ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ И СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ИНДУКТОРНОГО ТИПА

Г. И. Штурман, Н. Н. Левин

Многофазный индукторный асинхронный двигатель (сокращенно ИАД) по сравнению с обычными бесконтактными двигателями переменного тока обладает рядом существенных преимуществ. К числу этих преимуществ следует отнести:

1) возможность управления двигателем изменением параметров вторичной цепи без применения щеток и контактных колец;

2) практически неограниченные возможности увеличения числа пар полюсов (зубцов индуктора), что, в свою очередь, позволяет рассчитывать эти двигатели на питание от источников высокой частоты или на весьма малую синхронную скорость вращения при обычной частоте питания;

3) возможность вынесения части потерь во вторичной цепи за пределы электрической машины без использования щеток и контактных колец. Последнее может быть осуществлено для облегчения теплового режима при использовании ИАД в следящем приводе или в качестве моментного двигателя в различных гироскопических и других устройствах.

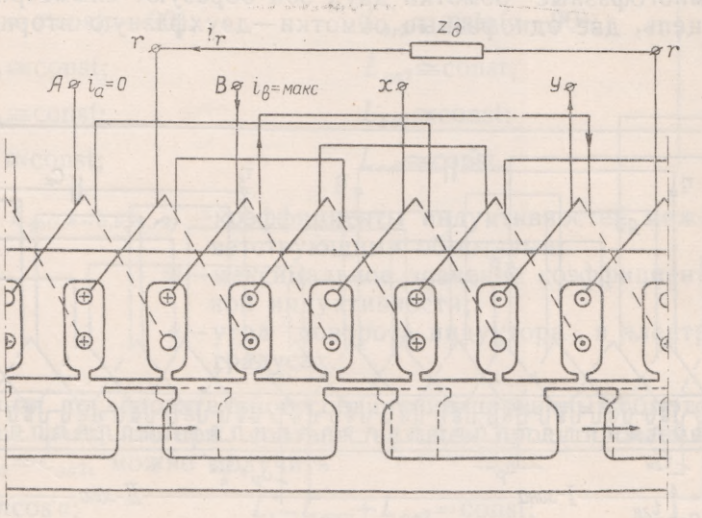


Рис. 1.

Для пояснения принципа действия ИАД на рис. 1 представлена простейшая конструктивная схема двухфазного разноименнополюсного индукторного генератора с обмотками двойного шага [1—3].

Если обмотку возбуждения генератора $r—r$ замкнуть на сопротивление $z_д$, а к обмоткам переменного тока $A—x$ и $B—y$ подвести питание от двухфазного источника, то за счет взаимодействия

переменных магнитных потоков с токами в обмотках зубчатый ротор начнет вращаться со скоростью меньше синхронной. Природу данного явления можно пояснить следующим образом.

Если зубцы ротора своим положением обеспечивают максимальное потокосцепление фазы $A—x$ со вторичной обмоткой $r—r$, то при прохождении тока i_a через нулевое значение в обмотке $r—r$ наведется максимальная э.д.с., а следовательно, появится ток i_r. Поскольку в данный момент времени имеет место наибольший ток в обмотке фазы $B—y$, то под действием электромагнитных сил ротор будет стремиться повернуться так, чтобы своим положением обеспечить максимальное потокосцепление фазы $B—y$ и вторичной обмотки $r—r$. В следующий момент времени ток фазы $B—y$ уменьшится до нуля, а фазы $A—x$ увеличится до максимума. Стремясь обеспечить в этом случае максимальное потокосцепление фазы $A—x$ и обмотки $r—r$, ротор повернется еще на некоторый угол. Таким образом, изменение во времени первичных и вторичных токов и обеспечит вращение ротора в определенную сторону.

Известно, что при обычном исполнении вторичная цепь асинхронного двигателя многофазная (симметричная), в простейшем случае двухфазная. Необходимость последнего в ряде случаев определяется стремлением избежать искажения механической характеристики при полусинхронной скорости, а также влияния углового положения ротора на величину момента при заторможенном роторе и несимметричном питании.

В индукторном двигателе симметрия вторичных цепей может быть осуществлена по-разному. Одним из путей решения этого вопроса является разбивка зубцов статора на две зоны. Каждая зубцовая зона с относящимися к ней зубцами ротора и обмотками определяет электрическую машину с многофазной первичной и однофазной вторичной обмотками. В этом случае последовательно соединенные многофазные обмотки двух зон образуют симметричную первичную цепь, две однофазные обмотки—двухфазную вторичную цепь (рис. 2).

