

## Гибридная схема замещения асинхронных двигателей с глубокопазым или двухклеточным ротором

СИВОКОБЫЛЕНКО В.Ф.

*Усовершенствован метод определения по каталожным данным параметров двух известных схем замещения рассматриваемых двигателей. В первой схеме для учета вытеснения тока сопротивлением ротора представлены нелинейными функциями скольжения, а во второй несколькими параллельно включенными контурами с постоянными сопротивлениями. Для учета потерь в стали в схемах выделен отдельный контур с общей взаимной индуктивностью. Предложенный метод основан на формировании и решении систем нелинейных уравнений для основных режимов двигателя и в отличие от известных обеспечивает полное совпадение расчетных и каталожных данных. Выявлены недостатки указанных схем: различные значения токов и, особенно, моментов при скольжениях, больших критического, но меньших единицы; некорректное отображение аperiodических составляющих токов и моментов в переходных режимах. Предложена не имеющая недостатков гибридная схема замещения, основанная на использовании параметров ротора обеих рассмотренных схем. Схема пригодна для анализа как стационарных, так и динамических режимов. Приведены примеры, подтверждающие эффективность разработанных методов и преимущества предлагаемой гибридной схемы.*

**Ключевые слова:** асинхронный двигатель, ротор, каталожные данные, вытеснение тока, параметры, гибридная схема замещения

Асинхронные двигатели (АД) с короткозамкнутым ротором являются сейчас основным типом электропривода механизмов различного рода промышленных установок. Для улучшения пусковых характеристик роторы асинхронных двигателей выполняют со стержнями прямоугольной, трапецеидальной, овальной, колбообразной формы или с двойной беличьей клеткой [1, 2]. Улучшение характеристик достигается за счет использования поверхностного эффекта в стержнях обмотки ротора, благодаря которому в пусковых режимах при больших скольжениях возрастает активное и уменьшается индуктивное сопротивление ротора, что в результате приводит к увеличению пускового электромагнитного момента. Применение таких АД в системе собственных нужд тепловых и атомных электростанций, а также в других промышленных установках с непрерывным технологическим процессом требует знания параметров эквивалентных схем замещения с целью анализа работы АД как в стационарных режимах, так и при кратковременных нарушениях электроснабжения, вызванных короткими замыканиями или переключениями питания двигателей на резервный источник.

Заводы-изготовители АД не предоставляют сведений о параметрах схемы замещения и форме стержней ротора, в связи с чем актуальной задачей является разработка методов их определения на основе известных каталожных или эксперименталь-

ных данных: номинальных значений напряжения  $U_H$ , тока статора  $I_H$ , активной мощности  $P_H$ , скольжения  $s_H$ , КПД  $\eta_H$ , коэффициента мощности  $\cos \varphi_H$ , а также значений кратности пускового тока статора  $I_p$  по отношению к номинальному току, пускового  $M_p$  и максимального  $M_M$  моментов по отношению к номинальному моменту.

**Анализ последних исследований.** Определению параметров АД посвящено много работ [1–8 и др.], однако основной их недостаток в том, что рассчитанные по найденным параметрам схемы замещения значения токов и моментов существенно отличаются от исходных каталожных данных. Особенно значительные погрешности возникают при расчете глубокопазым двигателей номинальным напряжением 6–10 кВ и мощностью более 1000 кВт. Причинами этого являются приближенный или недостаточно корректный учет эффекта вытеснения тока в стержнях ротора [3–5], использование недостоверной информации, отсутствующей в каталожных данных [4–6], пренебрежение потерями в стали [4] и др. Указанные факторы вносят существенные погрешности в результаты расчета как одиночных, так и групповых режимов работы АД. Принято считать [7, 8], что для анализа динамических характеристик предпочтительны схемы замещения АД с многоконтурным ротором. В них вытеснение тока в роторе учитывается за счет параллельного включения нескольких контуров с различными по-

стоянными времени, благодаря чему более точно описываются электромагнитные переходные процессы. Для анализа квазистационарных режимов АД (пуск, самозапуск, обрыв фазы) предпочтительны схемы замещения с одним контуром на роторе с зависящими от скольжения активным и индуктивным сопротивлениями. Поэтому необходимо дальнейшее совершенствование схем замещения глубоководных АД как для анализа квазистационарных режимов, так и переходных процессов.

**Задачи исследований.** На основе каталожных данных и при отсутствии сведений о форме стержней ротора для глубоководных и двухклеточных АД разработать метод определения параметров эквивалентных схем замещения, в которых учитываются эффект вытеснения тока в роторе и потери в стали, а расчетные значения токов и моментов полностью совпадают с исходными каталожными данными. На основе сравнительного анализа указанных схем выявить их достоинства и недостатки и предложить способы устранения недостатков.

