



Buzilish egri chiziqli yig'indi koeffitsientini aniqlashda raqamli ostsilloografdan foydalanish

Toxir F. Maxmudov

PhD, dots., Toshkent davlat texnika universiteti, Toshkent, 100095, O'zbekiston; t.maxmudov@tdtu.uz
<https://orcid.org/0000-0002-0357-0303>

Dolzarbliji: so'nggi yillarda nochiziqli elektron yuklamalardan foydalanish sezilarli darajada oshdi, sanoat ob'ektlari - chastota o'zgartirgichlari, yoy pechlari va kommunal sohada - ixcham lyuminestsent lampalar, kompyuterlar, televizorlar, konditsionerlar, ya'ni invertor o'zgartirgichlari va impuls quvvat manbalarini o'z ichiga olgan qurilmalar. Nochiziqli yuklamalar garmonik toklarni taqsimlash tizimlariga kiritadi. Kiritilgan garmonik toklar va natijada paydo bo'ladigan garmonik kuchlanishlar elektr energiya sifati muammolariga olib kelishi va elektr tarmog'iga ulangan iste'molchilarining ishlashiga ta'sir qilishi mumkin.

Maqsad: buzilish egri chiziqli yeg'indi koeffitsientini aniqlashda raqamli ostsilloografdan foydalanish imkoniyatini asoslash.

Usullari: o'rnatilgan Furye tez o'zgartirish funktsiyasi sinusoidal signalni garmonik spektrga ajratish uchun ishlatildi.

Natijalar: ostsillograf yordamida olingan natijalarni solishtirish uchun Fluke 1732 sanoat elektr energiya sifati analizatori yordamida kuchlanish uchun buzilish egri chiziqli yeg'indi koeffitsienti o'lchandi. Qimmatbaho elektr energiya sifati analizatori bo'limganda, garmonik buzilish egri chiziqli yeg'indi koeffitsientini ekspress baholash uchun raqamli ostsilloografdan foydalanish imkoniyati to'g'risida xulosalar chiqariladi. 15-garmonikagacha bo'lgan kuchlanish garmonikalarining amplituda-chastotaviy spektri aniqlandi.

Kalit so'zları: buzilish egri chiziqli yeg'indi koeffitsienti; Furye qatoriga yoyish; garmonika; raqamli ostsillograf.

Применение цифрового осциллографа для определения суммарного коэффициента нелинейных искажений

Тохир Ф. Махмудов

PhD, доц., Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, 100095, Узбекистан; t.maxmudov@tdtu.uz <https://orcid.org/0000-0002-0357-0303>

Актуальность: в последние годы значительно возросло использование нелинейных электронных нагрузок, как на объектах промышленности - преобразователи частоты, дуговые печи, так и в коммунально-бытовом секторе - компактные люминесцентные лампы, компьютеры, телевизоры, кондиционеры, т.е. приборы, имеющие в своем составе инверторные преобразователи и импульсные блоки питания. Такие нелинейные нагрузки вводят гармонические токи в распределительные системы. Введенные гармонические токи и полученные гармонические напряжения могут вызвать проблемы с качеством электроэнергии и влиять на производительность потребителей, подключенных к электросети.

Цель: обоснование применения цифрового осциллографа при определении суммарного коэффициента нелинейных искажений.

Методы: использована встроенная функция быстрого преобразования Фурье при разложении синусоидального сигнала в гармонический спектр.

Результаты: в целях сравнения полученных результатов при использовании осциллографа были произведены замеры коэффициента нелинейных искажений по напряжению промышленным анализатором качества электроэнергии Fluke 1732. Сделаны выводы относительно использования цифровых осциллографов при проведении экспресс-оценок коэффициента гармонических искажений при отсутствии дорогостоящего анализатора качества электроэнергии Fluke 1732. Определен амплитудно-частотный спектр гармоник напряжения вплоть до 15 гармоники.

Ключевые слова: коэффициент нелинейных искажений; преобразование Фурье; гармоники; цифровой осциллограф.



