

Производство многоплоскостных магнитопроводов наиболее эффективно на автоматизированных линиях при наборе заготовки пакета из плоских пластин с помощью укладчика с поворотной оправкой (с периодическим поворотом пакета на угол  $\alpha_r$ ) и последующим отгибом специальной оснасткой сегментных участков ярма в собранной на оправку заготовке и скреплением сваркой.

Таким образом, согласно (27) и (35) дополнительно к снижению отходов электротехнической стали (24) при производстве и снижению расхода конструкционных материалов (1) многоплоскостные магнитопроводы [4] обеспечивают увеличение внешней поверхности охлаждения.

На основании изложенного можно заключить, что разработка АД с многоплоскостным магнитопроводом является одним из направлений решения задачи общего ресурсосбережения при производстве электрических машин, причем освоение указанного направления не требует коренной перестройки производства и разработки комплекса нового специального технологического оборудования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Volkrodt W. Neue Wege im Elektromaschinenbau.— Elektro-Job, 1985, S. 29—38.
2. Копылов И. П., Костиков О. Н., Яковлев А. И. Основные направления снижения технологической материалоемкости магнитопроводов асинхронных двигателей.— Электротехника, 1987, № 6, с. 58—61.
3. Виноградов Н. В. Производство электрических машин. Учебное пособие для вузов. Изд. 2-е, перераб.— М.: Энергия, 1977.— 228 с.
4. А. с. № 1339749 (СССР). Магнитопровод электрической машины. / Ставинский А. А.— Оpubл. в Б. И., 1987, № 35.
5. Паластин Л. М. Электрические машины автономных источников питания.— М.: Энергия, 1972.— 464 с.
6. Романовский В. П. Справочник по холодной штамповке. 6-е изд.— Л.: Машиностроение, 1979.— 520 с.
7. Мышкис А. Д. Лекции по высшей математике. 3-е изд.— М.: Наука, 1969.— 640 с.
8. Счастливый Г. Г. Нагревание закрытых асинхронных электродвигателей. Киев: Наукова думка, 1966.— 196 с.

[10.10.91]

УДК 62-83:621.313.333.001.24

## Моделирование периодических режимов асинхронных электродвигателей безредукторного привода

ЛУКОВНИКОВ В. И., доктор техн. наук, СЕРЕДА В. П., канд. техн. наук, ТОДОРОВ В. В., канд. техн. наук

Гомельский политехнический институт

Более шестидесяти лет назад И. С. Брук, отмечая простоту, электрическую и механическую прочность конструкции и хорошие пусковые характеристики асинхронной машины со стальным массивным ротором, указал, что эта машина была бы идеальной, если бы удалось улучшить ее энергетические показатели в номинальном режиме работы.

Успехи, достигнутые при решении этой задачи за счет разработки и создания сначала железомедного двухслойного, а затем и многослойного массивных роторов [1], позволяют в настоящее время развить высказывание И. С. Брука следующим образом: асинхронная машина будет идеальной, если ее массивный ротор выполнить так, чтобы удельное электрическое сопротивление и магнитная проницаемость материала плавно возрастали оптимальным образом от периферии к центру ротора.

Наиболее целесообразно использование подобных «идеальных» электродвигателей в непосредственном (безредукторном) приводе периодического движения (частые пуски и торможения,

повторяющийся реверс, шаговое и колебательное движение), где пусковой и номинальный (или близкий к номинальному) режимы непрерывно перемежаются [2—5].

Однако в периодических режимах таких «идеальных» электродвигателей, как и двигателей с массивными роторами обычного и многослойного исполнения [1, 5], сильно проявляется нестационарность активных сопротивлений, собственных и взаимных индуктивностей обмоток, обусловленная непрерывным изменением скольжения и эллиптичности электромагнитного поля. Последнее, в частности, имеет место в случае создания режима периодического движения линейной фазовой или балансной амплитудной модуляцией фазных напряжений электродвигателя [2].

Затруднения в принятии обоснованного инженерно-технического решения при анализе и синтезе периодических режимов, вызванные указанными обстоятельствами, а также многообразием способов реализации этих режимов, могут быть преодолены с помощью специальной математической модели асинхронного электродвигателя, построен-

ной на основе метода симметричных составляющих К. Л. Фортескью.