**Результаты исследований.** В качестве допущений примем, что насыщение, а также механические и добавочные потери в АД отсутствуют. Для учета вытеснения тока в роторе будем полагать, что ротор выполнен глубоководным со стержнями прямоугольной формы или многоконтурным с двумя и более беличьими клетками. Основное внимание уделим двум схемам замещения: с одним контуром на роторе (ОКР) (рис. 1) и с многоконтурным ротором (МКР). При этом, как показано в [7, 8], в последнем случае можно ограничиться учетом только двух контуров (рис. 2). В обеих схемах сопротивления статора, ветви намагничивания и контуры потерь в стали представлены одинаково, а сопротивления ротора в первой схеме являются нелинейными функциями скольжения, а во второй – результирующим сопротивлением двух параллельно включенных ветвей с постоянными активным и индуктивным сопротивлениями в каждой из них.

Рассмотрим сначала способ определения параметров схемы замещения с ОКР (рис. 1), используемой, в основном, для анализа стационарных и квазистационарных режимов работы АД. Она со-

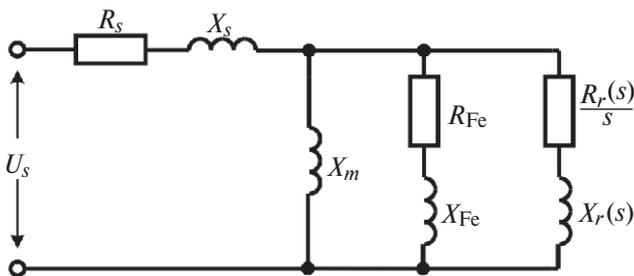


Рис. 1. Схема замещения глубоководного АД с одним контуром на роторе, параметры которого являются функциями скольжения

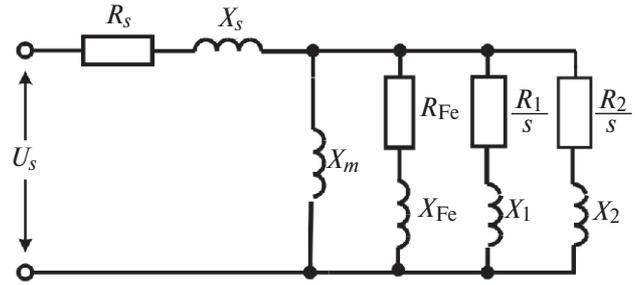


Рис. 2. Схема замещения АД с двухконтурным ротором, сопротивления которого не зависят от скольжения

держит активное сопротивление  $R_s$  и индуктивное сопротивление  $X_s$  рассеяния обмотки статора, сопротивление взаимной индукции  $X_m$ , активное сопротивление  $R_{Fe}$  и индуктивное сопротивление  $X_{Fe}$  рассеяния контура для учета потерь в стали. Сопротивления обмотки ротора, активное  $R_r(s)$  и индуктивное рассеяния  $X_r(s)$ , представим функциями скольжения, так как они зависят от частоты тока ротора, высоты и формы сечения стержней и глубины проникновения магнитного поля. В [1] приведены аналитические выражения указанных функций для стержней прямоугольной формы. Воспользуемся ими, однако эквивалентные значения высоты стержней для активного  $h_R$  и индуктивного  $h_X$  сопротивлений будем принимать различными. Приведенные значения высоты стержней ( $x_{RS}$  и  $x_{XS}$ ) зависят от текущего скольжения (пропорциональны  $\sqrt{s}$ ), а при  $s=1$  численно равны эквивалентным значениям высоты ( $x_{R1} = h_R$ ,  $x_{X1} = h_X$ ), выраженным в сантиметрах [1]. Тогда сопротивления ротора как функции соответствующего значения эквивалентной высоты стержней и скольжения примут вид:

$$R_r(s, h_R) = R_{r0} K_r(s, h_R); \tag{1}$$

$$X_r(s, h_X) = X_{r0} K_x(s, h_X);$$

$$K_r(s, h_R) = h_R \sqrt{s} \frac{\text{sh}(2h_R \sqrt{s}) + \sin(2h_R \sqrt{s})}{\text{ch}(2h_R \sqrt{s}) - \cos(2h_R \sqrt{s})}; \tag{2}$$

$$K_x(s, h_X) = \frac{3}{2h_X \sqrt{s}} \frac{\text{sh}(2h_X \sqrt{s}) - \sin(2h_X \sqrt{s})}{\text{ch}(2h_X \sqrt{s}) - \cos(2h_X \sqrt{s})}, \tag{3}$$

где  $K_r(s, h_R)$ ,  $K_x(s, h_X)$  – коэффициенты учета влияния вытеснения тока в роторе на активное и индуктивное сопротивления;  $R_{r0}$ ,  $X_{r0}$  – сопротивления ротора при скольжении  $s=0$ , когда вытеснение тока отсутствует, а коэффициенты в (2) и (3) при этом равны единице.

Отметим, что сопротивления ротора при любом скольжении можно будет определить, если предварительно найти  $R_{r0}$ ,  $X_{r0}$ ,  $h_R$ ,  $h_X$ .

Для обмотки статора, как и в [7, 8], примем активное сопротивление равным номинальному скольжению  $R_s = s_H$ , что характерно для АД боль-

шой единичной мощности, а индуктивное сопротивление рассеяния – обратной величине удвоенного значения кратности пускового тока статора  $X_s = (2I_p)^{-1}$  (здесь и в дальнейшем все величины будут приведены в относительных единицах с принятыми за базисные номинальными значениями).

