкую замкнутую область определения отношений β и γ .

Таблица 1

β	0	0,3	0,7	1,0	1,3	1,7	2,5	3,5
$(S_K=0,1), \sqrt{\frac{1}{0,1^2} - \beta^2}$	10	9,99	9,97	9,95	9,92	9,85	9,68	9,37
$S_K=0,12$	8,33	8,32	8,3	8,27	8,23	8,18	7,95	7,56
$S_K=0,15$	6,67	6,66	6,63	6,59	6,54	6,45	6,18	5,67
$S_K=0,2$	5,0	4,99	4,95	4,9	4,83	4,7	4,33	3,57
$S_K=0,25$	4,0	3,99	3,94	3,87	3,78	3,62	3,12	1,94
$S_K=0,3$	3,33	3,31	3,26	3,18	3,07	2,87	2,2	
$S_K=0,35$	2,85	2,84	2,77	2,67	2,54	2,29	1,38	
$S_K=0,4$	2,5	2,48	2,4	2,29	2,14	1,83		
$S_K=0,5$	2,0	1,98	1,87	1,73	1,52	1,05		
$S_K=0,6$	1,66	1,64	1,51	1,33	1,04			
$S_K=0,7$	1,43	1,4	1,24	1,02	0,59			
$S_K=0,8$	1,25	1,21	1,04	0,75				

Коэффициент C_1 , учитывающий потери напряжения от тока намагничивания, является важным параметром, позволяющим в уравнении (1) определить приведенный ток ротора I'_2 , на основании которого рассчитываются электромагнитный момент, критический момент и критическое скольжение двигателя, в формулах определения которых учитывается коэффициент C_1 .

Величина кратности пускового тока k_I двигателей с фазным ротором в каталогах не приводится, поэтому приближенно можно определить эту величину в зависимости от номинального скольжения S_H по графику (рис. 4), который получен на основании анализа данных в [4].

Величина коэффициента C_1 находится в пределах 1,02...1,06 [3], и можно найти ее по приближенной формуле [5]

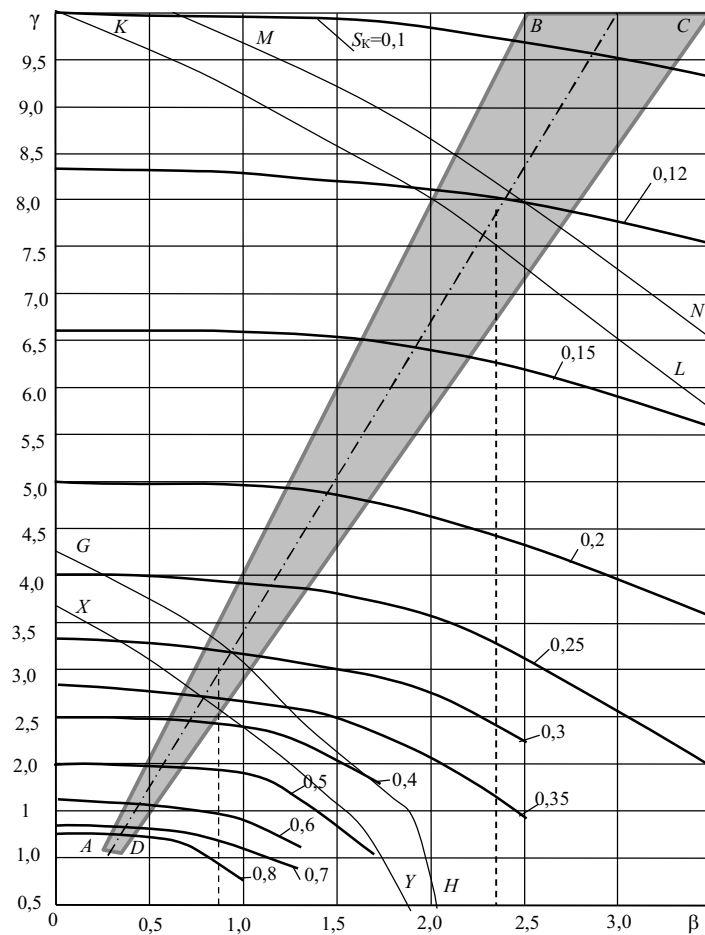
$$C_1 \approx 1 + \frac{I_0}{2I_1 k_I}, \quad (6)$$

