

Преимущества и недостатки совмещенной обмотки «славянка»

МОЩИНСКИЙ Ю. А., СОКОЛОВА Е. М.

Представлен аналитический метод расчета характеристик асинхронного двигателя (АД) с совмещенными обмотками, позволяющий исследовать основные показатели в рабочем и пусковом режимах. На основе выведенных уравнений выполнено преобразование обмотки «славянка» в эквивалентную обмотку «wanlass», подробно рассмотренную в зарубежной литературе. Приведены результаты исследования, которые показывают влияние коэффициента трансформации обмоток на параметры схемы замещения, а также соотношений их активных сопротивлений на характеристики в рабочем режиме. На основе анализа установлено, что двигатель с совмещенной обмоткой имеет наилучшие показатели, если отношение чисел витков обмоток и сечения проводов равны отношению фазного и линейного напряжений. Представлены результаты расчета пусковых и рабочих характеристик АД, стандартного и с совмещенными обмотками, дано их сравнение. Приведены основные достоинства и недостатки двигателей с обмоткой «славянка».

К л ю ч е в ы е с л о в а: асинхронный двигатель, совмещенная «звезда-треугольник» обмотка, схема замещения, энергетические показатели, рабочие характеристики, пусковые характеристики

В последние годы возрастает интерес к асинхронным двигателям (АД) с двумя обмотками, соединенными звездой и треугольником, включенными параллельно или последовательно (рис. 1) [1–7]. Некоторые авторы называют такие обмотки совмещенными [2, 4], другие – шестифазными [5–6], а в [7] обмотка на рис.1,а названа «славянской».

Такую обмотку можно рассматривать как обмотку с увеличенным числом фазных зон с $2m=6$ до $4m=12$, фазы обмоток «звезда» и «треугольник» имеют пространственный сдвиг осей на угол $\theta=30^\circ$, трехфазные токи «звезды» и «треугольника» при этом также будут сдвинуты во времени на угол θ . Это, как показано в [1–5, 7], позволяет увеличить коэффициент распределения и уменьшить дифференциальное рассеяние. В результате КПД и коэффициент мощности возрастают, а потребляемый из сети ток уменьшается. Форма поля у двигателя с

двумя обмотками ближе к синусоидальной, чем у стандартного двигателя.

В теоретическом плане авторы цитируемых выше работ в основном рассматривают суммарную МДС поля в зазоре с точки зрения расчета амплитуд высших гармоник и определения их обмоточных коэффициентов. Однако в перечисленных работах отсутствует общий метод расчета рабочих характеристик АД с совмещенными обмотками, что затрудняет их исследование.

В предлагаемой статье представлены результаты работы, цель которой – разработка аналитического метода расчета рабочих и пусковых характеристик АД, а также анализ влияния параметров обмоток на энергетические показатели двигателя.

При выводе основных уравнений АД с совмещенными обмотками приняты следующие допущения:

распределение магнитного поля и МДС вдоль воздушного зазора синусоидальное;

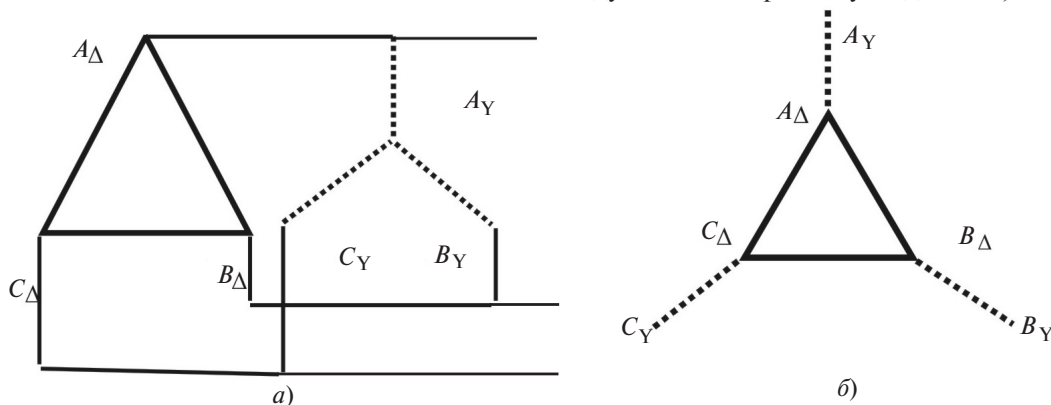


Рис. 1. Схемы включения обмоток асинхронного двигателя: а – параллельное; б – последовательное

трехфазные обмотки симметричны, занимают равное число пазов и выполнены подобно обмотке серийного двигателя;

нелинейность магнитных характеристик учитывается соответствующим включением усредненного коэффициента насыщения в намагничивающее индуктивное сопротивление, а потери в стали – введением активного сопротивления в цепь намагничивания;

эффект вытеснения тока в проводниках ротора учитывается изменением активных и индуктивных сопротивлений ротора в зависимости от скольжения с помощью коэффициентов k_r и k_x [8];

высшие гармоники не рассматриваются.

Электромагнитные расчеты трехфазных асинхронных двигателей обычно проводятся на основе схем замещения. Рассмотрим параллельную схему включения обмоток (рис. 1,а). В этом случае на статоре расположены две группы трехфазных обмоток, соединенные звездой и треугольником. Обмотка, соединенная звездой, обозначена индексом y , другая обмотка – индексом d . Тогда числа витков в фазах обмоток будут для «звезды» W_y , для «треугольника» W_d , их магнитные оси сдвинуты в пространстве на угол $\theta = \pi/6$.