Известно успешное использование этого метода для исследования ряда установившихся несимметричных режимов электрических машин при токах и напряжениях, являющихся гармоническими функциями времени [8]. Но поскольку в рассматриваемом случае режимы работы машин являются динамическими (квазиустановившимися) и происходят при токах (напряжениях) источников электроэнергии, являющихся бипериодическими функциями времени [2, 3], то непосредственное использование результатов известных работ невозможно.

В. Ф. Лайон распространил метод К. Л. Фортескью на симметричные составляющие для мгновенных значений токов и напряжений без ограничений в отношении законов их изменения [7]. Но это пространственные симметричные составляющие, для которых неправомерно использовать параметры электродвигателей, определенные для временных симметричных составляющих гармонических функций прямой и обратной последовательностей, создающих прямое и обратное электромагнитные поля [8].

Полагая эти параметры равными параметрам двигателя при симметричных составляющих произвольных мгновенных значений токов и напряжений, в дальнейшем разложение на временные симметричные составляющие будем производить по К. Л. Фортескью, но с помощью обобщенного комплексного преобразования [9].

Так, для двухфазной системы напряжений  $u_{as}(t)$  и  $u_{\beta s}(t)$  преобразование будет иметь вид:

$$\left. \begin{aligned} \left. \begin{aligned} u_{as1}(t) &= \frac{1}{4\pi} \left\{ e^{j\omega t} \int_0^{2\pi} e^{-j\omega t} [u_{as}(\omega t/\omega) \mp \right. \\ u_{as2}(t) &= \frac{1}{4\pi} \left\{ e^{j\omega t} \int_0^{2\pi} e^{-j\omega t} [u_{as}(\omega t/\omega) \mp \right. \\ &\left. \mp j u_{\beta s}(\omega t/\omega)] d(\omega t) - e^{-j\omega t} \int_0^{2\pi} e^{j\omega t} [u_{as}(\omega t/\omega) \pm \right. \\ &\left. \mp j u_{\beta s}(\omega t/\omega)] d(\omega t) \right\}; \\ u_{\beta s1}(t) &= \frac{1}{4\pi} \left\{ e^{j\omega t} \int_0^{2\pi} e^{-j\omega t} [u_{\beta s}(\omega t/\omega) \pm \right. \\ u_{\beta s2}(t) &= \frac{1}{4\pi} \left\{ e^{j\omega t} \int_0^{2\pi} e^{-j\omega t} [u_{\beta s}(\omega t/\omega) \pm \right. \\ &\left. \pm j u_{as}(\omega t/\omega)] d(\omega t) - e^{-j\omega t} \int_0^{2\pi} e^{j\omega t} [u_{\beta s}(\omega t/\omega) \mp \right. \\ &\left. \mp j u_{as}(\omega t/\omega)] d(\omega t) \right\}, \end{aligned} \right\} \end{aligned} \right\} (1)$$

где  $u_{as1}(t), \dots, u_{\beta s2}(t)$  — временные симметричные составляющие прямой (индекс 1) и обратной (индекс 2) последовательностей для мгновенных значений фазных напряжений;  $\omega$  — угловая частота;  $j$  — мнимая единица.

Пренебрежем потерями в стали и будем считать воздушный зазор равномерным, распределение поля в нем синусоидальным, а обмотки сосредоточенными, т. е. основное внимание при составлении математической модели уделим зави-

симости параметров от скольжения, имея в виду, что влияние эллиптичности поля будет учтено разложением на симметричные составляющие потокоцеплений, образующих прямое и обратное магнитные поля.

Так как большинство периодических режимов реализуется либо с помощью обычных двухфазных АД, либо с помощью трехфазных АД, статорные обмотки которых скоммутированы на подключение к двум источникам электроэнергии, то модель запишем в двухфазной статорной системе координат  $\alpha, \beta$  в обобщенном для линейного и углового движения виде [2, 3]:

$$\left. \begin{aligned} u_{as} &= \Delta u_{as} + e_{as}; \\ u_{\beta s} &= \Delta u_{\beta s} + e_{\beta s}; \\ 0 &= \Delta u_{ar} + e_{ar}; \\ 0 &= \Delta u_{\beta r} + e_{\beta r}; \end{aligned} \right\} (2)$$