Для контура потерь в стали отношение индуктивного сопротивления к активному (согласно [8] и работам проф. Л.П. Неймана) можно принять равным  $K_{Fe} = 0,5 \div 0,7$ , тогда  $X_{Fe} = K_{Fe} R_{Fe}$ . Теперь требуется определить вектор неизвестных параметров  $V = (R_{Fe}, X_m, h_R, h_X, R_{r0}, X_{r0})^{tr}$ , для чего составим соответствующую систему нелинейных уравнений, предварительно выразив токи статора, ротора и вращающие моменты через искомые параметры  $V$  схемы замещения и соответствующие скольжения:

$$Z_s = R_s + jX_s;$$

$$Z_r(s, V) = R_{r0} K_r(s, h_R) s^{-1} + jX_{r0} K_x(s, h_X);$$

$$Z_m = jX_m; Z_{Fe} = R_{Fe} + jX_{Fe};$$

$$V = (R_{Fe}, X_m, R_{r0}, X_{r0}, h_R, h_X)^{tr}; \quad (4)$$

$$I_s(s, V) = U_s [Z_s + (Z_m^{-1} + Z_r(s, V)^{-1} + Z_{Fe}^{-1})^{-1}]^{-1}; \quad (5)$$

$$I_r(s, V) = [U_s - Z_s I_s(s, V)] [Z_m^{-1} + Z_{Fe}^{-1} + Z_r(s, V)^{-1}]^{-1}; \quad (6)$$

$$M(s, V) = |I_r(s, V)|^2 \frac{R_{r0}}{s} K_r(s, h_R). \quad (7)$$

Записав выражения (5) и (7) для токов статора и моментов при номинальном скольжении и при скольжении  $s_1 = 1$ , а также для максимального момента, получим систему уравнений для определения вектора искомых параметров  $V$ . Отметим, что комплексное значение тока статора при  $s_H$  равно  $\cos j_H - j \sin j_H$ , а максимальный момент будем находить из расчета его значения по (7) для диапазона скольжений  $s_{var} = (0 \div 0,25)$ . Тогда система из пяти уравнений примет вид:

$$\begin{aligned} f_1(V) &= I_s(s_H, V) - (\cos j_H - j \sin j_H) = 0; \\ f_2(V) &= |I_s(s_1, V)| - I_p = 0; \\ f_3(V) &= M(s_H, V) - M_H = 0; \\ f_4(V) &= M(s_1, V) - M_p = 0; \\ f_5(V) &= M(s_{var}, V)_{max} - M_M = 0. \end{aligned} \quad (8)$$

Решение уравнений (8) основано на минимизации методом итераций суммы квадратов отклонений от нуля (невязок) функций  $f_1(V) \div f_5(V)$ . Для этой цели можно использовать, например, один из

численных методов Ньютона, градиентный или др., которые имеются в пакетах MathCad и MATLAB. Методы требуют задания начальных приближений для переменных, которые найдем с помощью следующих соотношений.

Используя известные значения  $M_M, \cos j_H, h_H$ , найдем сопротивление взаимоиנדукции  $X_m$  по известной из [1] формуле:

$$X_m = [\sqrt{1 - \cos(j_H)^2} - (M_M - \sqrt{M_M^2 - 1}) \cos j_H]^{-1}. \quad (9)$$

Активное  $R_{Fe}$ , а затем и индуктивное  $X_{Fe}$  сопротивления найдем, вычислив сначала для номинального режима потери мощности в статоре  $DP_s$ , роторе  $DP_r$ , суммарные потери  $DP_S$ , а затем потери в стали  $DP_{Fe}$ :

$$DP_s = R_s I_H^2 = R_s; DP_r = \cos j_H h_H s_H (1 - s_H)^{-1};$$

$$DP_S = (1 - h_H) \cos j_H; DP_{Fe} = DP_S - DP_s - DP_r;$$

$$R_{Fe} = K_{Fe}^2 DP_{Fe}^{-1}; X_{Fe} = K_{Fe} R_{Fe}. \quad (10)$$

Сопротивления ротора  $R_{r0}, X_{x0}$  найдем, используя известное входное сопротивление двигателя  $Z_H$  при номинальном скольжении, а для определения сопротивлений ротора при скольжении, равном единице  $R_{r1}$  и  $X_{r1}$ , используем значения пускового момента  $M_p$  и кратности пускового тока статора  $I_p$ :

$$Z_{r0} = [(Z_H - Z_s)^{-1} - Z_m^{-1} - Z_{Fe}^{-1}]^{-1}; \quad (11)$$

$$R_{r0} = \text{Re}(Z_{r0}); X_{r0} = \text{Im}(Z_{r0});$$

$$Z_H = \cos j_H + j \sin j_H; \quad (12)$$

$$Z_s = R_s + jX_s; Z_m = jX_m;$$

$$R_{r1} = M_p I_p^{-2}; X_{r1} = I_p^{-1} - X_s. \quad (13)$$

Определим коэффициенты вытеснения тока  $K_{r1}$  и  $K_{x1}$  при  $s_1 = 1$ , а затем приближенные значения для эквивалентных значений высоты  $h_R$  и  $h_X$ :

$$K_{r1}(s_1, h_R) = \frac{R_{r1}}{R_{r0}}; K_{x1}(s_1, h_X) = \frac{X_{x1}}{X_{x0}}; \quad (14)$$

$$h_R = K_{r1}(s_1, h_R) = \frac{R_{r1}}{R_{r0}}; h_X = \frac{3}{2 K_{x1}(s_1, h_X)} = \frac{3 X_{r0}}{2 X_{r1}}. \quad (15)$$