Соответствующая модель для расчета рабочих и пусковых характеристик получена методом наложения расчетов, выполненных отдельно для схемы включения обмотки звездой и треугольником. Когда в сеть включена одна обмотка d , схема замещения АД имеет вид как на рис. 2. Согласно этой схеме ЭДС, наведенная потоком в воздушном зазоре,

$$E_{\delta d} = I_{1d} Z_{\delta d}, \tag{1}$$

где $Z_{\delta d} = Z_{md} Z_{2d} / (Z_{md} + Z_{2d})$ – эквивалентное сопротивление ветвей намагничивания и ротора, выраженное через их сопротивления:

$$Z_{md} = R_{md} + jX_{md}; \quad Z_{2d} = R_{2d} / s + jX_{2d}.$$

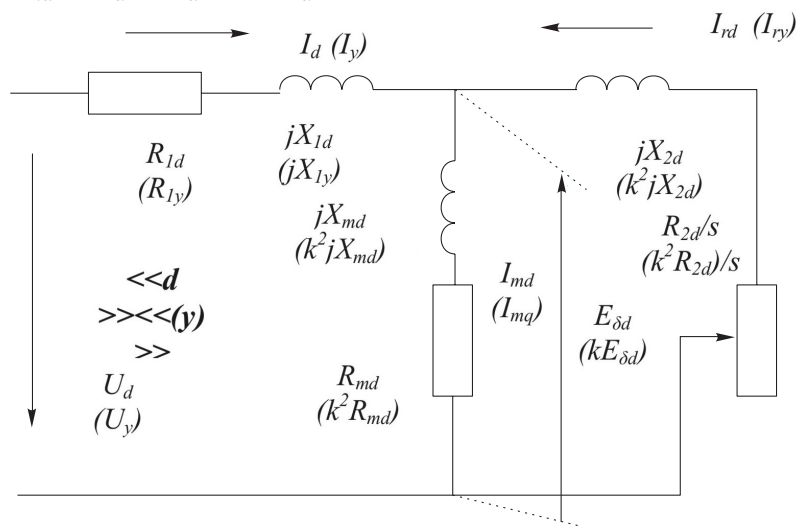


Рис. 2. Схема замещения АД асинхронного двигателя при соединении фаз треугольником (d) и звездой (y)

Ток фазы ротора

$$I_{rd} = I_d Z_{md} / (Z_{md} + Z_{2d}). \tag{2}$$

ЭДС, индуцированная потоком обмотки d в обмотке y , может быть записана в виде

$$E_{yd} = k E_d e^{j\theta} = k I_{1d} Z_{\delta d} e^{-j\theta}, \tag{3}$$

где $k = W_y / W_d$ – коэффициент трансформации обмоток; θ – угол смещения обмоток W_d и W_y в пространстве.

Схема замещения для обмотки y , когда она подключена к напряжению, аналогична схеме замещения для обмотки d (рис. 2), параметры схемы даны в скобках. В этом случае ЭДС воздушного зазора рассчитывается по формуле

$$E_{\delta y} = k^2 Z_{\delta d} I_y. \tag{4}$$

ЭДС, наведенная в обмотке d потоком обмотки y ,

$$E_{dy} = k E_{\delta d} e^{j\theta} = k Z_{\delta d} I_y e^{j\theta}.$$

Ток в фазе ротора

$$I_{rq} = k I_y Z_m / (Z_m + Z_2) e^{j\theta}. \tag{5}$$

Используя принцип суперпозиции, сформируем систему уравнений для ЭДС в воздушном зазоре каждой обмотки, которую представим в матричной форме:

$$\begin{bmatrix} E_{\delta d} \\ E_{\delta y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{\delta d} & k Z_{\delta d} e^{j\theta} \\ k Z_{\delta d} e^{-j\theta} & k^2 Z_{\delta d} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_y \end{bmatrix}. \tag{6}$$

Добавив к полученным ЭДС значения падений напряжения на сопротивлениях статора соответ-

вующих обмоток, получим систему уравнений для напряжений на зажимах фаз:

$$\begin{bmatrix} U_d \\ U_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{1d} + X_{1d} & jX_{11} \\ jX_{11} & R_{1y} + jX_{1y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_{\delta d} \\ E_{\delta y} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

где R_{1d} , R_{1y} – активные сопротивления фаз; X_{1d} , X_{1y} – индуктивные сопротивления рассеяния фаз обмоток; X_{11} – взаимное индуктивное сопротивление, обусловленное взаимными потоками в зоне пазовых и лобовых частей обмоток. В дальнейшем полагаем $X_{11} = 0$, поскольку его расчет требует специальных исследований.

Объединив (6) и (7), получим систему (8) в форме, удобной для решения:

$$\begin{bmatrix} U_d \\ U_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{1d} + X_{1d} + Z_{\delta d} & kZ_{\delta d}e^{j\theta} \\ kZ_{\delta d}e^{-j\theta} & R_{1y} + jX_{1y} + k^2Z_{\delta d} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_y \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Ток в фазе ротора

$$I_r = (I_d + kI_y e^{j\theta}) \frac{Z_{md}}{Z_{md} + Z_{2d}}. \quad (9)$$

Напряжения на зажимах обмоток связаны соотношением

$$U_y = (U_d e^{-j\theta}) / \sqrt{3}. \quad (10)$$

С учетом (10) система (8) приобретает вид:

$$\begin{bmatrix} U_d \\ U_y / \sqrt{3} e^{-j\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{1d} + X_{1d} + Z_{\delta d} & kZ_{\delta d}e^{j\theta} \\ kZ_{\delta d}e^{-j\theta} & R_{1y} + jX_{1y} + k^2Z_{\delta d} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_y \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Решение системы в матричной форме относительно токов фаз

