

УДК 62–83(075.8)

МЕТОД РАСЧЕТА СОПРОТИВЛЕНИЙ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ ПО ПАСПОРТНЫМ ДАННЫМ И ОЦЕНКА ЕГО ПОГРЕШНОСТИ

В.И. Котенев, А.Д. Стулов

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

E-mail: kotenev.viiv@gmail.com, ads260391@mail.ru.

***Аннотация.** Предложен более простой метод определения сопротивлений асинхронного двигателя (полного индуктивного сопротивления, активного сопротивления статора и приведенного активного сопротивления ротора) по справочным данным. Из уравнений реактивной мощности рассеяния и электромагнитной мощности в номинальном режиме и уравнения электромагнитной мощности в критическом режиме получены три алгебраических уравнения: первое – относительно трех сопротивлений, второе – уравнение зависимости активного сопротивления статора относительно полного индуктивного сопротивления, третье – уравнение зависимости активного сопротивления ротора относительно полного индуктивного сопротивления. Предложен метод итераций для решения данной системы уравнений, который дает малую погрешность уже на втором шаге вычислений.*

При оценке погрешности метода использованы уточненные значения электромагнитной мощности и кратности максимального момента, которые выражены относительно справочных сопротивлений контрольных двигателей. Дана оценка суммарной погрешности от несовершенства метода и несовпадения справочных величин кратности максимального момента и мощности на валу двигателя с их уточненными значениями, рассчитанными по сопротивлениям из справочника.

По рассчитанным сопротивлениям в номинальном режиме построены зависимости активного и индуктивного сопротивлений двигателя точным и приближенным методом.

Ключевые слова: метод, расчет, сопротивление, асинхронный двигатель, оценка, погрешность.

Введение

Применение автоматических систем управления реактивной мощностью систем электроснабжения на промышленных предприятиях [1, 2], функционирующих в условиях действия большого числа возмущений (пуск, самозапуск асинхронных и синхронных двигателей, короткие замыкания и т. д.), позволяет значительно сократить потери электроэнергии при ее транспортировке и обеспечить работу электроприемников с рациональным коэффициентом реактивной мощности.

Одним из сдерживающих факторов в построении таких систем управления является отсутствие эффективных и более простых методов расчета сопротивле-

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

Стулов Александр Дмитриевич, аспирант.

ний асинхронных двигателей, необходимых также и при выборе контакторов, магнитных пускателей, различного рода защит от перегрузок и коротких замыканий. Поэтому разработка таких методов относится к актуальным проблемам.

Степень разработанности проблемы

Проблеме разработки методов расчета сопротивлений асинхронных двигателей уделяется достаточно большое внимание как в отечественной [3–9], так и в зарубежной литературе [10–14].

Значения этих сопротивлений известны лишь для отдельных двигателей – машин серии 4А [15]. Для остальных двигателей они неизвестны. Поэтому возникает необходимость в их определении, что можно сделать двумя основными методами – экспериментальным и аналитическим.

К экспериментальным относятся методы, разработанные на основе: нейронных сетей [10], генетических алгоритмов [11], алгоритмов фазы-логики [12], алгебраических алгоритмов [13] и частотных характеристик [14]. Основной их недостаток – невозможность ими воспользоваться на этапе проведения аналитических исследований, когда отсутствует рассматриваемый двигатель.

Из числа аналитических методов наиболее востребованным является метод идентификации по каталожным данным двигателей. При таком подходе входными параметрами для исследований являются: номинальные значения мощности на валу $P_{2н}$, напряжение U_n , частота вращения n_n или скольжение s_n , коэффициенты полезного действия η_n и мощности $\cos\varphi_n$, значение кратности максимального момента $m_k = M_k / M_n$.

В работах [3–5] три основных параметра – активное сопротивление статора R_1 , полное индуктивное сопротивление x_k и приведенное активное сопротивление ротора R_2 при номинальном скольжении s_n – определяются из решения двух уравнений электромагнитной мощности при номинальном и критическом скольжениях. Причем во всех этих работах с целью снижения числа неизвестных с трех до двух отношение сопротивлений R_1 / R_2 выбирается фиксированным с недостаточным обоснованием. Поэтому при удачном выборе этого отношения погрешность вычисления сопротивлений незначительная, а при неудачном – недопустимо большая.

В работах [7–8] к уравнениям электромагнитной мощности при номинальном и критическом скольжениях добавлено третье уравнение реактивной мощности из [9]. В результате получена система трех уравнений для определения трех искомых сопротивлений, что приводит к значительному уменьшению погрешности вычислений. Основной недостаток этого метода – его сравнительная сложность, заключающаяся в необходимости составления расчетной программы.

