

# Расчет параметров схемы замещения асинхронных двигателей по каталожным данным

ГРИДИН В.М.

*Предложена методика определения параметров схемы замещения асинхронных двигателей (АД), необходимых для расчёта его характеристик в рабочем режиме. Исходными для расчёта являются только каталожные (паспортные) данные АД. Благодаря простоте и достаточной точности методика является приемлемой для учебного процесса, а также для прикладных и исследовательских работ, при проведении которых необходимо знание значений параметров схемы замещения АД.*

**Ключевые слова:** асинхронные двигатели, схема замещения, параметры, расчет

Расчету значений параметров схемы замещения АД посвящено много работ. В [1] предложена «математическая модель для оценки параметров схемы замещения на основе использования паспортных данных и рабочих характеристик – частоты вращения ротора, номинального и пускового моментов, значений КПД и  $\cos\phi$  при 25, 50, 75 и 100%-й нагрузке, кратности пускового тока. Уравнения модели получены из совместного рассмотрения эквивалентной схемы замещения, векторной диаграммы и характеристик двигателей. На основе разработанной методики составлен алгоритм и выполнена программа на персональном компьютере. Ввод – вывод информации реализован в виде электронных таблиц и графиков».

В [2] предложен алгоритм расчета значений параметров продольной ветви схемы замещения АД, содержащий процедуру итерации. В каждом её цикле назначается коэффициент загрузки АД, рассчитываются значения номинального электромагнитного момента  $M_{\text{эмн}}$  и указанных параметров за 17 действий. Затем рассчитываются значения критического скольжения и номинального электромагнитного момента  $M_{\text{эмн}}$  по уточненной формуле Клосса. Если различие между значениями  $M_{\text{эмн}}$  и  $M_{\text{эмн}}$  превышает допустимое значение, то корректируется коэффициент загрузки и процесс расчета повторяется.

Предложенные в [1, 2] и другой литературе методики определения параметров схемы замещения АД не позволяют определять их значения только по каталожным (паспортным) данным АД, без применения итерационных процедур или дополни-

*A procedure for calculating the parameters of the equivalent circuit of induction motors is proposed. Only the induction motor's nameplate parameters are used as initial data for calculation. The procedure is based on using well-known expressions for the nominal and maximal electromagnetic torques and electric losses for the case of induction motor operation with the maximum possible efficiency. Owing to its simplicity and sufficient accuracy, the proposed procedure can be used for education purposes, as well as for application and research works for which the parameters of the induction motor's equivalent circuit must be known.*

**Key words:** induction motors, equivalent circuit, parameters, calculation

тельных рабочих характеристик АД, являются сложными и поэтому неприемлемыми для учебного процесса.

Цель настоящей работы – создание несложной и достаточно точной методики расчёта значений параметров схемы замещения АД для рабочего режима только по каталожным данным АД. Методика должна быть приемлемой для использования в учебном процессе, а также при проведении прикладных и исследовательских работ.

Такая методика может быть создана на основе использования известных выражений для номинального и максимального электромагнитного момента, потерь мощности и электрических потерь, а также в условиях работы АД с максимально возможным КПД. Она предполагает расчёт сначала отношения активного сопротивления обмотки статора к активному приведенному к обмотке статора сопротивлению обмотки ротора, т.е.  $r_1 / r_2'$ , а затем – расчёт самих параметров, т.е. сопротивлений схемы замещения АД.

На рис. 1 изображена схема замещения одной фазы АД, известная, например, по [3]. Здесь помимо упомянутых  $r_1$  и  $r_2'$  обозначено:  $Z_1$  – комплексное сопротивление обмотки статора;  $x_k$  – индуктивное сопротивление обмоток для режима КЗ (при неподвижном роторе);  $Z_0$  – комплексное сопротивление поперечной ветви для Т-образной схемы замещения АД;  $s$  – скольжение ротора;  $\overset{\&}{U}$  – напряжение питания;  $\overset{\&}{I}_{1x}$  – ток холостого хода;

