

Experimental Study of Higher Harmonics Content in Street Lighting System Current

Authors

Kazimierz Bieliński
Sławomir Cieślík

Keywords

higher harmonics, street lighting

Abstract

Due to energy efficiency improvement requirements, street lighting system operators tend to reduce the electricity consumed by the lights themselves, and also minimize losses in the system. Smart lighting control systems are commonly used for this purpose. An important aspect of electricity power and quality issues is the higher harmonics content in street lighting system current, which was the subject of experimental research the results of which were presented in this paper.

DOI: 10.12736/issn.2300-3022.2016204

1. Introduction

One important aspect of improving energy, economy and ecology efficiencies is the use of smart algorithms for the control, adjustment and compensation of interference in street lighting [1].

The most important requirements for street lighting (PN-EN 13201-2, selection of lighting classes ME, CE, S, A, ES, EV to lighting situations) refer to providing users with high-quality illumination of the road, pavement, and shoulder (utility area); good recognition (the ability to distinguish shapes and colours) and perception; reduced impact of ambient/environment, without unpleasant sensations (glare); safety in zones of conflict [2]. This problem can be seen in terms of the optimization problem, where the objective function is to minimize street lighting electricity consumption. The constraints are primarily determined by the requirements of lighting standards [3]. Practical possibilities to reduce electricity consumption and to minimize the operating cost of a street lighting system, such as smart street lighting control (ISSOU) are being sought. The problem of minimizing a street lighting system's power consumption can not ignore the issues of power loss in the system's wiring, including those resulting from the presence of higher harmonic currents. The issue of the presence of harmonic currents is essential in an evaluation of the interaction of a street lighting system with a low voltage power grid [4–6]. As follows from publication [7], issues concerning the impact of higher harmonics on power system components have not been fully resolved.

One of the essential ISSOU components is a power electronic controller, whose main task is to control the light source in a single luminaire. Voltage-current characteristic of the power electronic converter and of the circuits in general, which are used to power the light sources, are very important. These are

non-linear characteristics, which results in the distortion of sine current waveforms and may influence the shape of voltage waveforms in the low voltage power network. Electromagnetic compatibility in terms of the acceptable levels for harmonic current emissions of a device with rated current less than 16 A is regulated by standard [8]. However, there are specific systems, such as just the electrical street lighting, which are specific in that besides dedicated devices (e.g. lamps) there are no other devices, including the possibility of connecting devices of any type. This makes solving tasks concerning, for instance, communication over power wiring (PLC) easier, but also gives cause to a specific approach to the problems related to the presence of harmonic currents.

At the Institute of Electrical Engineering of the University of Technology and Life Sciences in Bydgoszcz, Poland, a test bench has been developed to study ISSOUS' operational characteristics. One of the study topics is issues related to electricity quality in terms of harmonic currents and voltages.

2. Description of the test bench

Fig. 1 shows a schematic representation of the patch panel of a physical model of a street lighting system. In the physical model luminaires may be connected in eight points (poles), which are the following distances from the power connector: 100 m first point, the second is 30 m away, then 20, 40, 30, 30, 25 and the eighth 25 m. The wiring is made of YKYžo 5 × 2.5 mm² (7.41 Ω/km) cable.

For the measurement of power, current and voltage in individual luminaires a Yokogawa WT210 digital power meter was used, which can measure power with a basic accuracy of 0.1% (from 0.5 Hz to 100 kHz). Current and voltage waveforms were

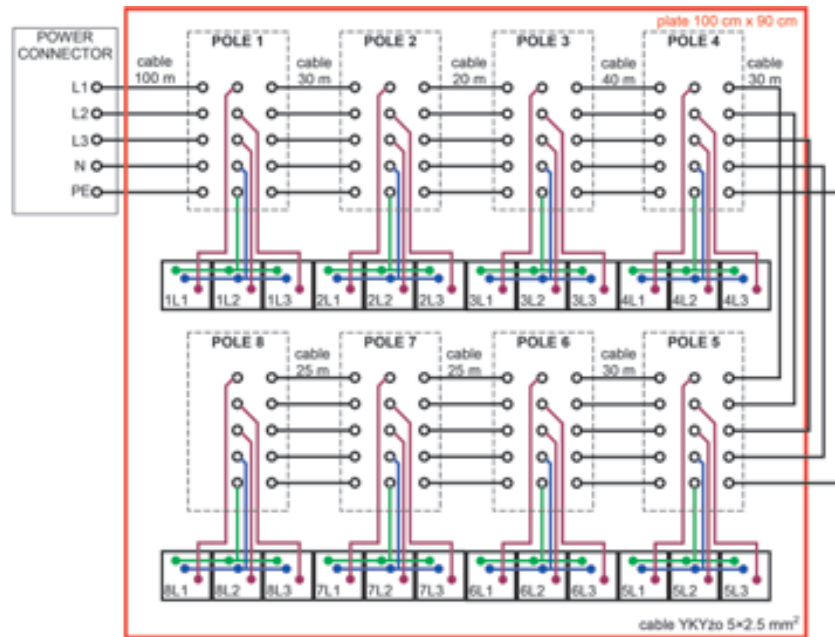


Fig. 1. Schematic diagram of patch panel in street lighting system's physical model

recorded by a TDS 2024 digital oscilloscope (200 MHz, 2 GS/s) with a TESTEC voltage probe (1:100, 25 MHz) and PR30 current probe (20 A RMS, 100 mV/A).

Compiled in Tab. 1 are basic details of the luminaires used in the tests.

3. Test results for individual luminaires

First current and voltage waveforms were recorded in individual luminaires. Fig. 2 shows voltage and current waveforms in selected luminaires with LED light sources. Besides the voltage and current waveform recording, effective values of voltage and current, and active power were measured in the test. The oscillograph records show that the same type of light source (LED) does not warrant qualitatively similar current waveforms. Power electronic converters, as the components in between light source and wiring terminals, play a vital role here.

The study was limited to an analysis of waveforms in individual phases; current waveforms in a neutral conductor are not considered. This is a simplification, which is not permissible for a detailed analysis of the issues of power loss in the system. The current waveform analysis was limited to the 25th harmonic, but as seen in the waveforms shown in Fig. 2, in some cases significantly higher order harmonics will be important.

Fig. 3 shows voltage and current waveforms in luminaires with metal halide light sources. As before, qualitative differences are evident in the current waveforms, particularly of the sources of the same power rating (MH2 and MH3).

Fig. 4 shows voltage and current waveforms in luminaires with sodium light sources. Selected luminaires had light sources with different rated powers: SOD1 150 W, SOD3 250 W and SOD6 100 W. Qualitative similarities of the current waveforms

No.	Symbol	Luminaire type	Source type	P
				W
1	LED 1	ACRON	LED	50
2	LED 2	ACRON	LED	40
3	LED 3	SELENIUM	LED	85
4	LED 4	ACRON	LED	70
5	LED 5	LUMA 1	LED	166
6	LED 6	MINILUMA	LED	42
7	LED 7	ASTAR	LED	50
8	LED 8	OU 105 GRA	LED	105
9	LED 9	ASTAR	LED	40
10	SOD 1	ACRON	WLS-T E40	150
11	SOD 2	OUS	Master SON-T E40	250
12	SOD 3	SELENIUM	WLS-T E40	250
13	SOD 4	OUS	Master SON-T E40	150
14	SOD 6	MALAGA	Master SON-T E40	100
15	SOD 7	SITECO	Master SON-T E40	100
16	MH 1	LEDA 1	MCW CDO-TT plus E40	150
17	MH 2	ACRON	MCW CDO-TT plus E40	100
18	MH 3	AluRoad	MCW CDO-TT plus E40	100

Tab. 1. Basic details of tested luminaires

in lamps SOD1 and SOD6 can be seen, while that of lamp SOD3 is different.

