

УДК 62-83-52

ИССЛЕДОВАНИЕ ГАРМОНИЧЕСКОГО СОСТАВА ПОТРЕБЛЯЕМОГО ТОКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО СТЕНДА НА ОСНОВЕ АСИНХРОННО-ВЕНТИЛЬНОГО КАСКАДА

В. С. ЗАХАРЕНКО, И. В. ДОРОЩЕНКО, М. Н. ПОГУЛЯЕВ

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого»,
Республика Беларусь*

Введение

В данной работе рассматривается гармонический состав потребляемого тока автоматизированного электромеханического испытательного стенда на основе асинхронно-вентильного каскада.

Целью данной работы является анализ гармонического состава потребляемого тока автоматизированного электромеханического испытательного стенда на основе асинхронно-вентильного каскада.

Основная часть

Для оценки энергоэффективности и качества энергопотребления испытательного стенда на основе асинхронно-вентильного каскада необходимо использовать имитационную модель каскада с учетом реальной схемы включения обмоток статора и ротора двигателя. Имеющиеся разработки составлены на основе математической модели двигателя в координатной системе $ABCabc$ [1, (3.221), (3.222)], которая справедлива только для схемы соединения обмоток статора и ротора звезда с нейтралью. А также имеются другие недостатки, связанные с упрощением модели, например, в работе [2] принято, что фазные обмотки асинхронного двигателя и трансформатора имеют одинаковые активные сопротивления и индуктивности рассеяния, сопротивление вентиля в прямом и обратном направлении не зависит от значения тока через него, что не соответствует действительности.

Нами была составлена такая модель, в которой уравнения статора, ротора и промежуточной цепи постоянного тока записывались по первому и второму законам Кирхгофа по схеме, представленной на рис. 1.

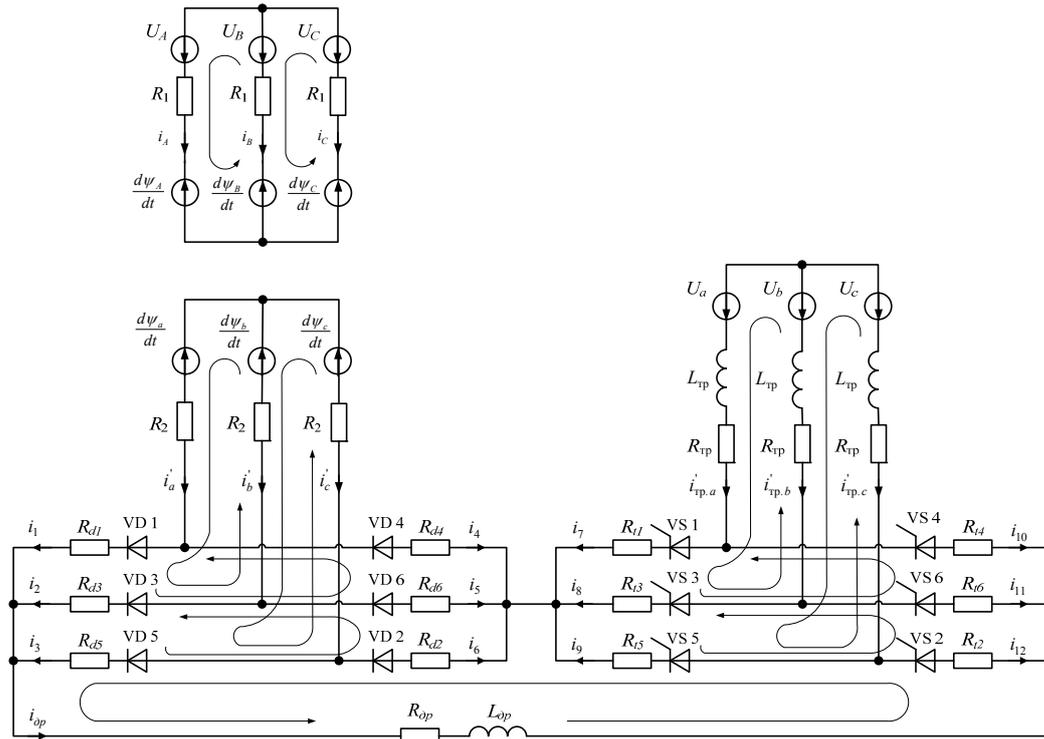


Рис. 1. Схема замещения асинхронно-вентильного испытательного стенда

В результате получим систему уравнений:

$$\begin{aligned}
 & \left((L_1 + 0,5L_{11}) \cdot \frac{di_A}{dt} - (L_1 + 0,5L_{11}) \cdot \frac{di_B}{dt} + \left(L_m \cos \gamma_{эл} - L_m \cos \left(\gamma_{эл} - \frac{2\pi}{3} \right) \right) \cdot \frac{di'_a}{dt} + \right. \\
 & \left. + \left(L_m \cos \left(\gamma_{эл} + \frac{2\pi}{3} \right) - L_m \cos \gamma_{эл} \right) \cdot \frac{di'_b}{dt} + \left(L_m \cos \left(\gamma_{эл} - \frac{2\pi}{3} \right) - L_m \cos \left(\gamma_{эл} + \frac{2\pi}{3} \right) \right) \cdot \frac{di'_c}{dt} = \right. \\
 & = -R_1 i_A + u_A + R_1 i_B - u_B + \omega i'_a \left(L_m \sin \gamma_{эл} - L_m \sin \left(\gamma_{эл} - \frac{2\pi}{3} \right) \right) + \\
 & \left. + \omega i'_b \left(L_m \sin \left(\gamma_{эл} + \frac{2\pi}{3} \right) - L_m \sin \gamma_{эл} \right) + \omega i'_c \left(L_m \sin \left(\gamma_{эл} - \frac{2\pi}{3} \right) - L_m \sin \left(\gamma_{эл} + \frac{2\pi}{3} \right) \right); \right. \\
 & \left((L_1 + 0,5L_{11}) \cdot \frac{di_B}{dt} - (L_1 + 0,5L_{11}) \cdot \frac{di_C}{dt} + \left(L_m \cos \left(\gamma_{эл} - \frac{2\pi}{3} \right) - L_m \cos \left(\gamma_{эл} + \frac{2\pi}{3} \right) \right) \cdot \frac{di'_a}{dt} + \right. \\
 & \left. + \left(L_m \cos \gamma_{эл} - L_m \cos \left(\gamma_{эл} - \frac{2\pi}{3} \right) \right) \cdot \frac{di'_b}{dt} + \left(L_m \cos \left(\gamma_{эл} + \frac{2\pi}{3} \right) - L_m \cos \gamma_{эл} \right) \cdot \frac{di'_c}{dt} = \right. \\
 & = -R_1 i_B + u_B + R_1 i_C - u_C + \omega i'_a \left(L_m \sin \left(\gamma_{эл} - \frac{2\pi}{3} \right) - L_m \sin \left(\gamma_{эл} + \frac{2\pi}{3} \right) \right) + \\
 & \left. + \omega i'_b \left(L_m \sin \gamma_{эл} - L_m \sin \left(\gamma_{эл} - \frac{2\pi}{3} \right) \right) + \omega i'_c \left(L_m \sin \left(\gamma_{эл} + \frac{2\pi}{3} \right) - L_m \sin \gamma_{эл} \right); \right. \\
 & \frac{di_A}{dt} + \frac{di_B}{dt} + \frac{di_C}{dt} = 0;
 \end{aligned}$$