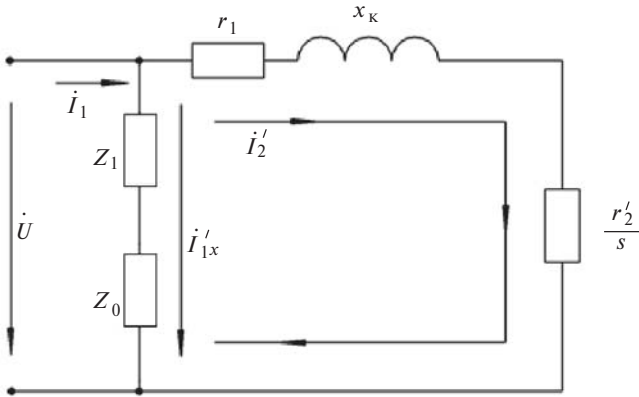


Рис. 1. Упрощенная Г-образная схема замещения одной фазы асинхронного двигателя

$I_2$  — ток в обмотке ротора, приведенный к обмотке статора;  $I_1$  — потребляемый ток.

Согласно [3] «параметры асинхронных машин таковы, что переход от Т-образной схемы к упрощенной Г-образной не приводит к появлению заметных погрешностей». В частности, «погрешность в первичном токе, связанная с неточностями в вычислении токов  $I_{1x}$  и  $I_2$ , не превосходит 1–2% (в сторону завышения)» [3]. Согласно [4]  $Z_1 + Z_0 = C_1 Z_0$ , где  $C_1 = 1 + Z_1 / Z_0 = 1,02, 1,06$ .

Покажем, как могут быть получены искомые выражения для сопротивлений схемы замещения АД, позволяющие рассчитать их значения только по каталожным данным.

В каталогах для АД с короткозамкнутым ротором, например серии АИР, и для АД с фазным ротором, например серий 4АК и 4АНК, указаны номинальные значения напряжения питания  $U_H$  и основных характеристик: мощности  $P_{2H}$ , числа оборотов в минуту вращающегося магнитного поля статора  $n_0$ , скольжения  $s_H$ , КПД  $h_H$ , коэффициента мощности  $\cos \phi_H$ , отношения I максимального вращающего момента  $M_m$  к номинальному  $M_H$ .

Известны выражения для номинальных характеристик: угловой скорости вращения ротора  $W_H$ , мощности на валу  $P_2$ , соотношения между вращающим  $M_H$  и электромагнитным  $M_{эм.н}$  моментами, а также момента холостого хода  $M_0$ :

$$W_H = n_0(1 - s_H) / 9,55 = W_0(1 - s_H);$$

$$P_{2H} = M_H W_H; M_{эм.н} = M_H + M_0 = \chi M_H;$$

$$M_0 = \frac{DP_{мех} + DP_{д}}{W_H} = (\chi - 1)M_H.$$

Здесь  $W_0 = m_0 / 9,55$  — угловая скорость вращения магнитного поля статора;  $\chi = 1 + (DP_{мех} + DP_{д}) / P_{2H}$ , так как  $M_{эм.н} W_H = M_H W_H + DP_{мех} + DP_{д}$ ;  $DP_{мех}$  —

мощность механических потерь;  $DP_{д}$  — мощность добавочных потерь, обусловленных наличием высших гармоник МДС обмоток и зубчатым строением статора и ротора. Согласно [4] сумма мощностей  $DP_{мех} + DP_{д}$  не превышает  $(0,02, 0,10)P_{2H}$ , следовательно  $\chi = 1,02, 1,10$ .

Известны выражения для коэффициента загрузки АД  $b = P_2 / P_{2H}$ , для которого КПД  $h$  — максимальный, а также для номинальных мощностей всех потерь  $DP_H$ , всех электрических потерь  $DP_{элн}$  и электрических потерь в обмотке ротора  $DP_{эл2н}$ :

$$\frac{P_2}{P_{2H}} = b_0 = \sqrt{\frac{DP_0}{DP_{элн}}} = 0,70, 0,85; \quad (1)$$

$$DP_H = P_{2H} \frac{1 - h_H}{h_H} = DP_0 + DP_{элн}; \quad (2)$$

$$DP_{элн} = 3I_{2H}^2(r_1 + r_2); \quad (3)$$

$$DP_{эл2н} = 3I_{2H}^2 r_2 = M_{эм.н} W_0 s_H = \chi M_H \frac{W_H}{1 - s_H} s_H = \frac{\chi s_H}{1 - s_H} P_{2H}, \quad (4)$$

где  $DP_0$  — суммарная мощность магнитных и механических потерь.