Все начальные приближения теперь известны, и из решения системы уравнений (8) находим параметры схемы замещения (рис. 1), а затем по (5)–(7) рассчитываем значения токов и моментов для сравнения их с исходными каталожными данными.

Рассмотрим схему замещения с двухконтурным ротором (рис. 2). Параметры обмотки статора  $R_s, X_s$ , ветви намагничивания  $X_m$  и контура потерь в

стали  $R_{Fe}$ ,  $X_{Fe}$  остаются такими же, а вектор иско-  
мых параметров двух эквивалентных контуров ро-  
тора  $W = (R_1, X_1, R_2, X_2)^T$  найдем из системы урав-  
нений, полученной из условия равенства проводи-  
мостей ротора для обеих схем замещения при  
скольжениях  $s_1 = 1$  и  $s_2 = s_H$ :

$$f_1(W) = \kappa \frac{R_r(s_1)}{s_1} + jX_r(s_1) \frac{\psi}{\omega} - \kappa \frac{R_1}{s_1} + jX_1 \frac{\psi}{\omega} - \kappa \frac{R_2}{s_1} + jX_2 \frac{\psi}{\omega} = 0;$$

$$f_2(W) = \kappa \frac{R_r(s_2)}{s_2} + jX_r(s_2) \frac{\psi}{\omega} - \kappa \frac{R_1}{s_2} + jX_1 \frac{\psi}{\omega} - \kappa \frac{R_2}{s_2} + jX_2 \frac{\psi}{\omega} = 0.$$
(16)

Для решения уравнений (16) используются те же методы, что и для (8) при начальных приближениях:

$$R_1 = R_r(s_H); R_2 = R_r(s_1); X_1 = X_r(s_H); X_2 = X_r(s_1).$$

Предложенный метод реализован в виде про-  
грамм в пакетах MathCad и MATLAB, выполнен-  
ные с его помощью расчеты показали высокую эф-  
фективность метода, так как он практически всегда  
обеспечивает полное совпадение каталожных и  
расчетных данных для схем как с ОКР, так и с  
МКР. В этом можно убедиться, выполнив расчеты  
токов и моментов для различного типа глубоко-  
пазных АД по параметрам, найденным предложен-  
ным методом и приведенным в таблице.

Исследования также показали, что расчетные  
значения токов и особенно моментов в области  
скольжений, больших номинального значения, но  
меньших единицы ( $s_H < s < 1$ ), отличаются между  
собой для схем с ОКР и МКР. Как пример на  
рис. 3 приведены зависимости от скольжения то-  
ков статора и моментов, а на рис. 4 – активных и  
индуктивных сопротивлений ротора для двигателя  
ВА3-215 напряжением 6 кВ и мощностью 8000 кВт  
(данные АД см. в таблице).

Практически для всех двигателей, указанных в  
таблице, а также для большинства двигателей соб-  
ственных нужд блочных агрегатов мощностью 200,  
300 и 800 МВт характер зависимостей, приведе-  
нных на рис. 3 и 4, аналогичен. При этом статиче-  
ские характеристики моментов для схем с ОКР  
имеют заниженные значения, а для схем с МКР  
завышенные, к тому же с тенденцией образования  
«двухгорбной» моментной характеристики. Это

также подтверждается сравнением расчетных дан-  
ных с экспериментальными для ряда двигателей.

Для устранения недостатков схем с ОКР и МКР  
предлагается гибридная схема замещения ротора  
(ГКР) (рис. 5).

В этой схеме ротор представлен параллельно  
включенными с разными долевыми коэффициен-  
тами сопротивлениями одноконтурной схемы заме-  
щения с нелинейными и зависящими от скольже-  
ния параметрами и многоконтурной с постоянными  
параметрами. Параметры статора и ветви на-  
магничивания в схеме ГКР остаются такими же,  
как в схемах с МКР и ОКР, при анализе статиче-  
ских характеристик она аналогична схеме ОКР, но  
с сопротивлениями ротора, зависящими от их зна-  
чений в обеих схемах:

