

О.Ю. Гасвський д-р. фіз.-мат. наук, В.В. Магада, С.О. Ужейко
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

МЕТОДИ ГАРМОНІЧНОГО АНАЛІЗУ ВИХІДНОЇ НАПРУГИ ІНВЕРТОРА В РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ

З метою контролю в реальному часі характеристик DC-AC інверторів при різних типах навантаження розроблено в програмних системах C++Builder, MATLAB і LabView методики гармонічного аналізу вихідної напруги. Отримано залежності загального (THD) і індивідуального (IHD) коефіцієнтів гармонічних спотворень від характеру навантаження і від коефіцієнта потужності. Результати розрахунків, отримані за допомогою трьох методик, відрізняються в середньому на 5-6%. Найбільш придатною для аналізу напруги в реальному часі є програма на мові C++. Вимірювання і оцифрування вихідних напруг інвертора виконувались за допомогою мікросистеми збору даних mDAQ12.

Ключові слова: інвертор, загальний коефіцієнт гармонічних спотворень (THD), індивідуальний коефіцієнт спотворень (IHD), гармонічний аналіз вихідної напруги, швидке перетворення Фур'є, аналогово-цифровий перетворювач.

Постійна напруга, що генерується напівпровідниковими модулями фотоелектричних станцій (ФЕС), має досить обмежену сферу застосування. Тому на більшості станцій необхідним є DC-AC перетворення постійної напруги в змінну, яка повинна відповідати визначеним стандартам. Це перетворення здійснюється PV-інверторами (Photovoltaic Inverters), що працюють в складі ФЕС. У ряді випадків DC-AC перетворенню передують DC-DC перетворення з підвищенням постійної напруги. Однак, якість електроенергії, що видається ФЕС, визначається, в кінцевому рахунку, параметрами напруги на виході інверторів. У даній роботі для контролю в реальному часі якості параметрів DC-AC інверторів при різних типах навантаження розроблено методики гармонічного аналізу вихідної напруги в програмних системах C++ Builder, MATLAB і LabView.

Оскільки більшість інверторів зібрані на вентильних схемах, що керуються за допомогою широтно-імпульсної модуляції (ШІМ), вихідна напруга інверторів має несинусоїдальний характер. Загально прийнято ступінь несинусоїдальності напруги характеризувати загальним коефіцієнтом гармонічних спотворень THD (Total Harmonic Distortion) [1-7]:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{i \geq 2} U_i^2}}{U_1} \cdot 100\% \quad (1)$$

де U_i – середньоквадратичне значення напруги i -ої гармоніки, U_1 – те ж для основної гармоніки. Інтенсивність окремих гармонік оцінюється по значенням індивідуальних коефіцієнтів спотворень IHD (Individual Harmonic Distortion), які представляють собою відношення середньоквадратичного значення напруги n -ої гармоніки до середньоквадратичного значення напруги основної гармоніки:

$$IHD_n = \frac{U_n}{U_1} \cdot 100\% \quad (2)$$

Приведені вище формули застосовуються для аналізу якості електроенергії, що видається інверторами напруги. Для інверторів струму спотворення описуються аналогічними формулами, якщо величини U_i замінити на струмові компоненти I_i .

Для безпроблемної роботи ФЕС важливо мати невисокі значення THD і IHD, оскільки високий рівень гармонічних спотворень може викликати руйнування конденсаторів, перенапругу і перевищення струмів в мережі, розігрів обладнання і пробій кабелів, хибні спрацювання релейного захисту, перегрів трансформаторів, помилки у вимірюванні електроенергії тощо.

Допустимі значення THD і IHD встановлюються спеціальними стандартами для інверторів чи загальними стандартами для перетворюючих пристроїв і розподільчих мереж. Основним європейським стандартом щодо рівня гармонічних спотворень електроенергії, яка інжектуються в мережу будь-якими приладами, у тому числі інверторами, є IEC 61000-3 [1, 2]. В Україні діє стандарт ДСТУ IEC 62040-3 [3] для систем безперебійного електроживлення, а також в стадії підготовки знаходиться

аналог європейського стандарту EN 62109 [4, 5], який стосується узгодження і безпеки силових перетворювачів фотоелектричних систем. Відмітимо, що більшість світових стандартів [1, 2, 6], в тому числі для інверторів у складі ФЕС, встановлюють допустиму величину THD на рівні 5 % від значення вихідної напруги чи струму. В той же час обмеження на гармонічні спотворення в розподільчих мережах дещо більш м'які: THD , згідно [7], не повинен перевищувати 8 %. Діючий український стандарт [3] допускає для інверторів в складі систем безперебійного живлення THD до 8%.