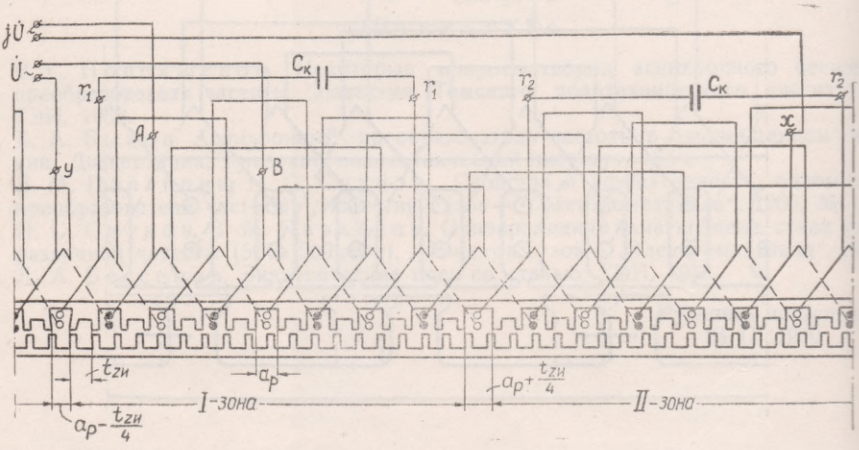


Рис. 2.

Для получения необходимых электромагнитных связей между обмотками первичной и вторичной цепей вторая зубцовая зона располагается несимметрично относительно первой, а со сдвигом на четверть зубцового шага ротора. Во избежание появления паза с уменьшенной площадью сечения промежутки между зубцовыми зонами ме-

быть увеличены на половину зубцового шага ротора. При этом число зубцов ротора увеличивается на единицу.

Для улучшения характеристик ИАД, а также для получения возможности регулирования скорости вращения во вторичную цепь следует включать емкость. В этом случае кривая момента приобретает вид резонансной кривой, положение максимума которой зависит от соотношения емкости и индуктивности во вторичной цепи.

Впервые анализ режимов работы асинхронного двигателя с резонансными контурами во вторичной цепи был произведен В. С. Кублановым [4]. Этому вопросу были посвящены работы и других авторов.

Для анализа режимов работы ИАД в различных схемах автоматики, а также для быстрого определения моментов, токов, скольжения индукторного синхронного двигателя при асинхронном пуске в ход необходимо знать основные уравнения ИАД и схемы замещения. Поскольку до настоящего времени этот вопрос в литературе не рассматривался, то ему, в основном, и посвящается данная статья.

2. УРАВНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СВЯЗЕЙ И Э.Д.С. АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ИНДУКТОРНОГО ТИПА

На рис. 2 приведена конструктивная схема ИАД с двухфазными первичной и вторичной цепями.

Если предположить, что магнитная цепь не насыщена, а потерями в стали можно пренебречь, то для коэффициентов индуктивностей, характеризующих электромагнитные связи между обмотками каждой зоны ИАД, можно написать следующие выражения:

для первой зоны	для второй зоны
$L_{ar1}=m\cos\alpha;$	$L_{ar2}=m\sin\alpha;$
$L_{br1}=m\cos(\alpha-90);$	$L_{br2}=m\sin(\alpha-90);$
$L_{aa1}\cong\text{const};$	$L_{aa2}\cong\text{const};$
$L_{bb1}\cong\text{const};$	$L_{bb2}\cong\text{const};$
$L_{rr1}\cong\text{const};$	$L_{rr2}\cong\text{const}.$

(1)

Здесь $L_{ik(i,k=a,b,r1,r2)}$ — коэффициенты индуктивностей между соответствующими обмотками;

m — максимальное значение коэффициента взаимной индуктивности;

α — угол поворота индуктора в электрических градусах.

Учитывая последовательное соединение первичных обмоток ИАД, а также тот факт, что при соответствующем проектировании $L_{aa1}=L_{bb1}=L_{aa2}=L_{bb2}$, можно получить

$L_{ar1}=m\cos\alpha;$	$L_1=L_{aa1}+L_{aa2}=\text{const};$
$L_{br1}=m\cos(\alpha-90);$	$L_1=L_{bb1}+L_{bb2}=\text{const};$
$L_{ar2}=m\sin\alpha;$	$L_2=L_{rr1}=L_{rr2}=\text{const}.$
$L_{br2}=m\sin(\alpha-90);$	

(2)

Уравнения (2) полностью совпадают с аналогичными уравнениями для обычного асинхронного двигателя с двухфазной первичной обмоткой на статоре и двухфазной обмоткой на роторе. Таким образом, можно принять, что конструктивная схема асинхронного двигателя с

подвижной вторичной обмоткой является эквивалентной схемой ИАД с неподвижной вторичной обмоткой.