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_y \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} R_{1d} + X_{1d} + Z_{\delta d} & -kZ_{\delta d}e^{j\theta} \\ -kZ_{\delta d}e^{-j\theta} & R_{1y} + jX_{1y} + k^2Z_{\delta d} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} U_d \\ U_y / \sqrt{3} e^{-j\theta} \end{bmatrix}, \quad (12)$$

где определитель этой системы

$$\Delta = [(R_{1d} + jX_{1d}) + Z_{\delta d}][R_{1y} + jX_{1y} + k^2Z_{\delta d}] - [kZ_{\delta d}e^{j\theta}][kZ_{\delta d}e^{-j\theta}].$$

Выражения для расчета потребляемых S_1 , P_1 , Q_1 и полезной P_2 мощностей представлены ниже. Полная потребляемая мощность

$$S_1 = 3U_d I_{1d}^* + 3U_y I_{1y}^*,$$

где I_{1d}^* , I_{1y}^* – сопряженные значения токов в фазах совмещенной обмотки.

Активная и реактивная мощности:

$$P_1 = \text{Re}(S_1); \quad Q_1 = \text{Im}(S_1).$$

Коэффициент мощности двигателя:

$$P_1 / \sqrt{(P_1^2 + Q_1^2)}.$$

Ток, потребляемый двигателем из сети

$$I_s = \sqrt{(P_1^2 + Q_1^2)} / (\sqrt{3}U_d).$$

Электромагнитный момент

$$M = pP_{em} / \omega_1,$$

где p – число пар полюсов; $\omega_1 = 2\pi f$ – угловая частота сети.

Электромагнитная мощность

$$P_{em} = mI_r^2 R_{2d} / s.$$

Полезная мощность на валу двигателя

$$P_2 = P_{em}(1-s) - P_{\text{мех}} - P_{\text{доб}}.$$

где механические $P_{\text{мех}}$ и добавочные $P_{\text{доб}}$ потери соответственно равны $0,005P_1$.

Коэффициент полезного действия

$$\eta = P_2 / P_1.$$

Индукция в воздушном зазоре

$$B_{\delta} = \Phi_{\delta\Sigma} / (\alpha_i \tau L_1),$$

где магнитный поток в воздушном зазоре двигателя

$$\Phi_{\delta\Sigma} = E_{\delta d} / (4,44(k_{\text{обд}}W_d)f)$$

определяется по ЭДС воздушного зазора в обмотке d :

$$E_{\delta d} = [U_d - I_d(R_{1d} + jX_{1d})];$$

$\alpha_i = 2/\pi$ – коэффициент полюсного перекрытия; τ – полюсное деление; L_1 – длина пакета статора; W_d – число витков фазы обмотки статора при соединении треугольником; $k_{\text{обд}}$ – обмоточный коэффициент. Для индукции B_{δ} рассчитываются магнитная цепь, магнитные потери в зубцах, ярмах статора и ротора и уточняется коэффициент насыщения.

Преобразуем обмотку, соединенную звездой, в эквивалентную обмотку, соединенную треугольником. Для приведения этой обмотки воспользуемся

системой (11). Помножим все элементы второго уравнения системы на $\sqrt{3}$ и учтем, что амплитуды токов в эквивалентной обмотке, соединенной треугольником, и в обмотке, соединенной звездой, связаны соотношением (как токи в обмотках трехфазного трансформатора)

$$I_{dy} = I_y / \sqrt{3}. \tag{13}$$

После подстановки (13) в (11) и преобразования получим систему уравнений:

$$\begin{bmatrix} U_d \\ U_d e^{-j\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{1d} + X_{1d} + Z_{\delta d} & \sqrt{3}kZ_{\delta d} e^{j\theta} \\ \sqrt{3}kZ_{\delta d} e^{-j\theta} & 3R_{1y} + 3jX_{1y} + 3k^2 Z_{\delta d} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_{dy} \end{bmatrix}. \tag{14}$$

Эти уравнения описывают электромагнитные процессы в двух обмотках, соединенных треугольником и включенных на напряжения с временным сдвигом $\theta = \pi/6$ (рис. 3). Числа витков этих обмоток равны W_d и $\sqrt{3}kW_d$, а их оси сдвинуты в пространстве на угол $\theta = \pi/6$.

Такое соединение обмоток, известное в технической литературе как обмотки «wanlass», достаточно подробно исследовано в [9]. Обмотки не получили широкого распространения в связи с необходимостью включения конденсаторов в фазы одной из обмоток для получения сдвига токов в них на угол θ .

Если использовать векторное соотношение для токов в эквивалентной и исходной обмотках