$$q_{эм} = dW_{эм}/d\chi = q_n(q_0, \xi, d\xi/dt),$$

где  $u_{as}, u_{\beta s}$  — фазные напряжения статорных обмоток;  $\Delta u_{as}, \dots, \Delta u_{\beta r}$  — падения напряжений на активных сопротивлениях обмоток;  $e_{as}, \dots, e_{\beta r}$  — э. д. с. электромагнитной индукции в обмотках;  $q_{эм}, q_n, q_0$  — обобщенные электромагнитное усилие, механическая нагрузка и усилие постоянного сопротивления;  $\chi, \xi$  — обобщенные координата положения и скорость подвижного элемента электродвигателя;  $W_{эм}$  — энергия электромагнитного поля.

В рассматриваемом случае асинхронный электродвигатель симметричен в магнитном и несимметричен в электрическом отношении только по статору, поэтому для приведенных обмоток он будет иметь различные, практически независимые от скольжения активные сопротивления ( $R_{as} \neq R_{\beta s}$ ) и индуктивности рассеяния ( $L_{as2} \neq L_{\beta s2}$ ) статорных обмоток и равные, сильно зависящие от скольжения  $s$  активные сопротивления ( $R_{dr}(s) = R_{\beta r}(s)$ ) и индуктивности рассеяния ( $L_{ar2}(s) = L_{\beta r\sigma}(s)$ ) роторных обмоток, а также индуктивности обмоток статора и ротора от главного магнитного потока ( $M_{as}(s) = M_{\beta s}(s) = M_{ar}(s) = M_{\beta r}(s)$ ).

Тогда согласно (1) симметричные составляющие мгновенных падений напряжений на активных сопротивлениях обмоток, выраженные через симметричные составляющие мгновенных токов, запишем в виде:

$$\left. \begin{aligned} \Delta u_{as1} &= 0,5(R_{as} + R_{\beta s})i_{as1} + 0,5(R_{as} - R_{\beta s})i_{as2}; \\ \Delta u_{\beta s1} &= 0,5(R_{as} + R_{\beta s})i_{\beta s1} + 0,5(R_{\beta s} - R_{as})i_{\beta s2}; \\ \Delta u_{as2} &= 0,5(R_{as} - R_{\beta s})i_{as1} + 0,5(R_{as} + R_{\beta s})i_{as2}; \\ \Delta u_{\beta s2} &= 0,5(R_{\beta s} - R_{as})i_{\beta s1} + 0,5(R_{as} + R_{\beta s})i_{\beta s2}; \\ \Delta u_{ar1} &= R_{ar}(s_1)i_{ar1}; \\ \Delta u_{\beta r1} &= R_{ar}(s_1)i_{\beta r1}; \\ \Delta u_{ar2} &= R_{ar}(s_2)i_{ar2}; \\ \Delta u_{\beta r2} &= R_{ar}(s_2)i_{\beta r2}, \end{aligned} \right\} (3)$$

где  $s_1 = 1 - \xi|\xi_c|^{-1}, s_2 = 2 - \xi|\xi_c|^{-1}$  — скольжения для прямого и обратного полей;  $|\xi_c|$  — синхронная скорость. Симметричные составляющие мгно-

венных э. д. с. электромагнитной индукции, выраженные через симметричные составляющие мгновенных потокосцеплений, могут быть представлены в осях  $\alpha, \beta$  [8]:

$$\left. \begin{aligned} e_{\alpha s1} &= d\psi_{\alpha s1}/dt, \quad e_{\beta s1} = d\psi_{\beta s1}/dt; \\ e_{\alpha s2} &= d\psi_{\alpha s2}/dt, \quad e_{\beta s2} = d\psi_{\beta s2}/dt; \\ e_{\alpha r1} &= -\xi\psi_{\beta r1} + d\psi_{\alpha r1}/dt, \quad e_{\beta r1} = \xi\psi_{\alpha r1} + d\psi_{\beta r1}/dt; \\ e_{\alpha r2} &= -\xi\psi_{\beta r2} + d\psi_{\alpha r2}/dt, \quad e_{\beta r2} = \xi\psi_{\alpha r2} + d\psi_{\beta r2}/dt \end{aligned} \right\} (4)$$