$$\left. \begin{aligned}
 & \left(L_2' + 0,5L_{22}' \right) \cdot \frac{di_a'}{dt} - \left(L_2' + 0,5L_{22}' \right) \cdot \frac{di_b'}{dt} + \left(L_m \cos \gamma_{\text{эл}} - L_m \cos \left(\gamma_{\text{эл}} + \frac{2\pi}{3} \right) \right) \cdot \frac{di_A}{dt} + \\
 & + \left(L_m \cos \left(\gamma_{\text{эл}} - \frac{2\pi}{3} \right) - L_m \cos \gamma_{\text{эл}} \right) \cdot \frac{di_B}{dt} + \left(L_m \cos \left(\gamma_{\text{эл}} + \frac{2\pi}{3} \right) - L_m \cos \left(\gamma_{\text{эл}} - \frac{2\pi}{3} \right) \right) \cdot \frac{di_C}{dt} + \\
 & + \frac{di_1}{dt} \cdot R_{d1} - \frac{di_2}{dt} \cdot R_{d3} = -R_2' i_a' + R_2' i_b' + \omega i_A \left(L_m \sin \gamma_{\text{эл}} - L_m \sin \left(\gamma_{\text{эл}} + \frac{2\pi}{3} \right) \right) + \\
 & + \omega i_B \left(L_m \sin \left(\gamma_{\text{эл}} - \frac{2\pi}{3} \right) - L_m \sin \gamma_{\text{эл}} \right) + \omega i_C \left(L_m \sin \left(\gamma_{\text{эл}} + \frac{2\pi}{3} \right) - L_m \sin \left(\gamma_{\text{эл}} - \frac{2\pi}{3} \right) \right); \\
 & \left(L_2' + 0,5L_{22}' \right) \cdot \frac{di_b'}{dt} - \left(L_2' + 0,5L_{22}' \right) \cdot \frac{di_c'}{dt} + \left(L_m \cos \left(\gamma_{\text{эл}} + \frac{2\pi}{3} \right) - L_m \cos \left(\gamma_{\text{эл}} - \frac{2\pi}{3} \right) \right) \cdot \frac{di_A}{dt} + \\
 & + \left(L_m \cos \gamma_{\text{эл}} - L_m \cos \left(\gamma_{\text{эл}} + \frac{2\pi}{3} \right) \right) \cdot \frac{di_B}{dt} + \left(L_m \cos \left(\gamma_{\text{эл}} - \frac{2\pi}{3} \right) - L_m \cos \gamma_{\text{эл}} \right) \cdot \frac{di_C}{dt} + \\
 & + \frac{di_2}{dt} \cdot R_{d3} - \frac{di_3}{dt} \cdot R_{d5} = -R_2' i_b' + R_2' i_c' + \omega i_A \left(L_m \sin \left(\gamma_{\text{эл}} + \frac{2\pi}{3} \right) - L_m \sin \left(\gamma_{\text{эл}} - \frac{2\pi}{3} \right) \right) + \\
 & + \omega i_B \left(L_m \sin \gamma_{\text{эл}} - L_m \sin \left(\gamma_{\text{эл}} + \frac{2\pi}{3} \right) \right) + \omega i_C \left(L_m \sin \left(\gamma_{\text{эл}} - \frac{2\pi}{3} \right) - L_m \sin \gamma_{\text{эл}} \right); \\
 & \frac{di_a'}{dt} + \frac{di_b'}{dt} + \frac{di_c'}{dt} = 0; \\
 & \frac{di_{\text{тп.а}}}{dt} \cdot L_{\text{тп}} - \frac{di_{\text{тп.б}}}{dt} \cdot L_{\text{тп}} + \frac{di_7}{dt} \cdot R_{t1} - \frac{di_8}{dt} \cdot R_{t3} = u_a - u_b - R_{\text{тп}} i_{\text{тп.а}} + R_{\text{тп}} i_{\text{тп.б}}; \\
 & \frac{di_{\text{тп.б}}}{dt} \cdot L_{\text{тп}} - \frac{di_{\text{тп.с}}}{dt} \cdot L_{\text{тп}} + \frac{di_8}{dt} \cdot R_{t3} - \frac{di_9}{dt} \cdot R_{t5} = u_b - u_c - R_{\text{тп}} i_{\text{тп.б}} + R_{\text{тп}} i_{\text{тп.с}}; \\
 & \frac{di_{\text{тп.а}}}{dt} + \frac{di_{\text{тп.б}}}{dt} + \frac{di_{\text{тп.с}}}{dt} = 0; \\
 & \frac{di_{\text{дп}}}{dt} \cdot L_{\text{дп}} + \frac{di_3}{dt} \cdot R_{d5} - \frac{di_6}{dt} \cdot R_{d2} + \frac{di_9}{dt} \cdot R_{t5} - \frac{di_{12}}{dt} \cdot R_{t2} = -i_{\text{дп}} \cdot R_{\text{дп}}; \\
 & \frac{di_1}{dt} \cdot R_{d1} - \frac{di_2}{dt} \cdot R_{d3} + \frac{di_5}{dt} \cdot R_{d6} - \frac{di_4}{dt} \cdot R_{d4} = 0; \\
 & \frac{di_2}{dt} \cdot R_{d3} - \frac{di_3}{dt} \cdot R_{d5} + \frac{di_6}{dt} \cdot R_{d2} - \frac{di_5}{dt} \cdot R_{d6} = 0; \\
 & \frac{di_{\text{дп}}}{dt} - \frac{di_1}{dt} - \frac{di_2}{dt} - \frac{di_3}{dt} = 0; \\
 & \frac{di_1}{dt} - \frac{di_a'}{dt} + \frac{di_4}{dt} = 0; \\
 & \frac{di_2}{dt} - \frac{di_b'}{dt} + \frac{di_5}{dt} = 0;
 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_3}{dt} - \frac{di'_c}{dt} + \frac{di_6}{dt} = 0; \\ \frac{di_7}{dt} - \frac{di_{\text{тp.a}}}{dt} + \frac{di_{10}}{dt} = 0; \\ \frac{di_8}{dt} - \frac{di_{\text{тp.b}}}{dt} + \frac{di_{11}}{dt} = 0; \\ \frac{di_9}{dt} - \frac{di_{\text{тp.c}}}{dt} + \frac{di_{12}}{dt} = 0; \\ \frac{di_7}{dt} \cdot R_{t1} - \frac{di_8}{dt} \cdot R_{t3} + \frac{di_{11}}{dt} \cdot R_{t6} - \frac{di_{10}}{dt} \cdot R_{t4} = 0; \\ \frac{di_8}{dt} \cdot R_{t3} - \frac{di_9}{dt} \cdot R_{t5} + \frac{di_{12}}{dt} \cdot R_{t2} - \frac{di_{11}}{dt} \cdot R_{t6} = 0; \\ -\frac{di_{\text{дp}}}{dt} - \frac{di_{10}}{dt} - \frac{di_{11}}{dt} - \frac{di_{12}}{dt} = 0, \end{array} \right.$$