$$I_{dy} = I_y / \sqrt{3} e^{j\theta}, \tag{15}$$

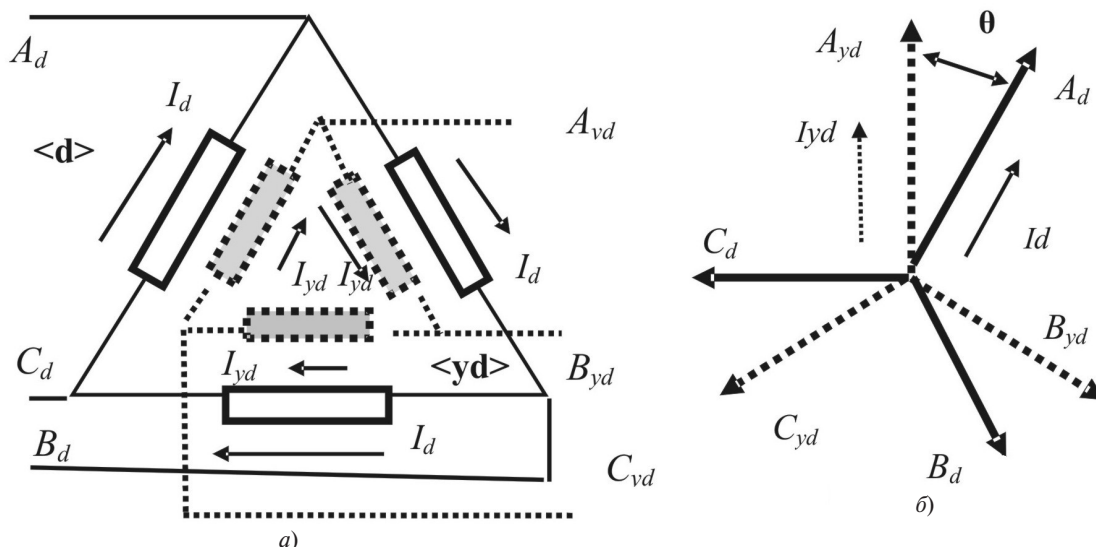


Рис. 3. Обмотка «wanlass»: а – конфигурация обмоток d и yd; б – расположение осей фаз обмоток в пространстве

то в результате преобразования получим систему

$$\begin{bmatrix} U_d \\ U_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{1d} + X_{1d} + Z_{\delta d} & \sqrt{3}kZ_{\delta d} \\ \sqrt{3}kZ_{\delta d} & 3R_{1y} + 3jX_{1y} + 3k^2 Z_{\delta d} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_{dy} \end{bmatrix}. \tag{16}$$

Система (16) соответствует уравнениям АД с двумя обмотками, соединенными параллельно, оси которых не имеют пространственного сдвига, т.е. $\theta=0$. Коэффициент трансформации обмоток $k_1 = \sqrt{3}k$. Комплексное сопротивление статора эквивалентной обмотки, как следует из (16), $Z_{1dy} = 3R_{1y} + 3jX_{1y}$. Таким образом, в результате преобразования система обмоток «звезда–треугольник» преобразуется в систему двух соосных обмоток «треугольник–треугольник» с неравным числом витков и различными значениями сопротивлений фаз статора.

Для анализа влияния параметров схемы замещения на характеристики АД выполним расчет совмещенных обмоток, используя в качестве базисного трехфазный стандартный двигатель серии 4А (мощность $P_2 = 15$ кВт, частота сети $f = 50$ Гц и напряжение фазы $U = 220$ В), проектный расчет которого представлен в [8].

Основные данные расчета серийного двигателя приведены ниже.

Статор: число пар полюсов $p=2$; диаметр ротора $D=0,185$ м; длина статора $L_1=0,14$ м; число зубцов $Z_1=48$; площадь поперечного сечения паза $S_p=131,7$ мм².

Обмотка статора (параметры обмоток в качестве базовой обозначены индексом b): обмотка однослойная с диаметральным шагом; число пазов на полюс и фазу $q_b=4$; число витков в фазе $W_b=104$; обмоточный коэффициент $k_{об}=0,96$; число эффективных проводников в пазу $u_{pb}=13$; число параллельных ветвей $a_b=1$; диаметры обмоточного про-

вода (изолированного и не изолированного) $d_{i_b}/d_b=0,158/0,15$ мм; число элементарных проводников $n_b=3$; коэффициент заполнения паза $k_{z_b}=0,74$.

Ротор: воздушный зазор $\delta=0,5$ мм; наружный диаметр $D_2=0,184$ м; число зубцов $Z_2=38$.

Основные показатели двигателя: номинальные значения $\eta_b=89,2\%$, $\cos(\varphi)_b=0,89$; соответствующие кратности максимального момента $k_m=2,59$, пускового момента $k_p=1,43$ и тока $k_i=6,2$.

Сопротивления (Ом) схемы замещения АД для различных соединений фаз:

Серийный АД							
R_1	X_1	R_m	X_m	R_2	X_2	W	Коэффициент трансформации
0,355	0,673	1,47	27,4	0,186	0,912	104	–
Двигатель с совмещенными обмотками							
Обмотка, соединенная треугольником (d)							
0,711	1,15	1,43	29,2	0,194	0,972	104	k
Обмотка, соединенная звездой (y)							
0,329	0,477	0,46	9,72	0,066	0,329	60	k
Обмотка, соединенная звездой (y) и преобразованная в эквивалентный «треугольник» (yd)							
0,987	1,431	1,43	29,2	0,194	0,972	103	$\sqrt{3}k$
Две параллельные одинаковые обмотки («треугольники» d и yd), объединенные в одну обмотку (эквивалентный «треугольник»)							
0,355	0,507	1,43	29,2	0,194	0,972	104	1

Расчет числа витков и диаметра провода двух обмоток, соединенных звездой и треугольником в заданных пазах, был выполнен при соблюдении двух условий:

магнитная индукция в воздушном зазоре должна быть примерно равна индукции в зазоре стандартного двигателя:

$$B_\delta \approx \frac{pU}{\sqrt{2}\pi f(k_o W)DL_1}; \quad (17)$$

коэффициент заполнения паза также должен оставаться постоянным:

$$k_{z_p} = \frac{nd_i^2 u_p}{S_p}. \quad (18)$$

На основе этих соотношений были определены значения числа витков, диаметров провода и рассчитаны сопротивления схемы замещения обмоток, соединенных звездой и треугольником; данные расчета представлены выше. Для сравнения приведены также значения сопротивлений обмотки, преобразованной из «звезды» в эквивалентный «треугольник».