Qualitative analysis of the presented current waveforms shows that sodium and metal halide lamps (i.e. discharge light sources) are somehow similar. This allows one to assume that if there are different lamps in a phase line, but with light sources of the same type (sodium or metal halide), the current flowing from the power connector will also have a shape similar to

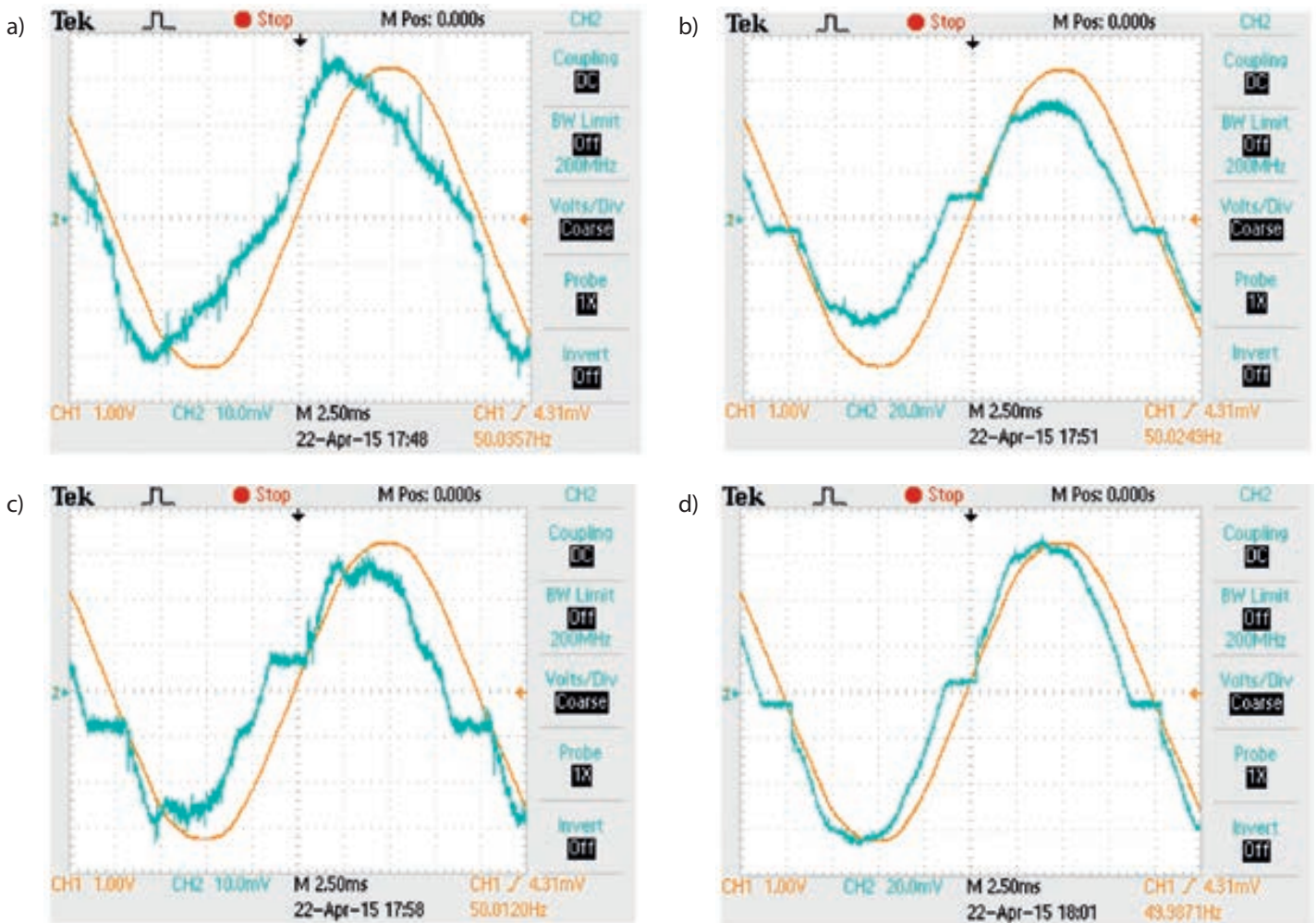


Fig. 2. Waveforms of voltages (CH1 x 100 V/V) and currents (CH2 x 10 A/V) recorded in the steady state operation of luminaires: a) LED2, b) LED3, c) LED6, and d) LED8

those presented for individual luminaires. In the case of lamps with LED light sources waveforms qualitatively different from the currents in individual lamps should be expected. This allows one to assume that if there are different lamps (different power electronic converters) in a phase line with light sources of the same type (LED), the current flowing from the power connector may have a different shape from those presented for individual luminaires. Thus, by appropriate selection of the lamps the resulting current's shape may even be improved, which is essential in the context of the impact of electrical street lighting on the low voltage power distribution grid. This problem becomes interesting in the application for lighting control.

4. Test results in the system model

Tests were conducted for several variants of sets of luminaires with lighting sources mounted in the points of the lighting system's physical model (Fig. 1) corresponding to actual lighting poles. As the first option, a system was simulated wherein three luminaires were connected to pole 1 (100 m away from the power connector) in the following manner: LED8 to phase L1, SOD1 to L2, and MH1 to L3. Measurements were taken at the luminaires' steady state operation in place of their installation (pole 1).

Results in the present case were similar to those obtained in testing each luminaire individually.

As the second option, in addition to the existing luminaires on pole 1, three luminaires were added on pole 4 (190 m away from the power connector) as follows: luminaire LED2 to phase L1, SOD3 to L2, and MH2 to L3. In this way, in each phase of the power connector combined currents are flowing to/from two luminaires. Results of the measurements taken on pole 4 terminals coincided with those obtained in previous individual tests of each luminaire. The results of the measurements taken on pole 1 are shown in Fig. 5. Current waveforms in phases L2 and L3 confirm the assumptions formulated in the previous section. Fig. 5.b clearly shows how the shape is "dominated" by the shape of the current in the lamp with a stronger source (SOD3 250).

As the third option of the luminaires set, in addition to the existing luminaires (on poles 1 and 4), three luminaires were added on pole 8 (300 m away from the power connector) as follows: luminaire LED3 to phase L1, SOD6 to L2, and MH3 to L3. Results of the measurements taken on pole 8 coincided with those obtained in previous individual tests of each luminaire. The results of the measurements taken on pole 1 are shown in Fig. 6. In this way,

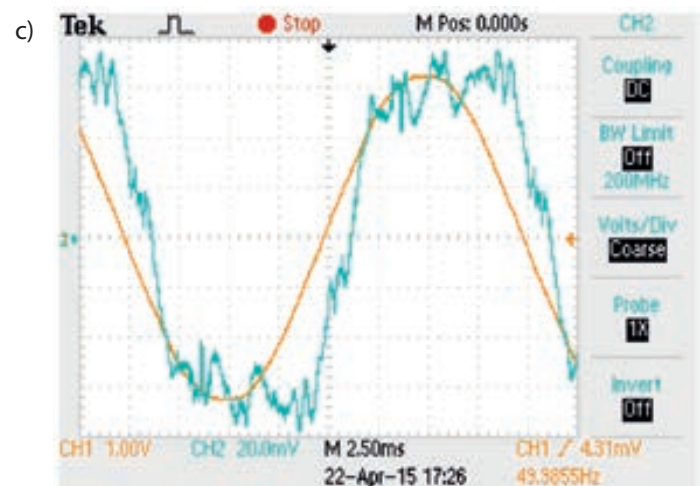
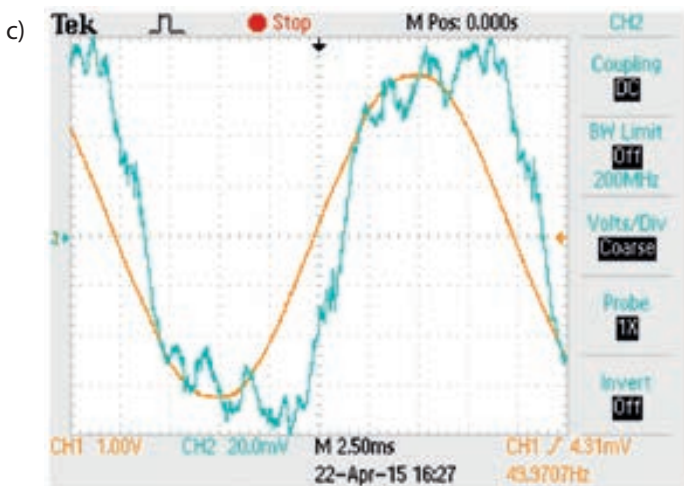
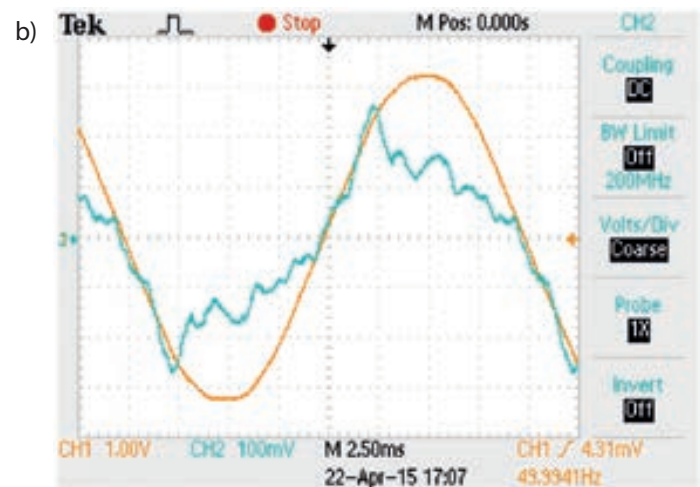
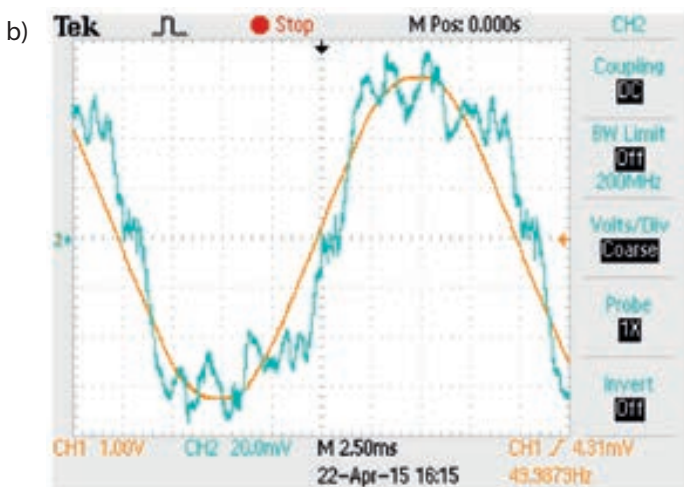
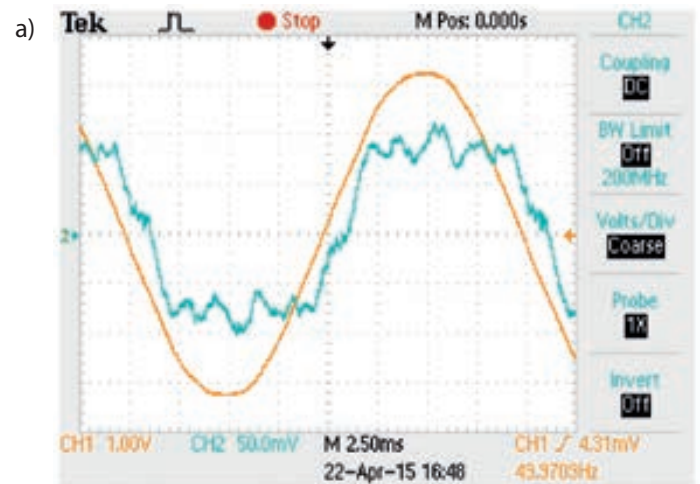
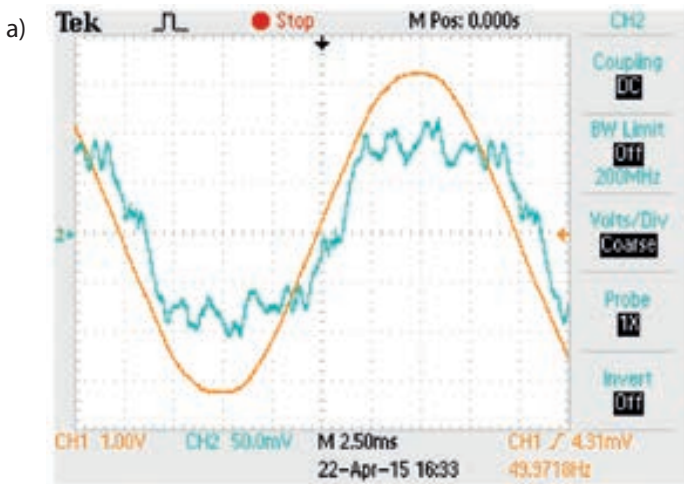


