

УДК 62-83-52

## ИССЛЕДОВАНИЕ ГАРМОНИЧЕСКОГО СОСТАВА ТОКА АСИНХРОННО-ВЕНТИЛЬНОГО КАСКАДА

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

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

### **Введение**

Проблема электромагнитной совместимости электрооборудования становится актуальной вследствие увеличения суммарной мощности электроприводов с регулированием частоты вращения посредством силовых полупроводниковых преобразователей [1], [2]. Повышенные требования к параметрам качества электрической энергии питающей сети делают актуальной задачу исследования влияния работы асинхронно-вентильного каскада (АВК) на сеть. Важнейшим фактором в проблеме электромагнитной совместимости являются генерирование преобразователями высших гармоник тока и напряжения и влияние их на качество электроэнергии. Гармонический спектр тока, генерируемый АВК, зависит, в основном, от типа вентильного преобразователя, используемого в схеме. Обеспечение электромагнитной совместимости возможно посредством минимизации высших гармоник напряжения и тока, генерируемых силовыми полупроводниковыми преобразователями в электрическую сеть. Наличие высших гармоник в кривой сетевого напряжения снижает надежность и качество работы электрооборудования технологических установок.

В последние годы в электроприводах переменного тока и в системах электропитания различных потребителей широко используют инверторы напряжения, корректоры коэффициента мощности и активные выпрямители. Для обеспечения высокого качества электрической энергии на входе и (или) выходе таких преобразователей применяют различные виды широтно-импульсной модуляции (ШИМ) [3], [4]. Искажения напряжения сети, вносимые силовыми полупроводниковыми преобразователями для разных схем, характеризуются различным составом их высших гармоник. Поскольку искажения кривой напряжения возникают из-за падения напряжения от токов высших гармонических составляющих на импедансах элементов сети, то спектр частот гармоник напряжения сети совпадает со спектром частот гармоник тока, потребляемого преобразователем из сети [1]. Допустимый коэффициент искажения синусоидальности напряжения определяет ГОСТ 13109–97 [2].

Целью данной работы является анализ гармонического состава потребляемого и рекуперируемого через роторную цепь токов асинхронно-вентильного каскада с различными преобразователями в роторной цепи.

### **Основная часть**

Имеющаяся в среде Matlab Simulink модель асинхронного электродвигателя представлена двухфазной моделью обобщенной электрической машины, которая справедлива для схемы включения статорных обмоток «звезда с нейтралью».

Для исследования же динамики двигателя при работе с автономным инвертором напряжения и при несимметричных схемах включения необходимо работать с линейными напряжениями. В связи с этим нами использовалась трехфазная математи-

ческая модель асинхронной машины, составленная на основании уравнений электрического равновесия статора и ротора и учитывающая указанные выше особенности [5]. При этом для удобства учета коммутации силовых полупроводниковых преобразователей уравнения модели разрешены относительно производных потокосцеплений.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\psi_A}{dt} - \frac{d\psi_B}{dt} = u_{AB} - R_1 \cdot i_A + R_1 \cdot i_B; \\ \frac{d\psi_B}{dt} - \frac{d\psi_C}{dt} = u_{BC} - R_1 \cdot i_B + R_1 \cdot i_C; \\ \frac{d\psi_C}{dt} - \frac{d\psi_A}{dt} = u_{CA} - R_1 \cdot i_C + R_1 \cdot i_A; \\ \frac{d\psi_a}{dt} - \frac{d\psi_b}{dt} = u_{ab} - R_2 \cdot i_a + R_2 \cdot i_b; \\ \frac{d\psi_b}{dt} - \frac{d\psi_c}{dt} = u_{bc} - R_2 \cdot i_b + R_2 \cdot i_c; \\ \frac{d\psi_c}{dt} - \frac{d\psi_a}{dt} = u_{ca} - R_2 \cdot i_c + R_2 \cdot i_a; \\ m = -L_{12} \cdot p_{\text{Д}} \left\{ \begin{array}{l} i_A \left[ \sin(\varphi_{\text{ЭЛ}})i_a + \sin\left(\varphi_{\text{ЭЛ}} - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right)i_b + \sin\left(\varphi_{\text{ЭЛ}} + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right)i_c \right] + \\ + i_B \left[ \sin\left(\varphi_{\text{ЭЛ}} + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right)i_a + \sin(\varphi_{\text{ЭЛ}})i_b + \sin\left(\varphi_{\text{ЭЛ}} - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right)i_c \right] + \\ + i_C \left[ \sin\left(\varphi_{\text{ЭЛ}} - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right)i_a + \sin\left(\varphi_{\text{ЭЛ}} + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right)i_b + \sin(\varphi_{\text{ЭЛ}})i_c \right] \end{array} \right\}; \\ \frac{d\omega_{\text{ЭЛ}}}{dt} = \frac{p_{\text{Д}}}{J} (m - m_{\text{С}}); \\ \frac{d\varphi_{\text{ЭЛ}}}{dt} = \omega_{\text{ЭЛ}}, \end{array} \right.$$