Расчеты показали: в связи с меньшим числом пазов на полюс и фазу у совмещенных обмоток

($q_z = q_y = q_b/2$) обмоточный коэффициент для этих обмоток будет $k_{od}=0,99$, что на 4% превышает значение обмоточного коэффициента стандартного АД $k_{ob}=0,96$; суммарный коэффициент магнитной проводимости $\Lambda_{\Sigma d}$ обмоток, соединенных звездой и треугольником, меньше суммарного коэффициента проводимости $\Lambda_{\Sigma b}$ обмоток базового двигателя за счет уменьшения коэффициентов лобового и дифференциального рассеяния в связи с уменьшением q и увеличением k_{od} . Так, для серийной обмотки коэффициент магнитной проводимости $\Lambda_{\Sigma b}=4,5$, а для совмещенной $\Lambda_{\Sigma d}=3,73$. Это означает, что при равном числе витков обмоток индуктивное сопротивление базового двигателя X_{1b} будет меньше сопротивления X_{1d} в 1,2 раза.

С другой стороны, в рассматриваемом двигателе число пазов, занимаемых каждой фазой, конфигурация обмоток, форма и размеры пазов одинаковы. Тогда индуктивные сопротивления рассеяния обмоток статора и сопротивления взаимной индукции пропорциональны квадратам действительного числа витков [10]:

$$X_{1y} / X_{1d} = X_{my} / X_{md} = W_{2y} / W_{2d} = k^2,$$

где $k = W_y / W_d$ – коэффициент трансформации, т.е. индуктивные сопротивления обмотки y : $X_{1y} = k^2 X_{1d}$; $X_{my} = k^2 X_{md}$. Ана-

логично для сопротивлений ротора справедливы соотношения: $R_{2y} = k^2 R_{2d}$; $X_{2y} = k^2 X_{2d}$. Так как сечение провода обмотки d отличается от сечения обмотки y не в k , а в t раз, то в этом случае активное сопротивление обмотки y $R_{1y} = ktR_{1d}$.

Для совмещенных обмоток идеальным вариантом является коэффициент трансформации $k_2 = 1/\sqrt{3} = U_y / U_d$ и отношение сечений проводов обмоток треугольника и «звезды», равное k_2 . При этих условиях выражения $(k_2 \sqrt{3})$ и $(3k_2^2)$ будут равны $k_2 \sqrt{3} = 3k_2^2 = 1$. Тогда после преобразования обмотки y в эквивалентный «треугольник» получаем две обмотки, соединенные в «треугольник» с одинаковыми параметрами схем замещения и подключенные к напряжению U_d , объединенные затем в одну обмотку. Сопротивление схемы замещения для этой обмотки приведено выше.

Сравнение сопротивлений стандартного и идеального двигателей показывает, что индуктивное сопротивление статора стандартного АД больше, т.е. $X_{1b} > X_{1d}$, а индуктивное сопротивление взаимной индукции меньше, т.е. $X_{mb} < X_{md}$, чем у идеального двигателя. Сопротивления роторных цепей у идеального двигателя несколько превышают со-

противления серийного за счет различия обмоточных коэффициентов при приведении этих сопротивлений к числу витков обмотки статора.

Также при коэффициентах трансформации $k \neq 1/\sqrt{3}$ в фазах возникают контурные токи из-за неравенства линейных ЭДС обмоток «звезды» и «треугольника», так как $\sqrt{3}E_y/E_d = \sqrt{3}W_y/W_d = k\sqrt{3} \neq 1$.

Эти токи протекают в контурах, образованных ветвями фаз соответствующих обмоток.

Пусковые характеристики идеального (см. выше параметры схемы замещения) и стандартного двигателей в относительных единицах приведены на рис. 4, где $M^* = M/M_{\text{ном}}$, $I_s^* = I/I_{\text{ном}}$ ($M_{\text{ном}}$ и $I_{\text{ном}}$ – номинальные значения момента и тока стандартного АД). Как видно из графиков, зависимости момента и тока идеального АД идут выше

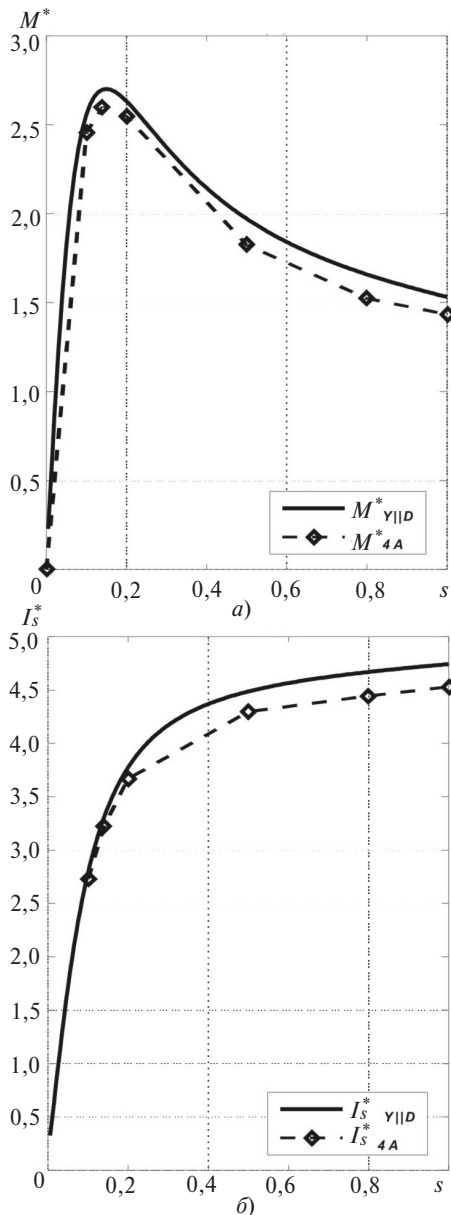


Рис. 4. Пусковые характеристики идеального ($k_2 = 1/\sqrt{3}$, $R_{1d} = R_{1yd}$) и стандартного АД

кривых тока и момента стандартного двигателя, при этом пусковой и максимальный моменты превышают аналогичные показатели стандартного двигателя.

