

С.Н.Радимов, д-р техн. наук,
В.Л.Беляев, А.Н.Бесараб, кандидаты техн. наук,
С.П.Савич, К.С.Кузнецов

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТЕПЕНИ ИСКАЖЕНИЯ СЕТЕВОГО ТОКА ЧАСТОТНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Експериментальними дослідженнями встановлено залежність ступеня спотворення синусоїдальності струму, який споживається з мережі перетворювачем частоти з інвертором напруги у разі формування вихідної напруги за методом ШІМ, від величини навантаження.

Експериментальними дослідженнями встановлено залежність ступеня искажения синусоидальности тока, потребляемого из сети преобразователем частоты с инвертором напряжения при формировании выходного напряжения по методу ШИМ, от величины нагрузки

Based upon the conducted experiments the dependence of THD of the current consumed from mains by AC adjustable speed drive with voltage inverter and voltage forming using PWM from the load value is set..

В промышленности, на транспорте, предприятиях коммунального хозяйства все большее распространение находят силовые полупроводниковые преобразователи (ПП), которые существенно расширяют функциональные возможности технологического оборудования и позволяют экономно расходовать энергию. Это различного типа преобразователи для систем электропривода, электротермии, электротехнологических установок. Наряду с этими положительными качествами силовые ПП характеризуются потреблением несинусоидальных токов; другими словами, они генерируют в питающую сеть высшие гармоники тока.

ПП по-разному воздействуют на питающую сеть с точки зрения генерации высших гармоник тока. Исследования неблагоприятного воздействия ПП на режимы работы промышленных сетей, разработка способов снижения этого воздействия на сеть и ее потребителей проводятся в ведущих электротехнических фирмах, в отраслевых и вузовских лабораториях. Результаты теоретических и экспериментальных исследований искажений, вносимых ПП в промышленные электрические сети, отражены, например, в работах [2-4].

В преобразователях частоты (ПЧ) с промежуточным звеном постоянного тока применяются два основных метода формирования выходного напряжения при изменении его частоты:

метод амплитудной модуляции (АМ);
метод широтно-импульсной модуляции (ШИМ).

Первый метод присущ преобразователям, построенным на полупроводниковых ключах – тиристорах. Он использовался в тиристорных ПЧ, разработка и начало выпуска которых относится к 60-70-м годам прошлого столетия.

Второй метод, метод ШИМ, является основным для современных ПЧ, построенных на полностью управляемых ключах – силовых транзисторах типа IGBT, промышленное изготовление которых освоено в начале 90-х годов прошлого столетия.

Вместе с тем, до сих пор не нашел достаточного освещения вопрос влияния величины нагрузки частотного электропривода с автономным инвертором напряжения с ШИМ на степень искажения синусоидальности тока, потребляемого из сети. Необходимость исследования этого влияния обусловлена следующими обстоятельствами.

Искажение синусоидальности сетевого тока является причиной нарушения синусоидальности напряжения сети, степень искажения которого ограничивается стандартом ка-

чества электрической энергии [1]. Этот стандарт не вводит ограничений на уровень высших гармоник тока, а только ограничивает искажение синусоидальности напряжения. В странах, входящих в Европейское Содружество, действует введенное МЭК (Международной Электротехнической Комиссией) ограничение на искажение синусоидальности тока высшими гармониками (THDi - Total Harmonic Distortion), которое не должно превышать 48 %.

Степень искажения синусоидальности сетевого тока определяется следующим выражением:

$$THDi_{\%} = \frac{\sqrt{\sum_{v=2}^{49} I_v^2}}{I_1} \cdot 100, \quad (1)$$

где I_v – действующее значение v -й гармоники сетевого тока; v – номер гармоники; I_1 – действующее значение первой гармоники сетевого тока.

В продолжительном режиме работы электроприводы с частотным управлением, как правило, недогружены. Наряду с этим, нагрузка частотных электроприводов, работающих в повторно-кратковременных режимах, с частыми пусками и реверсами, существенно отличается от номинального значения за счет наложения статических и динамических составляющих.

Настоящая статья направлена на установление зависимости между степенью искажения синусоидальности сетевого тока частотного электропривода и величиной его нагрузки. Нагрузку частотного электропривода будем определять относительной величиной действующего значения первой гармоники сетевого тока

$$I_{I*} = \frac{I_1}{I_{Iном}}, \quad (2)$$

где в качестве базисной величины принято действующее значение первой гармоники сетевого тока $I_{Iном}$, соответствующее номинальной нагрузке на выходе ПЧ.

