

МОДЕЛИРОВАНИЕ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Докт. техн. наук, проф. ЛУКОВНИКОВ В. И.,
канд. техн. наук, доц. ТОДАРЕВ В. В., асп. ВЕППЕР Л. В.

Гомельский политехнический институт

Несмотря на перспективность, внедрение безредукторных электроприводов углового колебательного движения сдерживается сложностью их технической реализации, вызванной необходимостью использования двухфазных асинхронных электродвигателей с подпружиненным валом, в воздушном зазоре которых создается качающееся магнитное поле при подключении статорных обмоток к источникам электроэнергии с модулированными по амплитуде или частоте напряжениями [1].

Переход на общепромышленные трехфазные асинхронные электродвигатели, замена пружины на валу маятником и использование подключения трехфазных АД к обычной однофазной промышленной сети, когда создается автоколебательный режим [2], позволит существенно упростить использование подобных электроприводов.

В такой реализации безредукторный маятниковый асинхронный электропривод углового движения может стать конкурентоспособным редукторным приводом станков — качалок нефти, испытательных стендов кабелей и тросиков на сматывание — разматывание и истирание, притирочных механизмов, мешалок и т. д.

В данной статье ставится задача математического моделирования указанных электроприводов для обеспечения последующей научно обоснованной разработки методик их анализа и синтеза.

Схемы подключения трехфазных АД к однофазной сети являются несимметричными и поэтому при математическом моделировании требуют специального определения параметров статорной цепи.

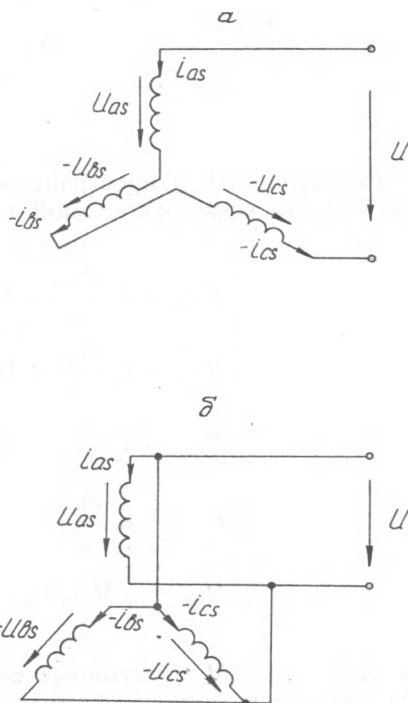


Рис. 1. а — последовательное и б — параллельное соединения статорных обмоток трехфазного АД при включении в однофазную сеть для автоколебательного режима работы

Для рассматриваемого в данной статье автоколебательного асинхронного электропривода с маятником на валу электродвигателя наиболее экономичны, на наш взгляд, схемы соединения фазных статорных обмоток, представленные на рис. 1, поскольку они обеспечивают максимальную магнитовдвигающую силу при номинальном токе.

Следуя [1], составим для схемы на рис. 1а условия несимметрии в мгновенных значениях фазных токов и напряжений статора:

$$\begin{aligned}i_{as} &= -i_{bs} = -i_{cs}; \\u_{as} - u_{bs} - u_{cs} &= u.\end{aligned}$$

В статорной системе координат α — β (ротор АД симметричен) эти условия запишем:

$$i_{\alpha s} + i_0 = 0,5i_{\alpha s} + 0,5\sqrt{3}i_{\beta s} - i_0 = 0,5i_{\alpha s} - 0,5\sqrt{3}i_{\beta s} - i_0;$$

$$(u_{\alpha s} + u_0) + (0,5u_{\alpha s} + 0,5\sqrt{3}u_{\beta s} - u_0) + (0,5u_{\alpha s} - 0,5\sqrt{3}u_{\beta s} - u_0) = u,$$

где $u_{\alpha s}, u_{\beta s}, i_{\alpha s}, i_{\beta s}$ — напряжения и токи фазных обмоток статора по осям α и β ;

u_0, i_0 — напряжение и ток обратной последовательности.