Зниження гармонічних спотворень на виході інверторів може здійснюватись традиційними способами за допомогою пасивних [8] і активних [9, 10] фільтрів. У ряді робіт пропонується удосконалити системи управління інверторами, наприклад, схема, яка виключає взаємну кореляцію між інверторами, що обслуговують різні ряди модулів і підключені до однієї шини змінної напруги [11]. Відомі розробки, в яких до виходу інверторів підключаються різного роду контролери для покращення гармонічного складу напруги на навантаженні [12, 13]. Можливе також зменшення THD за рахунок більш досконалих алгоритмів ШІМ [14, 15]. Варто відмітити, що величина THD суттєво залежить не лише від властивостей інвертора, а й від характеру навантаження (в першу чергу від ступеню нелінійності опору навантаження). Найбільший вплив навантаження здійснюється на характеристики інверторів напруги, оскільки внутрішній опір цих інверторів малий.

В даній роботі розроблено декілька методик гармонічного аналізу вихідної напруги інверторів в реальному часі. Вимірювання і оцифрування напруги здійснювалось за допомогою мікросистеми збору даних m-DAQ12 (Holit Data Systems, Україна), котра представляє собою 12-розрядний АЦП з мультиплексуванням вхідних аналогових сигналів. Наступна обробка і аналіз сигналів виконувались за допомогою програмних додатків, розроблених нами в різноманітних системах програмування (Builder C++, LabView і MATLAB) з метою перевірки ефективності роботи в реальному часі алгоритмів обчислення амплітуд спектральних компонент.

Електрична схема вимірювань показана на рис.1. До входу інвертора Leoton потужністю 500 Вт було підключено 7 паралельно з'єднаних між собою фотомодулів SEM-70 (потужністю 70 Вт) з напругою в точці максимуму потужності 22 В (при даній поточній сонячній радіації). До виходу інвертора з номінальною напругою 220 В були приєднані дільник напруги та навантаження. Дільник напруги розрахований таким чином, щоб на вході АЦП напруга становила близько 5 В (у даному випадку $R_1=62$ кОм, $R_2=1.5$ кОм). Навантаження складалося з фіксованого активного опору $R_L(310$ і 690 Ом) і індуктивного опору X_L зі змінною індуктивністю $L=0 - 0.808$ Гн.