В сопроводительной документации на преобразователи частоты некоторых производителей содержатся сведения о величине THDi для гаммы выпускаемых типоразмеров ПЧ. Например, в каталоге преобразователей

частоты с инверторами напряжения типа Altivar 71 [5], выпускаемых французской фирмой Schneider Electric, даны величины THDi для всех типоразмеров ПЧ при напряжении сети 380 В, а также уровни гармоник тока от 5 до 49 включительно, которые указаны в процентах от действующего значения тока основной гармоники $I_{Iном}$. В пояснении к таблице с данными указывается, что они соответствуют включению дросселя в промежуточном звене постоянного тока или эквивалентного сетевого дросселя на входе преобразователя при кратности тока короткого замыкания в точке подключения ПЧ не менее 120.

Для двух типоразмеров ПЧ Altivar 71 мощностью 2,2 кВт и 5,5 кВт, с которыми проводились экспериментальные исследования зависимости величины THDi от нагрузки ПЧ, в каталоге фирмы представлены сведения о величинах действующего значения тока основной гармоники $I_{Iном}$, равных соответственно, 4,4 и 9,83 А, а также дано значение THDi на уровне 45 % для обоих типоразмеров ПЧ.

Исследование зависимости величины THDi от нагрузки ПЧ проводилось для двух указанных выше типоразмеров ПЧ, а также для ПЧ типа VLT 2800 мощностью 2,2 кВт датской фирмы Danfoss. Принципиальная схема экспериментальной установки приведена на рис. 1.

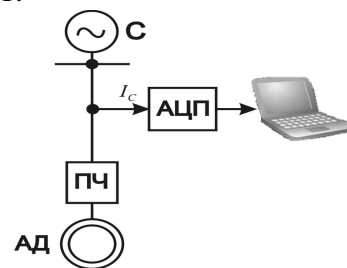


Рис. 1. Принципиальная схема исследовательской установки

При проведении исследований использовались два асинхронных двигателя. Параметры АД № 1: тип АК51/4, $P_{ном} = 2,8$ кВт, $n_{ном} = 1370$ об/мин, $f_{ном} = 50$ Гц, $\cos \varphi = 0,82$, $\eta = 78$ %;

АД №2 – тип АОК2-52-6-У3, $P_{ном} = 5,5$ кВт, $n_{ном} = 955$ об/мин, $f_{ном} = 50$ Гц, $\cos \varphi = 0,78$, $\eta = 83$ %.

Нагрузка двигателей изменялась в пределах, соответствующих росту действующего значения первой гармоники сетевого тока от 25 до 100 % номинального значения. В каждом эксперименте при помощи аналого-цифрового преобразователя (АЦП) фиксировалась в компьютере форма сетевого тока и рассчитывалась его спектрограмма, т.е. мгновенный спектр для каждого периода основной частоты. На основе полученных спектрограмм были построены зависимости коэффициента искажения синусоидальности кривой сетевого тока от относительной величины действующего значения первой гармоники сетевого тока

$$THDi_{\%} = f(I_{1*}). \quad (2)$$

Графики осциллограмм сетевого тока для трех типов ПЧ и соответствующих двигателей при различной нагрузке приведены на рис. 2-4.