Fig. 3. Waveforms of voltages (CH1 x 100 V/V) and currents (CH2 x 10 A/V) recorded in the steady state operation of luminaires: a) MH1, b) MH2 and c) MH3

Fig. 4. Waveforms of voltages (CH1 x 100 V/V) and currents (CH2 x 10 A/V) recorded in the steady state operation of luminaires: a) SOD1, b) SOD3 and c) SOD6

the currents in each phase of the connector are made up of three streams from/to luminaires with light sources of the same type.

As the third option of the luminaires set in the lighting system with a length of 300 m, to phase L1, on consecutive poles, 8 LED luminaires (LED8, LED2, LED3, LED5, LED6, LED4, LED7, LED9)

were connected to phase L2 – 6 SOD luminaires (SOD1, SOD3, SOD6, SOD2, SOD4, SOD7), and to phase L3 – 3 MH luminaires (MH1, MH2, MH3). The results of measurements taken on pole 1 in phases L1 and L2 are presented in Fig. 7. They qualitatively verify the assumptions formulated in paragraph 4 here about the shape of the combined current in the power connector.

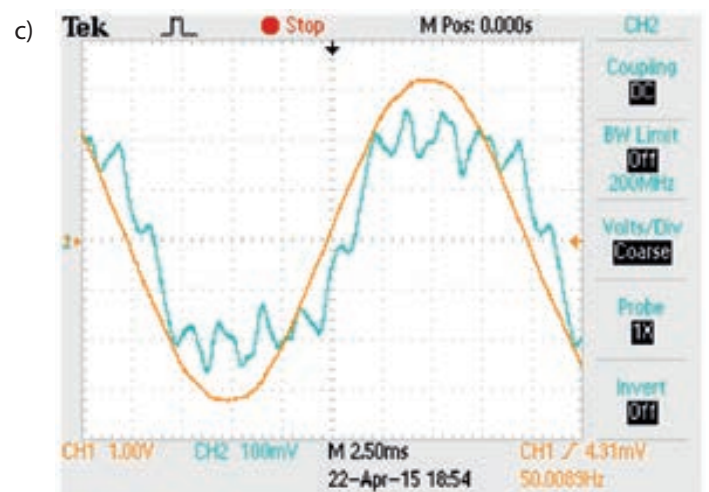
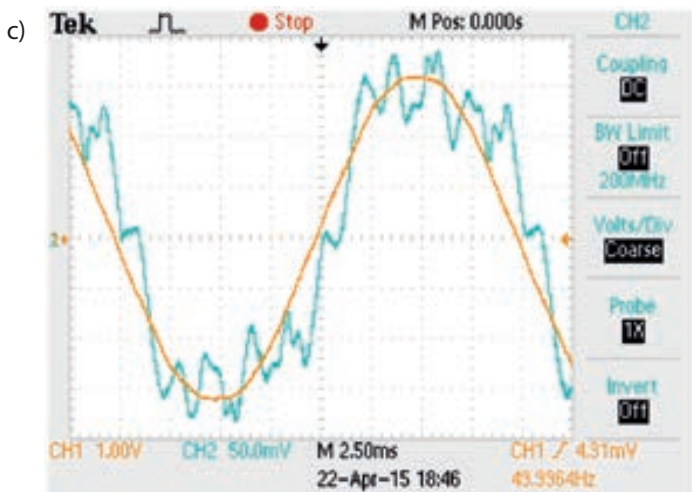
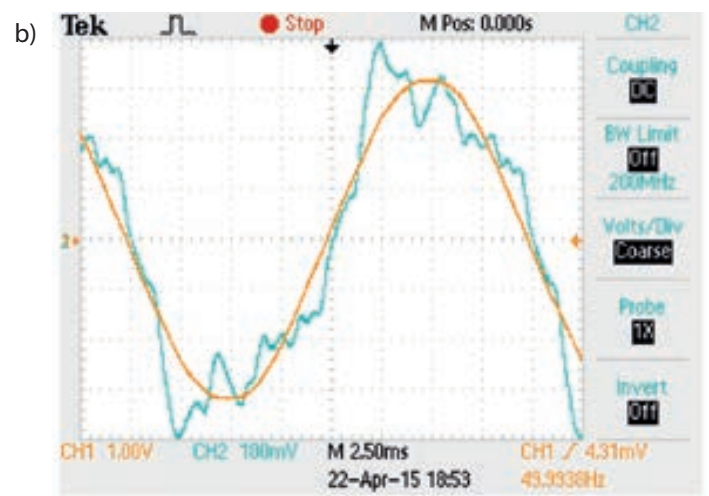
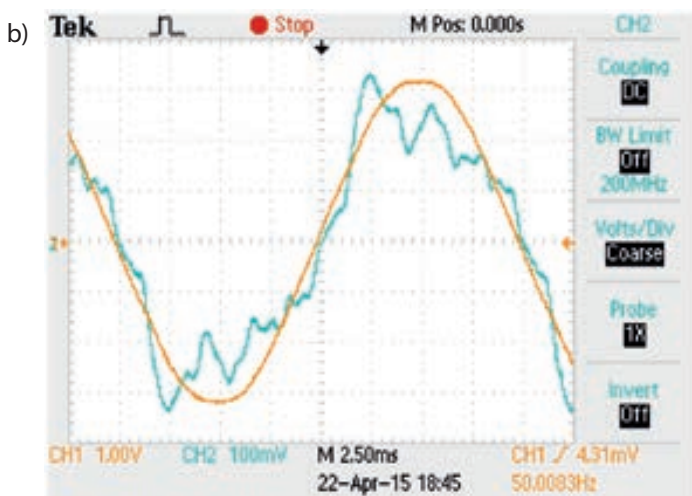
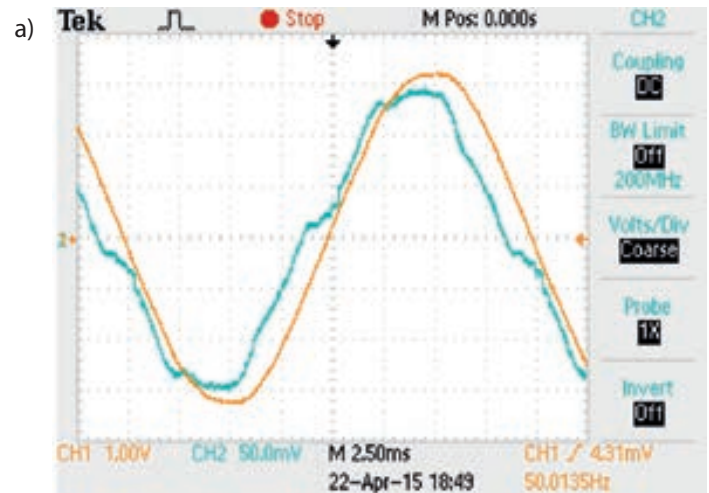
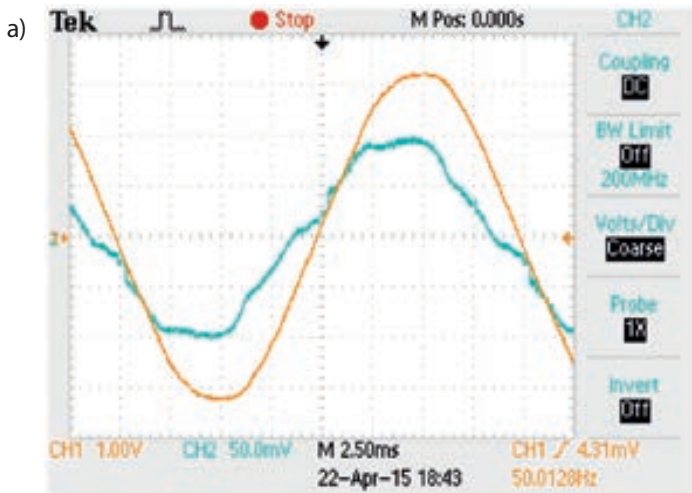