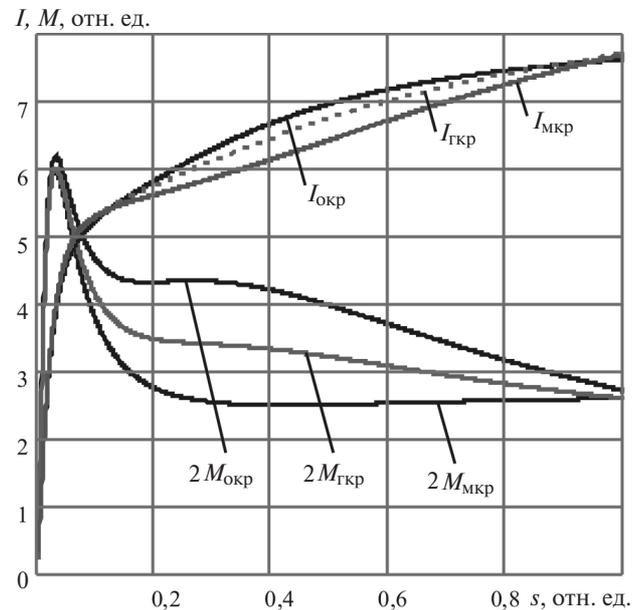


Рис. 3. Зависимости токов статора и моментов от скольжения для различных схем замещения АД типа ВА3-215

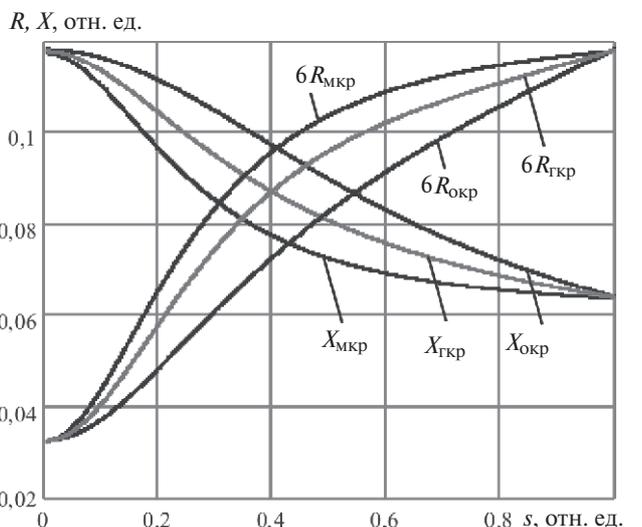


Рис. 4. Зависимости сопротивлений ротора от скольжения для различных схем замещения АД типа ВА3-215

Параметры	Тип АД								
	А3-12-52	ДА3О-4-560	2А3М-5000	АВК-1000	ВАО-800	А4-450	ВДД-213-54	ВАН-215/59	ВА3-215/9
Каталожные данные АД									
$P_H$ , кВт	630	1250	5000	1000	2000	315	1700	2500	8000
$n$ , об/мин	1480	1448	2985	1487	1490	587	371	370	995
$s_H$ , %	1,3	0,8	0,5	0,83	0,67	2,166	1,06	1,3	0,5
$h_H$ , %	94,5	95,5	97,3	95,5	96,0	93,0	93,7	94,7	95,0
$\cos j_H$	0,89	0,87	0,92	0,90	0,91	0,815	0,812	0,83	0,91
$M_p$	1,1	1,1	1,3	1,1	1,5	1,1	1,3	0,65	1,3
$M_M$	2,2	2,3	2,7	2,3	2,4	1,9	2,5	1,9	3,0
$I_p$	5,7	7,0	6,5	6,5	6,5	4,8	5,4	4,2	7,7
Общие параметры для всех схем замещения									
$R_s$	0,013	0,008	0,005	0,0083	0,00667	0,022	0,011	0,013	0,005
$X_s$	0,088	0,071	0,077	0,077	0,077	0,104	0,093	0,119	0,065
$R_{r0}$	0,014	0,00864	0,00516	0,00872	0,00696	0,024	0,012	0,014	0,0054
$X_{r0}$	0,16	0,173	0,119	0,16	0,148	0,202	0,143	0,181	0,117
$X_m$	4,127	3,416	4,69	4,431	4,751	2,723	2,378	3,001	4,074
$R_{Fe}$	18,665	21,737	34,705	21,099	23,0	17,77	16,04	20,612	17,09
$X_{Fe}$	11,199	13,042	20,82	12,66	13,8	10,66	9,62	12,367	10,25
Параметры для схемы замещения с ОКР и нелинейными сопротивлениями ротора									
$h_R$ , см	2,198	2,307	5,524	2,672	4,62	1,787	3,012	2,281	3,645
$h_X$ , см	2,863	3,695	2,442	3,208	3,048	3,06	2,421	2,303	2,791
Параметры для схемы замещения с МКР (двумя контурами на роторе)									
$R_1$	0,061	0,031	0,125	0,01	0,086	0,058	0,134	0,016	0,059
$X_1$	0,118	0,088	0,120	0,316	0,103	0,119	0,146	0,232	0,104
$R_2$	0,018	0,012	0,00538	0,039	0,00756	0,039	0,013	0,114	0,0059
$X_2$	0,258	0,319	0,13	0,095	0,175	0,518	0,172	0,228	0,141
Параметры для гибридной схемы замещения ГКР									
$r_1$	-0,013	-0,013	-0,012	-0,016	-0,022	-0,015	-0,0098	-0,011	-0,014
$r_2$	0,029	0,024	0,036	0,031	0,047	0,031	0,035	0,028	0,029
$r_3$	0,014	0,00845	0,00498	0,00847	0,00664	0,023	0,012	0,014	0,00524
$x_1$	0,069	0,146	0,00574	0,097	0,054	0,117	0,011	0,031	0,041
$x_2$	-0,146	-0,251	-0,051	-0,183	-0,130	-0,224	-0,065	-0,094	-0,095
$x_3$	0,162	0,175	0,12	0,162	0,149	0,206	0,144	0,182	0,118