Кроме того, во всех вышеперечисленных работах эффективность применяемых методов расчетов оценивается сравнением результатов вычислений с данными контрольных двигателей, которые выбраны без достаточных обоснований. Причем при их неудачном выборе погрешность расчетов будет обусловлена погрешностью данных этих двигателей, а не погрешностью используемого метода.

Постановка задачи

Проведенный краткий обзор литературных источников по разработке методов расчета сопротивлений асинхронных двигателей по справочным данным

позволяет конкретизировать проблему исследований в следующей постановке: разработать более простой метод вычисления сопротивлений асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором по паспортным данным с оценкой его погрешности.

Разработка метода расчета сопротивлений двигателя по справочным данным с оценкой его погрешности

Номинальная электромагнитная мощность

$$P_{\vartheta}(s_H) = \frac{U_H^2 \frac{R_2}{s_H}}{\left(R_1 + \frac{R_2}{s_H}\right)^2 + x_k^2}. \quad (1)$$

Реактивная мощность рассеяния в номинальном режиме, выраженная через активное сопротивление статора R_1 , ротора R_2 и полного индуктивного сопротивления x_k , представлена выражением

$$Q_2(s_H) = \frac{s_H x_k P_{\vartheta}(s_H)}{R_2}, \quad (2)$$

а выраженная через кратность максимального момента – соотношением

$$Q_2(s_H) = \frac{P_{2H}}{2m_k}. \quad (3)$$

Максимальная электромагнитная мощность

$$m_k P_{\vartheta}(s_H) = \frac{U_H^2}{2\left(R_1 + \sqrt{R_1^2 + x_k^2}\right)}. \quad (4)$$

Сопротивления R_1 , R_2 и x_k определяются из решения уравнений:

$$R_1^2 + \frac{R_2^2}{s_H^2} + \frac{a_1}{s_H} R_2 + \frac{2}{s_H} R_1 R_2 + x_k^2 = 0; \quad (5)$$

$$R_1 = a_2 - a_3 x_k^2; \quad (6)$$

$$R_2 = a_4 x_k, \quad (7)$$

где $a_1 = \frac{U_H^2}{P_{\vartheta}(s_H)}$; $a_2 = \frac{a_1}{4m_k}$; $a_3 = \frac{m_k}{a_1}$; $a_4 = 2a_0 s_H m_k$; $a_0 = \frac{\eta_H + 0,016}{\eta_H (1 - s_H)}$.

Уравнение (5) получено из (1), уравнение (6) – из (4), а уравнение (7) – из совместного рассмотрения выражений (1) ÷ (3).

Систему уравнений (5) ÷ (7) предлагается решать методом итерации. С этой целью на первом шаге вычислений используется выражение

$$x_{k,1} = \frac{a_1 a_4}{s_H (1 + b_1 a_4^2)}, \quad (8)$$

где
$$b_1 = 1 + \frac{1}{s_H^2} + \frac{2}{s_H},$$

которое получено из (5) при $R_1 = R_2$.

Если первое приближение принято при $R_1 = 0$, то из (5) следует

$$x_{к1} = \frac{a_1 a_4 s_H}{a_4^2 + s_H^2}. \quad (9)$$

Затем на i -том шаге, начиная со второго, определяется отношение сопротивлений по приближенной формуле

$$\varepsilon_i = \frac{R_1^{(i)}}{R_2^{(i)}} = \frac{a_2 - a_3 x_{к(i-1)}^2}{a_4 x_{к(i-1)}}, \quad i = 2, 3, \dots, n \quad (10)$$

и подставляются выражения

$$\begin{aligned} R_1^{(i)} &= \varepsilon_i R_2^{(i)}, \\ R_2^{(i)} &= a_4 x_{ки}, \quad i = 2, 3, \dots, n \end{aligned} \quad (11)$$

в уравнение (5), в котором следует считать $R_1 = R_1^{(i)}$, $R_2 = R_2^{(i)}$, $x_k = x_k^{(i)}$; получается рекуррентная формула для вычисления индуктивного сопротивления

$$x_{ки} = \frac{a_1 a_4}{s_H (1 + b_i a_4^2)}, \quad i = 2, 3, \dots, n, \quad (12)$$

где
$$b_i = \varepsilon_i^2 + \frac{2\varepsilon_i}{s_H} + \frac{1}{s_H^2}, \quad i = 2, 3, \dots, n.$$

Активные сопротивления на последнем шаге:

$$\begin{aligned} R_1 &= a_2 - a_3 x_{кн}^2; \\ R_2 &= a_4 x_{кн}. \end{aligned} \quad (13)$$

Оценка погрешности метода

Некоторые авторы [3–5] при определении погрешности метода расчета сопротивлений асинхронного двигателя по справочным данным пользуются исходными данными, в состав которых входят мощность на валу $P_{2нс}$ и кратность максимального момента $m_{кс}$ из справочника. Эти величины могут значительно отличаться от уточненных значений $P_{2ну}$ и $m_{кy1}$, $m_{кy2}$, вычисленных по значениям сопротивлений двигателей из справочника.