Fig. 5. Waveforms of voltages (CH1 x 100 V/V) and currents (CH2 x 10 A/V) recorded in the first pole's connector (variant 2): a) phase L1, b) phase L2, and c) phase L3

Fig. 6. Waveforms of voltages (CH1 x 100 V/V) and currents (CH3 x 10 A/V) recorded in the first pole's connector (option 2): a) phase L1, b) phase L2, and c) phase L3

5. Quantitative analysis of harmonic currents

Quantitative analysis of harmonic currents flowing in the street lighting wiring (physical model) was based on the amplitude spectrum of higher harmonics (up to 25 harmonic inclusive) and total harmonic distortion factor. The amplitude spectrum

was obtained using the classical representation of periodic functions by Fourier series. The input was the instantaneous (discrete) values of the waveform measured by a digital oscilloscope (sampling frequency 100 kHz). The total harmonic distortion factor was calculated from the following formula,

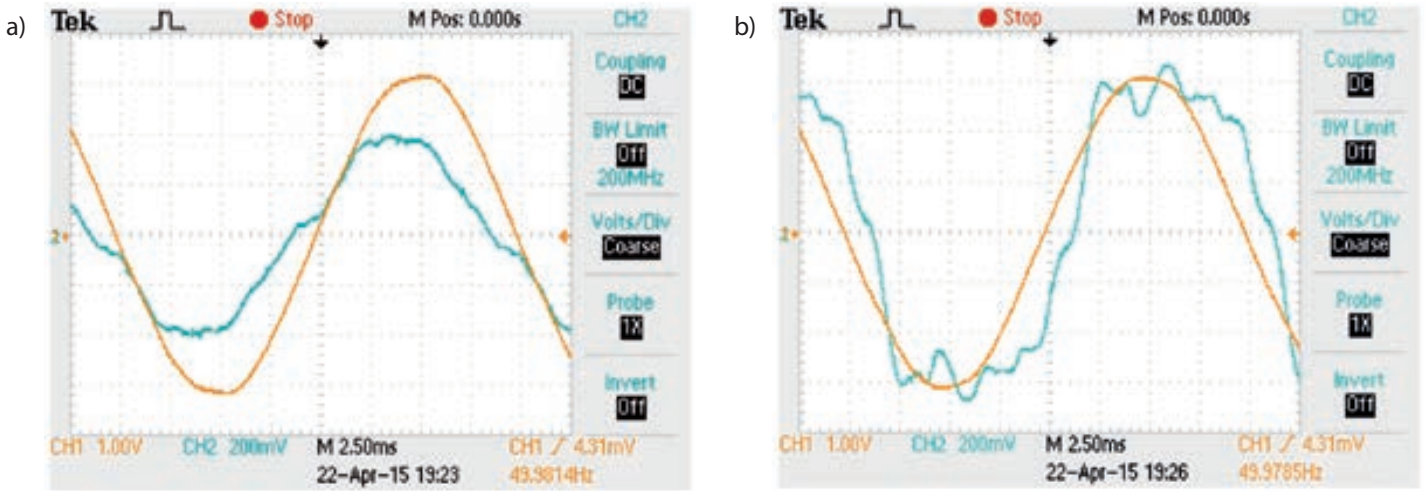


Fig. 7. Waveforms of voltages (CH1 x 100 V/V) and currents (CH 2 x 10 A/V) recorded in phase L1 (a) and L2 (b) in the first pole’s connector (option 4)

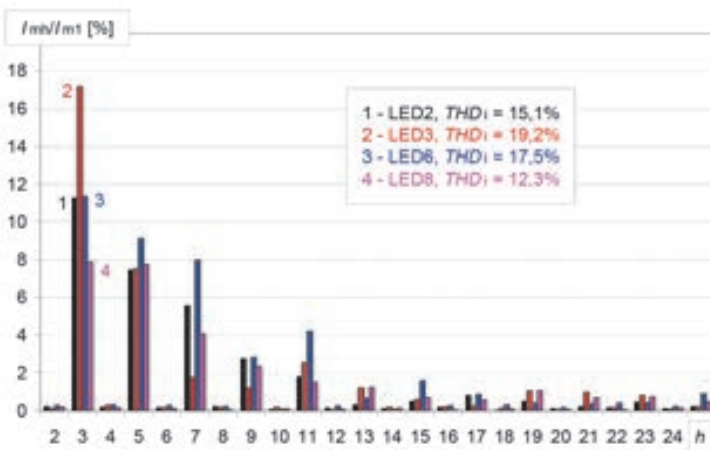


Fig. 8. Amplitude spectrum (up to 25 harmonic) of the currents to/from luminaires: LED2, LED3, LED6 and LED8

$$THDi = 100 \cdot \sqrt{\sum_{h=2}^{25} \left(\frac{I_{mh}}{I_{m1}} \right)^2} \quad (1)$$

where:

I_{mh} – amplitude of h harmonic current, I_{m1} – amplitude of the fundamental harmonic current.

Fig. 8–10 show the quantitative analysis results for luminaire types: LED (Fig. 8), MH (Fig. 9) and SOD (Fig. 10), tested individually. Analysis of the total harmonic distortion factors for the individual LED lamps shows that the absolute difference between the highest and lowest values for these selected lamps is 6.9%. However, to evaluate the shape, the amplitude spectra should be analysed, which differ for these selected luminaires. Smaller differences are obtained for the lamps of SOD and MH types.

Fig. 11 shows the results of quantitative analysis in the form of amplitude spectra of the currents in the power connector’s 50

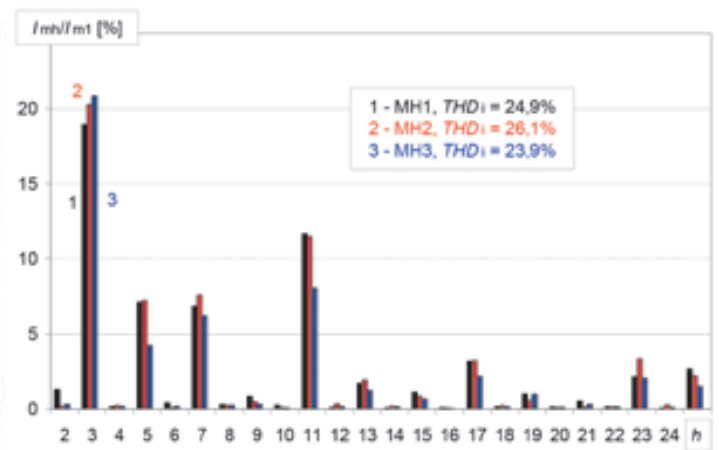


Fig. 9. Amplitude spectrum (up to 25 harmonic) of the currents to/from luminaires: MH1, MH2 and MH3