где  $\psi_A, \psi_B, \psi_C, R_1, i_A, i_B, i_C, u_{AB}, u_{BC}, u_{CA}$  – соответственно потокосцепления, активное сопротивление, токи и напряжения статора;  $\psi_a, \psi_b, \psi_c, R_2, i_a, i_b, i_c, u_a, u_b, u_c$  – соответственно потокосцепления, приведенное к статору активное сопротивление, токи и напряжения ротора;  $\varphi_{\text{ЭЛ}}$  – угол поворота ротора в электрических радианах;  $\omega_{\text{ЭЛ}}$  – скорость вращения ротора в эл. рад/с;  $m$  – электромагнитный момент машины;  $p_{\text{Д}}$  – число пар полюсов двигателя;  $J$  – момент инерции электродвигателя;  $m_{\text{С}}$  – момент сопротивления.

Уравнения для производных потокосцеплений по отдельным осям, выраженные через параметры токов статора  $i_A, i_B, i_C$ , ротора  $i_a, i_b, i_c$ , индуктивностей  $L_1, L_2, L_{12}$  и угла поворота ротора  $\varphi_{\text{ЭЛ}}$ , запишутся в виде:

$$\begin{aligned} \frac{d\psi_A}{dt} = & L_1 \frac{di_A}{dt} - \frac{L_{12}}{2} \cdot \frac{di_B}{dt} - \frac{L_{12}}{2} \cdot \frac{di_C}{dt} + \\ & + L_{12} \cdot \cos(\varphi_{\text{ЭЛ}}) \cdot \frac{di_a}{dt} - L_{12} \cdot \sin(\varphi_{\text{ЭЛ}}) \omega_{\text{ЭЛ}} \cdot i_a + \\ & + L_{12} \cdot \cos\left(\varphi_{\text{ЭЛ}} - \frac{2\pi}{3}\right) \frac{di_b}{dt} - L_{12} \cdot \sin\left(\varphi_{\text{ЭЛ}} - \frac{2\pi}{3}\right) \omega_{\text{ЭЛ}} \cdot i_b + \\ & + L_{12} \cdot \cos\left(\varphi_{\text{ЭЛ}} + \frac{2\pi}{3}\right) \frac{di_c}{dt} - L_{12} \cdot \sin\left(\varphi_{\text{ЭЛ}} + \frac{2\pi}{3}\right) \omega_{\text{ЭЛ}} \cdot i_c; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{d\psi_B}{dt} = & -\frac{L_{12}}{2} \cdot \frac{di_A}{dt} + L_1 \frac{di_B}{dt} - \frac{L_{12}}{2} \cdot \frac{di_C}{dt} + \\ & + L_{12} \cdot \cos\left(\varphi_{\text{ЭЛ}} + \frac{2\pi}{3}\right) \frac{di_a}{dt} - L_{12} \cdot \sin\left(\varphi_{\text{ЭЛ}} + \frac{2\pi}{3}\right) \omega_{\text{ЭЛ}} \cdot i_a + \\ & + L_{12} \cdot \cos(\varphi_{\text{ЭЛ}}) \frac{di_b}{dt} - L_{12} \cdot \sin(\varphi_{\text{ЭЛ}}) \omega_{\text{ЭЛ}} \cdot i_b + \\ & + L_{12} \cdot \cos\left(\varphi_{\text{ЭЛ}} - \frac{2\pi}{3}\right) \frac{di_c}{dt} - L_{12} \cdot \sin\left(\varphi_{\text{ЭЛ}} - \frac{2\pi}{3}\right) \omega_{\text{ЭЛ}} \cdot i_c; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{d\psi_C}{dt} = & -\frac{L_{12}}{2} \cdot \frac{di_A}{dt} - \frac{L_{12}}{2} \cdot \frac{di_B}{dt} + L_1 \frac{di_C}{dt} + \\ & + L_{12} \cdot \cos\left(\varphi_{\text{ЭЛ}} - \frac{2\pi}{3}\right) \frac{di_a}{dt} - L_{12} \cdot \sin\left(\varphi_{\text{ЭЛ}} - \frac{2\pi}{3}\right) \omega_{\text{ЭЛ}} \cdot i_a + \\ & + L_{12} \cdot \cos\left(\varphi_{\text{ЭЛ}} + \frac{2\pi}{3}\right) \frac{di_b}{dt} - L_{12} \cdot \sin\left(\varphi_{\text{ЭЛ}} + \frac{2\pi}{3}\right) \omega_{\text{ЭЛ}} \cdot i_b + \\ & + L_{12} \cdot \cos(\varphi_{\text{ЭЛ}}) \frac{di_c}{dt} - L_{12} \cdot \sin(\varphi_{\text{ЭЛ}}) \omega_{\text{ЭЛ}} \cdot i_c, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{d\psi_a}{dt} = & L_{12} \cdot \cos(\varphi_{\text{ЭЛ}}) \frac{di_A}{dt} - L_{12} \cdot \sin(\varphi_{\text{ЭЛ}}) \omega_{\text{ЭЛ}} \cdot i_A + \\ & + L_{12} \cdot \cos\left(\varphi_{\text{ЭЛ}} + \frac{2\pi}{3}\right) \frac{di_B}{dt} - L_{12} \cdot \sin\left(\varphi_{\text{ЭЛ}} + \frac{2\pi}{3}\right) \omega_{\text{ЭЛ}} \cdot i_B + \\ & + L_{12} \cdot \cos\left(\varphi_{\text{ЭЛ}} - \frac{2\pi}{3}\right) \frac{di_C}{dt} - L_{12} \cdot \sin\left(\varphi_{\text{ЭЛ}} - \frac{2\pi}{3}\right) \omega_{\text{ЭЛ}} \cdot i_C + \\ & + L_2 \frac{di_a}{dt} - \frac{L_{12}}{2} \cdot \frac{di_b}{dt} - \frac{L_{12}}{2} \cdot \frac{di_c}{dt}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{d\psi_b}{dt} = & L_{12} \cdot \cos\left(\varphi_{\text{ЭЛ}} - \frac{2\pi}{3}\right) \frac{di_A}{dt} - L_{12} \cdot \sin\left(\varphi_{\text{ЭЛ}} - \frac{2\pi}{3}\right) \omega_{\text{ЭЛ}} \cdot i_A + \\ & + L_{12} \cdot \cos(\varphi_{\text{ЭЛ}}) \frac{di_B}{dt} - L_{12} \cdot \sin(\varphi_{\text{ЭЛ}}) \omega_{\text{ЭЛ}} \cdot i_B + \\ & + L_{12} \cdot \cos\left(\varphi_{\text{ЭЛ}} + \frac{2\pi}{3}\right) \frac{di_C}{dt} - L_{12} \cdot \sin\left(\varphi_{\text{ЭЛ}} + \frac{2\pi}{3}\right) \omega_{\text{ЭЛ}} \cdot i_C - \\ & - \frac{L_{12}}{2} \cdot \frac{di_a}{dt} + L_2 \frac{di_b}{dt} - \frac{L_{12}}{2} \cdot \frac{di_c}{dt}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{d\psi_c}{dt} &= L_{12} \cdot \cos\left(\varphi_{\text{эл}} + \frac{2\pi}{3}\right) \frac{di_A}{dt} - L_{12} \cdot \sin\left(\varphi_{\text{эл}} + \frac{2\pi}{3}\right) \omega_{\text{эл}} \cdot i_A + \\ &+ L_{12} \cdot \cos\left(\varphi_{\text{эл}} - \frac{2\pi}{3}\right) \frac{di_B}{dt} - L_{12} \cdot \sin\left(\varphi_{\text{эл}} - \frac{2\pi}{3}\right) \omega_{\text{эл}} \cdot i_B + \\ &+ L_{12} \cdot \cos(\varphi_{\text{эл}}) \frac{di_C}{dt} - L_{12} \cdot \sin(\varphi_{\text{эл}}) \omega_{\text{эл}} \cdot i_C - \\ &- \frac{L_{12}}{2} \cdot \frac{di_a}{dt} - \frac{L_{12}}{2} \cdot \frac{di_b}{dt} + L_2 \frac{di_c}{dt}, \end{aligned}$$