Поэтому в состав погрешности будут входить две составляющие: одна обусловлена непосредственно предложенным методом, а вторая – погрешностью несовпадения $P_{2нс}$ и $P_{2ну}$, $m_{кс}$ и $m_{кy}$.

А если при вычислении погрешности метода использовать величины $P_{2\text{нп}}$, $m_{\text{кy1}}$ и $m_{\text{кy2}}$, то в состав полученной погрешности будет входить только погрешность предложенной методики.

Уточненное выражение электромагнитной мощности, полученное из (1), при сопротивлениях, равных справочным значениям, имеет вид

$$P_{\text{эy}}(s_{\text{н}}) = \frac{R_{*2\text{c}} P_{2\text{нc}}}{s_{\text{н}} \eta_{\text{нc}} \cos \varphi_{\text{нc}} z_1^2}, \quad (14)$$

$$z_1^2 = \left(R_{*1\text{c}} + \frac{R_{*2\text{c}}}{s_{\text{н}}} \right)^2 + x_{*к\text{c}}^2,$$

где индекс *с обозначает относительное значение соответствующей величины из справочника.

Уточненное значение мощности на валу двигателя составляет

$$P_{2\text{нп}} = \frac{P_{\text{эy}}(s_{\text{н}})}{a_0}.$$

Погрешность мощности

$$\delta_{\text{р2н}} = \left| \frac{P_{2\text{нп}} - P_{2\text{нc}}}{P_{2\text{нc}}} \right| 100\%.$$

Значение кратности максимального момента получено в результате деления (4) на (1) при сопротивлениях, равным справочным значениям:

$$m_{\text{кy}} = \frac{z_1^2 s_{\text{н}}}{2R_{*2\text{c}} \left(R_{*1\text{c}} + \sqrt{R_{*1\text{c}}^2 + x_{*к\text{c}}^2} \right)}. \quad (15)$$

Погрешность

$$\delta_{\text{мк}} = \left| \frac{m_{\text{кy}} - m_{\text{кc}}}{m_{\text{кc}}} \right| 100\%. \quad (16)$$

При определении погрешности методики расчета сопротивлений в качестве контрольного выбран двигатель из [16]: $P_{2\text{нc}} = 250$ кВт, $U_{\text{н}} = 3000$ В, $R_{1\text{c}} = 0,7$ Ом, $R_{*1\text{c}} = 0,0243$, $R_{2\text{c}} = 0,795$ Ом, $R_{*2\text{c}} = 0,02757$, $x_{\text{кc}} = 5,8$ Ом, $x_{*к\text{c}} = 0,202$, $s_{\text{н}} = 0,0249$, $a_1 = 34,4$ Ом, $a_2 = 3,29$ Ом, $a_3 = 0,076$ Ом⁻¹; $a_4 = 0,1362$, $m_{\text{кy}} = 2,62$, $\delta_{\text{мк}} = \delta_{\text{р2н}} = 0$.

Результаты расчетов по предложенной методике (10) ÷ (13) с начальным приближением (9) представлены в табл. 1 и на рис. 1 (кривая 1), а с приближением (8) – в табл. 2 и на рис. 1 (кривая 2).

Результаты вычислений показывают, что в первом случае (см. табл. 1) погрешность $\delta_{\text{кк}} = 0,22$ % достигается при четырехшаговом приближении, а во втором (см. табл. 2) $\delta_{\text{кк}} = 0,17$ % при двухшаговом расчете.

Значения погрешностей сопротивлений x_k , R_1 , R_2 после трехшаговых вычислений представлены в табл. 2. Их незначительное отличие от погрешностей, полученных из решения полной системы уравнений (5)÷(7) по разработанной в [7, 8] программе, объясняется принятыми округлениями в расчетах.