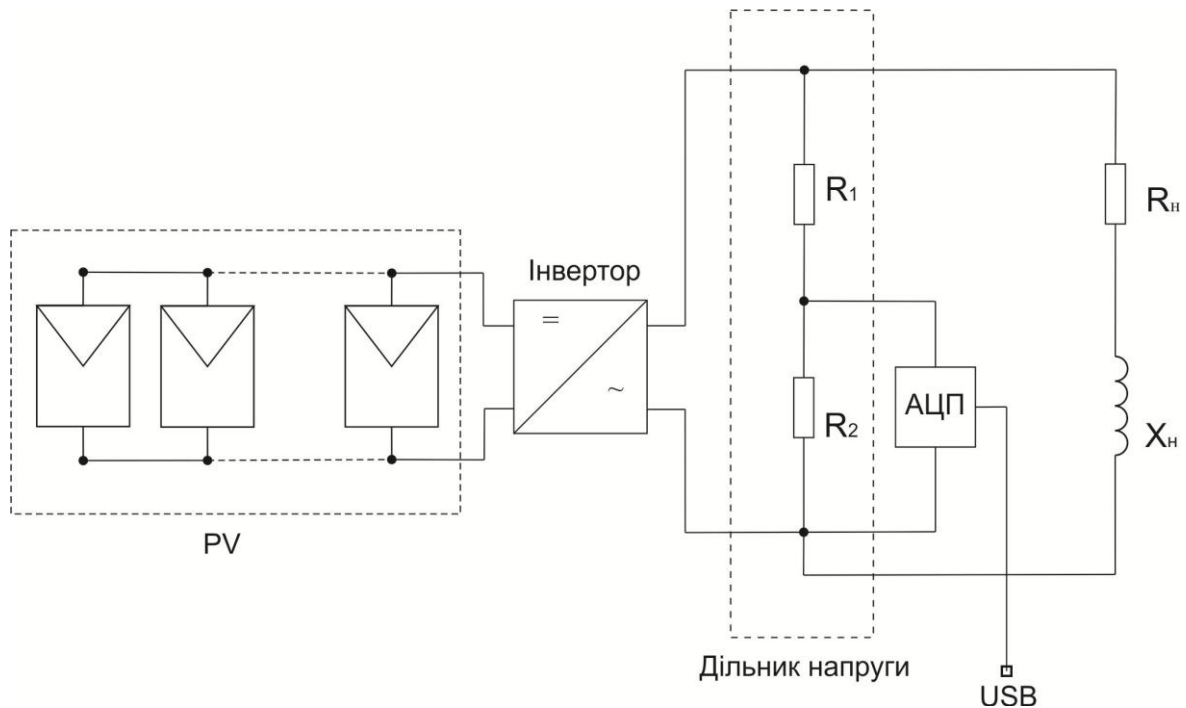


Рис. 1. Електрична схема вимірювань

Приклад кривої напруги на виході інвертора зображений на рис. 2.

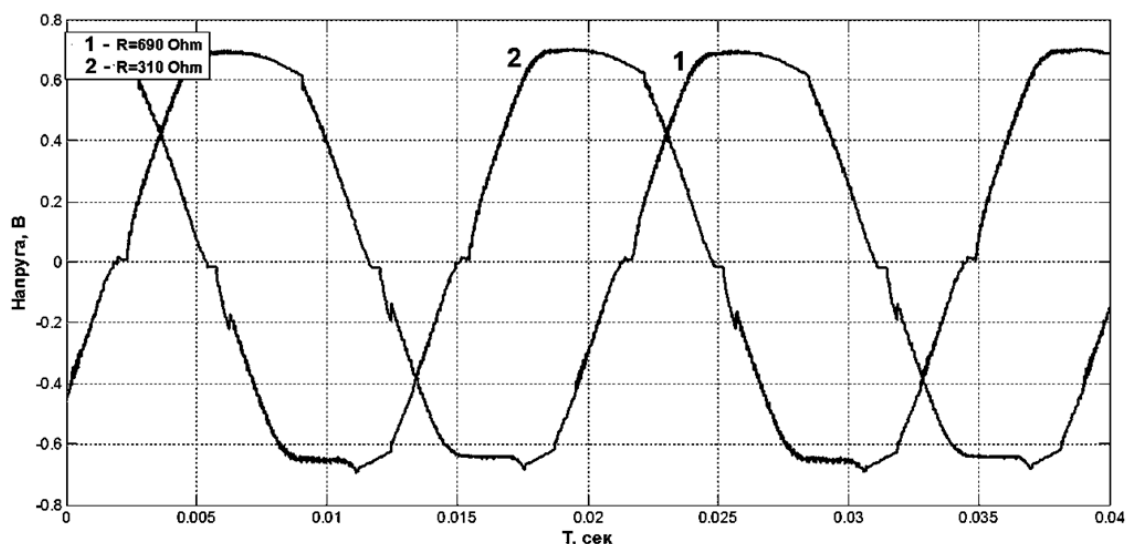


Рис 2. Форма кривої напруги на виході інвертора

До отриманих кривих, представлених у вигляді масивів даних, було застосовано алгоритм прямого швидкого дискретного перетворення Фур'є за формулою (3).

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-\frac{2\pi i}{N}kn}, k = 0, \dots, N - 1, \quad (3)$$

де N – кількість точок масиву, x_n – виміряні значення напруги в дискретних часових точках з номерами $n = 0, \dots, N-1$, X_k – комплексна амплітуда k -ої гармоніки.

За допомогою програми, створеної у Builder C++, був визначений гармонічний склад сигналу (рис. 3). Значення коефіцієнтів гармонічних спотворень THD та IHD при $R_L=310, 690$ Ом і $X_L=253.8$ Ом, які обчислювались за формулами (1)-(2), наведені у таблиці 1.