Примечание. Параметры с неуказанными единицами измерения даны в относительных единицах.

$$Z_{ГКР}(s, h_R, h_X) = [K_{окр} Z_r(s, h_R, h_X)^{-1} + K_{мкр} ZR^{-1}(s)]^{-1} =$$

$$= K_{окр} \frac{1}{R_{r0} K_r(s, h_R) s^{-1} + j X_{r0} K_x(s, h_X)} + K_{мкр} \frac{(R_1 s^{-1} + R_2 s^{-1} + j X_1 + j X_2) \frac{1}{B}}{(R_1 s^{-1} + j X_1)(R_2 s^{-1} + j X_2) \frac{1}{B}}, \quad (17)$$

В (17)  $K_{окр}$ ,  $K_{мкр}$  – долевые коэффициенты проводимостей ротора, с помощью которых представляется возможным усилить или ослабить в эквивалентном роторе свойства, присущие АД с двухклеточным ротором или со стержнями прямо-

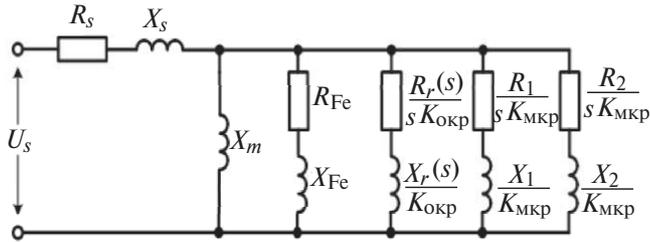


Рис. 5. Гибридная схема замещения АД с зависящими и независящими от скольжения параметрами контуров ротора

угольной формы. Для этого значения коэффициентов выбирают из диапазона 0–1 при условии, что их сумма равна 1. Например, при  $K_{окр} = 1$  и  $K_{мкр} = 0$  схема ГКР превращается в схему ОКР, а при  $K_{окр} = 0$  и  $K_{мкр} = 1$  – в схему МКР. Применение схемы ГКР с  $K_{окр} = 0,5$  и  $K_{мкр} = 0,5$  для АД типа ВАЗ, как видно из рис. 3 и 4, позволяет получить характеристики сопротивлений и моментов, близкие к экспериментальным, и без недостатков, присущих схемам с ОКР и МКР.

Отметим также, что для уменьшения объема вычислений можно использовать аппроксимацию выражений (2) и (3) квадратичными полиномами относительно неизвестных  $x_{RS} = sh_R$ ,  $x_{XS} = sh_X$ :

$$K_r(x_{RS}) = \begin{cases} M, & \text{если } x_{RS} \leq s_H; \\ \frac{1}{H} [1,085 - 0,383x_{RS} + 0,384x_{RS}^2], & \text{если } s_H < x_{RS} \leq 2,6; \\ 0, & \text{если } x_{RS} > 2,6; \end{cases}$$

$$K_x(x_{XS}) = \begin{cases} M, & \text{если } x_{XS} \leq s_H; \\ \frac{1}{H} [1 + 1,071x_{XS} - 0,093x_{XS}^2], & \text{если } s_H < x_{XS} \leq 2,6; \\ 0,5x_{XS}^{-1}, & \text{если } x_{XS} > 2,6. \end{cases}$$

Для сопротивлений ротора  $R_{ГКР}(s)$  и  $X_{ГКР}(s)$  коэффициенты такого рода полиномов определяют с учетом вычисленных значений сопротивлений ротора по (17) для трех скольжений, например  $s_1 = s_H$ ;  $s_2 = 0,5$ ;  $s_3 = 1$ :

$$\begin{aligned} R_{ГКР}(s) &= (r_1 s^2 + r_2 s + r_3) s; \\ X_{ГКР}(s) &= x_1 s^2 + x_2 s + x_3; \end{aligned} \tag{18}$$

$$\begin{matrix} \text{Й} r_1 & \text{Щ} & \text{Й} s_1^2 & s_1 & \text{1Щ} & \text{Й} \text{Re}(Z_{\text{мкр}}(s_1)) s_1 & \text{Щ} \\ \text{К} & \text{Б} & \text{К} & & \text{Б} & \text{К} & \text{Б} \\ \text{К} r_2 & \text{Б} & \text{К} s_2^2 & s_2 & \text{1Б} & \text{К} \text{Re}(Z_{\text{мкр}}(s_2)) s_2 & \text{Б} \\ \text{Л} r_3 & \text{Б} & \text{Л} s_3^2 & s_3 & \text{1Б} & \text{Л} \text{Re}(Z_{\text{мкр}}(s_3)) s_3 & \text{Б} \end{matrix}$$