Таблица 1

Результаты расчетов с начальным приближением (9)

Параметр	<i>i</i>				
	1	2	3	4	5
ε_i	1,000	0,574	0,777	0,848	0,874
b_i	–	1659	1676	1682	1684
x_{ki} , Ом	6,090	5,920	5,860	5,840	5,836
δ_{xk} , %	4,31	1,54	0,57	0,22	0,10
$R_1^{(i)}$, Ом	0,470	0,626	0,68	0,698	0,700
δ_{R1} , %	32,90	10,60	2,90	0,29	0,00
$R_2^{(i)}$, Ом	0,829	0,806	0,798	0,795	0,795
δ_{R2} , %	4,30	1,40	0,39	0,05	0,00

Таблица 2

Результаты расчетов с приближением (8)

Параметр	<i>i</i>		
	1	2	3
ε_i	1,000	0,930	0,900
b_i	1694	1688	1686
x_{ki} , Ом	5,800	5,820	5,830
δ_{xk} , %	0,46	0,17	0,00
$R_1^{(i)}$, Ом	0,733	0,716	0,707
δ_{R1} , %	4,80	2,20	1,00
$R_2^{(i)}$, Ом	0,790	0,793	0,794
δ_{R2} , %	0,63	0,29	0,12

Суммарная погрешность, обусловленная погрешностями метода и второго контрольного двигателя 4A225M2Y3 ($P_{2н} = 55$ кВт, $P_{зв}(s_n) = 57,068$ кВт, $\delta_{p2н} = 0,18$ %, $m_{кв} = 2,5$, $U_n = 380$ В, $s_n = 0,018$, $\eta_n = 0,91$, $\cos\varphi_n = 0,92$, $R_{*1} = 0,026$, $R_{*2} = 0,019$, $x_{*к} = 0,212$), составляет: $\delta_{xк} = 2,9$ %, $\delta_{R1} = 11,8$ %, $\delta_{R2} = 0,96$ %. Погрешность только метода: ($m_{кв} = 2,4$, $P_{зв}(s_n) = 57,068$ кВт, $\delta_{xк} = 0,47$ %, $\delta_{R1} = 0,38$ %, $\delta_{R2} = 0,42$ %).

Значения погрешностей расчета сопротивлений двигателя 4A225M2Y3 при $\delta_{p2н} = 0,18$ %, $\delta_{мк} = 0$ составляют: $\delta_{xк} = 2,53$ %, $\delta_{R1} = 11,42$ %, $\delta_{R2} = 0,54$ %. Они растут с увеличением погрешностей $\delta_{p2н}$, $\delta_{мк}$ и могут достичь больших значений.

Дополнительные исследования показали, что в качестве контрольных следует выбирать двигатели с погрешностью по абсолютной величине $|\delta_{p2н}| + |\delta_{мк}| \leq 1\%$.

Индуктивное сопротивление ветви намагничивания

$$x_{\mu} = \frac{U_{\text{н}}^2}{Q_{\mu}} - x_1, \quad (17)$$

а реактивная мощность этой ветви

$$Q_{\mu} = \frac{P_{2\text{н}}}{\eta} \operatorname{tg} \varphi_{\text{н}} - Q_{2\text{н}}. \quad (18)$$

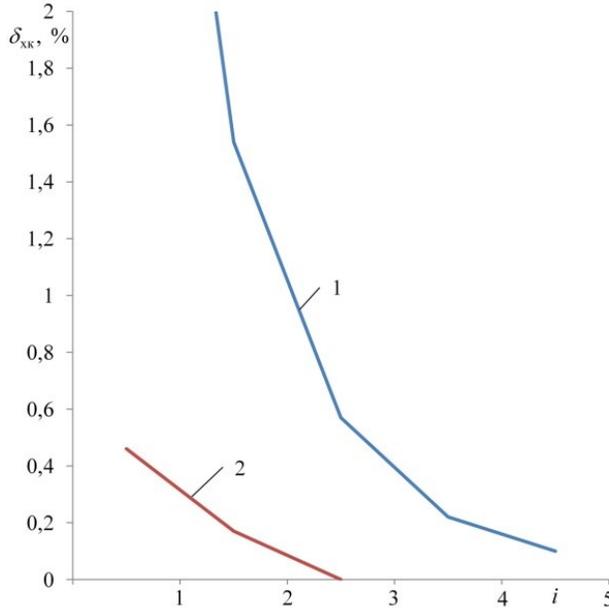


Рис 1. Зависимость погрешности $\delta_{\text{хк}}$ от i :

1 – построена по (9) ÷ (12); 2 – построена по (8), (10) ÷ (12).