а затем при проверочном расчете уточнить ее [4] по формуле

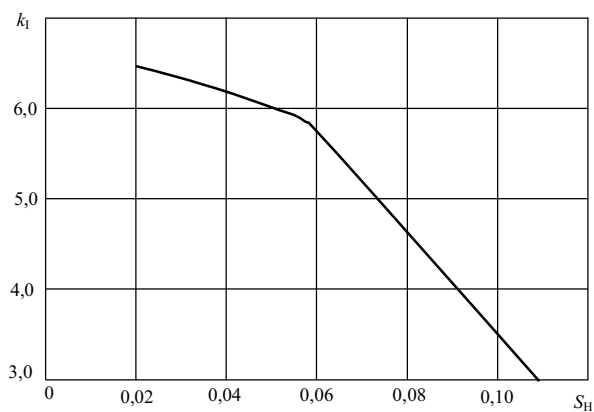
$$C_1 = 1 + \frac{Z_1}{Z_0} \approx 1 + \frac{X_1}{X_0} \quad (7)$$

и произвести сравнение с (6).

Величину тока цепи намагничивания принимаем пропорциональной реактивной составляющей тока статора.



Р и с. 3. Плоскость параметров для определения расчетного значения отношения активного сопротивления статора к приведенному активному сопротивлению ротора



Р и с. 4/ Зависимость кратности пускового тока от номинального скольжения

Определяется коэффициент

$$I_0 = k_0 I_{1i} \sin \varphi_i, \quad (8)$$

где приближенно принимается коэффициент $k_0 = (0,9 \dots 0,98)$.

$$C_1 \approx 1 + \frac{k_0 I_{1i} \sin \varphi_i}{2 I_{1i} k_i} = 1 + \frac{k_0 \sin \varphi_i}{2 k_i}. \quad (9)$$

Наибольшее значение R'_2 определяется при $R_1 = 0$.

Из выражения критического момента [3]

$$M_K = \frac{m U_{1H}^2}{2 \omega_0 C_1 (R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + (X_1 + C_1 X'_2)^2}},$$

принимая $M_{\max} = M_K$, $X_{KH} = X_1 + C_1 X'_2$, определим параметр

$$A_1 = R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_{KH}^2} = \frac{m U_{1H}^2}{2 \omega_0 C_1 M_{\max}}, \quad (10)$$

позволяющий определить величину R'_2 при известных S_K и β .

Величину этого параметра можно находить по преобразованной формуле

$$A_1 = \frac{m U_{1i}^2 (1 - S_i)}{2 \tilde{N}_1 k_{\max} P_i}. \quad (11)$$

Обозначим $k_{\max} = M_K/M_H$ – кратность критического и номинального моментов, и после преобразований формулы Клосса при $\beta = 0$

$$M_H = \frac{2 M_K (1 + \beta S_K)}{\frac{S_H}{S_K} + \frac{S_K}{S_H} + 2 \beta S_K} \quad (12)$$

получим [3] наименьшие значения критических скольжений

$$S_{\hat{E}} = S_i \left(k_{\max} + \sqrt{k_{\max}^2 - 1} \right) \quad (13)$$

При $R_1 = 0$ из (4) и (10) получим наибольшее значение

$$C_1 R'_2 = S_{\hat{E}} A_1. \quad (14)$$

Для определения наименьшего значения R'_2 принимаем величину приведенного тока ротора пропорциональной активной составляющей тока статора

$$I'_2 = \frac{I_{1i} \cos \varphi}{\cos \arcsin \varphi_3}. \quad (15)$$

Из векторной диаграммы

$$\sin \varphi_3 = \frac{X'_2}{\sqrt{\left(\frac{R'_2}{S_i} \right)^2 + (X'_2)^2}}. \quad (16)$$

Величина синуса этого угла находится в пределах $0,08 \dots 0,15$ и зависит от S_H . Принимаем в расчетах среднее значение $\sin \varphi_3 = 0,1$.