Зависимости КПД и коэффициента мощности представлены на рис. 5. Анализ показывает, что КПД и $\cos(\varphi)$ идеального АД превышают КПД и $\cos(\varphi)$ серийного АД на 2–3,4%.

Для двигателя с совмещенными обмотками (сопротивления схемы замещения фаз см. выше), пусковые и рабочие характеристики приведены на рис. 6 и 7.

Сравнение зависимостей показывает, что графики КПД и $\cos(\varphi)$ двигателей достаточно близки друг к другу, причем энергетические показатели АД с совмещенными обмотками несколько превышают показатели серийного двигателя. Также сов-

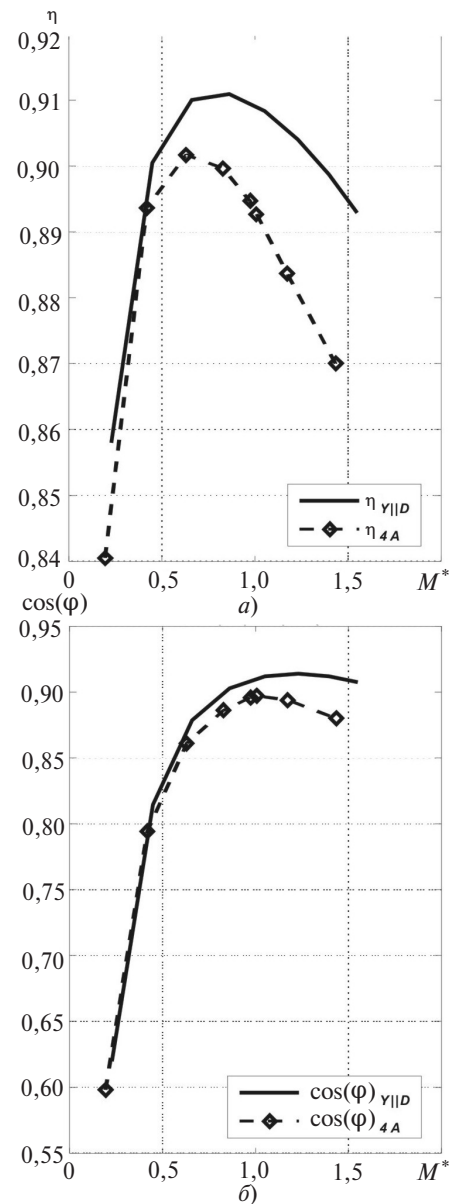


Рис. 5. КПД и $\cos(\varphi)$ идеального ($k_2 = 1/\sqrt{3}$, $R_{1d} = R_{1yd}$) и стандартного АД

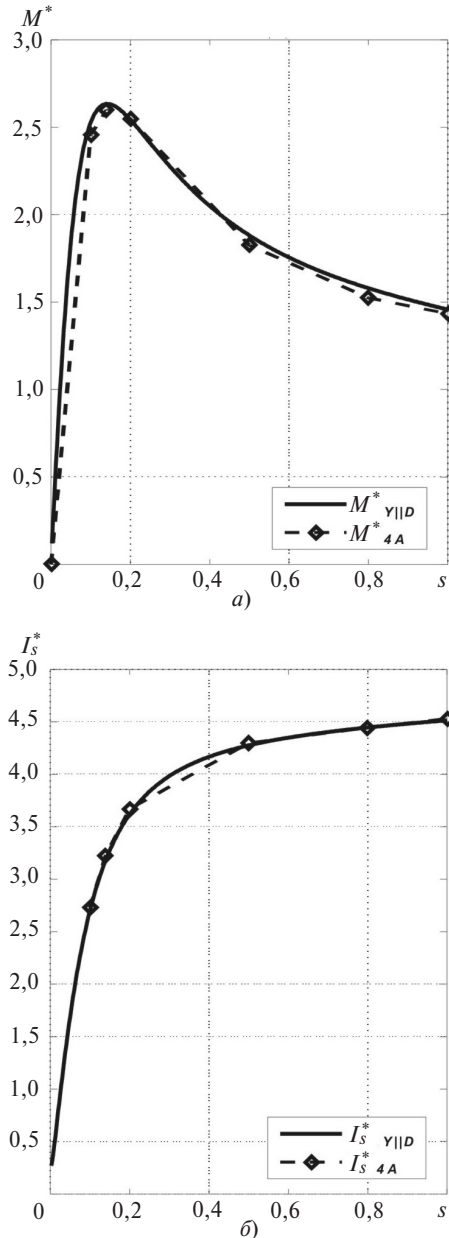


Рис. 6. Пусковые характеристики двигателя с совмещенными обмотками ($k_1 \neq 1/\sqrt{3}$, $R_{1d} \neq R_{1yd}$) и стандартного АД

падают и пусковые характеристики двигателей. Таким образом, проведенные расчеты без учета влияния высших пространственных гармоник МДС не выявили существенных преимуществ совмещенных обмоток в двигателях средней мощности.