Подставив (3) в (18), а затем в (17), получим

$$x_{\mu} = \frac{U_{\text{н}}^2}{P_{2\text{н}} \left(\frac{\operatorname{tg} \varphi_{\text{н}}}{\eta_{\text{н}}} - \frac{1}{2d_1 m_{\text{кy}}} \right)} - x_1.$$

После умножения числителя и знаменателя на $\eta_{\text{н}}$ и $\cos \varphi_{\text{н}}$ получено

$$x_{\mu} = \frac{z_{\text{н}}}{\left(\frac{\operatorname{tg} \varphi_{\text{н}}}{\eta_{\text{н}}} - \frac{1}{2d_1 m_{\text{кy}}} \right) \eta_{\text{н}} \cos \varphi_{\text{н}}} - x_1. \quad (19)$$

Сопротивление x_{μ} , вычисленное согласно (19), для двигателя из [15] $x_{\mu} = 92,7$ Ом при справочном значении $x_{\mu\text{с}} = 95,6$ Ом. Погрешность $\delta_{x_{\mu}} = -3$ %.

Зависимость сопротивлений асинхронного двигателя от скольжения можно определить, пользуясь его схемой замещения (рис. 2).

Как следует из схемы замещения, сопротивления $R_2(s)$, $x_2(s)$ являются функциями скольжения s . Объясняется это тем, что при скольжении выше кри-

тического $s > s_k$ начнет проявляться насыщение зубцового слоя и эффект вытеснения тока ротора, влекущие за собой уменьшение индуктивного сопротивления $x_2(s)$ и увеличение активного сопротивления ротора $R_2(s)$.

Зависимость $R_2(s)$ можно аппроксимировать функцией [9]

$$R_2(s) = R_2(0) + (R_2(1) - R_2(0))\sqrt{s}, \quad s_H < s \leq 1, \quad (20)$$

где

$$R_2(0) = \frac{R_2(s_H) - R_2(1)\sqrt{s_H}}{1 - \sqrt{s_H}}.$$

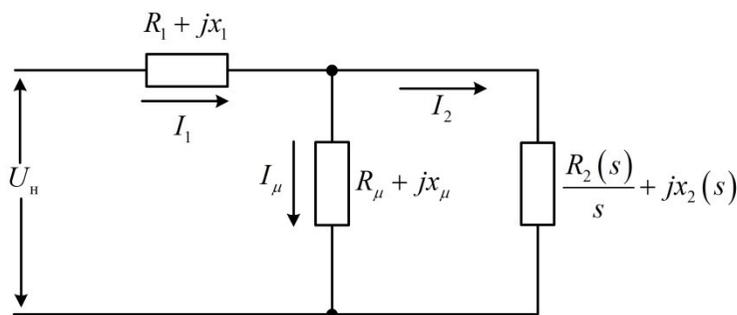


Рис. 2. Схема замещения АД с КЗ ротором

Индуктивное сопротивление изменяется незначительно в диапазоне скольжений $0,2 \leq s \leq 1$, основное его изменение приходится на участок $0 \leq s \leq 0,2$.

С достаточной степенью точности эту зависимость можно представить в виде [9]

$$x_k(s) = x_k(1) + (x_k(s_H) - x_k(1))e^{-\frac{s-s_H}{T_1}}, \quad s_H \leq s \leq 1, \quad (21)$$

где $x_k(1)$ – сопротивление короткого замыкания; $T_1 = 0,15$ с.

Индуктивное сопротивление статора

$$x_1 = 0,42x_k(s_H), \quad (22)$$

ротора

$$x_2(s) = 0,58x_k(s_H). \quad (23)$$

Из схемы замещения можно определить полное комплексное сопротивление

$$Z(s) = R(s) + jx(s) = R_1 + jx_1 + \frac{(R_\mu + jx_\mu) \left(\frac{R_2(s)}{s} + jx_2(s) \right)}{R_\mu + \frac{R_2(s)}{s} + j(x_\mu + x_2(s))},$$

из которого найти активное сопротивление двигателя

$$R(s) = R_1 + \frac{R_2(s) \frac{x_\mu^2}{s}}{(x_\mu + x_2(s))^2 + \frac{R_2^2(s)}{s^2}} \quad (24)$$

и индуктивное сопротивление

$$x(s) = x_1(s) + \frac{x_2(s)x_\mu^2 + x_\mu \left(x_2^2(s) + \frac{R_2^2(s)}{s^2} \right)}{\left(x_\mu + x_2(s) \right)^2 + \frac{R_2^2(s)}{s^2}}. \quad (25)$$

Вычисленные значения сопротивлений $R(s)$, $x(s)$ согласно (20) ÷ (25) для $s = (0,018; 0,1; 0,2; 0,6; 1,0)$ при $R_1 = 0,0572$ Ом, $R_2 = 0,0418$ Ом, $x_\kappa = 0,4664$ Ом, $s_H = 0,018$, $x_\mu = 10,05$ Ом, $R_2(1) = 0,0616$ Ом, $x_\kappa(1) = 0,33$ Ом для двигателя марки 4A225M2У3 даны в табл. 3.