После преобразования получим:

$$i_{\alpha s} = -4i_0;$$

$$u_{\alpha s} = 0,5(u + u_0); \quad (1)$$

$$i_{\beta s} = 0.$$

Известно, что в пространственных векторах симметричный трехфазный АД описывается системой дифференциальных уравнений:

$$\left\{ \begin{aligned}R_s i_{\alpha s} + L_s \frac{di_{\alpha s}}{dt} + M \frac{di_{\alpha r}}{dt} &= u_{\alpha s}; \\R_s i_{\beta s} + L_s \frac{di_{\beta s}}{dt} + M \frac{di_{\beta r}}{dt} &= u_{\beta s}; \\R_r i_{\alpha r} + L_r \frac{di_{\alpha r}}{dt} + M \frac{di_{\alpha s}}{dt} + \omega L_r i_{\beta r} + \omega M i_{\beta s} &= 0; \\R_r i_{\beta r} + L_r \frac{di_{\beta r}}{dt} + M \frac{di_{\beta s}}{dt} - \omega L_r i_{\alpha r} - \omega M i_{\alpha s} &= 0; \\M_{эм} &= \frac{3}{2} M (i_{\beta s} i_{\alpha r} - i_{\alpha s} i_{\beta r}),\end{aligned} \right. \quad (2)$$

где R_s, R_r, L_r, M — активные сопротивления, полные индуктивности и взаимная индуктивность фазных обмоток статора и ротора;

$M_{эм}, \omega$ — электромагнитный момент и угловая скорость ротора.

Учитывая, что

$$u_0 = i_0 R_0 + L_0 \frac{di_0}{dt},$$

где R_0, L_0 — активное сопротивление и полная индуктивность фазных обмоток статора токам нулевой последовательности.

Запишем систему уравнений (2) при условиях несимметрии (1) для напряжения сети $u = U_m \sin(\omega_1 t + \alpha)$ в форме Коши:

$$\begin{cases} \frac{di_{\alpha s}}{dt} = a_1 i_{\alpha s} + a_2 i_{\alpha r} + a_3 \omega i_{\beta r} + a_4 U_m \sin(\omega_1 t + \alpha); \\ \frac{di_{\alpha r}}{dt} = b_1 i_{\alpha s} + b_2 i_{\alpha r} + b_3 \omega i_{\beta r} + b_4 U_m \sin(\omega_1 t + \alpha); \\ \frac{di_{\beta s}}{dt} = c_1 \omega i_{\alpha s} + c_2 \omega i_{\alpha r} + c_3 i_{\beta r}; \\ \frac{d\omega}{dt} = d_1 \sin \varphi + d_2 \omega + d_3 \text{sign} \omega + d_4 i_{\alpha s} i_{\beta r}; \\ \frac{d\varphi}{dt} = \omega; \\ \varphi(+0) = \varphi_0 \neq 0; \quad \omega(+0) = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Здесь через U_m, ω_1, α обозначены амплитуда, угловая частота и начальная фаза сетевого напряжения, а коэффициенты рассчитываются по параметрам схемы замещения и нагрузки АД следующим образом:

$$a_1 = -1,125 r_1 (x_m + x_2') \omega_1 g; \quad a_2 = r_2' x_m \omega_1 g;$$

$$a_3 = -x_m^2 g; \quad a_4 = 0,5(x_m + x_2') \omega_1 g;$$

$$b_1 = 1,125 r_1 x_m \omega_1 g;$$

$$b_2 = c_2 = -r_2' (x_m + 1,125 x_1) \omega_1 g;$$

$$b_3 = (x_m + 1,125 x_1)(x_m + x_2') g = -c_3;$$

(4)

$$b_4 = 0,5 x_m \omega_1 g;$$

$$c_1 = -x_m (x_m + 1,125 x_1) g;$$

$$g = [x_m (1,125 x_1 + x_2') + 1,125 x_1 x_2']^{-1};$$

$$d_1 = -Gl / J; \quad d_2 = -H / J;$$

$$d_3 = -M_{\text{тр}} / J; \quad d_4 = -3x_m / 2\omega_1 J.$$

В выражениях для коэффициентов использованы:
 $r_1, x_1, x_m, r_2', x_2'$ — параметры схемы замещения АД;
 H — коэффициент демпфирования;
 G, m, l — вес, масса и длина плеча маятника;

$M_{\text{тр}}$ — момент сухого трения;

$J = J_{\text{дв}} + J_{\text{н}} + m^2 l$ — суммарный момент инерции ротора двигателя, нагрузки и маятника.

Подчеркнем, что ввиду отсутствия пускового момента при однофазном включении трехфазного АД начальное угловое отклонение маятника $\varphi(+0)$, а значит и начальное условие в системе (3) φ_0 должно быть обязательно ненулевым.