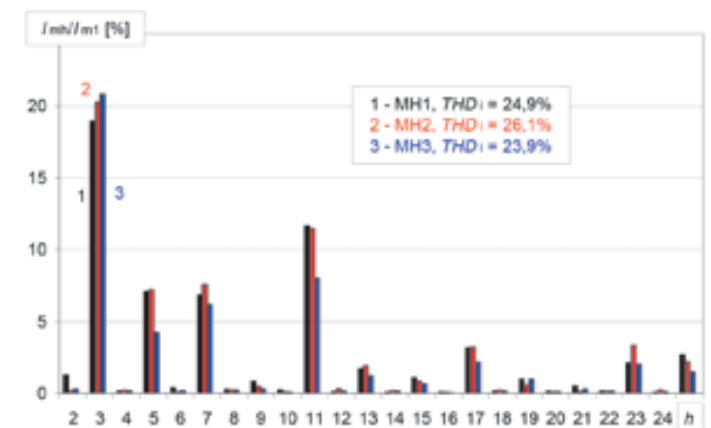


Fig. 10. Amplitude spectrum (up to 25 harmonic) of the currents to/from luminaires: SOD1, SOD3 and SOD6

two phases L1 and L2, in various configurations of the test system. The total harmonic distortion factor is also quoted. The results confirm that combining various types of lamps, but

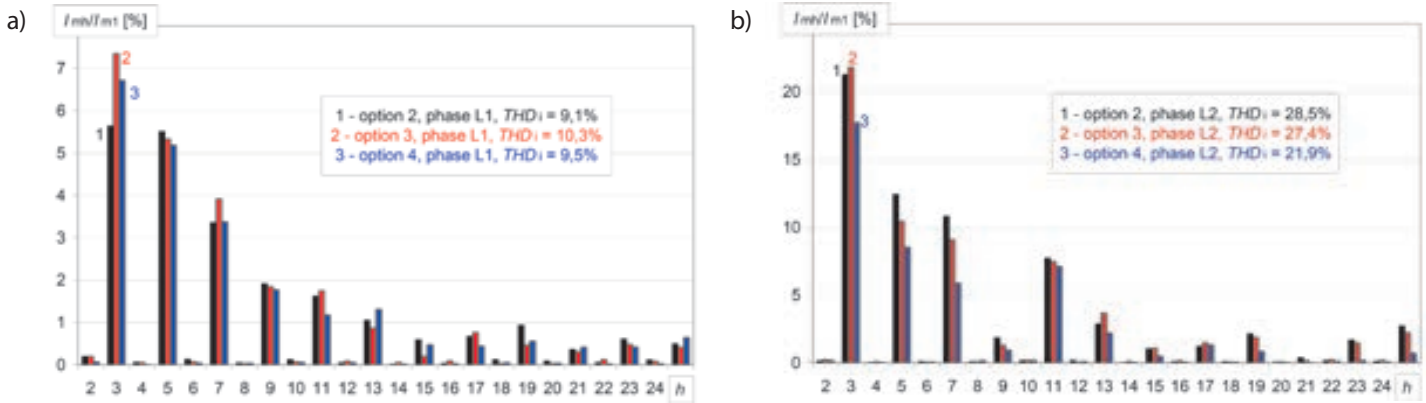


Fig. 11. Amplitude spectrum (up to 25 harmonics) of currents in L1 (a) and L2 (b) on pole 1, in various options

with the same type of LED light sources, reduces the content of the predominant harmonic orders (3, 5 and 7) in the resulting current waveform (in the power connector), thereby reducing the total harmonic distortion factor.

6. Summary

These experimental results are a contribution to the continuing study of the real impact of harmonic currents on power system components (mainly power losses), and the ways to mitigate their adverse effects.

There are specific electrical systems where the adverse impact on a low voltage power distribution grid can be reduced in a natural way (without additional systems and funding). These aspects should be analysed, especially where smart control systems are in place.

The results presented here are the outcome of the project entitled: "Design of Smart Street Lighting Control System" co-funded under the GEKON programme.

REFERENCES

1. K. Bieliński, "Monitorowanie jako narzędzie wspomagające zarządzanie energią" [Monitoring as an energy management supporting tool], *Rynek Energii*, No. 6, 2012, pp. 10–14.
2. K. Bieliński, "Monitorowanie czynne procesu oświetlania ulicznego" [Active monitoring of street lighting process], *Zarządzenie Energią i Teleinformatyka ZET 2015, Matematyka i Studia*, KAPRINT, Lublin, pp. 39–47.
3. Polish standard PN-EN 13201 (1-4): 2007 Road lighting, PKN Warsaw 2007.
4. S. Czapp, "Odształcenie prądu pobieranego przez urządzenia oświetleniowe i jego wpływ na instalację zasilającą" [Deformation of current in lighting devices and its impact on the supply grid], *Acta Energetica*, No. 1, 2009, pp. 25–40.
5. S. Czapp, "Efektywność energetyczna urządzeń oświetleniowych a jakość energii elektrycznej" [Energy efficiency of lighting devices and electricity quality], *Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej*, No. 31, 2012.
6. M. Maciążek, M. Pasko, "Wybrane metody eliminacji wyższych harmonicznnych z przebiegów prądów i napięć" [Selected methods of higher harmonics elimination from voltage and current waveforms], *Elektronika*, Vol. 51, No. 2, 2010, pp. 9–14.
7. S. Cieślík, P. Boniewicz, "Wpływ wyższych harmonicznnych napięcia na pracę odbioru zasilanego przez transformator" [Impact of higher harmonic voltage on load powered by transformer], *Proceedings of XVI Symposium, "Modern power, telecommunication, and information equipment and services"*, Poznań 2013, pp. 28–31.
8. Polish standard PN-EN 61000-3-2: 2007, Electromagnetic compatibility (EMC) Part 2-3: Limits. Limits for harmonic current emissions (load current ≤ 16 A per phase).

Kazimierz Bieliński

e-mail: kbiel@utp.edu.pl

University of Technology and Life Sciences in Bydgoszcz

Graduated in electrical engineering from the Academy of Technology and Agriculture in Bydgoszcz (1980). In 1993 he defended his doctorate at the Technical University of Lublin. His research interests include: energy efficiency, systems of active monitoring of technical facilities, energy management, issues related to the operation of energy and power systems with distributed generation. Author and co-author of over 60 articles and scientific papers and 10 scientific monographs and numerous energy audits and feasibility studies of energy effectiveness projects.

Sławomir Cieślik

University of Technology and Life Sciences in Bydgoszcz

e-mail: slavcies@utp.edu.pl

Graduated in electrical engineering from the Academy of Technology and Agriculture in Bydgoszcz (1995). In 2000 he defended his doctorate at the Faculty of Electrical and Control Engineering of Gdansk University of Technology. In 2014 he gained the postdoctoral degree at the Faculty of Electrical Engineering of Poznań University of Technology. His research interests relate to mathematical modelling and computer simulation of complex electromechanical and electrical power systems, including digital simulation of power systems in real time, and issues of power systems operation, particularly with distributed generation. Author of over 95 articles and research papers and 2 scientific monographs. Author and consultant of over 300 studies associated with the connection of generating units to a power system.

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 45–52. When referring to the article please refer to the original text.

PL

Eksperymentalne badania zawartości wyższych harmonicznych w przebiegach prądów w instalacji oświetlenia ulicznego

Autorzy

Kazimierz Bieliński
Sławomir Cieślík

Słowa kluczowe

wyższe harmoniczne, oświetlenie uliczne

Streszczenie

Wymagania dotyczące poprawy efektywności energetycznej skłaniają eksploatatorów oświetlenia ulicznego do zmniejszenia ilości energii zużywanej przez same lampy, ale również do minimalizacji strat energii w instalacji. W tym celu dużym zainteresowaniem cieszą się inteligentne systemy sterowania oświetleniem. Jednym z ważnych aspektów dotyczących zagadnień energetycznych oraz jakościowych energii elektrycznej jest zawartość wyższych harmonicznych prądów w instalacji oświetlenia ulicznego, co było przedmiotem badań eksperymentalnych, których wyniki zaprezentowano w tym artykule.