Установлено, что характеристики двигателя с обмоткой «звезда–треугольник» весьма чувствительны к значению коэффициента трансформации. При отклонении его от идеального значения $k = U_y U_d = 1/\sqrt{3}$ показатели КПД и $\cos(\varphi)$ значительно ухудшаются.

На рабочие характеристики также существенно влияет соотношение значений активных сопротивлений обмоток статора. При невыполнении условия $R_{1y} = k^2 R_{1d}$ значения КПД и $\cos(\varphi)$ АД с ком-

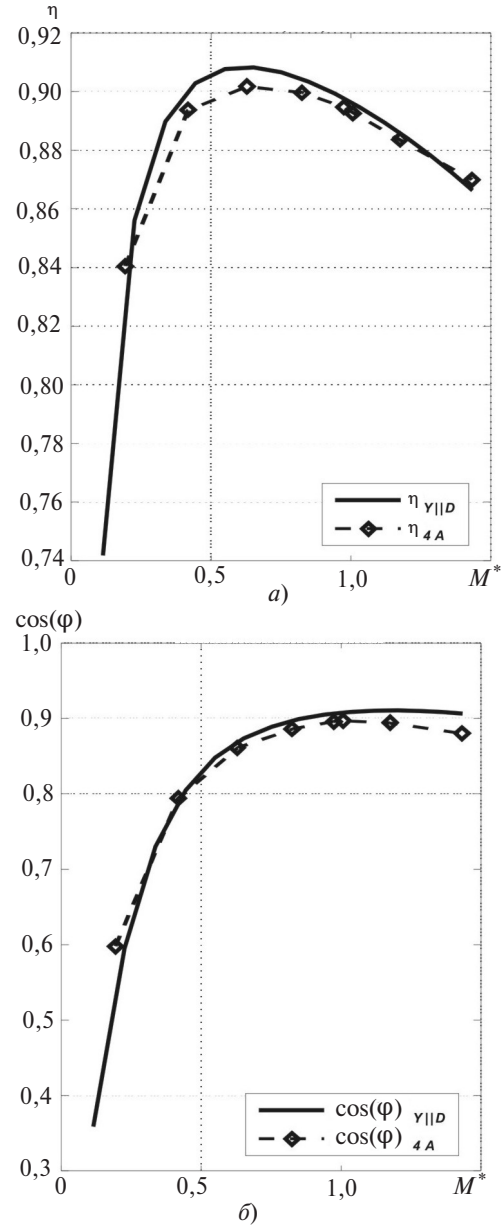


Рис. 7. КПД и коэффициент мощности двигателя с совмещенными обмотками ($k_1 \neq 1/\sqrt{3}$, $R_{1d} \neq R_{1yd}$) и стандартного АД

бинированной обмоткой уменьшаются. Это объясняется тем, что токи в обмотках «звезды» и «треугольника» будут сдвинуты на угол, отличный от $\theta = 30^\circ$, поэтому МДС, созданные токами, складываются не скалярно, как в идеальном случае, а векторно. В результате суммарная МДС уменьшается. Отметим, что с уменьшением относительных значений активных сопротивлений статора, что справедливо для АД при высотах оси вращения $H > 250$ мм, энергетические показатели двигателей с совмещенными обмотками возрастают.

Выводы. 1. На основе полученных уравнений выполнено преобразование обмотки «славянка» («звезда–треугольник») в обмотку «wanlass» («треугольник–треугольник») со сдвигом осей обмоток на $\theta = \pi/6$ и подключенных к напряжениям сети с временным сдвигом на этот угол.

2. В идеальном варианте выполнения обмоток, когда $k_2 = 1/\sqrt{3}$ и $R_{1y} = k_2^2 R_{1d}$, двигатель с совмещенными обмотками имеет наилучшие показатели и характеристики, которые превышают показатели серийного двигателя на 3–5%.

3. При отклонении коэффициента трансформации от идеального варианта, а также при увеличении относительного активного сопротивления обмоток статора, что справедливо для двигателей малой и средней мощности, характеристики двигателя с совмещенными обмотками резко ухудшаются.

4. Фазы обмоток, соединенные звездой и треугольником, имеют различные значения чисел витков и диаметров обмоточных проводов, что усложняет как электрическую схему выполнения совмещенной обмотки, так и технологию укладки их катушек в пазы.

5. Совмещенные обмотки допускают включение их только на одно напряжение сети, на которое они рассчитаны ($U = 220$ или 380 В).

6. При коэффициентах трансформации, отличных от идеального значения k_2 , внутри ветвей обмоток, образуемых фазами «звезды» и «треугольника», возникают контурные токи, которые отсутствуют при идеальном варианте.

Таким образом, совмещенную обмотку «славянка» следует применять при ремонте АД с высотой оси вращения $H \geq 250$ мм, если затраты на модернизацию будут экономически оправданы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chen J.Y., Chen C.Z. Investigation of a new AC electrical machine winding. – IEE Proc. – Elect. Power Appl, vol 145, No. 2, March 1998, pp. 125–132.
2. Попов В.И., Петров Ю.Н. Трёхфазные, специальные и совмещенные обмотки для электрических машин переменного тока. Основы теории и расчёта. Нижний Новгород, 1995, 335 с.

3. Дейного В., Дуюнов Д., Иванов В. Изменения в конструкции обмотки асинхронных электродвигателей – потенциал обеспечения надежности электросетей. – Россети, 2015, №2(29), с. 42–49.

4. Змиева К.А., Яковлев А.П. Оптимизация линейки энерго-сберегающих асинхронных двигателей с габаритами 100 до 132 с совмещенными обмотками. – Электротехника, 2014, № 7, с. 32–39.