Using a digital oscilloscope to determine the total harmonic distortion coefficient

Toxir F. Maxmudov

PhD, dots., Tashkent State Technical University, Tashkent, 100095, Uzbekistan; t.maxmudov@tdtu.uz
<https://orcid.org/0000-0002-0357-0303>

Relevance: in recent years, the use of nonlinear electronic loads has increased significantly, both in industrial facilities - frequency converters, arc furnaces, and in the public utility sector - compact fluorescent lamps, computers, televisions, air conditioners, i.e. devices that have inverter converters and pulse power supplies in their composition. Nonlinear loads introduce harmonic currents into distribution systems. The introduced harmonic currents and the resulting harmonic voltages can cause problems with the quality of electricity and affect the performance of consumers connected to the power grid.

Aim: justification of the possibility of using a digital oscilloscope in determining the total coefficient of nonlinear distortion.

Methods: the built-in fast Fourier transform function is used to decompose a sinusoidal signal into a harmonic spectrum.

Results: in order to compare the results obtained using an oscilloscope, the nonlinear distortion coefficient of voltage was measured using an industrial power quality analyzer Fluke 1732. Conclusions were made on the possibility of using digital oscilloscopes to conduct an express assessment of the harmonic distortion coefficient in the absence of an expensive power quality analyzer. The amplitude-frequency spectrum of voltage harmonics up to the 15th harmonic was determined.

Key words: nonlinear distortion coefficient; Fourier transform; harmonics; digital oscilloscope.

1. Введение (Introduction)

Несколько десятилетий назад проблемы, связанные с гармониками, ограничивались более низкими уровнями напряжения. В настоящее время внедрение различных крупных нелинейных нагрузок, напрямую подключенных к уровням напряжения распределения и передачи, навсегда изменило гармонический состав всей энергосистемы. Расширение мощностей сетей передачи, применение новых технологических решений и установка новых элементов в систему: таких как высоковольтные электропереходы постоянного тока (HVDC - high-voltage direct current), ветровые электростанции, системы гибких электропередач (FACTS - flexible alternating current transmission system), а также других технологий с преобразователями напряжения, требуют особого внимания при исследовании совместной работы существующей сети и таких элементов системы [1-3].

Основная гармоника (или первая гармоника) - это синусоидальная форма волны с частотой 50 Гц. Гармоники представляются как целые числа, кратные основной частоте. Гармоники характеризуют собой математический способ описания искажения формы волны напряжения или тока. Искажение этих синусоидальных форм волн напряжения и тока, вызванное гармониками, является одной из основных проблем обеспечения качества электроэнергии. В энергосистемах характеристики переменного напряжения и тока, в зависимости от времени, существенно отличаются от чистой синусоидальной формы. Эта форма волны состоит из одной основной синусоидальной формы волны и ряда других синусоидальных волн с различными частотами [4].

Негативное влияние гармонических искажений заключается в следующем [5-6]:

- 1) увеличение нагрузки на изоляцию электрооборудования из-за искажений напряжения;
- 2) тепловое напряжение и перегрев электрических машин, конденсаторов и другого силового оборудования;
- 3) увеличение потерь мощности в обмотках машин и проводниках из-за дополнительных гармонических составляющих тока;
- 4) неверное срабатывание устройств релейной защиты и автоматики;
- 5) высокочастотный электрический шум, вызывающий большие скачки напряжения, которые могут повредить чувствительное электронное оборудование, такое как электронные платы управления, программируемые логические контроллеры и др.

Таким образом, большой проблемой при обеспечении качества электроэнергии являются гармонические искажения форм волн напряжения и тока. Гармонический ток взаимодействует с импедансом системы питания, вызывая искажения выходного напряжения и тока питания, которые влияют на все другие нагрузки, подключенные к системе, в том числе и на сам источ-

ник питания [7]. Интерпретация того, как гармонические составляющие искажают форму синусоидального сигнала промышленной частоты, показан на рис. 1.