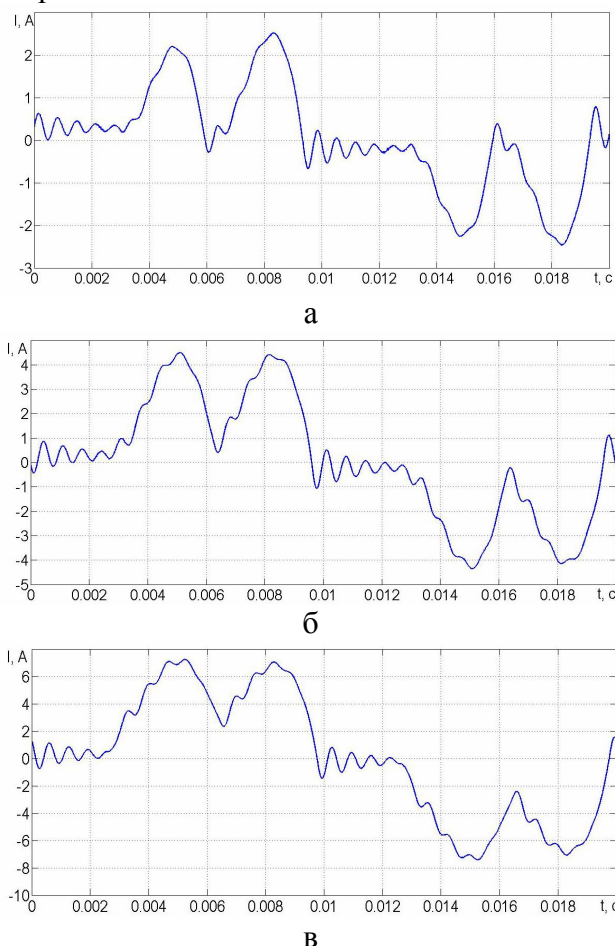


Рис. 2. Осциллограммы сетевого тока ПЧ Altivar 71 мощностью 2,2 кВт с двигателем № 1 при нагрузке: а) 25, б) 50, в) 100 %

В экспериментах с ПЧ типа Altivar 71 мощностью 2,2 и 5,5 кВт использовался сетевой дроссель типа VW3A4552 индуктивностью $L = 4$ мГн и номинальным током $I_{\text{ном}} = 10$ А, а с ПЧ типа VLT 2800, который поставляется в комплекте с дросселем в звене постоянного тока, - без входного сетевого дросселя

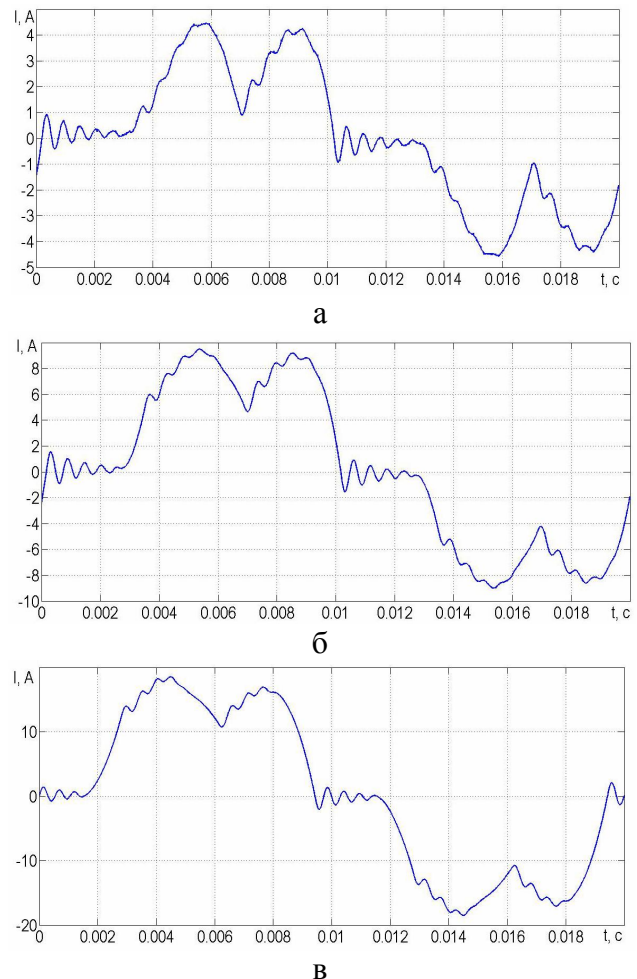


Рис.3. Осциллограммы сетевого тока ПЧ Altivar 71 мощностью 5,5 кВт с двигателем № 2 при нагрузке а) 5, б) 50, в) 100 %

Зависимости степени искажения синусоидальности кривой сетевого тока $THDi$ от относительной величины действующего значения первой гармоники сетевого тока I_{1*} для каждого из рассмотренных типов ПЧ представлены на рис. 5.

Применим интерполяцию этих зависимостей степенными полиномами вида

$$THDi_{\%} = A \cdot I_{1*}^{-\alpha}, \quad (3)$$

где A – коэффициент степенной функции, α – показатель степенной функции. Результат интерполяции приведен в табл. 1.