Рассматривая совместно выражения (1), (2) и (3), получаем:

$$3I_{2H}^2(r_1 + r_2) = \frac{P_{2H}}{1 + b_0^2} \frac{1 - h_H}{h_H}. \quad (5)$$

Выразим из (4) произведение  $3I_{2H}^2$ , подставим полученное выражение в (5) и после преобразования найдем отношение активных сопротивлений схемы замещения:

$$a = \frac{r_1}{r_2} = \frac{a_0}{\chi} \frac{1 - h_H}{h_H} \frac{1 - s_H}{s_H} - 1, \quad (6)$$

где  $a_0 = \frac{1}{1 + b_0^2}$ .

Проанализируем полученное выражение для  $a = r_1 / r_2$ . При увеличении коэффициента  $b_0$  в области вероятных значений от 0,7 до 0,85 коэффициент  $a_0$  уменьшается от 0,671 до 0,581, т.е. в 1,15 раз. Можно рекомендовать, например, значение  $a_0 = 0,61$ , которому соответствует значение  $b_0 = 0,8$ . При увеличении мощности  $P_{2H}$  согласно каталогам для АД, как правило, КПД  $h_H$  увеличивается, а скольжение  $s_H$  уменьшается, соответственно множитель  $(1 - h_H)h_H$  уменьшается, а множитель  $(1 - s_H) / s_H$  увеличивается. Поэтому значения про-

изведения  $\frac{1-h_H}{h_H} \frac{1-s_H}{s_H}$  и, следовательно, отношения  $a = r_1 / r_{\Sigma}$  находятся в относительно узком интервале. Как показала практика расчётов, отношение  $a = r_1 / r_{\Sigma}$  может принимать значения от десятых долей единицы до нескольких единиц.

Известны выражения для максимального  $M_{\Sigma m}$  и номинального  $M_{\Sigma H}$  электромагнитных моментов:

$$M_{\Sigma m} = \frac{3U_H^2}{2W_0(r_1 + \sqrt{r_1^2 + x_K^2})} = 1 M_H + M_0 = (1 + \chi - 1) M_H; \quad (7)$$

$$M_{\Sigma H} = \frac{3U_H^2 r_{\Sigma} / s_H}{W_0[(r_1 + r_{\Sigma} / s_H)^2 + x_K^2]} = \chi M_H, \quad (8)$$

где  $U_H$  – номинальное фазное напряжение.

Из (7) получим выражение для индуктивного сопротивления:

$$x_K = \sqrt{\frac{3U_H^2(1-s_H)}{2P_{2H}(1+\chi-1)} - r_1^2 - r_{\Sigma}^2}. \quad (9)$$

Введем величину

$$R_m = \frac{3U_H^2(1-s_H)}{2P_{2H}(1+\chi-1)} \quad (10)$$

и с учетом (9) и (10) запишем для  $x_K$  другое выражение:

$$x_K = \sqrt{R_m^2 - 2R_m r_1}. \quad (11)$$

Учитывая, что  $r_1 = ar_{\Sigma}$ , из (8) получим квадратное уравнение с неизвестным сопротивлением  $r_{\Sigma}$ :

$$(ar_{\Sigma} + r_{\Sigma} / s_H)^2 + R_m^2 - 2aR_m r_{\Sigma} = 2bR_m r_{\Sigma} / s_H,$$

где  $b = (1 + \chi - 1) / \chi$ .