Уравнения равновесия э.д.с. ИАД имеют следующий вид:

$$\begin{aligned}
u_a &= i_a r_1 + \frac{d}{dt}(L_1 i_a + L_{ar1} i_{21} + L_{ar2} i_{22});\\
u_b &= i_b r_1 + \frac{d}{dt}(L_1 i_b + L_{br1} i_{21} + L_{br2} i_{22});\\
u_{21} &= i_{21} r_2 + \frac{d}{dt}(L_2 i_{21} + L_{ar1} i_a + L_{br1} i_b);\\
u_{22} &= i_{22} r_2 + \frac{d}{dt}(L_2 i_{22} + L_{ar2} i_a + L_{br2} i_b).
\end{aligned} \qquad (3)$$

Здесь $u_{(a,b,21,22)}$ — напряжения, приложенные к первичным и вторичным цепям;

$i_{(a,b,21,22)}$ — токи первичных и вторичных цепей;

r_1; r_2 — активные сопротивления первичных и вторичных цепей.

Производя преобразования [5], приводящие напряжения, потокосцепления и токи к двум осям (d, q), совпадающим с осями вторичных обмоток (см. эквивалентную схему), можно получить следующие уравнения в операторной форме:

$$\begin{aligned}
u_d &= (r_1 + pL_1) i_d + mpi_{21} + (L_1 i_q + mi_{22}) p\alpha;\\
u_q &= (r_1 + pL_1) i_q + mpi_{22} - (L_1 i_d + mi_{21}) p\alpha;\\
u_{21} &= (r_2 + pL_2) i_{21} + mpi_d;\\
u_{22} &= (r_2 + pL_2) i_{22} + mpi_q,
\end{aligned} \qquad (4)$$

где $p = \frac{d}{dt}$ — оператор дифференцирования;

$u_{(d,q)}$; $i_{(d,q)}$ — напряжения и токи, приведенные к осям d и q.

В установившихся режимах уравнения (4) в комплексной форме будут иметь вид:

$$\begin{aligned}
\dot{U}_d &= (r_1 + j\omega sL_1)\dot{I}_d + j\omega sm\dot{I}_{21} + (1-s)\omega L_1 \ddot{I}_q + (1-s)\omega m\dot{I}_{22};\\
\dot{U}_q &= (r_1 + j\omega sL_1)\ddot{I}_q + j\omega sm\dot{I}_{22} - (1-s)\omega L_1 \dot{I}_d - (1-s)\omega m\dot{I}_{21};\\
\dot{U}_{21} &= (r_2 + j\omega sL_2)\dot{I}_{21} + j\omega sm\dot{I}_d;\\
\dot{U}_{22} &= (r_2 + j\omega sL_2)\ddot{I}_{22} + j\omega sm\ddot{I}_q,
\end{aligned} \qquad (5)$$

где s — скольжение, определяемое обычным отношением;

$\omega = 2\pi f$ — круговая частота;

$(1-s)\omega$ — угловая скорость ротора в электрических радианах в секунду.

Учитывая, что при симметричном режиме со стороны первичной и вторичной цепей

$$\dot{U}_{22} = j\dot{U}_{21} = j\ddot{U}_2; \qquad \dot{I}_q = j\ddot{I}_d = j\dot{I}_1;$$

$$\dot{U}_q = j\ddot{U}_d = j\dot{U}_1; \qquad \dot{U}_{21} = -\frac{x_{ck}\ddot{I}_{21}}{js};$$

$$\dot{I}_{22} = j\dot{I}_{21} = j\dot{I}_2; \qquad \dot{U}_{22} = -\frac{x_{ck}\dot{I}_{22}}{js},$$

Уравнения (5) приводятся к двум уравнениям вида

$$\left.\begin{aligned}\dot{U}_1&=(r_1+jx_{L_1})\dot{I}_1+jx_m\dot{I}_2;\\ 0&=\left(r_2+jsx_{L2}-j\frac{x_{ck}}{s}\right)\dot{I}_2+jsx_m\dot{I}_1.\end{aligned}\right| \qquad (6)$$

Здесь $x_{L1}=\omega L_1$ — индуктивность первичной цепи при холостом ходе;

$x_{L2}=\omega L_2$ — индуктивность вторичной цепи;

$x_m=\omega m$ — сопротивление взаимной индуктивности между обмотками первичной и вторичной цепей;

$x_{ck}=\dfrac{1}{\omega C_k}$ — сопротивление компенсирующей емкости (C_k) при частоте сети.

2. ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ И СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ИНДУКТОРНОГО ТИПА

С учетом коэффициента приведения для вторичной э.д.с.

$$\frac{E_2'}{E_2}=\frac{b_1}{b_2}, \qquad (7)$$

из равенства электромагнитных мощностей приведенной и неприведенной вторичных цепей можно получить следующее выражение для коэффициента приведения вторичного тока:

$$\frac{I_2'}{I_2}=\frac{m_2b_2}{m_1b_1}. \qquad (8)$$

Здесь m_1; m_2 — числа фаз первичной и вторичной цепей;

b_1; b_2 — числа, характеризующие обмоточные данные первичной и вторичной цепей.

С учетом уравнений (7) и (8), коэффициент приведения для вторичных сопротивлений будет иметь вид

$$k_{np}=\frac{z_2'}{z_2}=\frac{m_1}{m_2}\left(\frac{b_1}{b_2}\right)^2. \qquad (9)$$

Уравнения (6) можно записать следующим образом:

$$\left.\begin{aligned}\dot{U}_1&=r_1\dot{I}_1+jx_{L_1}\dot{I}_1+jx_m\frac{b_1b_2}{b_2b_1}\cdot\frac{m_1m_2}{m_2m_1}\dot{I}_2;\\ 0&=\left(\frac{r_2}{s}+jx_{L2}-j\frac{x_{ck}}{s^2}\right)\frac{m_1}{m_2}\left(\frac{b_1}{b_2}\right)^2\frac{m_2b_2}{m_1b_1}\dot{I}_2+j\frac{m_1}{m_2}x_m\frac{b_2m_2}{b_1m_1}\left(\frac{b_1}{b_2}\right)^2\dot{I}_1,\end{aligned}\right| \qquad (10)$$

или с учетом уравнений (8), (9)

$$\left.\begin{aligned}\dot{U}_1&=r_1\dot{I}_1+jx_{L_1}\dot{I}_1+j\frac{m_1b_1}{m_2b_2}x_m\dot{I}_2';\\ 0&=\left(\frac{r_2'}{s}+jx_{L2}'-j\frac{x_{ck}'}{s^2}\right)\dot{I}_2'+j\frac{m_1b_1}{m_2b_2}x_m\frac{m_2}{m_1}\dot{I}_1.\end{aligned}\right| \qquad (11)$$

Полагая

$$\dot{I}_1+\dot{I}_2'=\dot{I}_o;\qquad \frac{m_1b_1}{m_2b_2}x_m=x_o;\quad m_2=m_1,$$

из выражения (11) можно получить в окончательном виде

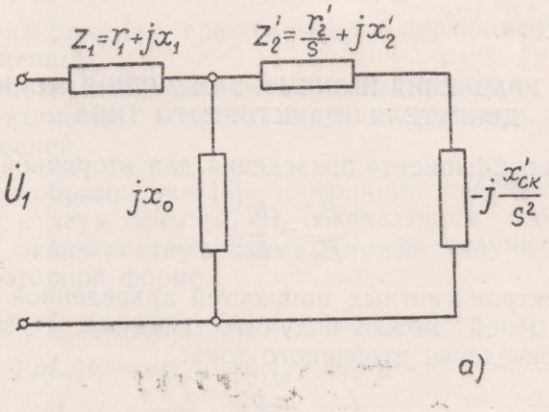
$$\left.\begin{aligned}\dot{U}_1&=-\dot{E}_1+(r_1+jx_1)\dot{I}_1;\\ \dot{E}_2'&=\left[\frac{r_2'}{s}+j\left(x_2'-\frac{x_{ck}'}{s^2}\right)\right]\dot{I}_2'.\end{aligned}\right| \qquad (12)$$

Здесь x_o; I_o — сопротивление и ток намагничивающего контура;

$x_1=x_{L1}-x_o$ — сопротивление рассеяния первичной цепи;

$x_2'=x_{L2}'-x_o$ — приведенное к первичной цепи сопротивление рассеяния вторичной цепи;

$\dot{E}_2'=\dot{E}_1=-jx_o\dot{I}_o$ — приведенное значение вторичной и первичная э.д.с.