$$\begin{matrix} \text{Й} x_1 & \text{Щ} & \text{Й} s_1^2 & s_1 & \text{1Щ} & \text{Й} \text{Im}(Z_{\text{мкр}}(s_1)) & \text{Щ} \\ \text{К} & \text{Б} & \text{К} & & \text{Б} & \text{К} & \text{Б} \\ \text{К} x_2 & \text{Б} & \text{К} s_2^2 & s_2 & \text{1Б} & \text{К} \text{Im}(Z_{\text{мкр}}(s_2)) & \text{Б} \\ \text{Л} x_3 & \text{Б} & \text{Л} s_3^2 & s_3 & \text{1Б} & \text{Л} \text{Im}(Z_{\text{мкр}}(s_3)) & \text{Б} \end{matrix}$$

Значения коэффициентов полиномов (18) для схемы с ГКР при  $K_{окр} = 0,5$  и  $K_{мкр} = 0,5$  для рассмотренных двигателей приведены в таблице, которая содержит параметры всех трех схем замещения каждого двигателя.

Динамические характеристики АД для различных схем замещения сравнивались с помощью математических моделей, основанных на полных дифференциальных уравнениях, приведенных для АД с МКР в [8], а для ГКР – на уравнениях, записанных в неподвижных относительно статора осях а, б.

Для схемы замещения с ОКР используются эти же уравнения, но за исключением уравнений для двух контуров с учетом того что  $K_{мкр} = 0$ , а  $K_{окр} = 1$ .

Полученные результаты расчетов (для АД типа ВАЗ-215) токов статора, вращающего момента, частоты вращения для режимов пуска АД, короткого замыкания (КЗ) и отключения КЗ приведены на рис. 6. Из сравнения характеристик следует, что в

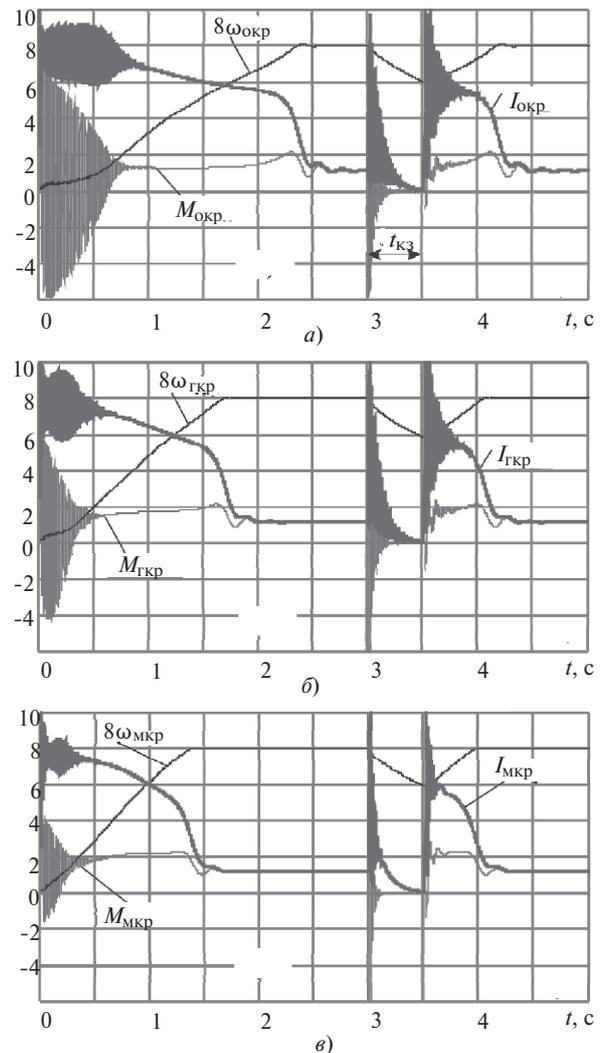


Рис. 6. Динамические характеристики тока статора, момента и частоты вращения для АД типа ВАЗ-215 в режимах пуска и трехфазного короткого замыкания длительностью 0,5 с для схем с ОКР(а), ГКР(б) и МКР(е)

схеме с ОКР динамический момент в начале пуска существенно завышен, тогда как в схеме с МКР занижен. Значения времени пуска в схемах с ОКР и МКР отличаются на 25–30%. Наиболее корректное отражение переходных процессов в АД имеет место для схемы с ГKR, в которой с помощью трех контуров на роторе, имеющих различные постоянные времени, представляется возможным учесть значения и скорости затухания аperiodических составляющих токов и моментов.