5. Мишин В.И., Тарасенко Р.А., Яцкевич Ю.В. Сравнительная характеристика свойств трёхфазного двигателя при 6 и 12-зонной обмотках статора. – Сб. научн. трудов «Регулируемые асинхронные двигатели». – Киев: Ин-т электродинамики НАН Украины, 1996, с.153–163.

6. Бабаев М.Б., Голубев А.Н. Моделирование электромагнитных процессов в шестифазных асинхронных двигателях с расщепленной обмоткой. – Электричество, 1994, №4, с.31–35.

7. Афанасьев А.А., Никитин В.А., Токмаков Д.А. Комбинированная обмотка «славянка». – Электричество, 2017, № 6, с. 53–58.

8. Копылов И.П., Клоков Б.К., Морозкин В.П., Токарев Б.Ф. Проектирование электрических машин: Учеб. для вузов/Под ред. И.П. Копылова. М.: Высшая школа, 2002, 767 с.

9. Stephen D., Herbert L. Hess. Modeling and analysis of the Wanlass three-phase induction motor configuration. – Transaction on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-100, No. 9, September, 1991 pp. 2012–2095.

10. Юферов Ф.М. Электрические машины автоматических устройств. М.: Высшая школа, 1988, 479 с.

[07.05.2018]

А в т о р ы : Мощинский Юрий Анатольевич окончил Московский энергетический институт (МЭИ) в 1965 г. В 1975 г. защитил кандидатскую диссертацию «Синхронный двигатель с постоянными магнитами с асинхронно-гистерезисным пуском» в МЭИ. Доцент кафедры «Электромеханика, электрические и электронные аппараты» «НИУ «МЭИ».

Соколова Елена Михайловна окончила в 1967 г. МЭИ. В 1974 г. защитила кандидатскую диссертацию «Анализ и синтез быстродействующей следящей системы». Доцент кафедры «Электромеханика, электрические и электронные аппараты» «НИУ «МЭИ».

Elektrichestvo, 2018, No. 11, pp. 23–31

DOI:10.24160/0013-5380-2018-11-23-31

Advantages and Drawbacks of the SlavyankaType Combined Winding

MOSHCHINSKII Yurii A. (National Research University «Moscow Power Engineering Institute» – NRU «MPEI», Moscow, Russia) – Associate Professor, Cand. Sci. (Eng.)

SOKOLOVA Yelena M. (NRU «MPEI», Moscow, Russia) – Associate Professor, Cand. Sci. (Eng.)

The article presents an analytical method for calculating the characteristics on an induction motor fitted with combined windings, the use of which makes it possible to study the motor's main parameters in its working and startup modes. The obtained equations were used to transform the Slavyanka type winding into the equivalent Wanlass winding, which is considered in detail in the foreign literature, and its parameters have been determined. The article presents the study results showing the effect the winding transformation ratio has on the equivalent circuit parameters, and how the ratios of their resistances affect the characteristics in the working mode. It has been found from the analysis result that the motor or fitted

a combined winding has the best performance characteristics when the ratio of winding turns and wire cross sections are equal to the ratio between the phase and line-to-line voltage. Calculation of the startup and working characteristics of a standard induction motor and an induction motor fitted with combined windings is presented, and their comparison is given. The main advantages and drawbacks of motors fitted with a Slavyanka type winding are given.

Key words: *induction motor, combined star-delta winding, equivalent circuit, power performance indicators, working characteristics, startup characteristics*

REFERENCES

1. **Chen J.Y., Chen C.Z.** Investigation of a new AC electrical machine winding. – IEEProc. – Elect. PowerAppl, vol 145, No. 2, March 1998, pp. 125–132.
2. **Popov V.I., Petrov Yu.N.** *Trekhfaznye, spetsial'nye i sovmeshchennye obmotki dlya elektricheskikh mashin peremennogo toka. Osnovy teorii i rascheta* (Three-phase, special and combined windings for AC electrical machines. Fundamentals of theory and calculation). Nizhnii Novgorod, 1995, 335 p
3. **Deinogo V., Duyunov D., Ivanov V.** *Rosseti* – in Russ. (Rosseti), 2015, No. 2(29), pp. 42–49.
4. **Zmiyeva K.A., Yakovlev A.P.** *Elektrotehnika* – in Russ. (Electrical Engineering), 2014, No. 7, pp. 32–39.
5. **Mishin V., Tarasenko R.A., Yatskevich Yu.V.** *Cb. nauchnykh trudov «Reguliruyemye asinkhronnye dvigateli»* – in Russ. (Collection «Regulating induction motors»). Kiev, Institute of electrodynamics. National Academy of Sciences Ukraine, 1996, pp. 153–163.
6. **Babayev M.B., Golubev A.N.** *Elektrichestvo* – in Russ (Electricity), 1994, No 4, pp. 31–35.
7. **Afanas'yev A.A., Nikitin V.A., Tokmakov D.A.** *Elektrichestvo* – in Russ. (Electricity), 2017, No 6, pp. 53–58.
8. **Kopylov I.P., Klokov B.K., Morozkin V.P., Tokarev B.F.** *Proyektirovaniye elektricheskikh mashin/Pod red. I.P. Kopylova* (Design of electrical machines/Edit. by I.P. Kopylov). Moscow, Vysshaya shkola, 2002, 767 p.
9. **Stephen D., Herbert L. Hess.** Modeling and analysis of the Wandler three-phase induction motor configuration. – Transaction on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-100, No. 9, September, 1991 pp. 2012–2095.
10. **Yuferov F.M.** *Elektricheskiye mashiny avtomaticheskikh ustroystv* (Electrical machines of automatic devices). Moscow, Vysshaya shkola, 1988, 479 p.

[07.05.2018]