Наименьшие значения приведенного сопротивления ротора

$$R'_2 = \frac{P_{\text{в1}} S_{\text{I}}}{3I_2^2}. \quad (17)$$

Электромагнитная мощность ротора с учетом механических потерь, которые принимаются равными 2 % от номинальной мощности, вычисляется по формуле

$$P_{\text{эм}} = \frac{1,02P_{\text{H}}}{1 - S_{\text{H}}}. \quad (18)$$

Таким образом получим наименьшие значения $C_1 R'_2$.

Для двух электродвигателей, асинхронного с короткозамкнутым ротором (КР) и асинхронного с фазным ротором (ФР), рассчитанные данные приведены в табл. 2.

Каталожные данные КР [4]: тип 4А160S6У3, $P_{\text{H}} = 11,0$ кВт, $U_{1\text{H}} = 220$ В, $\eta_{\text{H}} = 0,86$, $\cos\varphi_{\text{H}} = 0,86$, $S_{\text{H}} = 0,027$, $k_{\text{I}} = 6$, $k_{\text{max}} = 2$, $I_{\text{H}} = 22,6$ А, $R_1 = 0,073$ Ом, $X_1 = 0,11$ Ом, $R'_2 = 0,030$ Ом, $X'_2 = 0,15$ Ом, $n_0 = 1000$ об/мин.

Каталожные данные ФР: тип МТН 311–6, $P_{\text{H}} = 11,0$ кВт, $U_{1\text{H}} = 220$ В, $\eta_{\text{H}} = 0,83$, $\cos\varphi_{\text{H}} = 0,79$, $S_{\text{H}} = 0,05$, $k_{\text{max}} = 2,8$, $I_{\text{H}} = 25,4$ А, $R_{\text{P}} = 0,102$ Ом, $n_0 = 1000$ об/мин, $U_{2\text{Л}} = 170$ В, $I_{\text{НР}} = 43,0$ А.

Таблица 2

	C_1	A_1	$P_{\text{эм}}$	I'_2	Наибольшее	Наименьшее
					$C_1 R'_2$	$C_1 R'_2$
КР	1,038	3,1	11531	19,5	0,313	0,278
ФР	1,046	2,14	11810	20,2	0,58	0,5

Для расчета области определения отношения β из уравнения (10), параметры которого не зависят от критического скольжения, найдем

$$X_{\text{KH}} = \sqrt{A_1^2 - 2A_1 R_1}. \quad (19)$$

Определяется максимальное значение $R_{1\text{max}}$:

$$R_{1\text{max}} = \frac{A_1^2}{2A_1} = \frac{A_1}{2}.$$

Задаваясь величиной R_1 от 0 до $R_{1\text{max}}$, определяем X_{KH} , затем производим расчет отношений R_1/R'_2 и X_{KH}/R'_2 . Полученные данные сводятся в таблицы. Для примера в табл. 3 приведены расчетные данные для ФР $C_1 R'_2 = 0,5$ Ом.

Таблица 3

R_1	0	0,2	0,4	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,0765
X_{KH}	2,153	1,94	1,71	1,43	1,27	1,09	0,87	0,57	0
$X_{\text{KH}}/C_1 R'_2$	4,28	3,86	3,4	2,85	2,53	2,17	1,73	1,13	0
$R_1/C_1 R'_2$	0	0,4	0,796	1,19	1,39	1,59	1,79	1,99	2,14

По табличным данным на рис. 3 построены графики, кривые KL и MN для КР и кривые GH и XY для ФР. В результате определена область в виде ромба, по центру которого принимается средняя расчетная величина β и определяется S_{K} .

КР: $\beta = 2,3$; $S_{\text{K}} = 0,121$;

ФР: $\beta = 0,85$; $S_{\text{K}} = 0,32$.

Аналитический расчет параметров производится в следующей последовательности.