Таблица 3

Значения сопротивлений $R(s)$, $x(s)$

s	0,018	0,05	0,1	0,2	0,6	1,0
$R(s)$, Ом	2,15	0,88	0,49	0,29	0,14	0,11
$x(s)$, Ом	0,93	0,50	0,42	0,37	0,33	0,33
$x_a(s)$, Ом	0,86	0,50	0,36	0,33	0,33	0,33
$R_a(s)$, Ом	2,37	0,93	0,51	0,30	0,15	0,12

Приближенные (аппроксимированные) зависимости $x_a(s)$, $R_a(s)$ построены по выражениям:

$$R_a(s) = R_1 + \frac{R_2(s)}{s}; \quad (26)$$

$$x_a(s) = x_\kappa(1) + (x_{\kappa 1} - x_\kappa(1))e^{-\frac{s-s_H}{T_1}}, \quad (27)$$

где $x_{\kappa 1} = z_H \sin \arccos \varphi_H$.

Постоянную времени T_1 определяют из условия выполнения равенства

$$x_a(0,05) = x(0,05).$$

Тогда из (26)

$$x(0,05) = x_\kappa(1) + (x_{\kappa 1} - x_\kappa(1))e^{-\frac{0,05-s_H}{T_1}},$$

откуда получаем

$$T_1 = \frac{s_H - 0,05}{\ln \frac{x(0,05) - x_\kappa(1)}{x_{\kappa 1} - x_\kappa(1)}}. \quad (28)$$

Для двигателя марки 4A225M2У3

$$x_{\kappa 1} = 2,2 \arcsin 0,92 = 0,86 \text{ Ом.}$$

Постоянная времени (28) при $x(0,05) = 0,5$ Ом (из табл. 3) составляет $T_1 = 0,028$ с.

Выражения (26), (27) принимают вид:

$$R_a(s) = 0,0572 + \frac{0,039 + 0,02\sqrt{s}}{s}; \quad (29)$$

$$x_a(s) = 0,33 + 0,53e^{\frac{s-0,018}{0,028}}. \quad (30)$$

Значения сопротивлений, вычисленные по аппроксимированным выражениям (29), (30), представлены в табл. 3.

Из анализа данных этой таблицы следует, что значения сопротивлений $R_a(s)$, $x_a(s)$ имеют достаточно хорошее совпадение с сопротивлениями $x(s)$ при всех скольжениях в диапазоне $0,018 \leq s \leq 1$.

Графики зависимости $R_a(s)$, $x_a(s)$ показаны на рис. 3.

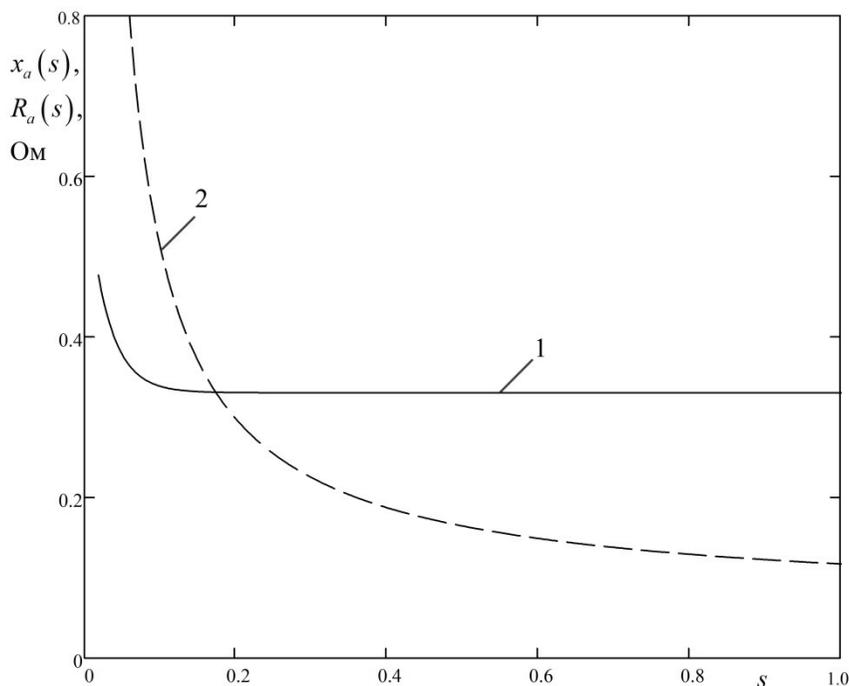


Рис. 3. Зависимость сопротивления двигателя 4A225M2У3 от скольжения: 1 – $x_a(s)$; 2 – $R_a(s)$

Эти зависимости могут быть использованы, например, в расчетах активной, реактивной и полной мощности при пуске асинхронного двигателя.