С помощью (1) формулы для симметричных составляющих мгновенных потокосцеплений, выраженные через симметричные составляющие мгновенных токов, запишем в виде:

$$\left. \begin{aligned} \psi_{\alpha s1} &= [0,5(L_{\alpha s\sigma} + L_{\beta s\sigma}) + M(s_1)] i_{\alpha s1} + \\ &+ M(s_1) i_{\alpha r1} + 0,5(L_{\alpha s\sigma} - L_{\beta s\sigma}) i_{\alpha s2}; \\ \psi_{\beta s1} &= [0,5(L_{\alpha s\sigma} + L_{\beta s\sigma}) + M(s_1)] i_{\beta s1} + \\ &+ M(s_1) i_{\beta r1} + 0,5(L_{\beta s\sigma} - L_{\alpha s\sigma}) i_{\beta s2}; \\ \psi_{\alpha s2} &= [0,5(L_{\alpha s\sigma} + L_{\beta s\sigma}) + M(s_2)] i_{\alpha s2} + \\ &+ M(s_2) i_{\alpha r2} + 0,5(L_{\alpha s\sigma} - L_{\beta s\sigma}) i_{\alpha s1}; \\ \psi_{\beta s2} &= [0,5(L_{\alpha s\sigma} + L_{\beta s\sigma}) + M(s_2)] i_{\beta s2} + \\ &+ M(s_2) i_{\beta r2} + 0,5(L_{\beta s\sigma} - L_{\alpha s\sigma}) i_{\beta s1}; \\ \psi_{\alpha r1} &= [L_{\alpha r\sigma}(s_1) + M(s_1)] i_{\alpha r1} + M(s_1) i_{\alpha s1}; \\ \psi_{\beta r1} &= [L_{\alpha r\sigma}(s_1) + M(s_1)] i_{\beta r1} + M(s_1) i_{\beta s1}; \\ \psi_{\alpha r2} &= [L_{\alpha r\sigma}(s_2) + M(s_2)] i_{\alpha r2} + M(s_2) i_{\alpha s2}; \\ \psi_{\beta r2} &= [L_{\alpha r\sigma}(s_2) + M(s_2)] i_{\beta r2} + M(s_2) i_{\beta s2}. \end{aligned} \right\} (5)$$

Подставляя (5) в (4), а полученный результат и (3) — в (2) и учитывая, что в рассматриваемом случае

$W_{эм} = \frac{1}{2}(\psi_{\alpha s} i_{\alpha s} + \psi_{\beta s} i_{\beta s} + \psi_{\alpha r} i_{\alpha r} + \psi_{\beta r} i_{\beta r})$ , получим математическую модель АД в следующем виде:

$$\begin{aligned} u_{\alpha s1} &= [0,5(R_{\alpha s} + R_{\beta s}) - M'(s_1)\xi_c^{-1}\frac{d\xi}{dt}] i_{\alpha s1} + \\ &+ [0,5(L_{\alpha s\sigma} + L_{\beta s\sigma}) + M(s_1)] \frac{di_{\alpha s1}}{dt} - \\ &- M'(s_1)\xi_c^{-1}\frac{d\xi}{dt} i_{\alpha r1} + M(s_1) \frac{di_{\alpha r1}}{dt} + \\ &+ 0,5(R_{\alpha s} - R_{\beta s}) i_{\alpha s2} + 0,5(L_{\alpha s\sigma} - L_{\beta s\sigma}) \frac{di_{\alpha s2}}{dt}; \\ u_{\beta s1} &= [0,5(R_{\alpha s} + R_{\beta s}) - M'(s_1)\xi_c^{-1}\frac{d\xi}{dt}] i_{\beta s1} + \\ &+ [0,5(L_{\alpha s\sigma} + L_{\beta s\sigma}) + M(s_1)] \frac{di_{\beta s1}}{dt} - \\ &- M'(s_1)\xi_c^{-1}\frac{d\xi}{dt} i_{\beta r1} + M(s_1) \frac{di_{\beta r1}}{dt} + \\ &+ 0,5(R_{\beta s} - R_{\alpha s}) i_{\beta s2} + 0,5(L_{\beta s\sigma} - L_{\alpha s\sigma}) \frac{di_{\beta s2}}{dt}; \\ 0 &= [R_{\alpha r}(s_1) - \xi_c^{-1}\frac{d\xi}{dt}(M'(s_1) + L'_{\alpha r\sigma}(s_1))] i_{\alpha r1} + \\ &+ [M(s_1) + L_{\alpha r\sigma}(s_1)] \frac{di_{\alpha r1}}{dt} - M'(s_1)\xi_c^{-1}\frac{d\xi}{dt} i_{\alpha s1} + \\ &+ M(s_1) \frac{di_{\alpha s1}}{dt} - \xi [M(s_1) + L_{\alpha r\sigma}(s_1)] i_{\beta r1} - \\ &- \xi M(s_1) i_{\beta s1}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 0 &= [R_{\alpha r}(s_1) - \xi_c^{-1}\frac{d\xi}{dt}(M'(s_1) + L_{\alpha r\sigma}(s_1))] i_{\beta r1} + \\ &+ [M(s_1) + L_{\alpha r\sigma}(s_1)] \frac{di_{\beta r1}}{dt} - M'(s_1)\xi_c^{-1}\frac{d\xi}{dt} i_{\beta s1} + \\ &+ M(s_1) \frac{di_{\beta s1}}{dt} + \xi [L_{\alpha r\sigma}(s_1) + M(s_1)] i_{\alpha r1} + \\ &+ \xi M(s_1) i_{\alpha s1}; \\ &\dots \\ q_{эм} &= 0,5 \left\{ -M'(s_1)\xi_c^{-1}\xi^{-1}\frac{d\xi}{dt} [(i_{\alpha s1} + i_{\alpha r1})^2 + \right. \\ &+ (i_{\alpha s1} + i_{\alpha r1})(i_{\alpha s2} + i_{\alpha r2}) + (i_{\beta s1} + i_{\beta r1})^2 + \\ &+ (i_{\beta s1} + i_{\beta r1})(i_{\beta s2} + i_{\beta r2})] - M'(s_2)\xi_c^{-1}\xi^{-1}\frac{d\xi}{dt} \times \\ &\times [(i_{\alpha s2} + i_{\alpha r2})^2 + (i_{\alpha s1} + i_{\alpha r1})(i_{\alpha s2} + i_{\alpha r2}) + \\ &+ (i_{\beta s2} + i_{\beta r2})^2 + (i_{\beta s1} + i_{\beta r1})(i_{\beta s2} + i_{\beta r2})] - \\ &- M'(s_1)\xi_c^{-1}\xi^{-1}\frac{d\xi}{dt} (i_{\alpha r1}^2 + i_{\beta r1}^2 + i_{\alpha r1}i_{\alpha r2} + \\ &+ i_{\beta r1}i_{\beta r2}) - M'(s_2)\xi_c^{-1}\xi^{-1}\frac{d\xi}{dt} (i_{\alpha r2}^2 + i_{\beta r2}^2 + i_{\alpha r1}i_{\alpha r2} + \\ &+ i_{\beta r1}i_{\beta r2}) + M(s_1)(2i_{\alpha s1}i_{\beta r1} - 2i_{\beta s1}i_{\alpha r1} + i_{\alpha s1}i_{\beta r2} - \\ &- i_{\beta s1}i_{\alpha r2} + i_{\alpha s2}i_{\beta r1} - i_{\beta s2}i_{\alpha r1}) + M(s_2)(2i_{\alpha s2}i_{\beta r2} - \\ &- 2i_{\beta s2}i_{\alpha r2} + i_{\alpha s1}i_{\beta r2} - i_{\beta s1}i_{\alpha r2} + i_{\alpha s2}i_{\beta r1} - \\ &- i_{\beta s2}i_{\alpha r1}) = L_{мех}\frac{d\xi}{dt} + R_{мех}\xi + C_{мех}^{-1} \int \xi dt + \\ &+ q_{тр} \text{sign } \xi + q_0, \end{aligned} \quad (6)$$

где для кратности записи обозначено  $M'(s_1) = \frac{dM}{ds} \Big|_{s=s_1}$ ,  $M'(s_2) = \frac{dM}{ds} \Big|_{s=s_2}$  и опущены четыре урав-

нения электрического равновесия обратной последовательности вместо многоточия, получающиеся из записанных уравнений прямой последовательности заменой индекса 1 на индекс 2.