где $\psi_A, \psi_B, \psi_C, R_1, i_A, i_B, i_C, u_{\phi A}, u_{\phi B}, u_{\phi C}$ – соответственно потокосцепления, активное сопротивление, токи и напряжения статора; $\psi_a, \psi_b, \psi_c, R'_2, i'_a, i'_b, i'_c$ – соответственно потокосцепления, приведенное к статору активное сопротивление и токи ротора; $R_{\text{тp}}, L_{\text{тp}}, i_{\text{тp.a}}, i_{\text{тp.b}}, i_{\text{тp.c}}, u_a, u_b, u_c$ – соответственно активное сопротивление, индуктивность, токи и напряжения трансформатора; $L_1 = L_{1\sigma} + L_m$ – собственная индуктивность обмотки фазы статора; $L_{1\sigma}$ – индуктивность рассеяния обмотки фазы статора (по Т-образной схеме замещения); L_m – главная взаимная индуктивность между обмотками фазы статора и фазы ротора; L_{11} – взаимная индуктивность между обмотками фаз статора; $\gamma_{\text{эл}}$ – угол поворота ротора в электрических радианах; $L'_2 = L'_{2\sigma} + L_m$ – приведенная к статору собственная индуктивность обмотки фазы ротора; $L'_{2\sigma}$ – приведенная к статору индуктивность рассеяния обмотки фазы ротора (по Т-образной схеме замещения); L'_{22} – приведенная к статору взаимная индуктивность между обмотками фаз ротора; $i_{\text{дp}}$ – выпрямленный ток дросселя; $i_1 \div i_6$ – токи выпрямителя; $i_7 \div i_{12}$ – токи инвертора; $R_{d1} \div R_{d6}$ – сопротивления диодов выпрямителя, изменяющиеся в зависимости от его состояния; $R_{t1} \div R_{t6}$ – сопротивления тиристоров инвертора, изменяющиеся в зависимости от его состояния; $R_{\text{дp}}, L_{\text{дp}}$ – активное сопротивление и индуктивность дросселя.

Уравнения механической части для исследования двигательного режима работы двигателя имеют вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\omega_{\text{эл}}}{dt} = \frac{(M - M_c) \cdot p_d}{J_{\Sigma}}; \\ \frac{d\gamma_{\text{эл}}}{dt} = \omega_{\text{эл}}, \end{array} \right. \quad (2)$$

где $\omega_{эл}$ – скорость вращения ротора в эл. рад/с; M – электромагнитный момент двигателя; M_c – момент сопротивления; p_d – число пар полюсов асинхронного двигателя.