Выводы

Применение метода простых итераций к решению уравнений, полученных из уравнений реактивной мощности рассеяния и уравнений электромагнитной мощности двигателя в номинальном и критическом режимах, позволило значительно упростить решение данной системы уравнений. Погрешность вычислений не превышает следующих значений: активного сопротивления статора – 0,38 %, приведенного активного сопротивления ротора – 0,42 %, полного индуктивного сопротивления – 0,47 %.

В качестве контрольных следует выбирать двигатели, у которых сумма по абсолютной величине погрешности мощности на валу и кратности момента от-

носителем их значений, вычисленных по сопротивлениям из справочника, не превышает одного процента.

По значениям рассчитанных сопротивлений двигателя в номинальном режиме и индуктивного сопротивления контура намагничивания построены зависимости активного и индуктивного сопротивлений двигателя от скольжения точным и приближенным методами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Kotenev V.I., Kochetkov V.V., Elkin D.A.* The reactive power control of the power system load node at the voltage instability of the power supply, in 2017 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), 2017.
2. *Kotenev A.V. et al.* Electrical engineering unit for the reactive power control of the load bus at the voltage instability // Journal of Physics: Conference Series. 2018. № 1.012064.
3. *Моцинский Ю.А., Беспалов В.Я., Кирияткин А.А.* Определение параметров схемы замещения асинхронной машины по каталожным данным // Электричество. – 1998. – № 4. – С. 38–42.
4. *Усольцев А.А., Лукичев Д.В.* Определение параметров модели асинхронного двигателя по справочным данным // Известия вузов. Приборостроение. – 2008. – № 10. – С. 35–41.
5. *Макеев М.С., Кувишинов А.А.* Алгоритм расчета параметров схемы замещения асинхронного двигателя по каталожным данным // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2013. – № 1 (23). – С. 108–112.
6. *Свит П.П., Семкин Б.В.* Определение параметров схем замещения асинхронных двигателей небольшой мощности // Ползуновский альманах. Алтайский гос. тех. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул, 2004. – № 3. – С. 96–99.
7. *Котенев А.В., Котенев В.И., Кочетков В.В.* Определение сопротивлений короткозамкнутого двигателя по каталожным данным // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Технические науки. – 2016. – № 1 (49). – С. 103–106.
8. *Котенев А.В., Котенев В.И., Кочетков В.В.* Определение параметров схемы замещения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором по справочным данным // Известия вузов. Электромеханика. – 2016. – № 6 (548). – С. 13–17.
9. *Сыромятников И.А.* Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / Ред. Л.И. Мамиконянц. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 240 с.
10. *Jin Zhao, Bimal K.* Neural-network-based waveform Processing and Delayless filtering in power electronics and AC drives // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2004. № 5. Pp. 981–991.
11. *Megherbi A.C. et al.* Parameter identification of induction motors using variable-weighted cost function of genetic algorithms // Journal of Electrical Engineering & Technology. 2010. № 4. Pp. 597–605.
12. *Jin Z., Bose B.K.* Evaluation of membership functions for fuzzy logic controlled induction motor drive // IEEE 2002 28th Annual Conference of the Industrial Electronics Society. IECON 02. 2002. Vol. 1. Pp. 229–234.
13. *Bolovin E., Glazyrin A., Polichshuk V.* Induction Motor Drive Parameters Identification Applying Difference Schemes // Applied Mechanics and Materials. 2015. Pp. 65–68.
14. *Rechberger K., Coefler H.* Analytical approach to calculate the transient state of doubly fed synchronous machines employing the steady state circle diagram of the machine // 15th International Conference on Electrical Machines “ICEM 2002”. August 25–28. 2002. Brugge. Belgium. 2002.
15. *Кравчик А.Э. и др.* Асинхронные двигатели серии 4А: справочник. М.: Энергоатомиздат, 1982.
16. *Костенко М.П., Пиотровский Л.М.* Электрические машины. В 2 ч. Ч. 2. Машины переменного тока. – Л.: Энергия, 1973.

Статья поступила в редакцию 16 февраля 2021 г.