где  $L_{12}$  – взаимная индуктивность между обмотками фаз статора и ротора;  $L_1$  – собственная индуктивность обмотки фазы статора;  $L_2$  – приведенная к статору собственная индуктивность обмотки фазы ротора.

На основании уравнений математической модели асинхронного двигателя, с учетом функциональных схем асинхронно-вентильного каскада (рис. 1), в программе Matlab Simulink были составлены соответствующие имитационные модели АВК. С их помощью был выполнен расчет токов статора и тока, рекуперированного в сеть через роторную цепь для двигательного режима работы АВК, а также произведен анализ гармонического состава этих токов. В исследуемых схемах АВК в качестве электрической машины М1 использовался асинхронный двигатель с фазным ротором МТФ-112-6 мощностью 5 кВт и номинальной частотой вращения  $n_H = 930$  об/мин. В качестве вентилей в преобразователе UZ2 (рис. 1, а) использовались тиристоры, а в преобразователе UF (рис. 1, б) применялись IGBT-транзисторы.

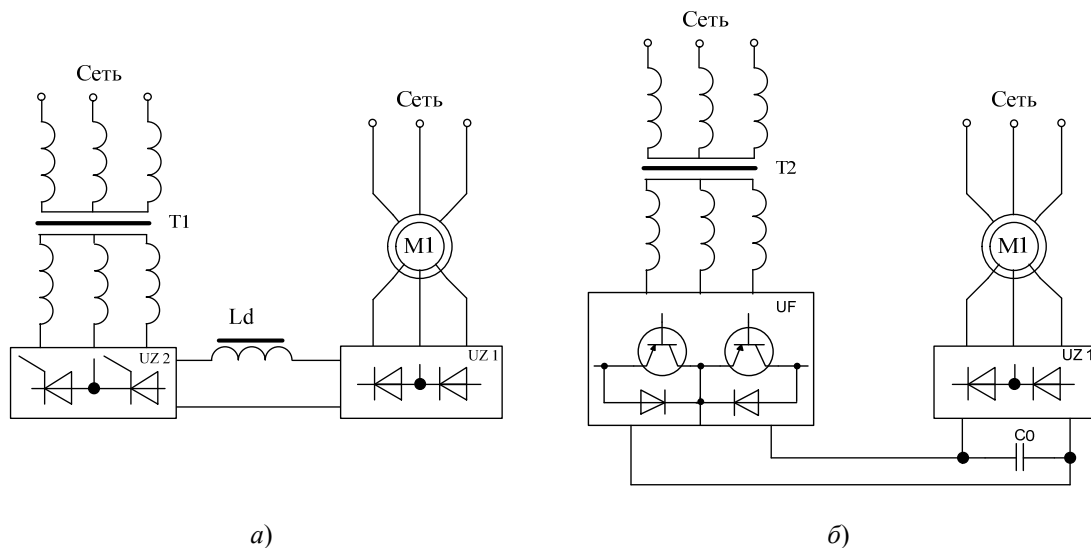
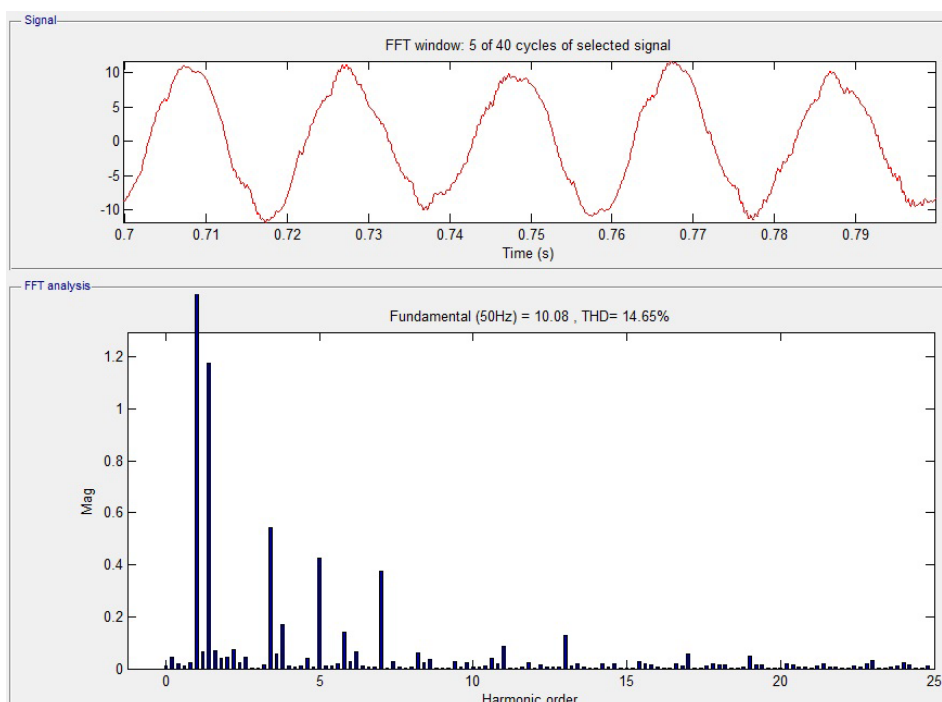
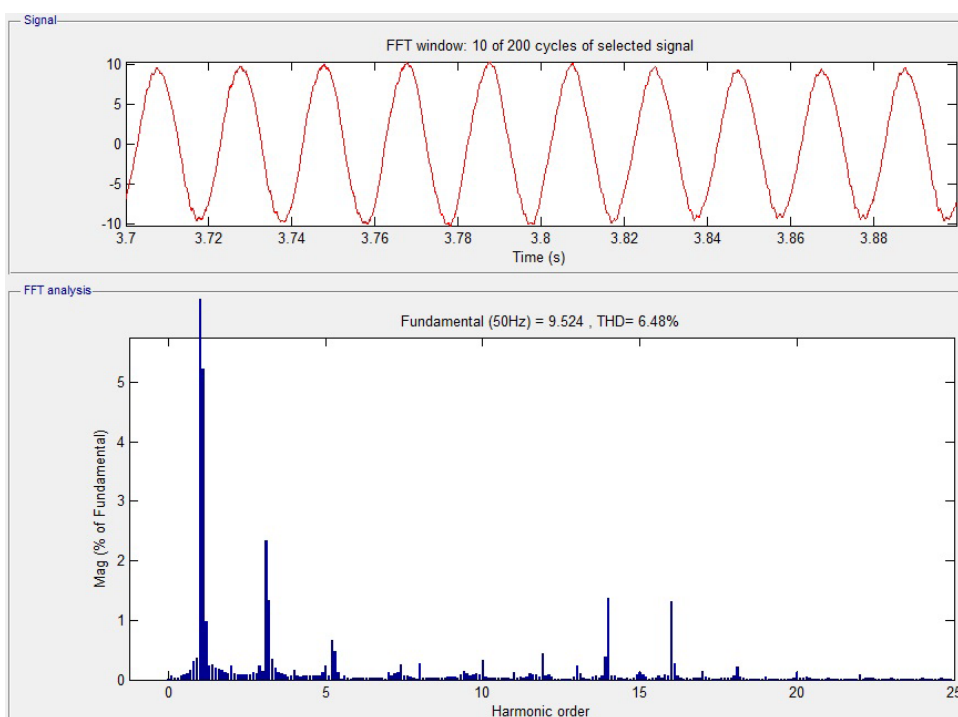


Рис. 1. Функциональные схемы АВК:  
а – с тиристорным преобразователем в роторной цепи;  
б – с автономным инвертором напряжения в роторной цепи

На рис. 2 и 3 представлены полученные диаграммы фазных токов статора (потребляемого) и тока, рекуперированного через роторную цепь, соответственно, а также гармонический спектр данных токов для двигательного режима асинхронно-вентильного каскада при постоянной нагрузке  $M_c = 20$  Н·м и скорости  $0,6 \cdot n_H$ .