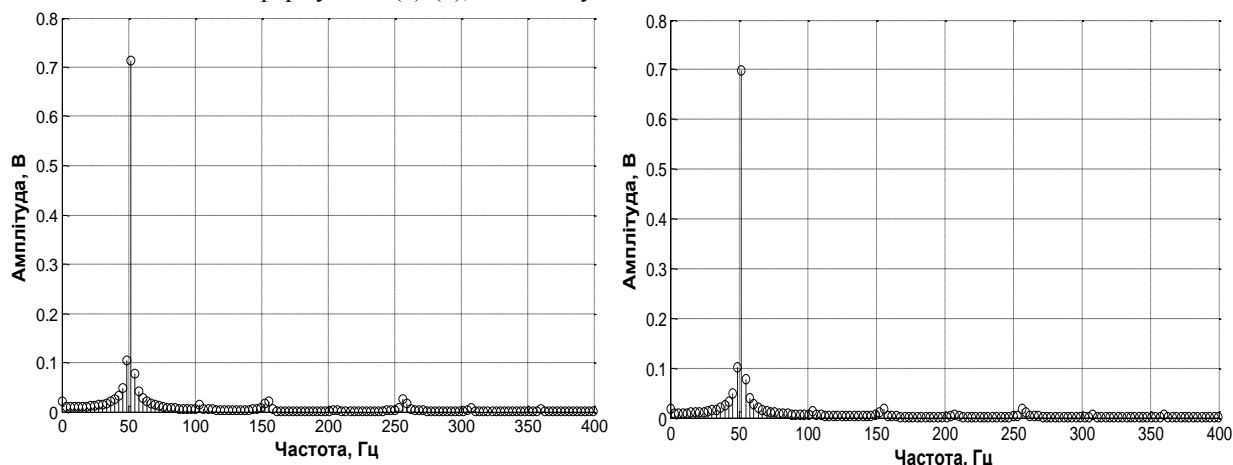


Рис. 3. Гармонічний склад напруги (для $R_L=690$ Ом і $X_L=253.8$ і 95.2 Ом)

Програма, яка була написана у MATLAB з використанням функції fft (fast Fourier transform), дала результати, які співпадають (з точністю до $\sim 6\%$) з наведеними вище.

Таблиця 1.

Коефіцієнти гармонічних спотворень інвертора

| Значення індуктивного опору | $X_L=253.8$ Ом | |
|-----------------------------|----------------|--------------|
| | $R_L=310$ Ом | $R_L=690$ Ом |
| Значення активного опору | | |
| THD, % | 7.90 | 8.10 |
| IHD ₁ , % | 98.22 | 98.18 |
| IHD ₃ , % | 3.80 | 3.20 |
| IHD ₅ , % | 3.14 | 3.18 |
| IHD ₇ , % | 0.79 | 0.83 |

У даній роботі було також створено у системі графічного програмування LabView віртуальний прилад (ВП) для збору та обробки даних (рис.4), які поступають від сумісної з LabView мікросистеми m-DAQ12. В даній схемі частота опитування АЦП задається користувачем. Також реалізовано графічне відображення форми сигналу та його спектру.