Для обобщения получаемых результатов и выравнивания порядков величин в дифференциальных уравнениях системы (3) введем относительные переменные:

$$i^0 = i / I_N; \quad u^0 = u / U_N; \quad \varphi^0 = \psi \omega_1 / U_N;$$

$$\varphi^0 = \omega_0 \varphi / \omega_1; \quad \omega^0 = \omega / \omega_1; \quad \tau = \omega_0 t,$$

где в качестве базовых электрических величин приняты, как обычно, номинальные действующие значения фазных токов I_N , напряжений U_N , потокосцеплений $\psi_N = U_N / \omega_1$, частоты сети ω_1 , но за базовое время принята величина

$$t_6 = 1 / \omega_0 = \sqrt{\frac{J_{\text{дв}}}{G l} + \frac{J_{\text{н}}}{G l} + \frac{m^2}{G}},$$

равная обратному значению собственной частоты ω_0 колеблющихся масс.

Система уравнений (3) при этом сохранит свой вид, но коэффициенты (4) станут относительными и равными соответственно:

$$a_1^0 = -1,25k \left(\frac{r_1}{x_2'} + \frac{r_1}{x_m} \right); \quad a_2^0 = k \frac{r_2'}{x_2'};$$

$$a_3^0 = -k \frac{x_m}{x_2'}; \quad a_4^0 = \frac{U}{\sqrt{2} I_N} k \left(\frac{1}{x_2'} + \frac{1}{x_m} \right);$$

$$b_1^0 = -a_1^0 \left(1 + \frac{x_2'}{x_m} \right)^{-1};$$

$$b_2^0 = c_2^0 = -a_2^0 \left(1 + 1,125 \frac{x_1}{x_m} \right);$$

$$b_3^0 = -c_3^0 = k \left(1 + 1,125 \frac{x_1}{x_m} \right) \left(1 + \frac{x_m}{x_2'} \right);$$

$$b_4^0 = a_4^0 \left(1 + \frac{x_2'}{x_m} \right)^{-1}; \quad c_1^0 = a_3^0 \left(1 + 1,125 \frac{x_1}{x_m} \right);$$

$$k = \left\{ d_1^0 \left[1 + 1,125 \left(\frac{x_1}{x_2'} + \frac{x_1}{x_m} \right) \right] \right\}^{-1};$$

$$d_1^0 = -\frac{\omega_0}{\omega_1}; \quad d_2^0 = \frac{H}{J\omega_1 d_1^0}; \quad d_3^0 = \frac{M_{\text{тр}}}{J\omega_1^2 d_1^0}; \quad d_4^0 = \frac{3J_N^2 x_m}{J\omega_1^3 d_1^0}.$$

С помощью математической модели (3) в относительных переменных был исследован на ПЭВМ автоколебательный режим асинхронного электродвигателя типа 4А90ЛВ8УЗ по последовательной схеме включения стартовых обмоток (рис. 1а).

Во вращательном режиме двигатель имеет следующие номинальные паспортные данные: $P_N = 1,1$ кВт; $U_N = 220$ В; $I_N = 3,5$ А; $\eta = 70$ %;