Его решением будет выражение

$$r_{\Sigma} = \frac{R_m b}{G s_H} + a + \sqrt{\frac{R_m^2 b^2}{G^2 s_H^2} + \frac{a^2}{\chi} - G \frac{a}{s_H}} \quad (12)$$

где

$$G = 1/s_H^2 + 2a/s_H + a^2. \quad (13)$$

Из (10), (12) и (13) получим для  $r_{\Sigma}$  другое выражение:

$$r_{\Sigma} = \frac{3U_H^2 s_H(1-s_H)[b+a+s_H + \sqrt{b^2-1+2as_H(b-1)}]}{2P_{2H}(1+\chi-1)(1+2as_H+a^2s_H^2)} \quad (14)$$

Зная  $r_{\Sigma}$  и отношение  $a = r_1 / r_{\Sigma}$ , можно определить сопротивления  $r_1$  и  $x_K$ .

Найдем приближенные оценочные выражения для сопротивлений  $r_{\Sigma}$  и  $x_K$ . Учитывая, что  $s_H < < 1$ ,  $b \gg 1$ , и пренебрегая малыми членами, получаем из (12)–(14) более простое выражение:

$$r_{\Sigma} \gg R_m s_H (1 + \sqrt{1^2 - 1}). \quad (15)$$

С учётом (10), полагая  $1 + \chi - 1 \gg 1$ , получаем:

$$r_{\Sigma} \gg \frac{3U_H^2}{2P_{2H}} s_H \frac{1}{1} \frac{\sqrt{1^2 - 1}}{1} \quad (16)$$

Так как множитель  $1 + \sqrt{1^2 - 1} / 1$  при изменении  $l$  от 2 до 3,5 изменяется от 1,87 до 1,96, т.е. в среднем равен 1,915, то

$$r_{\Sigma} \gg 2,87 \frac{U_H^2}{P_{2H}} s_H. \quad (17)$$

Рассматривая совместно формулы (11), (15) и  $r_1 = ar_{\Sigma}$ , получаем:

$$x_K \gg R_m \sqrt{1 - 2as_H(1 + \sqrt{1^2 - 1})}. \quad (18)$$

Так как  $s_H < < 1$ , то

$$x_K \gg R_m \gg \frac{1,5U_H^2}{1P_{2H}}. \quad (19)$$

Расчёт по приближенным формулам завышает значения сопротивлений  $r_1$ ,  $r_{\Sigma}$  и  $x_K$ .

Так как выражения (15)–(19) являются только оценочными, то для расчёта сопротивлений  $r_{\Sigma}$  и  $x_K$  нужно применять выражения (9)–(14).

Согласно (17) и (19) сопротивления  $r_{\Sigma}$  и  $x_K$ , а также  $r_1 = ar_{\Sigma}$  тем меньше, чем меньше напряжение питания  $U_H$  и чем больше мощность  $P_{2H}$ ; сопротивления  $r_1$  и  $r_{\Sigma}$  практически не зависят от отношения  $l$ , а значение сопротивления  $x_K$  тем меньше, чем больше отношение  $l$  максимального момента  $M_m$  к номинальному  $M_H$ . Такая зависимость  $x_K(l)$  предопределена формулой (7) для максимального электромагнитного момента.

Для определения комплексного сопротивления  $Z_0$  схемы замещения и его составляющих  $r_0$  и  $x_0$  нужно вначале определить ток холостого хода  $I_{1x}$  и разность фаз  $j_x$  этого тока и напряжения питания  $U_H$ , используя векторную диаграмму АД на рис. 2.

Для обозначенных здесь характеристик справедливы следующие формулы:

номинальный потребляемый фазный ток

$$I_{1H} = P_{2H} / (3U_H \cos j_H h_H);$$

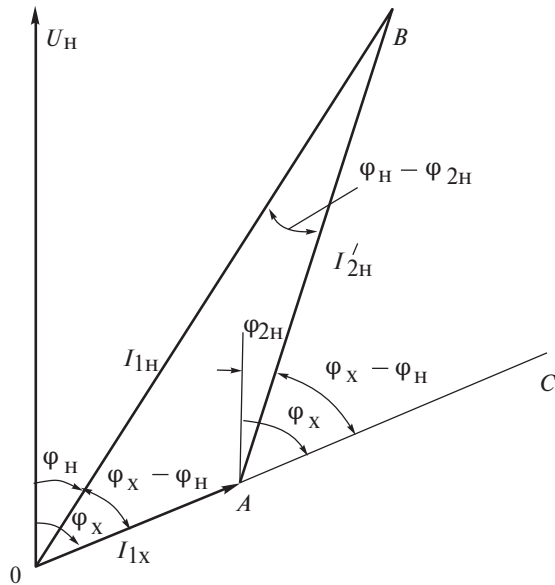


Рис. 2. Векторная диаграмма асинхронного двигателя

номинальный ток в обмотке ротора, приведенный к обмотке статора

$$I_{2H} = \frac{U_H}{\sqrt{(r_1 + r_2/s_H)^2 + x_k^2}}$$

угол между векторами  $I_{1H}$  и  $U_H$

$$j_H = \arccos(\cos j_H);$$

угол между векторами  $I_{2H}$  и  $U_H$

$$j_{2H} = \arctg \frac{x_k}{r_1 + r_2/s_H};$$

угол ОВА между векторами  $I_{1H}$  и  $I_{2H}$  равен  $j_H - j_{2H}$ , потому что сумма этого угла с другим острым углом треугольника  $BOA$  равна внешнему углу  $BAC$   $j_H - j_{2H}$ .

Из векторной диаграммы по теореме косинуса для треугольника  $OBA$  следует:

$$I_{1x} = \sqrt{I_{1H}^2 + I_{2H}^2 - 2I_{1H}I_{2H}\cos(j_H - j_{2H})}. \quad (20)$$

Из рис. 2 также следует:

$$\cos j_x = (I_{1H}\cos j_H - I_{2H}\cos j_{2H})/I_{1x}; \quad (21)$$

$$j_x = \arccos(\cos j_x).$$

В [2, 5] приведены другие выражения для тока  $I_{1x}$  и  $\cos j_x$ , однако они менее удобны для расчетов, чем (20) и (21).

Комплексное сопротивление

$$Z_0 = r_0 + jx_0 = z_0 \angle j_x,$$

где  $z_0 = \sqrt{r_0^2 + x_0^2} = U_H / C_1 I_{1x}$  – полное сопротивление;  $r_0 = z_0 \cos j_x$ ,  $x_0 = z_0 \sin j_x$  – активная и индуктивная составляющие сопротивления  $Z_0$ .

Результаты расчёта полезно проверить по формулам, вытекающим из (7), (8) и выражения для мощности:

$$P_{2H} = \frac{3U_H^2(1-s_H)r_2/s_H}{x[(r_1 + r_2/s_H)^2 + x_k^2]}$$

$$l = \frac{3U_H^2}{2P_{2H}} \frac{1-s_H}{r_1 + \sqrt{r_1^2 + x_k^2}} + 1 - x.$$

С целью проверки предложенной методики расчёта параметров схемы замещения АД были определены значения активного сопротивления обмотки статора  $r_1$  для АД с известными обмоточными данными, приведенными в [6]. Рассчитанные по методике значения  $r_1$  совпадали с известными с погрешностью не более 5%. С этой же целью были рассчитаны параметры схемы замещения двух АД, спроектированных в [7, 8].

*Пример 1.* Расчет параметров схемы замещения АД [7]:  $U_H = 380$  В;  $P_{2H} = 15000$  Вт;  $n_0 = 1500$  об/мин;  $s_H = 0,016$ ;  $\cos j_H = 0,89$ ;  $h_H = 0,89$ ;  $l = 2,0$ .