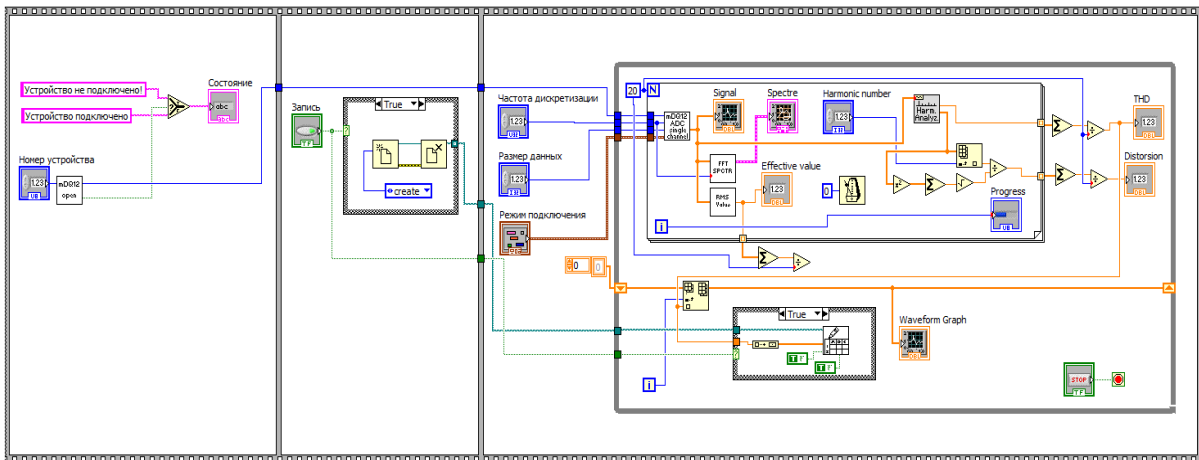


Рис. 4. ВП збору та обробки даних з АЦП m-DAQ12

Розрахунок коефіцієнту гармонічних спотворень THD та індивідуальних коефіцієнтів гармонічних спотворень для 3-ї, 5-ї і 7-ї гармонік проводився в окремому віртуальному приладі. Значення коефіцієнтів THD та IHD, розрахованих в LabView, відрізнялись від значень, отриманих за допомогою попередніх програм (C++ та MATLAB) у середньому на 5%.

В роботі також досліджувалась залежність гармонічних спотворень від характеру навантаження, а саме від величини індуктивної складової опору навантаження. Як видно з графіка на рис.5, при певному значенні індуктивного опору коефіцієнт гармонічних спотворень різко зростає, тобто якість вихідної напруги інвертора зі збільшенням індуктивного характеру опору суттєво знижується.

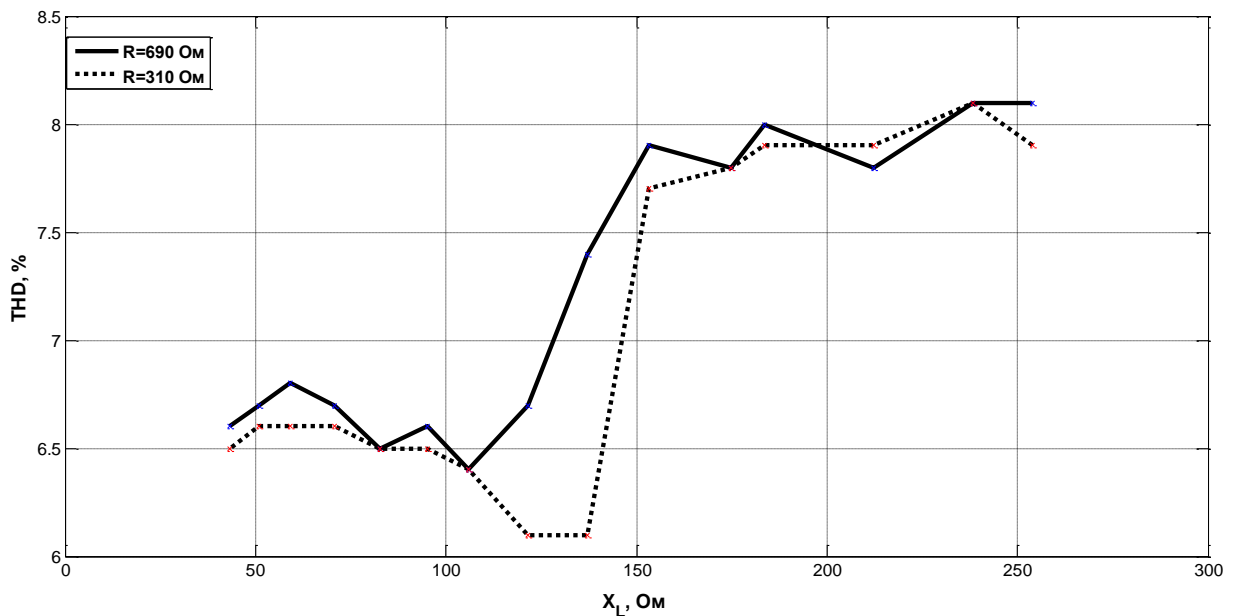


Рис. 5. Залежність THD від індуктивності навантаження (суцільна крива – R=690 Ом, пунктирна крива – R=310 Ом)

Висновки

В даній роботі було розроблено декілька методик гармонічного аналізу вихідної напруги інверторів в залежності від характеру навантаження, а також були отримані експериментальні залежності загального коефіцієнту гармонічних спотворень THD від індуктивної складової опору навантаження.