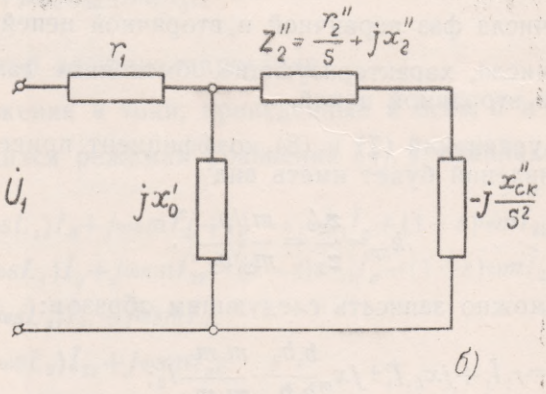


Рис. 3.

Уравнения (12) определяют точную схему замещения ИАД (рис. 3*а*), которая ничем не отличается от схемы замещения обычных асинхронных двигателей с емкостью в цепи ротора при неучете потерь в стали.

Из расположения обмоток и равенства э.д.с. первичной и приведенной вторичной цепей определяются следующие значения чисел: b_1, b_2: $b_1=w_{k1}k_{об1}$; $b_2=w_{k2}k_{об2}$,

где w_{k1}; w_{k2} — числа витков в одной катушке первичной и вторичной обмоток;

$k_{об1}$; $k_{об2}$ — обмоточные коэффициенты первичной и вторичной обмоток.

Однако, учитывая повышенные сопротивления рассеяния индукторных машин, в ряде случаев удобно коэффициенты приведе-

ния для параметров вторичной цепи определить из следующего равенства:

$$x_1 = x_{L1} - \frac{m_1 b_1}{m_2 b_2} x_m = 0, \tag{13}$$

тогда

$$\frac{b_1}{b_2} = \frac{m_2}{m_1}\cdot\frac{x_{L1}}{x_m}; \quad k_{np} = \frac{m_2}{m_1}\left(\frac{x_{L1}}{x_m}\right)^2; \quad x_2'' = x_{L_2}'' - x_{L1},$$

и основные уравнения приобретают вид:

$$\left.\begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1' + r_1 \dot{I}_1; \\ \dot{E}_2'' &= \left[\frac{r_2''}{s} + j\left(x_2'' - \frac{x_{ck}''}{s^2}\right)\right]\dot{I}_2''. \end{aligned}\right| \tag{14}$$

Уравнения (14) определяют схему замещения ИАД с частичным вынесением намагничивающего контура (рис. 3*б*). В отличие от точного преобразования, связанного с частичным вынесением намагничивающего контура [6], уравнения (13) и (14) осуществляют приближенное преобразование, при котором вместо $\sigma = \frac{z_o + jx_1}{z_o}$ полагается $\sigma = \frac{x_o + x_1}{x_o}$.

Однако данное упрощение, не внося существенной погрешности в результаты расчетов различных характеристик, значительно облегчает исследование режимов работы ИАД. При необходимости учета потерь в стали ИАД схемы замещения рис. 3 могут быть несколько видоизменены заменой jx_o на $z_o = r_o + jx_o$.

ВЫВОДЫ

1. Рассмотрен принцип конструктивной компоновки многополюсного асинхронного индукторного двигателя с обмотками двойного шага.

2. Получены уравнения электромагнитных связей и э.д.с. асинхронного индукторного двигателя с симметричными первичной и вторичной цепями.

3. Получены основные уравнения и схемы замещения асинхронного двигателя индукторного типа, которые полностью совпадают с аналогичными уравнениями и схемами замещения обычного асинхронного двигателя с емкостью во вторичной цепи.

Последнее допускает использование для исследования индукторных асинхронных двигателей известных в литературе формул и соотношений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. И. Штурман. Повышение частоты переменного тока в системах электроснабжения транспортных средств. Труды института энергетики и электротехники АН Латвийской ССР, вып. 6, 1958.
2. Г. И. Штурман, К. Э. Скрузитис. Трехфазный индукторный генератор с двухзубцовой обмоткой. Труды института энергетики и электротехники АН Латвийской ССР, III, 1961.
3. Н. Н. Левин. Соотношение чисел зубцов в разноименнополюсных индукторных генераторах „Известия вузов—„Электромеханика", 1960. № 4.
4. В. С. Кулебакин. Об ускорении процесса реверсирования асинхронных двигателей с помощью статических конденсаторов. Известия АН СССР, отделение технических наук, 1938. № 3.
5. А. А. Горев. Переходные процессы синхронной машины. Госэнергоиздат, 1950.
6. М. П. Костенко. Электрические машины. Специальная часть. Госэнергоиздат, 1949.

Рукопись поступила
28 XI 1960