Принимаем, как в [7],  $C_1 = 1,02$ ,  $b_0 \gg 0,8$ ,  $x = 1,014$ , тогда  $b = \frac{l+x-1}{x} = 1,986$ ;  $a_0 = \frac{1}{1+b_0^2} = 0,61$ ;

$$a = \frac{r_1}{r_2} = \frac{a_0}{x} \frac{1-h_H}{h_H} \frac{1-s_H}{s_H} = 3,573;$$

$$r_2 = \frac{3U_H^2 s_H (1-s_H)[b + as_H + \sqrt{b^2 - 1 + 2as_H(b-1)}]}{2P_{2H} (1+x-1)(1+2as_H + a^2 s_H^2)} =$$

$$= 0,383 \text{ Ом}; \quad r_1 = ar_2 = 1,368 \text{ Ом};$$

$$x_k = \sqrt{\frac{3U_H^2 (1-s_H)}{2P_{2H} (1+x-1)} - r_1^2} = 5,52 \text{ Ом}$$

$$\text{или } R_m = \frac{3U_H^2}{2P_{2H}} \frac{1-s_H}{1+x-1} = 7,055 \text{ Ом};$$

$$G = \frac{1}{s_H^2} + \frac{2a}{s_H} + a^2 = 4365;$$

$$r_2 = \frac{R_m}{G} \frac{b}{s_H} + a \sqrt{\frac{R_m b}{G s_H} + a^2 \frac{R_m}{G}} = 0,383 \text{ Ом};$$

$$r_1 = ar_2 = 1,368 \text{ Ом};$$

$$x_k = \sqrt{R_m^2 - 2R_m r_1} = 5,52 \text{ Ом}.$$

По максимально упрощенным формулам (17) и (19) можно получить прикидочные значения со-

противлений  $r\zeta$  и  $x_K$ , завышенные соответственно на 15 и 30%:  $r\zeta = 0,442$  Ом;  $x_K = 7,22$  Ом;

$$I_{1H} = P_{2H} / (3U_H \cos j_H h_H) = 16,6 \text{ А};$$

$$I_{\zeta H} = \frac{U_H}{\sqrt{(r_1 + r\zeta/s_H)^2 + x_K^2}} = 14,67 \text{ А};$$

$$j_H = \arccos(\cos j_H) = \arccos(0,89) = 27,1^\circ;$$

$$j_{2H} = \arctg \frac{x_K}{r_1 + r\zeta/s_H} = 12,3^\circ;$$

$$I_{1X} = \sqrt{I_{1H}^2 + I_{\zeta H}^2 - 2I_{1H}I_{\zeta H} \cos(j_H - j_{2H})} = 4,39 \text{ А};$$

$$\cos j_X = (I_{1H} \cos j_H - I_{\zeta H} \cos j_{2H}) / I_{1X} = 0,101;$$

$$j_X = \arccos(\cos j_X) = 84,2^\circ; z_0 = U_H / C_1 I_{1X} = 84,9 \text{ Ом};$$

$$r_0 = z_0 \cos j_X = 8,57 \text{ Ом}; x_0 = z_0 \sin j_X = 84,48 \text{ Ом};$$

$$Z_0 = r_0 + jx_0 = 8,57 + j84,48.$$

Проверка:

$$P_{2H} = \frac{3U_H^2 (1 - s_H) r\zeta / s_H}{x[(r_1 + r\zeta/s_H)^2 + x_K^2]} = 15000 \text{ Вт};$$

$$l = \frac{3U_H^2}{2P_{2H}} \frac{1 - s_H}{r_1 + \sqrt{r_1^2 + x_K^2}} + 1 - x = 2.$$

Результаты расчёта значений параметров схемы замещения АД:  $r_1 = 1,368$  Ом;  $r\zeta = 0,383$  Ом;  $x_K = 5,52$  Ом;  $r_0 = 8,57$  Ом;  $x_0 = 84,48$  Ом. Значения параметров схемы замещения АД, приведённые в [7]:  $r_1 = 1,1$  Ом;  $r\zeta = 0,37$  Ом;  $x_K = 5,54$  Ом;  $r_0 = 4,81$  Ом;  $x_0 = 85,2$  Ом.

Очевидно, оба значения сопротивлений  $r\zeta$ ,  $x_K$  и  $x_0$  практически совпадают. Различие двух значений сопротивления составляет примерно 20%, а сопротивления  $r_0$  – примерно 78%. Но это не означает ошибочность расчётов, так как расчётные формулы в статье основаны только на известных выражениях. К тому же значение сопротивления  $r_0$  практически не влияет на значения тока  $I_{1X}$  и угла  $j_X$ .