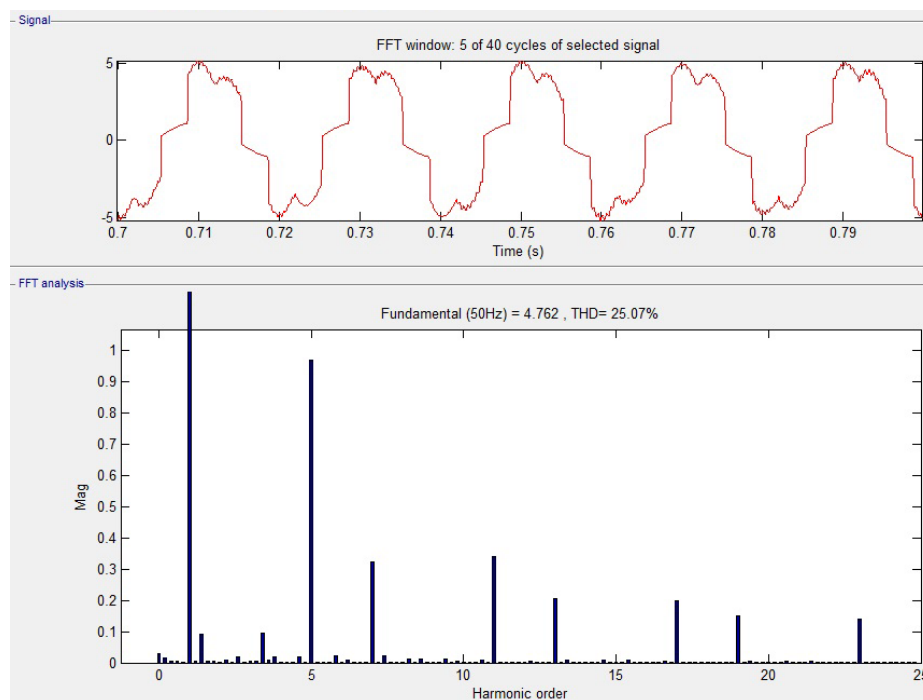


a)

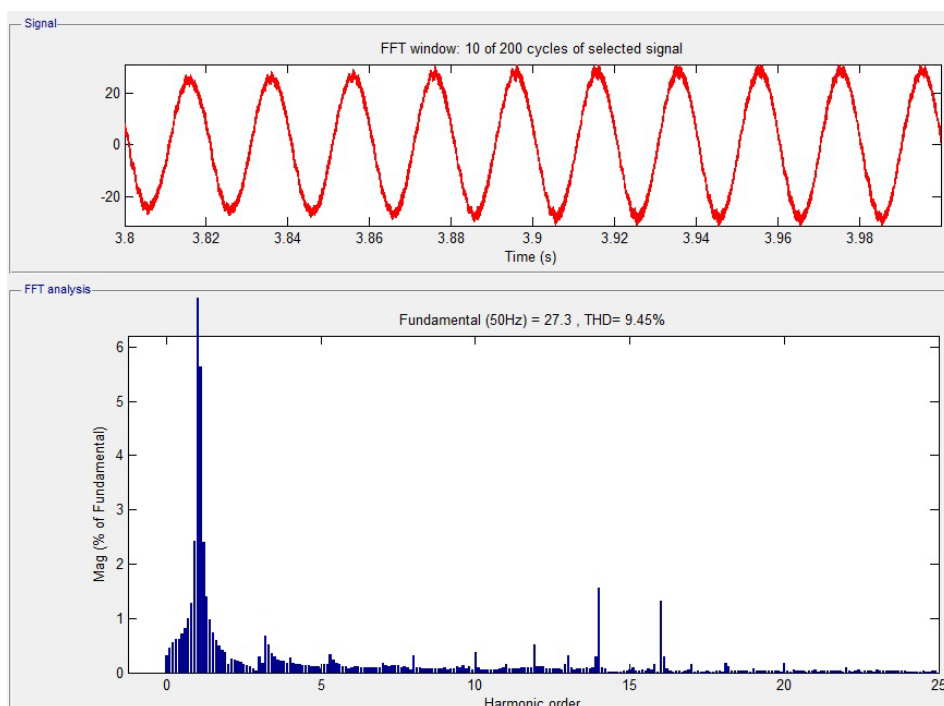


б)