Уравнения механической части для исследования генераторного режима работы двигателя имеют вид:

$$\begin{cases} \omega_{эл} = \text{const}; \\ \frac{d\gamma_{эл}}{dt} = \omega_{эл}. \end{cases} \quad (3)$$

Электромагнитный момент определяется выражением:

$$\begin{aligned} M = & -L_m \cdot p_d \cdot i_A \cdot \left[\left(i'_a \sin \gamma_{эл} + i'_b \sin \left(\gamma_{эл} + \frac{2\pi}{3} \right) + i'_c \sin \left(\gamma_{эл} - \frac{2\pi}{3} \right) \right) + \right. \\ & + i_B \cdot \left(i'_b \sin \gamma_{эл} + i'_c \sin \left(\gamma_{эл} + \frac{2\pi}{3} \right) + i'_a \sin \left(\gamma_{эл} - \frac{2\pi}{3} \right) \right) + \\ & \left. + i_C \cdot \left(i'_c \sin \gamma_{эл} + i'_a \sin \left(\gamma_{эл} + \frac{2\pi}{3} \right) + i'_b \sin \left(\gamma_{эл} - \frac{2\pi}{3} \right) \right) \right]. \end{aligned} \quad (4)$$

Производились расчеты по составленной имитационной модели методом Эйлера, для генераторного режима работы каскада на основе асинхронного электродвигателя 4АНК 250 М4. Были получены диаграммы фазных токов. На рис. 2 представлен гармонический спектр тока (при частоте сети 50 Гц, значении угла опережения $\beta = 40^\circ$, скорости вращения генератора 625 рад/с).

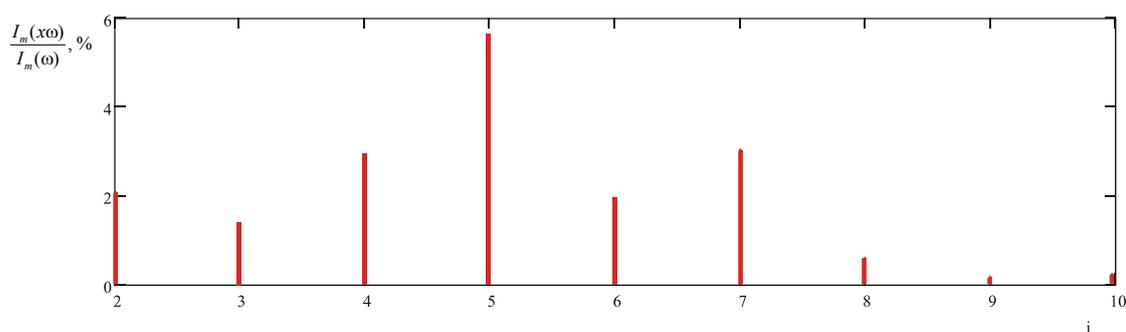


Рис. 2. Гармонический спектр тока: i – номер гармоники тока; $\frac{I_m(x\omega)}{I_m(\omega)}$ – отношение i -й гармоники к первой

На основе спектрального анализа получены следующие коэффициенты:

1) коэффициент искажения синусоидальности кривой тока:

$$K_I = 7,707 \ %;$$

2) коэффициенты n -й гармонической составляющей тока:

$$\begin{aligned}K_{I(2)} &= 1,546 \%, & K_{I(5)} &= 5,587 \%, \\K_{I(4)} &= 0,437 \%, & K_{I(7)} &= 5 \%, \\K_{I(6)} &= 0,242 \%, & K_{I(3)} &= 0,703 \%, \\K_{I(8)} &= 0,11 \%, & K_{I(9)} &= 0,154 \%. \\K_{I(10)} &= 0,074 \%,\end{aligned}$$

Заключение

В результате проделанной работы видно, что коэффициент искажения синусоидальности кривой тока автоматизированного электромеханического испытательного стенда на основе асинхронно-вентильного каскада ниже, чем у аналогичного испытательного стенда на основе двигателя постоянного тока, но все равно выше нормы 5 % [3]. Результаты исследования дают оценку качества энергопотребления испытательного стенда на основе асинхронно-вентильного каскада.

Литература

1. Фираго, Б. И. Теория электропривода : учеб. пособие / Б. И. Фираго, Л. Б. Палявичик. – Минск : Техноперспектива, 2004. – 527 с.
2. Вилячкин, Л. В. Компьютерная модель асинхронно-вентильного каскада / Л. В. Вилячкин, Ю. П. Галишников // Электротехника. – 1997. – № 9. – С. 40–45.
3. Электрическая энергия. Совместимость технических средств. Электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения : ГОСТ 13109–97. – Введ. 01.01.1999. – Минск : Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации: Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 1999. – 31 с.
4. Асинхронно-вентильные нагружающие устройства / С. В. Хватов [и др.]. – Москва : Энергоатомиздат, 1986. – 144 с.

Получено 23.10.2008 г.