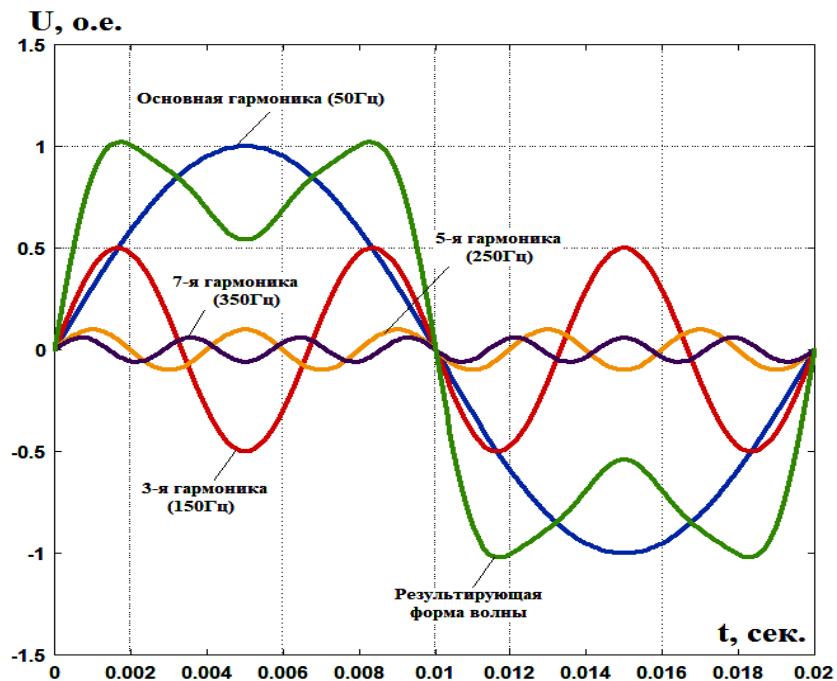


Рис.1. Искаженная форма синусоидальной волны за счет влияния нечетных гармоник
Fig. 1. Distorted form of a sine wave due to the influence of odd harmonics

2. Методы и материалы (Methods and materials)

Коэффициент нелинейных искажений является одним из важнейших показателей качества электроэнергии. Значение суммарного коэффициента гармонических искажений (THD - Total Harmonic Distortion) дает представление о линейности и спектральной чистоте синусоидального сигнала [8-9]. THD - это обобщающий показатель, используемый для различных стандартов измерения полного гармонического искажения:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_{rmsn}^2}}{V_{rms1}}, \quad (1)$$

где V_{rms1} - это среднеквадратичная амплитуда напряжения основной частоты; V_{rmsn} - среднеквадратичная амплитуда напряжения гармоник n -го порядка основной частоты.

Если амплитуды основной частоты и всех гармонических компонентов n -го порядка известны, то довольно легко рассчитать THD. Представление сигнала осциллографом во временной области не дает амплитуды каждой гармоники по отдельности. Однако в настоящее время даже недорогие осциллографы начального уровня предлагают расширенные математические функции, в том числе быстрое преобразование Фурье (FFT - fast fourier transformation). Функциональность FFT позволяет производить преобразование полученного сигнала из временной области в частотную и отображать амплитуду спектральных составляющих как функцию частоты. Затем эти значения можно использовать для расчета THD сигнала [10].

Представление сигнала из временной в частотной области на осциллографе обычно приводит к измерениям в виде значений децибелов по напряжению, мощности или по отношению мощности сигнала к несущему сигналу (dBV_{rms} , dBm , dBc), которые нельзя напрямую использовать в уравнении (1).

Измерение в dBV_{rms} можно довольно легко преобразовать в среднеквадратичное напряжение (V_{rms}) [11]:

$$V_{rms} = 10^{(dBV_{rms}/20)}. \quad (2)$$

Подстановка каждого члена V_{rmsn} в уравнение (1) дает следующее уравнение:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} (10^{(dBV_{rmsn}/20)})^2}}{10^{(dBV_{rms1}/20)}}, \quad (3)$$



где dBV_{rms1} — амплитуда основной гармоники), а dBV_{rmsn} — амплитуда всех последующих гармоник n -го порядка.

Для значений, указанных в dBm , среднеквадратичное напряжение можно рассчитать следующим образом [12]:

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{Z}{1000}} \cdot 10^{(P_{dBm}/20)}, \quad (4)$$

где Z - системный импеданс, P_{dBm} — это мощность гармоники в dBm , а V_{rms} — это среднеквадратичное значение напряжения.

Объединение уравнения (1) с уравнением (4) дает уравнения (5) для расчета THD непосредственно из спектральной мощности гармоник n -го порядка в dBm :

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left(\sqrt{\frac{Z}{1000}} \cdot 10^{(P_n/20)} \right)^2}}{\sqrt{\frac{Z}{1000}} \cdot 10^{(P_1/20)}}, \quad (5)$$

где P_n - мощность гармоники n -го порядка в dBm , P_1 - мощность основной частоты в dBm .