Как видно из примера, значения сопротивлений  $r_1$ ,  $r\zeta$  и  $x_K$  схемы замещения АД рассчитаны всего за четыре действия без применения итераций. При этом использованы всего четыре формулы, содержащие только каталожные данные и вытекающие из общепризнанных выражений. В отличие от известных методик такие расчёты можно и нужно проводить с помощью простейшего калькулятора, что вполне приемлемо для учебного процесса.

*Пример 2.* Расчет параметров схемы замещения АД [8]:  $U_H = 220$  В;  $P_{2H} = 15000$  Вт;  $n_0 = 1500$  об/мин;  $s_H = 0,024$ ;  $\cos j_H = 0,894$ ;  $h_H = 0,892$ .

Значения параметров схемы замещения, приведенные в [8]:  $r_1 = 0,355$  Ом;  $r\zeta = 0,186$  Ом;  $x_K = 1,585$  Ом;  $r_0 = 2,97$  Ом;  $x_0 = 26,84$  Ом; значения параметров, рассчитанные автором для  $l = 2,2$ :  $r_1 = 0,385$  Ом;  $r\zeta = 0,196$  Ом;  $x_K = 1,706$  Ом;  $r_0 = 2,56$  Ом;  $x_0 = 27,13$  Ом.

Проверка:  $P_{2H} = 15000$  Вт;  $l = 2,2$ .

Очевидно, оба значения сопротивлений  $x_0$  практически совпадают. Различие двух значений сопротивлений  $r_1$  и  $x_K$  составляет примерно 8%, сопротивления  $r\zeta$  – примерно 5%, а сопротивления  $r_0$  – примерно 16%.

По максимально упрощённым формулам (17) и (19):  $r\zeta = 0,222$  Ом;  $x_K = 2,20$  Ом. Отношения одноименных сопротивлений:  $0,222 : 0,196 = 1,13$ ;  $2,20 : 1,706 = 1,29$ .

Предложенная в статье простая и достаточно точная методика успешно применялась в учебном процессе МГТУ им. Н.Э.Баумана при расчетах и построениях характеристик АД по каталожным данным. В частности, графики рабочих характеристик  $I_1(P_2)$ ,  $P_1(P_2)$ ,  $h(P_2)$ ,  $\cos j(P_2)$ ,  $M(P_2)$ ,  $n(P_2)$ , а также механической  $n(M)$  и электромеханической  $n(I_1)$  характеристик имели вид, подобный таковым характеристикам, например, в [4]; КПД был максимален при назначенном коэффициенте загрузки АД.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беспалов В.Я., Мощинский Ю.А., Кириакин А.А. Определение параметров и характеристик асинхронных двигателей на основе компьютерной обработки паспортных данных. Тезисы докладов научно-техн. конф. «Электротехнические комплексы автономных объектов». – М.: МЭИ, 1997.
2. Фираго Б.И., Павлячик Л.Б. Регулируемые электроприводы переменного тока. – Минск: Техноперспектива, 2006.
3. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины: Учебник для вузов – М.: Энергия, 1980.
4. Вольдек А.И. Электрические машины: Учебник для вузов. – Л.: Энергия, 1974.
5. Сборник задач по электротехнике и основам электроники / Под ред. В.С. Пантюшина. – М.: Высшая школа, 1979.
6. Тембель П.В., Герашенко Г.В. Справочник по обмоточным данным электрических машин и аппаратов. – Киев: Техніка, 1981.
7. Кацман М.С. Расчёт и конструирование электрических машин. – М.: Энергоатомиздат, 1984.
8. Проектирование электрических машин / Под ред. И.П. Копылова. – М.: Высшая школа, 2002.

[14.06/12]

*Автор: Гридин Владимир Михайлович окончил электромеханический факультет Московского энергетического института (МЭИ) в 1963 г. В 1979 г. в МЭИ защитил кандидатскую диссертацию «Исследование и расчет трехфазных бесконтактных двигателей постоянного тока с однополупериодной коммутацией». Доцент кафедры «Электротехника и промышленная электроника» МГТУ им. Н.Э.Баумана.*