Таким образом, статические и динамические характеристики токов и моментов наиболее приемлемы при использовании гибридной схемы замещения, что позволяет рекомендовать её для анализа режимов работы рассматриваемых АД.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей/Под ред. Л.Г. Мамиконянца, 4 изд. — М.: Энергоатомиздат, 1984, 240 с.
2. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины: Учебник для вузов. — М.: Энергия, 1980, 928с.
3. Мошинский Ю.А., Беспалов В.Я., Кирякин А.А. Определение параметров схемы замещения асинхронной машины по каталожным данным. — Электричество, 1998, №4, с. 38–42.

*Elektrichestvo (Electricity), 2016, No.4, pp. 34–40.*

## A Hybrid Equivalent Circuit of Asynchronous Motors with a Deep-Slot or Double-Cage Rotor

SIVOKOBYLENKO Vitalii Fedorovich (Donetsk National Technical University, Donetsk, Ukraine) — Professor, Dr. Sci. (Eng.)

*A method for determining the parameters of two well-known equivalent circuits of the considered motors based on catalogue data is improved. In the first circuit, the rotor resistance displacement phenomenon is taken into account by nonlinear functions of slipping, and in the second circuit this is taken into account by using a few parallel-connected loops with constant resistances. For taking into account iron losses, an individual loop with a common mutual inductance is separated in the circuits. The proposed method is based on constructing and solving systems of nonlinear equations for the motor's main operating modes and, in contrast to the well-known ones, yields calculation results fully identical with the catalogue data. Drawbacks of the above-mentioned circuits are revealed: they yield different values of currents and, especially, of torques at slipping values higher than the critical one but less than unity; incorrect presentation of aperiodic components of currents and torques during transients. A hybrid equivalent circuit free from drawbacks is proposed, which is based on using the rotor parameters in both of the considered circuits. The proposed circuit is suitable for analyzing both steady and dynamic modes of operation. Examples confirming the effectiveness of the developed methods and the advantages of the proposed hybrid circuit are given.*

**Key words:** asynchronous motor, rotor, catalogue data, current displacement, parameters, hybrid equivalent circuit

#### REFERENCES

1. Syromyatnikov I.A. *Rezhimy raboty asinkhronnykh i sinkhronnykh dvigatelei / Pod red. L.G. Mamikonantsa. 4 izd.* (Modes of operation of asynchronous motors/Edit. by L.S. Mamikonants. Publ. 4). Moscow, Publ. Energoatomizdat, 1984, 240 p.
2. Ivanov-Smolenskii A.V. *Elektricheskiye mashiny: Uchebnik dlya vuzov* (Electrical machines. Textbook for high school). Moscow, Publ. «Energiya», 1980, 928 p.
3. Moshchinskii Yu.A., Bepalov V.Ya., Kiryakin A.A. *Elektrichestvo — in Russ. (Electricity)*, 1998, No. 4, pp. 38–42.
4. Artishevskaya S.V. *Elektrichestvo — in Russ. (Electricity)*, 1999, No. 11, pp. 29–31.

4. Артишевская С.В. Экспериментально-аналитический метод определения параметров асинхронных машин. — Электричество, 1999, №11, с. 29–31.

5. Boglietti A., Cavagnino A., Ferraris L. [and others]. Induction motor equivalent circuit including the stray load losses in the machine power balance. — IEEE Transaction on Energy Conversion, 2008, vol. 23, Iss. 3, pp. 796–803.

6. Pedra J. On the determination of Induction Motor Parameters from Manufacturer Data for Electromagnetic Transient Programs. — IEEE Transactions on Power Systems, 2008, vol.23, No.4, pp. 1709–1718.

7. Сивокобыленко В.Ф., Павлюков В.А. Расчет параметров схем замещения и пусковых характеристик глубоководных асинхронных машин. — Электричество, 1979, №10, с. 35–39.

8. Сивокобыленко В.Ф., Ткаченко С.Н., Деркачев С.В. Определение параметров схем замещения и характеристик асинхронных двигателей. — Электричество, 2014, №10, с. 38–44.

[13.01.16]

*Автор: Сивокобыленко Виталий Федорович окончил электроэнергетический факультет Харьковского политехнического института в 1957 г. В 1986 г. защитил докторскую диссертацию «Математическое моделирование и оптимизация переходных процессов в многомашинных системах электроснабжения электрических станций и промышленных установок» в Московском энергетическом институте. Профессор кафедры «Электроинженерия» Донецкого национального технического университета.*

5. Boglietti A., Cavagnino A., Ferraris L. [and others]. Induction motor equivalent circuit including the stray load losses in the machine power balance. — IEEE Transaction on Energy Conversion, 2008, vol. 23, Iss. 3, pp. 796–803.

6. Pedra J. On the determination of Induction Motor Parameters from Manufacturer Data for Electromagnetic Transient Programs. — IEEE Transactions on Power Systems, 2008, vol. 23, No. 4, pp. 1709–1718.

7. Sivokobylenko V.F., Pavlyukov V.A. *Elektrichestvo — in Russ. (Electricity)*, 1979, No. 10, pp. 35–39.

8. Sivokobylenko V.F., Tkachenko S.N., Derkach S.V. *Elektrichestvo — in Russ. (Electricity)*, 2014, No. 10, pp. 38–44.