Некоторые осциллографы способны также отображать и автоматически отслеживать спектральную мощность в децибелах, относительно мощности несущего сигнала (dBc). Основная частота используется в качестве опорной для точки 0 dBc , а все последующие показания мощности отображаются относительно этой опорной точки [13].

$$dBc = 10 \log \left(\frac{P_n}{P_1} \right), \quad (6)$$

где P_n - мощность гармоники n -го порядка в dBm , P_1 - мощность опорной несущей гармоники. Выразим мощности через следующее соотношение:

$$\frac{P_n}{P_1} = \frac{\frac{V_{rmsn}^2}{R}}{\frac{V_{rms1}^2}{R}} = \frac{V_{rmsn}^2}{V_{rms1}^2}, \quad (7)$$

где V_{rmsn} - среднеквадратичное значение напряжения гармоники n -го порядка, а V_{rmsc} - среднеквадратичное значение амплитуды напряжения опорного сигнала.

Это свойство полезно, поскольку оно упрощает расчеты значений THD по данным значениям dBc . Тогда уравнение (1) примет следующую форму:

$$THD = \sqrt{\frac{V_{rms2}^2}{V_{rms1}^2} + \frac{V_{rms3}^2}{V_{rms1}^2} + \frac{V_{rms4}^2}{V_{rms1}^2} + \frac{V_{rms5}^2}{V_{rms1}^2} \dots}. \quad (8)$$

Объединение уравнения (8) с отношением мощности к квадрату среднеквадратичного напряжения, показанным в уравнении (7), приводит к очень компактному уравнению для расчета значений THD непосредственно из измерений мощности в dBc :

$$THD = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} 10^{PdBc_n/10}}, \quad (9)$$

где $PdBc_n$ - относительная мощность каждой гармоники n -го порядка в dBc .

3. Результаты и обсуждения (Results and discussion)

В качестве тестируемого сигнала было использовано напряжение фазы А, одной из кабельных линий напряжением 0.4 кВ, снабжающей здание Энергетического факультета Ташкентского государственного технического университета. Для отображения результатов и дальнейших вычислений использовался цифровой осциллограф Rigol DS1202Z-E, имеющий сертификат о прохождении сертификационных испытаний, выданных агентством «Узстандарт». Осциллограф имеет полосу пропускания 200 МГц и частоту дискретизации 1 гигасэмпл в секунду. В качестве щупов был использован коаксиальный кабель типа PVP2350. Так как питание осциллографа осуществлялось по вышеприведенной фазе А, то для гальванической развязки и одновременного понижения напряжения сети был использован трансформатор с коэффициентом трансформации 220/12.

На рис. 2 приведен гармонический спектр исследуемой кривой напряжения частотой 50 Гц.

