

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРОЦЕССЫ В АСИНХРОННОМ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ С НЕСИНУСОИДАЛЬНЫМ НАПРЯЖЕНИЕМ ПИТАНИЯ

А. А. ЕФИМОВ, В. И. ПАНТЕЛЕЕВ, Б. П. СОУСТИН

(Представлена научно-техническим семинаром НИИ АЭМ)

Если ступенчатое напряжение трансформировать к системе отсчета, вращающейся с частотой поля статора, то напряжение по двум осям запишется

$$U_{\alpha s}^{\kappa} = \frac{2U_I'}{\pi} \left( 1 + \frac{2}{35} \cos 6\omega_{\kappa} t - \frac{2}{143} \cos 12\omega_{\kappa} t + \dots \right), \quad (1)$$

$$U_{\beta s}^{\kappa} = \frac{2U_I'}{\pi} \left( \frac{12}{35} \sin 6\omega_{\kappa} t - \frac{24}{143} \sin 12\omega_{\kappa} t + \dots \right). \quad (2)$$

Ось  $\alpha$  и магнитные оси фаз статора и ротора совпадают в нулевой момент времени. 5 и 7 гармоники трансформируются в величины 6 гармоники, а 11 и 13 гармоники в величины 12 и т. д. [2]. На рис. 1 представлена эквивалентная схема системы [3], которая может быть выпол-

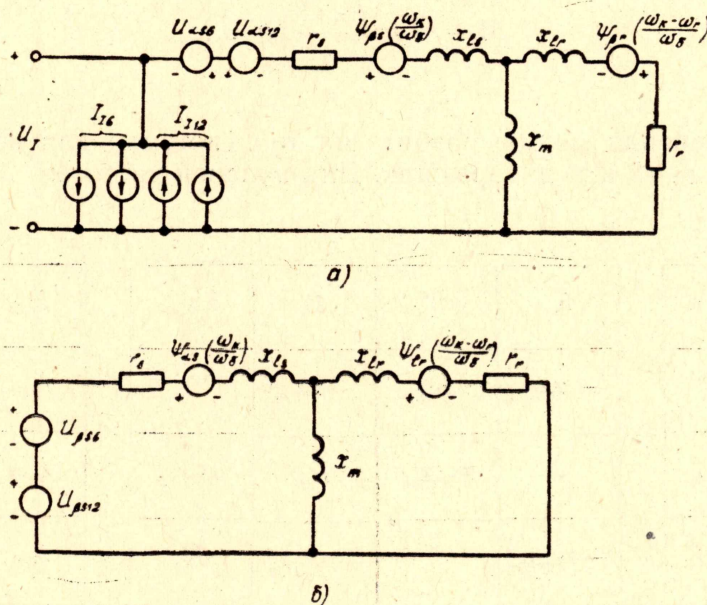


Рис. 1



нена с любой степенью точности добавлением в нее источников тока и напряжения. Установившиеся величины напряжения и тока, скорости ротора, а также напряжения и тока инвертора определяются постоянными составляющими (нулевой частотой) и гармониками 6, 12 и т. д.

Если ввести базовую электрическую угловую частоту  $\omega_6$ , принять относительные величины частоты  $\alpha = \frac{\omega_k}{\omega_6}$  и абсолютного скольжения  $\beta = \alpha s$ , то уравнения асинхронной машины в матричной форме запишутся

|                                            |                                            |                                            |
|--------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|
| $R_s + \left(\frac{p}{\omega_6}\right)x_s$ | $\alpha x_s$                               | $\left(\frac{p}{\omega_6}\right)x_m$       |
| $-\alpha s$                                | $R_s + \left(\frac{p}{\omega_6}\right)x_s$ | $-\alpha x_m$                              |
| $\left(\frac{p}{\omega_6}\right)x_m$       | $\alpha s x_m$                             | $R_r + \left(\frac{p}{\omega_6}\right)x_r$ |
| $-\alpha s x_m$                            | $\left(\frac{p}{\omega_6}\right)x_m$       | $-\alpha s x_r$                            |

(3)

|                                            |               |               |
|--------------------------------------------|---------------|---------------|
| $\alpha x_m$                               | $i_{as}$      | $U_{as}$      |
| $\left(\frac{p}{\omega_6}\right)x_m$       | $i_{\beta s}$ | $U_{\beta s}$ |
| $\alpha s x_r$                             | $i_{ar}$      | $U_{ar}$      |
| $R_r + \left(\frac{p}{\omega_6}\right)x_r$ | $i_{\beta r}$ | $U_{\beta r}$ |

 $\times$

$$M = x_m(i_{as} \cdot i_{\beta r} - i_{\beta s} \cdot i_{ar}), \quad (4)$$

$$M - M_c = \left(\frac{2H}{\omega_6}\right) p \cdot \omega_r. \quad (5)$$

Эти уравнения можно разбить на три системы: для величин нулевой частоты, 6, 12 и т. д. гармоник. Для нулевой частоты

|          |                   |                  |                   |                  |                |
|----------|-------------------|------------------|-------------------|------------------|----------------|
| $U_{10}$ | $R_s$             | $\alpha x_s$     | 0                 | $\alpha x_m$     | $i_{as0}$      |
| 0        | $-\alpha x_s$     | $R_s$            | $-\alpha x_m$     | 0                | $i_{\beta s0}$ |
| 0        | 0                 | $\alpha s_0 x_m$ | $R_r$             | $\alpha s_0 x_r$ | $i_{ar0}$      |
| 0        | $-\alpha s_0 x_m$ | 0                | $-\alpha s_0 x_r$ | $R_r$            | $i_{\beta r0}$ |