Значення THD досліджуваного інвертора виробництва Leoton знаходяться в допустимих межах, що визначаються стандартом [3]. Але зі зростанням коефіцієнта потужності навантаження $\cos \phi$ спостерігається стрибкоподібний приріст значення THD до гранично допустимого рівня (рис. 6).

Порівняння програм гармонічного аналізу напруги, розроблених в C++ Builder, MATLAB і LabView, показало, що найбільш швидкодіючою є програма на C++ і відповідно для обробки даних в реальному часі перевагу потрібно надавати даній системі. Різниця в результатах розрахунку THD і IHD за допомогою вищевказаних трьох програм становлять 5-6 %.

Список літератури

1. EN 61000-3-2: Limits for harmonic current emissions (equipment input current ≤ 16 A per phase).
2. EN 61000-3-12: Limits for harmonic currents produced by equipment connected to public low-voltage systems with input current < 75 A per phase.
3. ДСТУ ІЕС 62040-3: Національний стандарт України. Системи гарантованого електропостачання. Агрегати безперебійного живлення. Загальні технічні вимоги. Методи випробування. [Текст] — [Чинний від 2006-04-01]. — К.: Держспоживстандарт України, 2006. — IX, 99 с.
4. ІЕС62109-1:2010: Safety of power converters for use in photovoltaic power systems. Part 1:General requirements Edition 1.0
5. ІЕС 62109-2:2011: Safety of power converters for use in photovoltaic power systems - Part 2: Particular requirements for inverters Edition 1.0.
6. IEEE 519-1992: Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems.
7. DIN EN 50160: Voltage characteristic of electricity in public distribution systems.
8. Renzhong X. Design and Research on the LCL Filter in Three-Phase PV Grid-Connected Inverters [Text] / X. Renzhong, X. Lie, Zh. Junjun. – Int. J. Computer and Electrical Engineering, Vol. 5, No. 3, 2013. – pp. 322 – 325.
9. Akagi, H. New Trends in Active Filters for Power Conditioning [Text]. – IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.32, No.6, 1996. – pp. 1313-1322.
10. El-Habrouk M. Active power filters: A review [Text] / M. El-Habrouk, M. K. Darwish and P. Mehta. – Electric Power Applications, IEE Proceedings, Vol. 147, 2000. – pp. 403-413.
11. Armstrong M. Low Order Harmonic Cancellation in a Grid Connected Multiple Inverter System Via Current Control Parameter Randomization [Text] / M. Armstrong, D. J. Atkinson, C. M. Johnson. – IEEE Trans. Power Electronics, Vol. 20, No. 4, 2005. – pp. 885-892.
12. Hwang U. The Current Control Method for an Improvement of a Single-phase Grid-connected PV Inverter [Text] / U. Hwang, O. Yang, W. Chung. – Int. J. Control and Automation. Vol. 25, 2013. – pp. 127 - 130.
13. Murugan S.A.. Harmonics Elimination in Grid Connected Single Phase PV Inverter [Text] / S. A. Murugan, A. Anbarasan. – Int. J. Innovative Research in Science, Engineering and Technology. Vol. 3, Special Issue 1, 2014. – pp. 1473-1480.
14. Михальський В.М. Засоби підвищення якості електроенергії на вході та виході перетворювачів частоти та напруги з широтно-імпульсною модуляцією. – Київ: Ін-т електродинаміки. – 2013. – 340 с.
15. Kumar P.V. Power Quality Improvement for Grid Connected Photovoltaic System [Text] / P.V. Kumar, D. Maheswari, T.N. Kumar et al. – Int. J. Advanced Trends in Computer Science and Engineering, Vol.2, No.2, 2013. – pp. 23-28.

A.Y. Gaevski, V.V. Magada, S.O. Uzheiko

National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»

INVERTER OUTPUT VOLTAGE HARMONIC ANALYSIS METHODS IN REAL TIME

The software techniques realized in C++Builder, MATLAB and LabView have been developed for the analysis of the DC-AC inverter output voltage. The output voltages have been digitized by the m-DAQ12 microsystem. The individual (IHD) and the total (THD) harmonic distortion dependencies of the load power factor have been obtained. The differences between calculation results obtained by the above mentioned programs were about 5-6 %. The C++ Builder program has appeared to be the most applicable for a real-time voltage analysis.