1. Wstęp

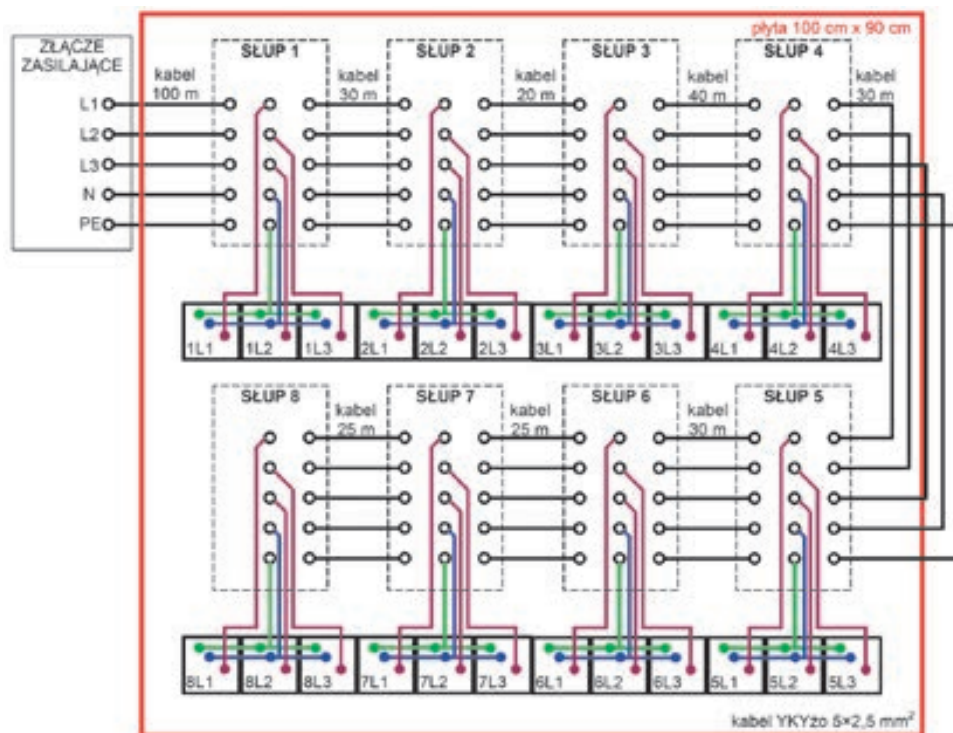
Jednym z ważnych aspektów poprawy efektywności energetycznej, ekonomicznej i ekologicznej jest zastosowanie inteligentnych algorytmów sterowania, regulacji i kompensacji zakłóceń w oświetleniu ulicznym [1].

Najważniejsze wymagania stawiane oświetleniu ulicznemu (wg normy PN-EN 13201-2, dobór klas oświetlenia ME, CE, S, A, ES, EV do sytuacji oświetleniowych) dotyczą: zapewnienia użytkownikom wysokiej jakości oświetlenia jezdni, chodnika, pobocza (obszaru użytkowego); dobrego rozpoznawania (zdolność rozróżniania

kształtów i barw), postrzegania; ograniczenia wpływu otoczenia/środowiska, niepowodowania przykrych odczuć (oślnienia); bezpieczeństwa w strefach konfliktowych [2].

Problem ten można rozpatrywać w kategoriach zagadnienia optymalizacyjnego, w którym funkcją celu jest minimalizacja poziomu zużycia energii elektrycznej przez instalacje oświetlenia ulicznego. Warunki ograniczające determinowane są głównie przez wymagania norm oświetlenia [3]. Poszukuje się praktycznych możliwości ograniczenia ilości zużywanej energii elektrycznej oraz minimalizacji kosztów

eksploatacji instalacji oświetlenia ulic, m.in. z zastosowaniem inteligentnego systemu sterowania oświetleniem ulicznym (ISSOU). Problematyka minimalizacji poboru mocy przez oświetlenie nie może pomijać zagadnień strat mocy w instalacji elektrycznej oświetlenia, w tym spowodowanych występowaniem wyższych harmonicznych w przebiegach prądów. Zagadnienie istnienia harmonicznych prądów ma zasadnicze znaczenie w ocenie współpracy instalacji oświetlenia ulicznego z elektroenergetyczną siecią zasilającą niskiego napięcia [4–6]. Jak wynika z publikacji [7], zagadnienia dotyczące wpływu wyższych harmonicznych



Rys. 1. Schemat poglądowy tablicy połączeń w modelu fizycznym instalacji oświetlenia ulicznego

na elementy systemu elektroenergetycznego nie są do końca rozwiązane.

Jednym z zasadniczych elementów ISSOU jest energoelektroniczny sterownik, którego głównym zadaniem jest sterowanie źródłem światła w pojedynczej oprawie oświetleniowej. Bardzo ważne są charakterystyki napięciowo-prądowe przekształtnika energoelektronicznego oraz w ogólności układów, które są stosowane do zasilania źródeł światła. Są to charakterystyki nieliniowe, co w efekcie powoduje odkształcenia od sinusoidy przebiegów prądów, a nawet może wpływać na kształt przebiegów napięć w sieci elektroenergetycznej niskiego napięcia. Kompatybilność elektromagnetyczna w zakresie poziomów dopuszczalnych emisji harmonicznym prądu urządzeń o prądzie znamionowym mniejszym od 16 A regulowana jest normą [8]. Istnieją jednak instalacje specyficzne, w tym właśnie instalacja elektryczna oświetlenia ulicznego, które charakteryzują się tym, że poza urządzeniami dedykowanymi (np. lampy) nie ma innych urządzeń, w tym możliwości przyłączania urządzeń dowolnego typu. Ułatwia to rozwiązania zadań dotyczących np. komunikacji z wykorzystaniem przewodów instalacji elektroenergetycznej (PLC), ale również daje przyczyny do specyficznego podejścia do problemów związanych z istnieniem wyższych harmonicznym prądów.

W Instytucie Inżynierii Elektrycznej Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy opracowano

stanowisko eksperymentalne, które ma służyć do badania charakterystyk użytkowych ISSOU. Jednym z elementów badań są zagadnienia dotyczące jakości energii elektrycznej w zakresie wyższych harmonicznym napięć i prądów.

2. Opis stanowiska eksperymentalnego

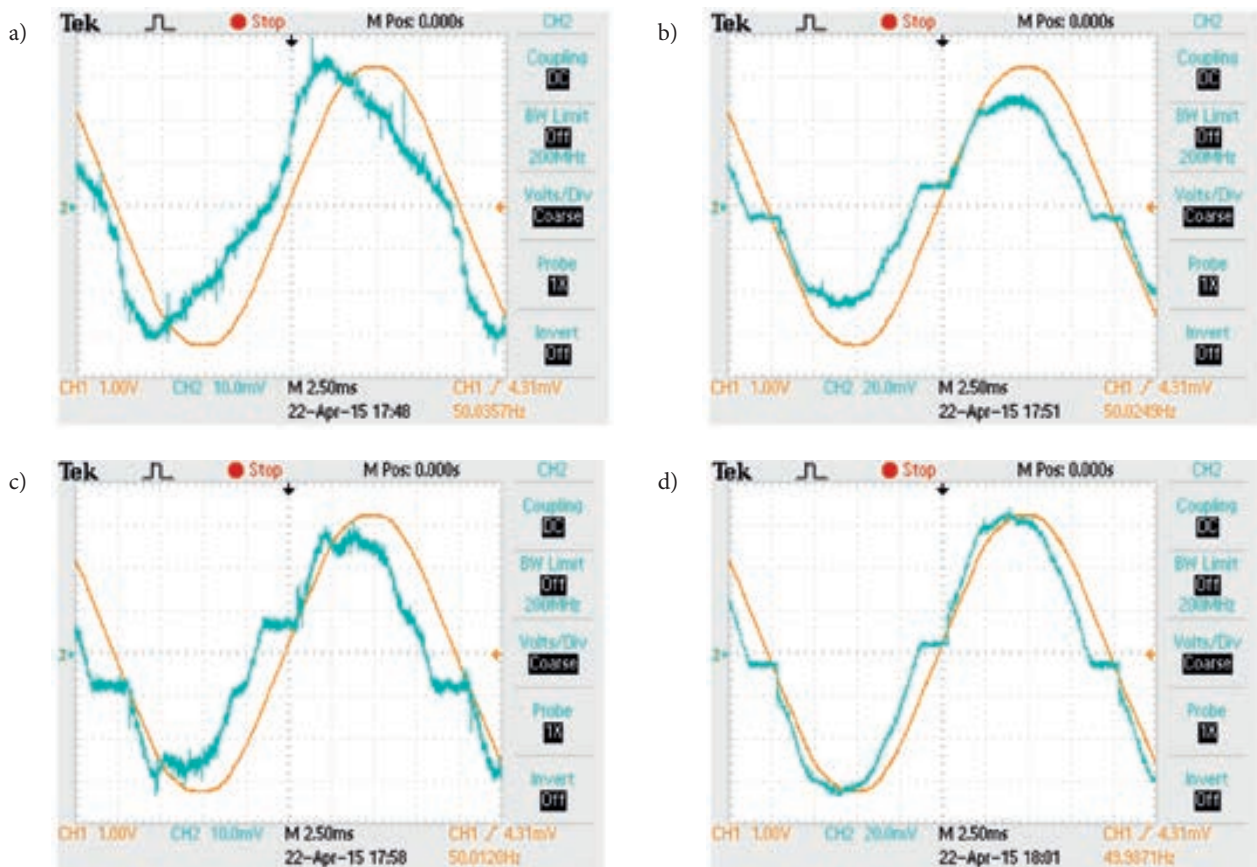
Na rys. 1 przedstawiono schemat poglądowy tablicy połączeń modelu fizycznego instalacji oświetlenia ulicznego. W modelu fizycznym

jest możliwość podłączenia opraw oświetleniowych w ośmiu punktach (słupach), które są w następujących odległościach od złącza zasilającego: 100 m pierwszy punkt, drugi 30 m dalej, następnie 20, 40, 30, 30, 25 oraz 25 m. Instalacja wykonana jest kablem YKYżo 5 × 2,5 mm² (7,41 Ω/km).