Величина критического скольжения [1]

$$S_{\hat{e}} = S_i \frac{k_{\max} + \sqrt{k_{\max}^2 - [1 - 2S_i \beta(k_{\max} - 1)]}}{1 - 2S_i \beta(k_{\max} - 1)}. \quad (20)$$

Величина расчетного активного сопротивления ротора, приведенного к обмотке статора асинхронного двигателя,

$$R'_2 = \frac{A_1}{C_1 \left(\beta + \frac{1}{S_{\hat{e}}} \right)}. \quad (21)$$

Активное сопротивление статора

$$R_1 = \beta C_1 R'_2. \quad (22)$$

Параметр γ , который позволяет найти индуктивное сопротивление короткого замыкания $X_{\text{кн}}$,

$$\gamma = \sqrt{\frac{1}{S_{\hat{e}}^2} - \beta^2}. \quad (23)$$

$$X_{\text{кн}} = \gamma C_1 R'_2. \quad (24)$$

Приведенный ток ротора

$$I'_2 = \frac{U_{\text{и}}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{C_1 R'_2}{S_i} \right)^2 + X_{\hat{e}i}^2}}. \quad (25)$$

На основании уравнения Кирхгофа (1) получим

$$U_{\text{и}} = I_1 \sqrt{R_1^2 + X_1^2} + I'_2 \sqrt{\left(\frac{R'_2}{S_i} \right)^2 + (X'_2)^2}. \quad (26)$$

Запишем это уравнение в виде

$$U_{\text{и}} = I_1 \sqrt{R_1^2 + X_1^2} + I'_2 \sqrt{\left(\frac{R'_2}{S_i} \right)^2 + (X_{\hat{e}i} - X_1)^2}. \quad (27)$$

Вычисляется величина второго слагаемого; так как $\frac{R'_2}{S_i} \gg X'_2$, то задаваясь

$X_1 = \frac{X_{\hat{e}i}}{2}$, получим

$$B_1 = I'_2 \sqrt{\left(\frac{R'_2}{S_i} \right)^2 + (X_{\hat{e}i} - X_1)^2}. \quad (28)$$

Определяется X_1 из выражения

$$U_{\text{и}} - \hat{A}_1 = I_1 \sqrt{R_1^2 + X_1^2}. \quad (29)$$

Определяется

$$X'_2 = X_{\text{KH}} - X_1. \quad (30)$$

Определяется ЭДС контура намагничивания

$$E_m = U_{\text{IH}} - I_{\text{IH}} \sqrt{(R_1^2 + X_1^2)}. \quad (31)$$

Определяется приведенный ток ротора после расчета X_1 и X'_2 по (25).

Определяем ток намагничивания, приняв его реактивным, на основе баланса реактивной мощности схемы замещения.

Потребляемая активная мощность на фазу

$$P_N = \frac{P_1}{3\eta}. \quad (32)$$

Полная мощность на фазу

$$S_N = U_{\text{if}} I_{\text{f}}. \quad (33)$$

Реактивная мощность на фазу

$$Q_N = \sqrt{S_N^2 - P_N^2}. \quad (34)$$

$$I_0 = \frac{Q_N - I_{\text{if}}^2 X_1 - I_2'^2 X_2'}{E_m}. \quad (35)$$

Определяется реактивное сопротивление цепи намагничивания

$$X_0 = \frac{E_m}{I_0}. \quad (36)$$

На основании баланса активных мощностей определяется активное сопротивление контура намагничивания

$$R_0 = \frac{P_C - I_1^2 R_1 - \frac{I_2'^2 R_2'}{S_N}}{I_0^2}. \quad (37)$$

Результаты аналитического расчета, например для двигателя с ФР, приведены в табл. 4.

Таблица 4

S_K	R'_2	R_1	γ	X_{KH}	I'_2	X_1	X'_2
0,321	0,516	0,46	3,0	1,62	19,35	0,626	1,04
E_m	P_C	S_C	Q_C	I_0	X_0	R_0	β
200,3	4418	5588	3422	13,23	15,14	1,47	0,85

Проверочный расчет производится по уравнениям Кирхгофа, а также по формулам для уточнения приближенно принятых коэффициентов k_0 , k_I , C_1 , $\sin\varphi_3$.

Принимаем погрешность проверочных расчетов не более 5 %.

На основании уравнений Кирхгофа (1) и (26) проверяется баланс напряжений $U_{\text{IH}} = 220,3$ В.

Производится проверка коэффициента, учитывающего потери напряжения от тока холостого хода, по выражению (7), $C_1 = 1,041$.

Производится проверка синуса угла φ_3 по выражению (16), $\sin\varphi_3 = 0,096$.