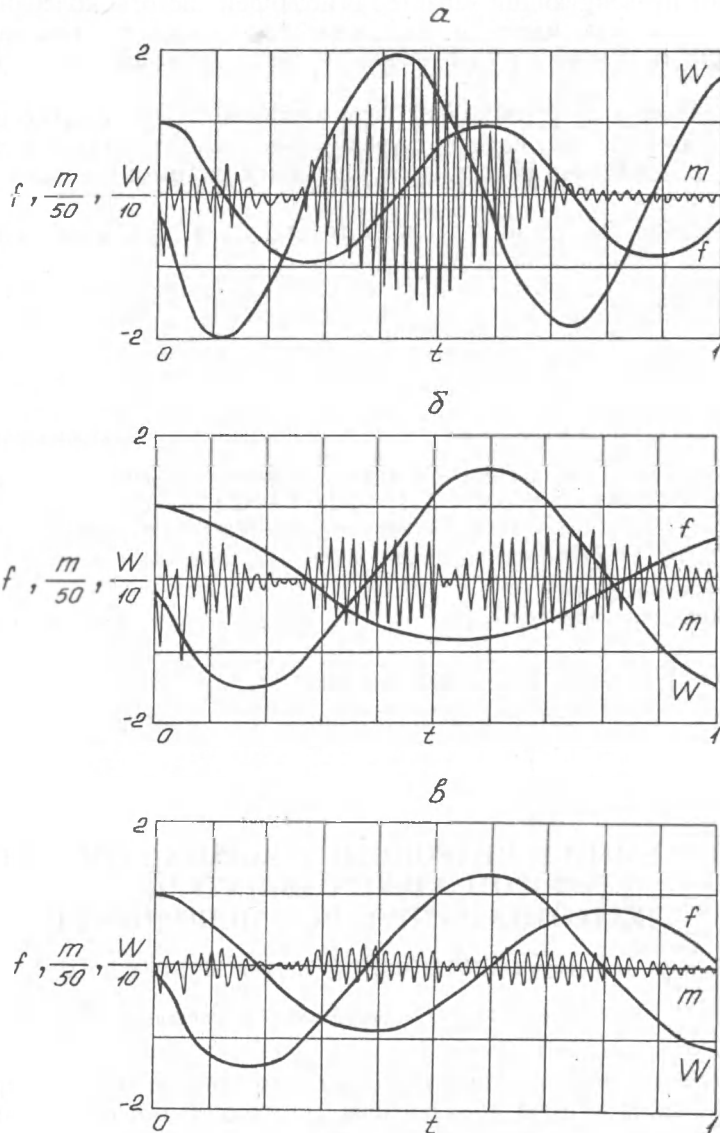


Рис. 2. Временные диаграммы угла f , скорости ω и момента m колебаний АД типа 4А90ЛВ8УЗ при:
 а — $U = 333$ В; $\varphi_0 = 1$ рад; $M_{\text{тр}} = 0,1$ Нм; $Gl = 4$ Нм; б — 333 В; 1 рад;
 0; $2,119$ Нм; в — 220 В; 1 рад; $0,1$ Нм; $2,119$ Нм

$\cos \varphi = 0,68$; $M_N = 15$ Нм; $n_N = 700$ об./мин; $r_1 = 7,44$ Ом; $x_1 = 8,59$ Ом; $x_m = 880$ м; $r_2' = 5,73$ Ом; $x_2' = 15,65$ Ом; $p = 4$.

Расчет велся на одну пару полюсов $p = 1$, поэтому были приняты момент $M_{N1} = M_N / p = 3,75$ Нм, а частота вращения $n_{N1} = n_N p = 2800$ об./мин.

В процессе исследования параметры электропитания и нагрузки варьировались в диапазонах: $U = 100-333$ В; $M_{\text{тр}} = 0-0,35$ Нм; $Gl = 0,3-4$ Нм; $\varphi_0 = 0-2$ рад.

В этих диапазонах возникали устойчивые автоколебательные режимы. Временные диаграммы некоторых из них представлены на рис. 2.

Анализ расчетных данных и результатов экспериментального исследования, хорошо совпавших с ними, позволил получить следующие выводы.

1. Математические модели автоколебательного режима трехфазного АД при однофазном включении адекватны реальным процессам.

2. Электромагнитный момент и фазные токи в автоколебательном режиме имеют пульсирующий характер огибающей частоты колебаний, аналогично тому, как это имеет место в режиме возбуждаемых колебаний [1].

3. Законы изменения угла и скорости автоколебаний близки к гармоническим.

4. Амплитуда угла устойчивых автоколебаний с ростом сухого трения почти пропорционально падает, с увеличением напряжения электропитания почти квадратично растет, а от частоты колебаний зависит обратно пропорционально.

5. Частота автоколебаний зависит только от инерции колеблющихся масс, размера плеча и веса груза маятника.

6. Амплитуда скорости устойчивых автоколебаний от частоты колебаний и величины нагрузки практически не зависит.

ЛИТЕРАТУРА

1. Грачев С. А., Луковников В. И. Безредукторный электромашинный привод периодического движения. — Мн.: Вышэйшая школа, 1991. — С. 160.
2. В л а с о в Н. П. Автоколебательная схема с однофазным асинхронным мотором // Журнал технической физики. — 1935. — Т. 5. — Вып. 4. — С. 641—653.
3. Л е в и н М. С., К у ц П. В. О сопротивлении нулевой последовательности АД // Электричество. — 1953. — № 2.