Do pomiarów mocy, natężenia prądu oraz napięcia pojedynczych opraw wykorzystano cyfrowy miernik mocy WT210, produkcji Yokogawa, który pozwala

Lp.	Symbol	Typ oprawy	Typ źródła	P	
				W	
1	LED 1	ACRON	LED	50	
2	LED 2	ACRON	LED	40	
3	LED 3	SELENIUM	LED	85	
4	LED 4	ACRON	LED	70	
5	LED 5	LUMA 1	LED	166	
6	LED 6	MINILUMA	LED	42	
7	LED 7	ASTAR	LED	50	
8	LED 8	OU 105 GRA	LED	105	
9	LED 9	ASTAR	LED	40	
10	SOD 1	ACRON	WLS-T E40	150	
11	SOD 2	OUS	Master SON-T E40	250	
12	SOD 3	SELENIUM	WLS-T E40	250	
13	SOD 4	OUS	Master SON-T E40	150	
14	SOD 6	MALAGA	Master SON-T E40	100	
15	SOD 7	SITECO	Master SON-T E40	100	
16	MH 1	LEDA 1	MCW CDO-TT plus E40	150	
17	MH 2	ACRON	MCW CDO-TT plus E40	100	
18	MH 3	AluRoad	MCW CDO-TT plus E40	100	

Tab. 1. Podstawowe dane badanych opraw oświetleniowych



Rys. 2. Przebiegi napięć (CH1 × 100 V/V) i prądów (CH2 × 10 A/V) zarejestrowane w stanach ustalonych pracy opraw: a) LED2, b) LED3, c) LED6 oraz d) LED8

mierzyć moc z błędem podstawowym 0,1% (zakres częstotliwości od 0,5 Hz do 100 kHz). Rejestracji przebiegów prądów i napięć dokonano za pomocą oscyloskopu cyfrowego TDS 2024 (200 MHz, 2 GS/s) z wykorzystaniem sond napięciowej TESTEC (1:100, 25 MHz) i prądowej PR30 (20 A RMS, 100 mV/A).

W tab. 1 zestawiono podstawowe dane dotyczące opraw wykorzystywanych w badaniach eksperymentalnych.

3. Wyniki badań dla pojedynczych opraw

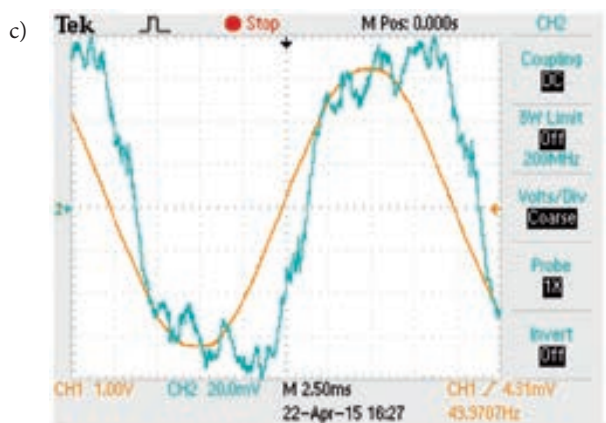
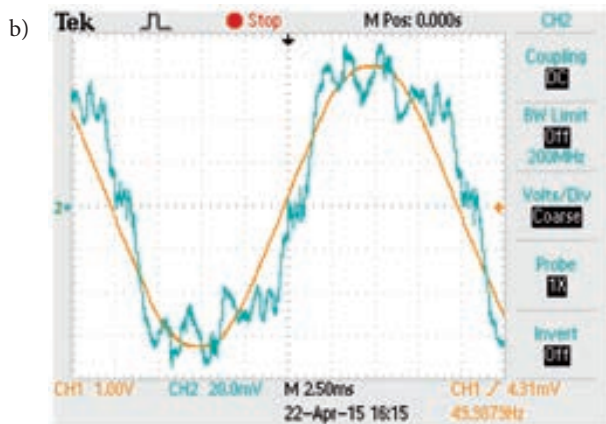
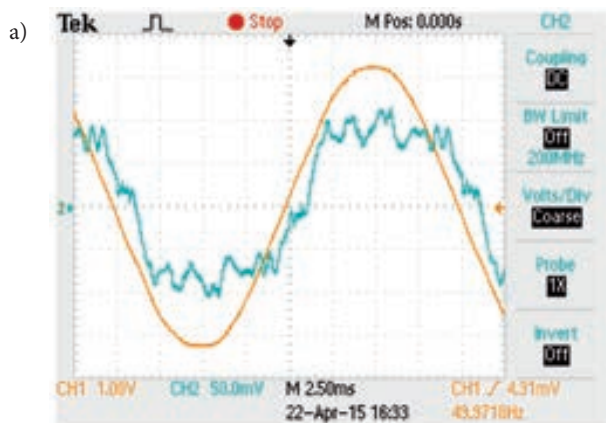
W pierwszej kolejności zarejestrowano przebiegi czasowe prądów i napięć dla poszczególnych opraw oświetleniowych.

Na rys. 2 przedstawiono przebiegi napięć i prądów dla wybranych opraw ze źródłami światła typu LED. Poza rejestracją oscylogramów napięcia i prądu, podczas badań mierzono wartości skuteczne napięć i prądów oraz wartość mocy czynnej. Na oscylogramach widać, że ten sam typ źródła światła (LED) nie gwarantuje podobnego jakościowo przebiegu prądu w czasie. Zasadniczą rolę odgrywają tutaj przekształtniki energoelektroniczne, które są elementami pośredniczącymi pomiędzy źródłem światła (LED) i zaciskami instalacji elektrycznej.

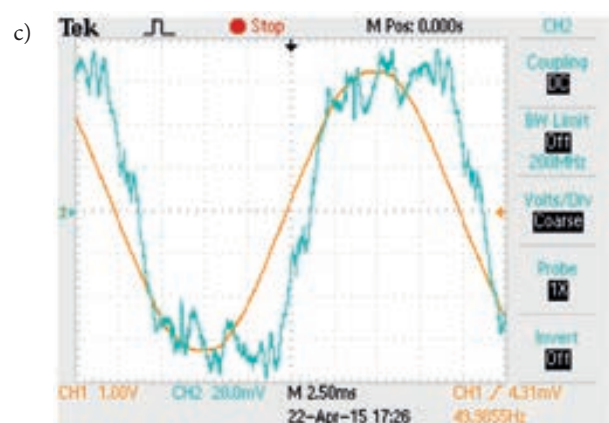
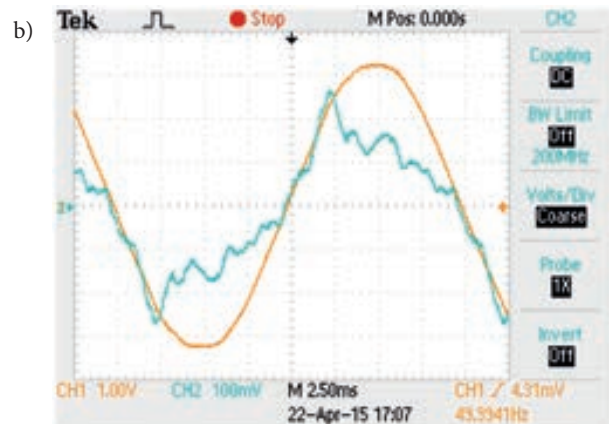
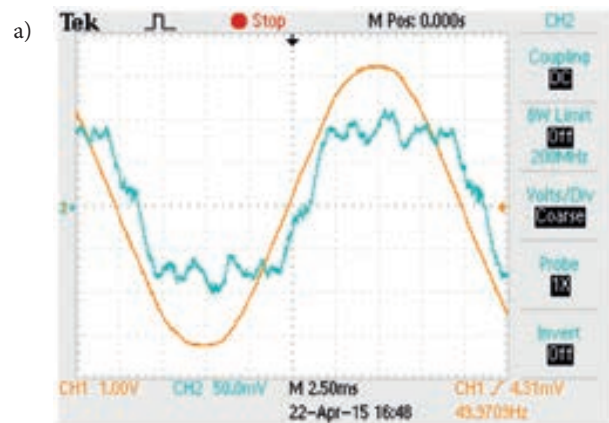
W badaniach ograniczono się do analizy przebiegów czasowych w poszczególnych fazach, nie rozpatruje się przebiegów czasowych

prądów w przewodzie neutralnym. Jest to uproszczenie, które nie jest dopuszczalne w przypadku szczegółowej analizy zagadnień strat mocy w instalacji. Analizę przebiegów prądów ograniczono do 25 harmonicznej, chociaż jak widać na przebiegach pokazanych na rys. 2, w niektórych przypadkach znaczenie będą miały harmoniczne znacznie wyższych rzędów.