Keywords: inverter, total harmonic distortion (THD), individual harmonic distortion (IHD), output voltage harmonic analysis, fast Fourier transform, analog-to-digital converter.

1. EN 61000-3-2: Limits for harmonic current emissions (equipment input current ≤ 16 A per phase).
2. EN 61000-3-12: Limits for harmonic currents produced by equipment connected to public low-voltage systems with input current < 75 A per phase.

3. DSTU IEC 62040-3: Natsionalnyi standart Ukrainy. Systemy garantovanogo elektropostachannia. Agregaty bezperebinogo zhyvlennia. Zagal'ni tehniczni vymogy. Metody vyprobuvannia. [Text] – K.: Derzhspozhy`v standart Ukrayiny`, 2006. – IX, 99 p.
4. IEC62109-1:2010: Safety of power converters for use in photovoltaic power systems. Part 1: General requirements Edition 1.0.
5. IEC 62109-2:2011: Safety of power converters for use in photovoltaic power systems - Part 2: Particular requirements for inverters Edition 1.0.
6. IEEE 519-1992: Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems.
7. DIN EN 50160: Voltage characteristic of electricity in public distribution systems.
8. Renzhong X. Design and Research on the LCL Filter in Three-Phase PV Grid-Connected Inverters [Text] / X. Renzhong, X. Lie, Zh. Junjun. – Int. J. Computer and Electrical Engineering, Vol. 5, No. 3, 2013. – pp. 322 – 325.
9. Akagi, H. New Trends in Active Filters for Power Conditioning [Text]. – IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.32, No.6, 1996. – pp. 1313-1322.
10. El-Habrouk M. Active power filters: A review [Text] / M. El-Habrouk, M. K. Darwish and P. Mehta. – Electric Power Applications, IEE Proceedings, Vol. 147, 2000. – pp. 403-413.
11. Armstrong M. Low Order Harmonic Cancellation in a Grid Connected Multiple Inverter System Via Current Control Parameter Randomization [Text] / M. Armstrong, D. J. Atkinson, C. M. Johnson. – IEEE Trans. Power Electronics, Vol. 20, No. 4, 2005. – pp. 885-892.
12. Hwang U. The Current Control Method for an Improvement of a Single-phase Grid-connected PV Inverter [Text] / U. Hwang, O. Yang, W. Chung. – Int. J. Control and Automation. Vol. 25, 2013. – pp. 127 - 130.
13. Murugan S.A.. Harmonics Elimination in Grid Connected Single Phase PV Inverter [Text] / S. A. Murugan, A. Anbarasan. – Int. J. Innovative Research in Science, Engineering and Technology. Vol. 3, Special Issue 1, 2014. – pp. 1473-1480.
14. Michalski V.M The power quality improvement methods for input and output voltages of converters with pulse-width modulation. - Kyiv: Institute of electrodynamics. – 2013. – 340 p. (in Ukrainian).
15. Kumar P.V. Power Quality Improvement for Grid Connected Photovoltaic System [Text] / P.V. Kumar, D. Maheswari, T.N. Kumar et al. – Int. J. Advanced Trends in Computer Science and Engineering, Vol.2, No.2, 2013. – pp. 23-28.

УДК 621.314.58: 621.311.13: 004.67

А.Ю. Гаевский, д - р. физ.- мат. наук, В.В. Магада, С.О. Ужейко

**Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»
МЕТОДЫ ГАРМОНИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ИНВЕРТОРА В
РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ**

С целью контроля в реальном времени характеристик DC-AC инверторов при различных типах нагрузки разработаны в программных системах C++Builder, MATLAB и LabView методики гармонического анализа выходного напряжения. Получены зависимости общего и индивидуального (ИИД) коэффициентов гармонических искажений от характера нагрузки и от коэффициента мощности. Результаты расчетов, полученные с помощью трех методик, отличаются на 5-6%. Наиболее пригодной для анализа напряжения в реальном времени является программа на языке C++. Измерения и оцифровка выходных напряжений инвертора выполнялись с помощью микросистемы сбора данных m-DAQ12.

Ключевые слова: инвертор, общий коэффициент гармонических искажений (ТНД), индивидуальный коэффициент искажений (ИИД), гармонический анализ выходного напряжения, быстрое преобразование Фурье, аналогово-цифровой преобразователь.

Надійшла 23.09.2014

Received 23.09.2014