Рис. 2. Форма и гармонический спектр потребляемого тока АВК:  
 а – с тиристорным преобразователем в роторной цепи;  
 б – с автономным инвертором напряжения в роторной цепи



а)



б)

Рис. 3. Форма и гармонический спектр рекуперированных через роторную цепь токов АВК:

а – с тиристорным преобразователем в роторной цепи;  
б – с автономным инвертором напряжения в роторной цепи

Анализируя спектры генерируемых в сеть токов (рис. 3), можно увидеть, что для схемы АВК с тиристорным преобразователем в роторной цепи в основном на искажение синусоидальности формы тока оказывают влияние 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23-я гармо-

ники. Для схемы АВК с автономным инвертором напряжения в роторной цепи и трехфазной ШИМ на искажение синусоидальности формы тока оказывают высшие гармоники – 14, 16.

Аналогичные исследования были проведены и для других значений рабочих скоростей АВК в диапазоне от  $0,98 \cdot n_H$  до  $0,35 \cdot n_H$ . При этом установлено, что коэффициент искажения синусоидальности кривой потребляемого тока (статора) для схемы АВК с тиристорным преобразователем в роторной цепи изменяется в пределах 0,03–14,3 %, а для схемы АВК с автономным инвертором напряжения в роторной цепи изменяется в пределах 3,7–6,7 %. При уменьшении скорости в указанном выше диапазоне коэффициент искажения рекуперированного в сеть тока для обеих схем увеличивается. Так, для схемы АВК с тиристорным преобразователем в роторной цепи изменяется в пределах 8,7–27,6 %, а для схемы АВК с автономным инвертором напряжения в роторной цепи в пределах 6,8–9,5 %.

### Заключение

В результате проделанных исследований установлено, что коэффициент искажения синусоидальности кривой потребляемого тока для схемы АВК с тиристорным преобразователем в роторной цепи составил 14,6 %, а для схемы АВК с автономным инвертором напряжения в роторной цепи – 6,4 %. Коэффициент искажения рекуперированного в сеть тока для схемы АВК с тиристорным преобразователем в роторной цепи составил 25 %, а для схемы АВК с автономным инвертором напряжения в роторной цепи – 9,45 %. Согласно ГОСТ 13109–197 нормально-допустимое значение коэффициента искажения синусоидальности напряжения составляет 8 %, а предельно допустимое значение коэффициента искажения – 12 %. Таким образом, нормативу удовлетворяет схема АВК с автономным инвертором напряжения в роторной цепи. Следовательно, лучшая электромагнитная совместимость обеспечивается по схеме асинхронно-вентильного каскада с автономным инвертором напряжения в цепи ротора.

### Литература

1. Инжиниринг электроприводов и систем автоматизации : учеб. пособие для студентов высш. учеб. заведений / М. П. Белов [и др.] ; под ред. В. А. Новикова, Л. М. Чернигова. – М. : Академия, 2006. – 368 с.
2. 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.
3. Обухов, С. Г. Широтно-импульсная модуляция в трехфазных инверторах напряжения / С. Г. Обухов, Е. Е. Чаплыгин, Д. Е. Кондратьев // Электричество. – 2008. – № 7. – С. 56–59.
4. Чаплыгин, Е. Е. Спектральное моделирование преобразователей с широтно-импульсной модуляцией : учеб. пособие / Е. Е. Чаплыгин. – М. : МЭИ, 2009. – 56 с.
5. Захаренко, В. С. Особенности имитационного моделирования асинхронного двигателя для составления модели с учетом коммутации и при несимметричных схемах включения / В. С. Захаренко, И. В. Дорощенко // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2011. – № 3. – С. 66–74.