Производится проверка тока намагничивания по уравнению Кирхгофа (3)

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_1 - \dot{I}'_2 = 20,066 + j15,57 - 19,26 - j1,86 = 0,8 + j13,7.$$

Пусковой ток, приведенный к обмотке статора, при $S = 1$ определяется по формуле

$$I'_{2К} = \frac{U_{1Н}}{\sqrt{(R_1 + C_1 R'_2)^2 + (X_1 + C_1 X'_2)^2}}. \quad (38)$$

Проверяется кратность пускового тока, получено $k_I = 5,86$:

$$k_I = \frac{I'_{2\text{Б}}}{I'_2}. \quad (39)$$

Проверяется величина критического скольжения с полученным значением $C_1 = 1,041$, получено $S_K = 0,31$, по формуле

$$S_{\text{Б}} = \pm \frac{\tilde{N}_1 R'_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + \tilde{N}_1 X'_2)^2}}. \quad (40)$$

Приведенный ток ротора по выражению (25) при $C_1 = 1,041$, $I'_2 = 19,34$ А.

Производится проверка коэффициента

$$k_0 = \frac{I_0}{I_{1\text{И}} \sin \varphi_{\text{И}}} = \frac{13,23}{25,4 \cdot \sin 42^\circ} = 0,945. \quad (41)$$

Сопротивления ротора для разных типов современных двигателей с ФР можно найти в Интернете, однако данные от разных производителей могут существенно отличаться друг от друга.

Для рассматриваемого двигателя с ФР эта величина в холодном состоянии равна [1]

$$R'_2 = 0,95 R_{\text{Р}} \left(\frac{U_{1\text{И}}}{U_{2\text{Л}}} \right)^2 = 0,95 \cdot 0,102 \cdot \left(\frac{380}{170} \right)^2 = 0,484 \text{ Ом}. \quad (42)$$

В горячем состоянии с учетом температурного коэффициента $\alpha = 1,2$ при нагреве на 45°C получим $R'_2 = 0,581$ Ом. В приведенной методике принято $R'_2 = 0,516$ Ом, что соответствует среднему режиму работы при средней температуре.

Многочисленные расчеты по приведенной методике параметров схемы замещения для различных типов двигателей показали удовлетворительные результаты.

Получена удовлетворительная сходимость результатов при проверочном расчете.

Полный проверочный расчет производить не обязательно, достаточно сделать проверку тока намагничивания по уравнению Кирхгофа (3).

Данная методика может использоваться в инженерной практике.

При больших расхождениях для уточнения параметров можно повторить расчет с новыми полученными значениями k_I , C_1 , $\sin \varphi_3$, k_0 .

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Качин С.И. Автоматизированный электропривод: учеб.-метод. пособие / С.И. Качин, А.Ю. Чернышев, О.С. Качин; Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 162 с.
2. Свит П.П., Сёмкин Б.В. Определение параметров схем замещения асинхронных двигателей небольшой мощности // Ползуновский альманах. – 2004. – № 3.
3. Вольдек А.И. Электрические машины. – Л: Энергия, 1974. – 840 с.

4. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник / А.Е. Кравчик, М.М. Шлаф, В.И. Афонин, Е.А. Соболенская. – М: Энергоиздат, 1982. – 504 с.
5. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / Под ред. Л.Г. Миконянца. – 4 изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 240 с.

Статья поступила в редакцию 12 апреля 2013 г.

DEFINITION EQUIVALENT CIRCUIT PARAMETERS OF THREE PHASE ASYNCHRONOUS MOTORS

V.S. Osipov, V.I. Kotenev, V.V. Kochetkov

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100

The problem of determining the parameters of the equivalent circuit of asynchronous electric motors with squirrel-cage rotor and slip ring on the catalog data in order to build their mechanical characteristics is considered. Method for determining the parameters of the equivalent circuit with subsequent evaluation of the results of convergence solutions is developed.

Keywords: *electric motor, asynchronous, stator, rotor, sliding, torque, voltage, stator current, resulted rotor current, resistance of the stator, resulted rotor resistance.*

*Vyacheslav S. Osipov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.
Viktor I. Kotenev (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Vladimir V. Kochetkov, Postgraduate Student.*