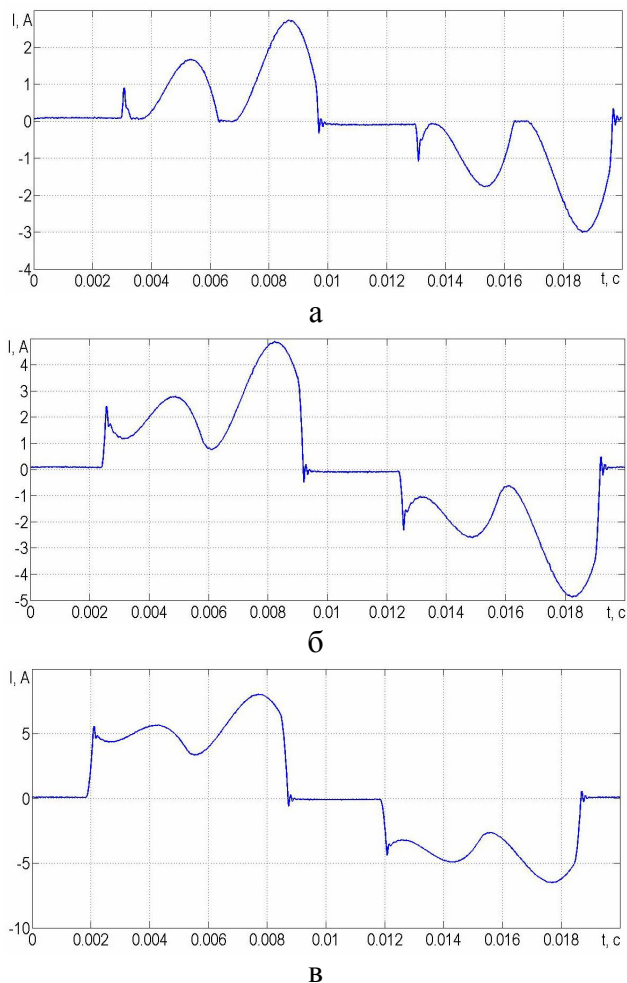


Рис.4. Осциллограммы сетевого тока ПЧ фирмы Danfoss типа VLT 2800 с двигателем № 1 при нагрузке а) 25, б) 50, в) 100 %

Следует отметить, что несмотря на различия форм тока, представленных на осциллограммах рис. 2-4, показатели α для обоих ПЧ Altivar 71 практически совпали и отличаются от аналогичного показателя для ПЧ фирмы Danfoss на 13 %. У ПЧ мощностью 2,2 кВт незначительно (~ 5 %) отличаются коэффициенты A степенной функции. Отличие этих коэффициентов у ПЧ ATV 71 разной мощности обусловлено тем, что для обоих ПЧ эксперимент выполнялся с одним и тем же дросселем, предназначенным для ПЧ 2,2 кВт, в то время как ПЧ 5,5 кВт должен комплектоваться сетевым дросселем индуктивностью 2 мГн, на номинальный ток

16 А, т.е. в два раза меньшей, чем использованная при эксперименте. Ввиду этого величина $THDi$ при номинальной нагрузке у ПЧ 5,5 кВт (~ 26 %) значительно ниже, чем у ПЧ мощностью 2,2 кВт (~40 %).