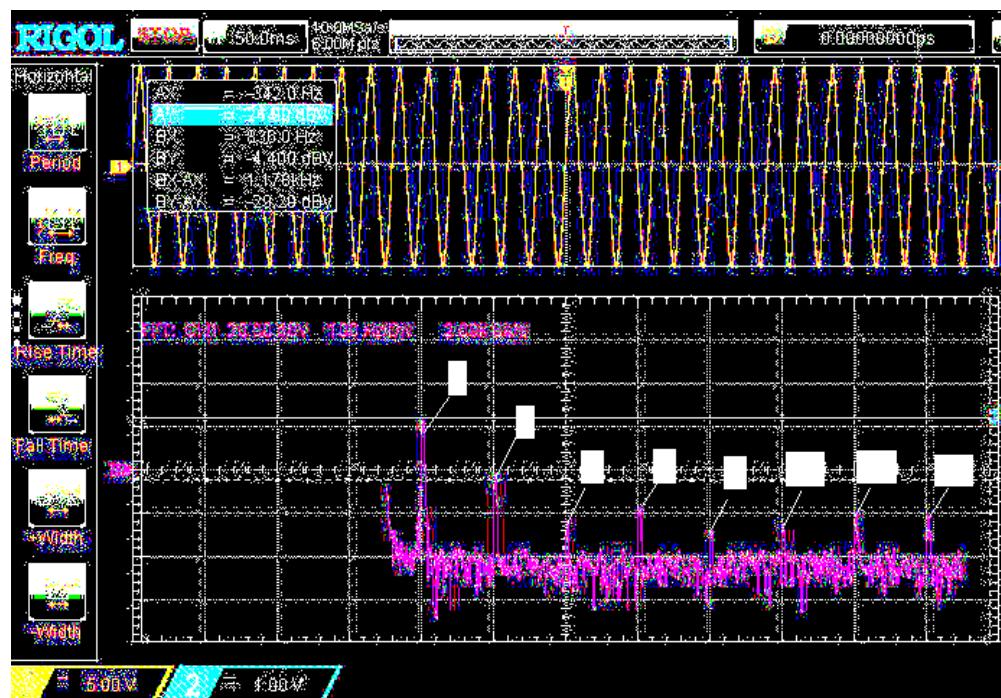


Рис. 2. Кривая напряжения и ее гармонический состав
Fig. 2. Voltage curve and its harmonic composition

В табл.1. показаны абсолютные величины гармоник по напряжению в логарифмических единицах – dBV_{rms}, определенные по формуле (2).

Таблица 1. Уровни гармоник по напряжению и их THD

Table 1. Voltage harmonic levels and their THD

Номер гармоники	Амплитуда (dBV _{rms})	V _{rms}	THD _{замер} , %	допустимые THD, согласно ГОСТ 32144-2013, % [14]
1	24,8	17,37800829		
3	-4,8	0,575439937	3,311311215	5
5	-12,8	0,229086765	1,318256739	6
7	-20,3	0,096605088	0,555904257	5
9	-23,6	0,066069345	0,380189396	1,5
11	-26,4	0,047863009	0,27542287	3,5
13	-28,4	0,03801894	0,218776162	3
15	-28,1	0,039355008	0,226464431	0,3

Воспользуемся выражением (3) и определим суммарный коэффициент гармонических искажений по напряжению:

$$\text{THD}_{(\%)} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} (10^{(\text{dBV}_{\text{rms},n}/20)})^2}}{10^{(\text{dBV}_{\text{rms},1}/20)}} \cdot 100\% = \frac{\sqrt{0.402594693}}{17.37800829} \cdot 100\% = 3.65118\%$$

Для подтверждения адекватности полученных данных с цифрового осциллографа был произведен замер суммарного коэффициента гармонических искажений по напряжению анализатором качества электроэнергии Fluke 1734. Значения величин абсолютной и относительной погрешностей сведены в табл.2.

Таблица 2. Сравнительный анализ результатов

Table 2. Comparative analysis of results

THD _{Rigol} , %	THD _{Fluke} , %	Абсолютная погрешность, %	Относительная погрешность, %
3,65118	3,2	0,45118%	14,099%



4. Заключение (Conclusion)

Определение суммарных коэффициентов нелинейных искажений является одной из важнейших задач при анализе качества электрической энергии. При проведении экспресс-анализа коэффициентов нелинейных искажений использование цифровых осциллографов, оснащенных функцией быстрого преобразования Фурье, является вполне оправданным, так как обеспечивает достаточно высокую степень точности, что показало сравнение с величинами, полученными на анализаторе качества электроэнергии Fluke 1734.

ЛИТЕРАТУРА

1. Jawad Ghorbani M., Mokhtari H. Impact of Harmonics on Power Quality and Losses in Power Distribution Systems // International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE), Vol. 5, No. 1, February 2015, pp. 166-174.
2. Collins C.D., Bathurst G.N., Waston N.R. and Wood A.R. Harmonic domain approach to STATCOM modeling, IEE Proceedings on Generation, Transmission, Distribution, Vol. 152, No. 2, March 2005, pp. 194–200.
3. Петухов В. Энергосберегающие лампы как источник гармоник тока / В. Петухов // Новости электротехники. – 2009. – № 5. – С. 59.
4. Shah N. Harmonics in power systems: Causes, effects and control, SIEMENS, USA, 2013.
5. Dixit J.B., Yadav A. Electrical Power Quality. Laxmi Publications, Ltd., 2010.
6. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий: 4-е изд., перераб. и доп. -Москва-Энергоатомиздат, 2000. -331 с.
7. Асоков С.М., Вишнягов М.Г., Иванова Е.В., Клеутин В.И., Руппель А.А., Сидоренко А.А. К проблеме электроснабжения при некачественной электроэнергии //Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2010. № 1. -С. 333–336.
8. Jesus Rico J., Madrigal M., and Acha E. Dynamic Harmonic Evolution Using the Extended Harmonic Domain, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 18, No. 2, April 2003, pp. 587–594.
9. Избранные вопросы несинусоидальных режимов в электрических сетях предприятий /И. В. Жежеленко [и др.]; /под ред. И.В. Жежеленко. – М.: Энергоатомиздат, 2007. – 296 с.
10. García H., Madrigal M., Vyakaranam B., Rarick R., and Villaseca F.E., Dynamic Companion Harmonic Circuit Models for Analysis of Power Systems with Embedded Power Electronics Devices, Electric Power Systems Research Journal (Elsevier), October 2010, pp. 340–346.
11. Хацевский К.В., Денчик Ю.М., Клеутин В.И., Зубанов Д.А., Бубнов А.В., Харламов В.В. Проблемы качества электроэнергии в системах электроснабжения //Омский научный вестник. 2012. № 2 (110). -С. 212–214.
12. Winn J.K. and Crow D.R. Harmonic measurements using a digital storage oscilloscope // IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 25, no. 4, pp. 783-788, July-Aug. 1989, doi: 10.1109/28.31261.
13. Sebastian Westerhold. Total Harmonic Distortion (THD) analysis utilizing the FFT capabilities of modern digital storage oscilloscopes // Baltic Lab, 2022, doi.org/10.5281/zenodo.6969825.
14. ГОСТ 32144–2013. Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ.2014–07–01. -М.:Стандартинформ, 2014. -20 с.