METHOD FOR CALCULATING THE RESISTANCE OF AN ASYNCHRONOUS SQUIRREL CAGE MOTOR ACCORDING TO PASSPORT DATA AND ESTIMATION OF ITS ERROR

V.I. Kotenev, A.D. Stulov

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

Abstract: *A simpler method is proposed for determining the resistances of an induction motor (total inductive resistance, active resistance of the stator and reduced active resistance of the rotor) according to reference data. Three algebraic equations are obtained from the equations of reactive power dissipation and electromagnetic power in the nominal mode and the equation of electromagnetic power in the critical mode: the first is relative to three resistances, the second is the equation of the dependence of the active resistance of the stator relative to the total inductive resistance, and the third is the active resistance of the rotor relative to the total inductive resistance. An iterative method is proposed for solving this system of equations, which gives a small error already at the second step of the calculations.*

When assessing the error of the method, the specified values of the electromagnetic power and the multiplicity of the maximum torque were used, which are expressed relative to the reference resistances of the control motors. An estimate is given of the total error from the imperfection of the method and the discrepancy between the reference values of the multiplicity of the maximum torque and power on the motor shaft with their refined values calculated from the resistances from the reference book.

Based on the calculated resistances in the nominal mode, the dependences of the active and inductive resistances of the motor are constructed using an accurate and approximate method.

Keywords: *method, calculation, resistance, induction motor, estimate, error.*

REFERENCES

1. *Kotenev V.I., Kochetkov V.V., Elkin D.A.* The reactive power control of the power system load node at the voltage instability of the power supply, in 2017 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), 2017.
2. *Kotenev A.V. et al.* Electrical engineering unit for the reactive power control of the load bus at the voltage instability // Journal of Physics: Conference Series. 2018. № 1.012064.
3. *Moshchinsky Yu.A., Bepalov V.Ya., Kiryatkin A.A.* Determination of the parameters of the equivalent circuit of an asynchronous machine according to catalog data // Electricity. 1998. No. 4. Pp. 38–42.
4. *Usoltsev A.A., Lukichev D.V.* Determination of the parameters of the model of an asynchronous motor according to reference data // Izvestiya VUZov. Instrumentation. 2008. No. 10. Pp. 35–41.
5. *Makeev M.S., Kuvshinov A.A.* Algorithm for calculating the parameters of the equivalent circuit of an induction motor according to catalog data // Vector of Science of Togliatti State University. 2013. No. 1 (23). Pp. 108–112.
6. *Suite P.P., Semkin B.V.* Determination of the parameters of the equivalent circuit of low-power asynchronous motors // Polzunovsky Almanac. Altai state those. un-t them. I.I. Polzunova (Barnaul) 2004. No. 3. Pp. 96–99.
7. *Kotenev A.V., Kotenev V.I., Kochetkov V.V.* Determination of the resistances of a squirrel-cage motor according to catalog data // Bulletin of the Samara State Technical University. Series of Engineering Science. 2016. No. 1 (49). Pp. 103–106.

*Viktor I. Kotenev (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Alexander D. Stulov, Postgraduate Student.*

8. *Kotenev A.V., Kotenev V.I., Kochetkov V.V.* Determination of the parameters of the equivalent circuit of an asynchronous motor with a squirrel-cage rotor according to reference data // *Izvestiya vuzov. Electromechanics*. 2016. No. 6 (548). Pp. 13–17.
9. *Syromyatnikov I.A.* Operating modes of asynchronous and synchronous motors, L.I. Mamikonyants (ed.). 4th ed. Revised. and add. Moscow: Energoatomizdat, 1984. 240 p.
10. *Jin Zhao, Bimal K.* Neural-network-based waveform Processing and Delayless filtering in power electronics and AC drives // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2004. № 5. Pp. 981–991.
11. *Megherbi A.C. et al.* Parameter identification of induction motors using variable-weighted cost function of genetic algorithms // *Journal of Electrical Engineering & Technology*. 2010. № 4. Pp. 597–605.
12. *Jin Z., Bose B.K.* Evaluation of membership functions for fuzzy logic controlled induction motor drive // *IEEE 2002 28th Annual Conference of the Industrial Electronics Society. IECON 02. 2002. Vol. 1. Pp. 229–234.*
13. *Bolovin E., Glazyrin A., Polichshuk V.* Induction Motor Drive Parameters Identification Applying Difference Schemes // *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Pp. 65–68.
14. *Rechberger K., Coefler H.* Analytical approach to calculate the transient state of doubly fed synchronous machines employing the steady state circle diagram of the machine // *15th International Conference on Electrical Machines “ICEM 2002”*. August 25–28. 2002. Brugge. Belgium. 2002.
15. *Kravchik A.E. et al.* Asynchronous motors of the 4A series: a reference book. M.: Energoatomizdat, 1982.
16. *Kostenko M.P., Piotrovsky L.M.* Electric cars. L.: Energy, 1973. 648 p.