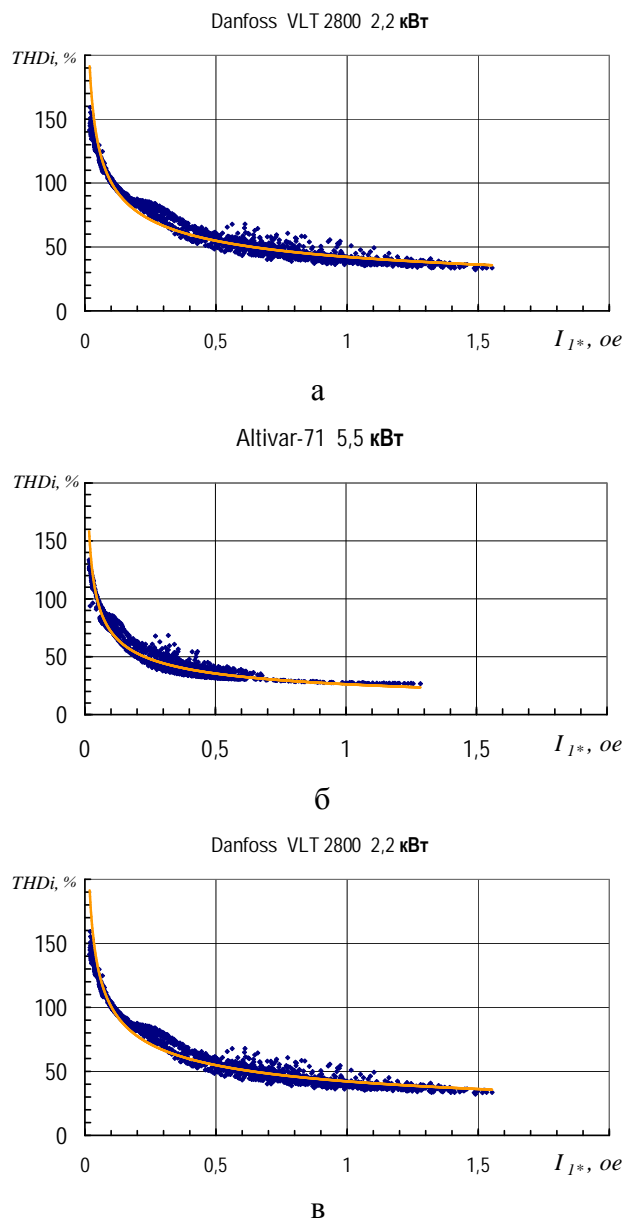


Рис. 5. Графики зависимости $THDi_{\%} = f(I_{1*})$ для ПЧ: а) Altivar 71 2,2 кВт, б) Altivar 71 5,5 кВт, в) Danfoss VLT 2800 2,2 кВт.

Таблица 1 - Результат интерполяции

Тип ПЧ	Коэф-т A	Показатель α
Altivar 71 2,2 кВт	40,11	-0,424
Altivar 71 5,5 кВт	26,22	-0,436
VLT 2800 2,2 кВт	42,19	-0,378

Поскольку в большинстве случаев система ПЧ-АД используется для механизмов, в которых двигатель работает с частотой вращения меньшей номинальной и сетевой ток ПЧ меньше номинального, возникает ситуация, когда степень искажения синусоидальности тока может превышать значения, указанные в каталоге. Результаты проведенных исследований могут быть использованы для адекватной оценки уровня высших гармоник сетевого тока ПЧ при нагрузках, меньших номинальной, как на стадии проектирования, так и на стадии эксплуатации систем электроснабжения с целью выбора и установки технических средств снижения гармоник.

Список использованной литературы

1. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Взамен ГОСТ13109-87; введ. 01.01.1999. – К.: Госстандарт Украины, 1999.

2. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий / И.В. Жежеленко – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 331 с.

3 Избранные вопросы несинусоидальных режимов в электрических сетях предприятий/ [Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л., Бараненко Т.К., Горпинич А.В., Несторович В.В.] / И.В. Жежеленко. – М.: Энергоатомиздат, 2007. – 296 с.

4 Карташев И.И. Определение виновника искажений напряжения путем приборного контроля качества электроэнергии / Карташев И.И., Пономаренко И.С. // Зб.наук.пр.IV Міжнар.наук. конф. "Ефективність і якість електропостачання промислових підприємств". – Маріуполь, 2000. – С. 337-340.

5 Altivar 71. Преобразователи частоты. Schneider Electric, 2009. – 332 с.



Радимов
Сергей Николаевич,
д-р техн. наук, проф.
каф. энергоменеджмента
Одесск. нац. политехн.
ун-та



Беляев
Владимир Леонидович,
канд. техн. наук, доц.
каф. энергоменеджмента
Одесск. нац. политехн.
ун-та



Бесараб
Александр Николаевич,
канд. техн. наук, доц.
каф. электроснабжения
Одесск. нац. политехн.
ун-та



Савич
Светлана Павловна,
ст. препод. каф. энерго-
менеджмента Одесск. нац.
политехн. ун-та



Кузнецов
Кирилл Сергеевич,
аспирант каф. энерго-
менеджмента Одесск.
нац. политехн. ун-та
пр. Шевченко, 1,
м.Одеса, 65044

Получено 25.02.2010