В уравнении движения системы (6) описан наиболее распространенный случай обобщенной нагрузки  $q_n$  на валу (штока) асинхронного электродвигателя, когда она является суммой постоянной силы сопротивления  $q_0$ , силы сухого трения  $q_{тр}$  инерционной, позиционной и демпфирующей сил (с коэффициентами  $L_{мех}$ ,  $C_{мех}$  и  $R_{мех}$  соответственно).

Фазные статорные напряжения  $u_{\alpha s}$  и  $u_{\beta s}$  в периодическом режиме работы АД являются модулированными по амплитуде, частоте или фазе гармоническими функциями времени [2, 3], и поэтому в общем случае их можно описать выражениями:

$$\begin{aligned} u_{\alpha s} &= U_m \gamma(t) \sin [\omega_0 \int \alpha(t) dt + \varphi(t)]; \\ u_{\beta s} &= U_m \cos [\omega_0 \int \alpha(t) dt], \end{aligned}$$

где  $U_m$ ,  $\omega_0$  — номинальные амплитуда и частота сети;  $\gamma(t)$ ,  $\alpha(t)$ ,  $\varphi(t)$  — функции модуляции соответственно амплитуды, частоты и фазы.

Применяя к ним преобразование (1), получим симметричные составляющие мгновенных фазных

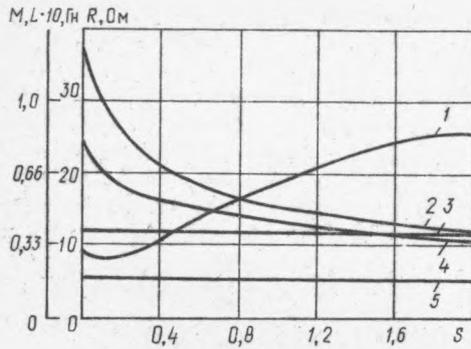


Рис. 1. Зависимости электрических параметров АД ДР-71А2У3 от скольжения: 1 —  $R_{ar}(s)$ ; 2 —  $M_a(s)$ ; 3 —  $R_{as}(s)$ ; 4 —  $L_{ar\sigma}(s)$ ; 5 —  $L_{as\sigma}(s)$

статорных напряжений:

$$\begin{aligned}
 u_{as1} &= U_m \gamma_1(t) \frac{\sin}{\cos} [\omega_0 \int \alpha(t) dt + \varphi_1(t)]; \\
 u_{\beta s1} & \\
 u_{as2} &= \pm U_m \gamma_2(t) \frac{\sin}{\cos} [\omega_0 \int \alpha(t) dt + \varphi_2(t)]; \\
 u_{\beta s2} & \\
 \gamma_1(t) &= 0,5 [1 \pm 2\gamma(t) \cos \varphi(t) + \gamma^2(t)]^{0,5}; \\
 \gamma_2(t) & \\
 \varphi_1(t) &= \text{arctg} \{ \gamma(t) \sin \varphi(t) [\gamma(t) \cos \varphi(t) \pm 1] \}^{-1}; \\
 \varphi_2(t) &
 \end{aligned} \tag{7}$$

В таблице приведены моделирующие функции для различных способов получения периодического реверса в АД.

Анализ зависимостей от скольжения параметров схем замещения АД с различными типами роторов [1, 5] показал, что первичные электрические параметры АД можно описать следующими аналитическими зависимостями:

$$\left. \begin{aligned}
 R_{as}, R_{\beta s}, L_{as\sigma}, L_{\beta s\sigma} &= \text{const}; \\
 M(s) &= \omega_0^{-1} x_m [1 - (1 - x_{m2}/x_m)(0,5s)^{1/n_1}]; \\
 L_{ar\sigma}(s) &= \omega_0^{-1} x_2^2 [1 - (1 - x_{22}/x_2^2)(0,5s)^{1/n_2}]; \\
 R_{ar}(s) &= r_2^2 [1 - (1 - R_{22}^2/R_2^2)(0,5s)^{1/n_3}],
 \end{aligned} \right\} \tag{8}$$

где  $n_1, n_2, n_3$  — натуральные числа;  $x_m, x_2^2, R_2^2$  — номинальные прямые ( $s = s_n \approx 0$ ),  $x_{m2}, x_{22}^2, R_{22}^2$  — обратные ( $s = 2 - s_n \approx 2$ ) параметры схемы замещения АД.