 $\times$ 
(6)

$$M_0 = x_m(i_{as0} \cdot i_{\beta r0} - i_{\beta s0} \cdot i_{ar0}), \quad (7)$$



$$s_0 = \left( \frac{\omega_\kappa - \omega_{r0}}{\omega_\kappa} \right), \quad (8)$$

$$M_0 - M_{c0} = 0. \quad (9)$$

Для величин 6 гармоники справедливы уравнения

|                                                           |                                                       |                                                                 |      |
|-----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|------|
| $R_s + j6\alpha x_s$                                      | $\alpha x_s$                                          | $j6\alpha x_m$                                                  | (10) |
| $-\alpha x_s$                                             | $R_s + j6\alpha x_s$                                  | $-\alpha x_m$                                                   |      |
| $j(K_M \Psi_{\beta r0} \cdot i_{\beta r0} + 6\alpha x_m)$ | $\alpha S_0 x_m - jK_M \Psi_{\beta r0} \cdot i_{ar0}$ | $R_r + j(6\alpha x_r - K_M \Psi_{\beta r0} \cdot i_{\beta s0})$ |      |
| $-\alpha S_0 x_m - jK_M \Psi_{ar0} \cdot i_{ar0}$         | $j(6\alpha x_m + K_M \Psi_{ar0} \cdot i_{ar0})$       | $-\alpha S_0 x_r + jK_M \Psi_{ar0} \cdot i_{\beta r0}$          |      |

|                                                       |          |                      |     |                          |
|-------------------------------------------------------|----------|----------------------|-----|--------------------------|
| $\alpha x_m$                                          | $\times$ | $\bar{i}_{as6}$      | $=$ | $\frac{2}{35} U_{I0}$    |
| $j6\alpha x_m$                                        |          | $\bar{i}_{\beta s6}$ |     | $-j\frac{12}{35} U_{I0}$ |
| $\alpha S_0 x_r + jK_M \Psi_{\beta r0} \cdot i_{as0}$ |          | $\bar{i}_{ar6}$      |     | $0$                      |
| $R_r + j(6\alpha x_r - K_M \Psi_{ar0} \cdot i_{as0})$ |          | $\bar{i}_{\beta r6}$ |     | $0$                      |

$$|\bar{M}_6| = [\text{Re}(\bar{M}_6)^2 + \text{Im}(\bar{M}_6)^2]^{1/2}. \quad (11)$$

Относительные отклонения скорости, вызываемые 6 гармоникой,

$$\left| \frac{\bar{\omega}_{r6}}{\omega_\kappa} \right| = \frac{1}{12\alpha^2 \omega_6 H} \cdot |\bar{M}_6|. \quad (12)$$

Выражение (10) представляет собой матричное линейное уравнение, учитывающее отклонение скорости при вычислении пульсаций момента шестой гармоники. Влияние отклонения скорости учитывается соответствующими коэффициентами при импедансах в третьем и четвертом ряду.

Для величин 12 гармоники вывод уравнений и их вид аналогичен, но

$$\frac{p}{\omega_6} = j12\alpha, \quad (13)$$

$$\bar{M}_{12} = x_m \cdot \begin{bmatrix} i_{\beta s0} & -i_{ar0} & -i_{\beta s0} & i_{\beta s0} \end{bmatrix} \cdot \bar{i}_{12}. \quad (14)$$

Относительные отклонения скорости

$$\left| \frac{\bar{\omega}_{r12}}{\omega_\kappa} \right| = \frac{1}{24\alpha^2 \omega_6 H} |\bar{M}_{12}|. \quad (15)$$



Аналогичным способом вычисляются отклонения скорости от 18, 24 и т. д. гармоник, однако практически даже для двигателей с очень малым моментом инерции достаточно определения этих двух.

Пульсации момента двигателя ДАТ 250-8, вычисленные на ЭЦВМ по предложенной методике при номинальной частоте, составляют для 6 гармоники 12,1% от номинального, для 12 — 1,78%.

### Выводы

Предложено математическое описание асинхронной машины при несинусоидальном напряжении, позволяющее определить пульсации момента с учетом изменения скорости ротора. Полученные выражения представляют собой матричные линейные уравнения. Влияние отклонения скорости учитывается соответствующими составляющими коэффициентов при импедансах.

### ЛИТЕРАТУРА

1. К. Н. Ковач, И. Рац. Переходные процессы в машинах переменного тока. ГЭИ, 1963.
2. И. Ф. Калинин, В. И. Пантелеев, Б. П. Соустин, Асинхронный электропривод, питаемый прямоугольным напряжением. Тезисы докладов к XXIV научно-технической конференции ЛИАПа, Л., 1971.
3. Lipo T. A., Krause P. C., Jordan Howard E. „Harmonic torque and speed pulsation in a rectifier — inverter induction motor drive.“. „IEEE Trans. Power. Appar. and Syst“. № 5, Part I, 1969.