REFERENCES

1. Jawad Ghorbani M., Mokhtari H. Impact of Harmonics on Power Quality and Losses in Power Distribution Systems // International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE), Vol. 5, No. 1, February 2015, pp. 166-174.
2. Collins C.D., Bathurst G.N., Waston N.R., and Wood A.R. Harmonic domain approach to STATCOM modeling, IEE Proceedings on Generation, Transmission, Distribution, Vol. 152, No. 2, March 2005, pp. 194–200.
3. Petukhov V. Energy-saving lamps as a source of current harmonics / V. Petukhov // Electrical Engineering News. – 2009. – № 5. – P. 59.
4. Shah N. Harmonics in power systems: Causes, effects and control, SIEMENS, USA, 2013.
5. Dixit J.B., Yadav A. Electrical Power Quality. Laxmi Publications, Ltd., 2010.
6. Zhezhelenko I.V. Higher harmonics in power supply systems of industrial enterprises: 4th ed., revised and enlarged. Moscow-Energoatomizdat, 2000. 331 p.
7. Asokov S.M., Vishnyagov M.G., Ivanova E.V., Kleutin V.I., Ruppel A.A., Sidorenko A.A. On the problem of power supply with poor-quality electricity // Scientific problems of transport of Siberia and the Far East. 2010. No. 1. P. 333–336.



8. Jesus Rico J., Madrigal M., and Acha E. Dynamic Harmonic Evolution Using the Extended Harmonic Domain, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 18, No. 2, April 2003, pp. 587–594.
9. Selected Issues of Non-Sinusoidal Modes in Enterprise Electrical Networks / I.V. Zhezhelenko [et al.]; edited by I. V. Zhezhelenko. – Moscow: Energoatomizdat, 2007. – 296 p.
10. García H., Madrigal M., Vyakaranam B., Rarick R., and Villaseca F.E., Dynamic Companion Harmonic Circuit Models for Analysis of Power Systems with Embedded Power Electronics Devices, *Electric Power Systems Research Journal* (Elsevier), October 2010, pp. 340–346.
11. Khatsevskiy K.V., Denchik Yu.M., Kleutin V.I., Zubanov D.A., Bubnov A.V., Kharlamov V.V. Problems of Electric Power Quality in Power Supply Systems // *Omsk Scientific Bulletin*. 2012. No. 2 (110). Pp. 212–214.
12. Winn J.K. and Crow D.R. Harmonic measurements using a digital storage oscilloscope // *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 25, no. 4, pp. 783-788, July-Aug. 1989, doi: 10.1109/28.31261.
13. Sebastian Westerhold Total Harmonic Distortion (THD) analysis utilizing the FFT capabilities of modern digital storage oscilloscopes // *Baltic Lab*, 2022, doi.org/10.5281/zenodo.6969825
14. GOST 32144–2013. Interstate standard. Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Standards for the quality of electrical energy in general-purpose power supply systems. Introduced. 2014–07–01. Moscow: Standartinform, 2014. 20 p.