С помощью математической модели (6) при аппроксимациях (8) были исследованы различные варианты периодического реверса (см. таблицу) выполненных на базе серийных короткозамкнутых асинхронных электродвигателей АД с двухслойными роторами, изготовленными из сплава СМ-19 [1, 5]. На рис. 1 представлены зависимости электрических параметров двигателя с двухслойным ротором АД ДР-71А2У3 от скольжения.

Исследовался как обычный (периодический) реверс, осуществляемый либо переключением фазных обмоток статора, либо гармонической модуляцией фазных напряжений [2, 3], так и реверс, применяемый только для АД с массивным или многослойным ротором [5], имеющим критическое скольжение  $s_k > 1$ .

В последнем случае реверс осуществляется за счет торможения АД до нулевой частоты вращения переводом его в однофазный режим и последующего пуска в обратном направлении.

Полученные с помощью модели (6) расчетные осциллограммы частоты вращения и электромагнитного момента подтверждают наличие эффекта торможения при переводе в однофазный режим АД с двухслойным ротором (рис. 2). Причем при нагрузке, естественно, время торможения уменьшается, а время пуска увеличивается.

На рис. 3 показаны расчетные осциллограммы частоты вращения и электромагнитного мо-

Разновидности периодического реверса АД

Модулирующие сигналы	Переключение полярности фазного напряжения	Отключение фазной обмотки от источника электроэнергии		Гармоническая амплитудная модуляция	Линейная фазовая модуляция	Гармоническая амплитудно-частотная модуляция
		без замыкания на себя	с замыканием на себя			
$\gamma(t)$	$\text{sign}(\sin \Omega t)$	$0,5\{\text{sign}(\sin \Omega t) - \text{sign}[\sin(\Omega t - \delta)]\}$		$\sin \Omega t$	1	$\sin \Omega t$
$\gamma_1(t)$	$0,5 [1 + \text{sign}(\sin \Omega t)]$	$0,5 + 0,25\{\text{sign}(\sin \Omega t) - \text{sign}[\sin(\Omega t - \delta)]\}$		$0,5 (1 + \sin \Omega t)$	$\cos 0,5\Omega t$	$0,5 (1 + \sin \Omega t)$
$\gamma_2(t)$	$0,5 [1 - \text{sign}(\sin \Omega t)]$	$0,5 - 0,25\{\text{sign}(\sin \Omega t) - \text{sign}[\sin(\Omega t - \delta)]\}$		$0,5 (1 - \sin \Omega t)$	$\sin 0,5\Omega t$	$0,5 (1 - \sin \Omega t)$
$\varphi(t)$	0	0		0	$\Omega t$	0
$\varphi_1(t)$	0	0		0	$\text{arctg} [\sin \Omega t \times (\cos \Omega t + 1)^{-1}]$	0
$\varphi_2(t)$	0	0		0	$\text{arctg} [\sin \Omega t \times (\cos \Omega t - 1)^{-1}]$	0
$\alpha(t)$	1	1		1	1	$\cos \Omega t$

П р и м е ч а н и е. При расчете реверса отключением фазной обмотки от источника электроэнергии без последующего замыкания ее на себя одновременно со статорными напряжениями в модели (9) моделируют сигналом  $\gamma_1(t)$  токи  $i_{as1}, i_{\beta s1}$ , а сигналом  $\gamma_2(t)$  — токи  $i_{as2}, i_{\beta s2}$ .

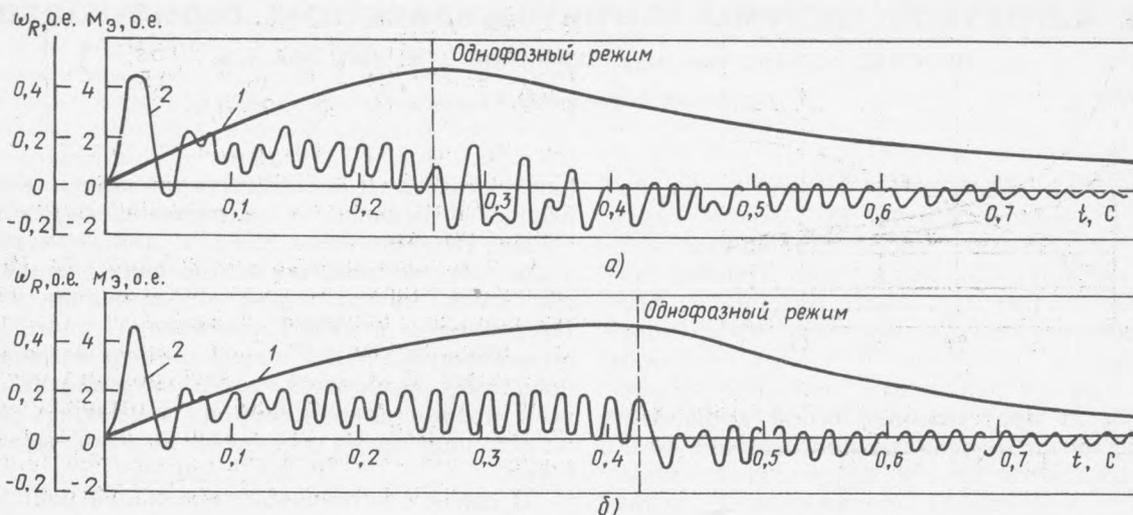


Рис. 2. Осциллограммы частоты вращения (1) и электромагнитного момента (2) пуско-тормозных режимов электродвигателя АДДР-42-4 с двухслойным ротором при холостом ходе (а) и полуноминальной нагрузке жидким трением (б)

мента АДДР-71А2У3, подтверждающие возможность использования известных способов возбуждения колебательных режимов и для асинхронных электродвигателей с двухслойным ротором.

Хорошее качественное и количественное совпадение полученных результатов расчета с экспериментальными данными, изложенными в [3, 4], убеждает в адекватности модели (6) реальным динамическим процессам при периодическом движении ротора несимметричного в электрическом отношении по статору АД с параметрами, зависящими от скольжения и эллиптичности поля.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Олейников А. М. Электромагнитные и геометрические соотношения в многослойном роторе асинхронного двигателя.— Электричество, 1987, № 3, с. 25—28.
2. Луковников В. И. Электропривод колебательного движения.— М.: Энергоатомиздат, 1984.— 152 с.
3. Луковников В. И., Серeda В. П. Динамические режимы работы асинхронного электропривода.— М.: ВЗПИ, 1990.— 210 с.
4. Годоров В. В. Энергетические характеристики асинхронного электродвигателя колебательного движения в составе электрогидропривода: Автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук, Минск, 1990.— 22 с.
5. Серeda В. П. Время самоторможения асинхронного двигателя с двухслойным ротором при однофазном включении.— В кн.: Задачи динамики электрических машин, Омск: ОмПИ, 1986, с. 102—103.

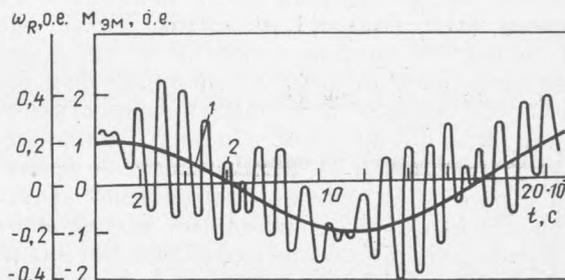


Рис. 3. Осциллограммы частоты вращения (1) и электромагнитного момента (2) колебательного режима электродвигателя АДДР-71А2У3 с двухслойным ротором, возбужденного линейной фазовой модуляцией фазных напряжений, при частоте колебаний 5 Гц, полуноминальной нагрузке жидким трением и механическом резонансе

6. Вербовой П. Ф., Сьянов А. М. Выбор системы координат и значений параметров при исследовании переходных процессов в асинхронных машинах.— В кн.: Физико-технические проблемы надежности электрических машин, Киев: Наукова Думка, 1986.
7. Лайон В. Анализ переходных процессов в электрических машинах переменного тока.— М.— Л.: Госэнергоиздат, 1958.— 400 с.
8. Трещев И. И. Электромеханические процессы в машинах переменного тока.— Л.: Энергия, 1980.— 344 с.
9. Луковников В. И., Серeda Л. С. Основы гиперкомплексного метода расчета электрических цепей.— В кн.: Задачи динамики электрических машин. Омск: ОмПИ, 1986, с. 35—38.