Na rys. 3 przedstawiono przebiegi napięć i prądów dla opraw z metalohalogenowymi źródłami światła. Podobnie jak poprzednio widoczne są jakościowe różnice w przebiegach prądów, szczególnie widoczne dla źródeł o tej samej mocy znamionowej (MH2 i MH3).



Rys. 3. Przebiegi napięć (CH1 $\times 100$ V/V) i prądów (CH2 $\times 10$ A/V) zarejestrowane w stanach ustalonych pracy opraw: a) MH1, b) MH2 oraz c) MH3



Rys. 4. Przebiegi napięć (CH1 $\times 100$ V/V) i prądów (CH2 $\times 10$ A/V) zarejestrowane w stanach ustalonych pracy opraw: a) SOD1, b) SOD3 oraz c) SOD6

Na rys. 4 przedstawiono przebiegi napięć i prądów dla wybranych opraw ze sodowymi źródłami światła. Wybrane oprawy różnią się m.in. mocą znamionową źródeł światła SOD1 150 W, SOD3 250 W i SOD6 100 W. Można zauważyć podobieństwo jakościowe przebiegów prądów lamp SOD1 i SOD6, natomiast przebieg prądu lampy SOD3 jest już odmienny.

Analizując przedstawione przebiegi prądów w ujęciu jakościowym, można stwierdzić, że dla lamp sodowych i metalohalogenkowych (czyli wyładowczych źródeł światła), uzyskuje się pewne podobieństwo. Pozwala to na przypuszczenie, że jeżeli w ciągu liniowym w danej fazie będą różne lampy,

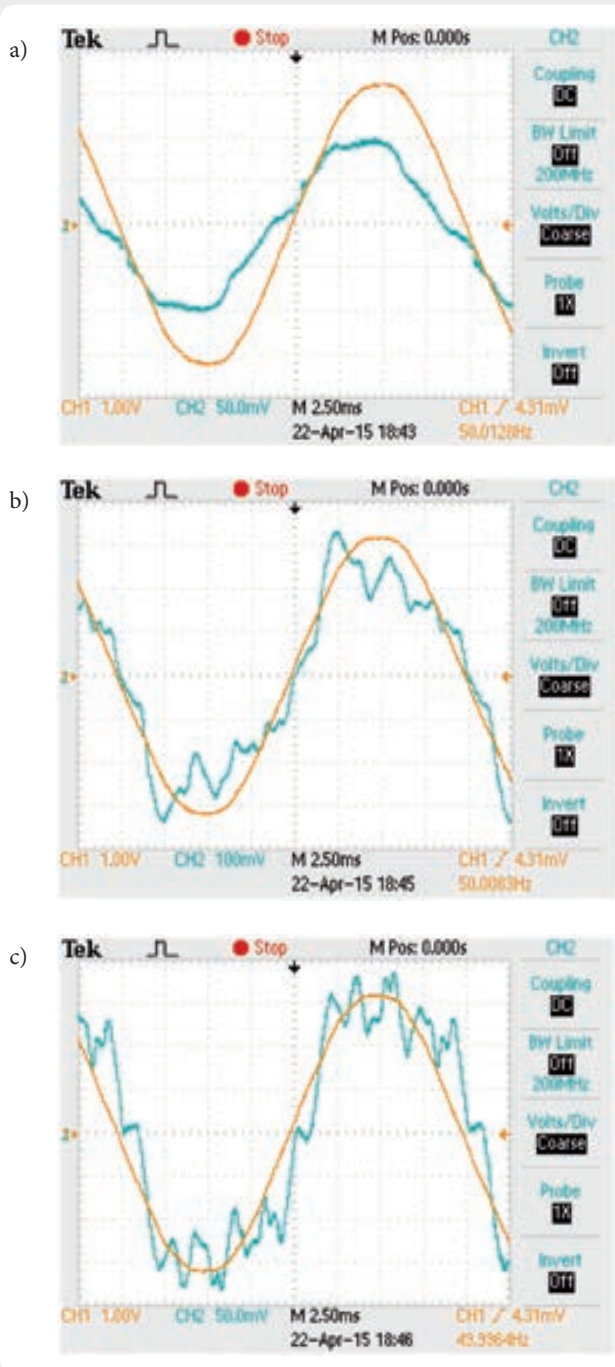
ale ze źródłami światła tego samego typu (sodowe lub metalohalogenkowe), to prąd wypływający ze złącza zasilającego również będzie miał kształt zbliżony do prezentowanych dla pojedynczych opraw.

W przypadku lamp ze źródłami światła typu LED należy się spodziewać różnych jakościowo przebiegów prądów pojedynczych lamp. Pozwala to na przypuszczenie, że jeżeli w ciągu liniowym, w danej fazie będą różne lampy (różne przekształtniki energoelektroniczne) ze źródłami światła tego samego typu (LED), to prąd wypływający ze złącza zasilającego może mieć odmienny kształt od prezentowanych dla pojedynczych opraw. A zatem przez odpowiedni dobór

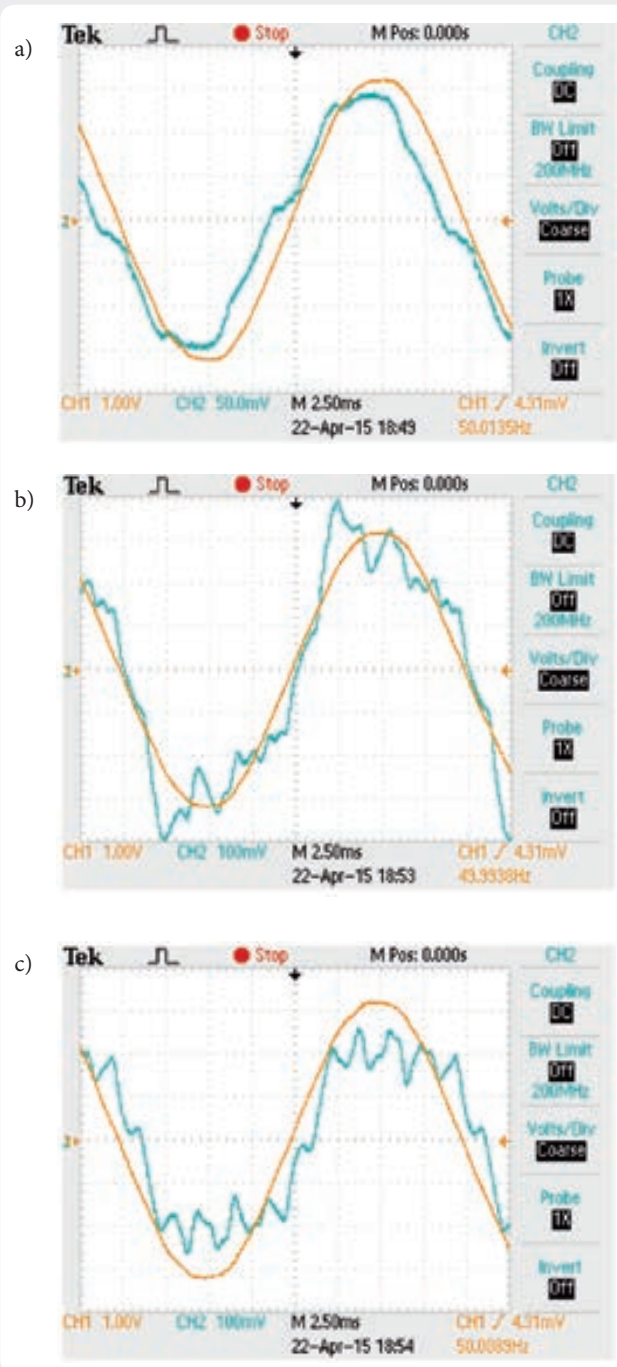
lamp możliwe będzie nawet poprawienie kształtu prądu wypadkowego, co ma zasadnicze znaczenie w kontekście oddziaływania instalacji elektrycznej oświetlenia ulicznego na elektroenergetyczną sieć dystrybucyjną niskiego napięcia. Zagadnienie to staje się interesujące w przypadku zastosowania sterowania oświetleniem.

4. Wyniki badań w modelu instalacji

Następnie przeprowadzono badania eksperymentalne dla kilku wariantów zestawów opraw ze źródłami światła montowanych w punktach modelu fizycznego instalacji oświetleniowej (rys. 1), odpowiadających rzeczywistym słupom oświetleniowym.



Rys. 5. Przebiegi napięć (CH1 × 100 V/V) i prądów (CH2 × 10 A/V) zarejestrowane w złączu pierwszego słupa (wariant 2): a) faza L1, b) faza L2 oraz c) faza L3



Rys. 6. Przebiegi napięć (CH1 × 100 V/V) i prądów (CH2 × 10 A/V) zarejestrowane w złączu pierwszego słupa (wariant 3): a) faza L1, b) faza L2 oraz c) faza L3

W pierwszym wariantie symulowano układ, w którym do słupa nr 1 (odległego o 100 m od złącza zasilającego) instalacji oświetleniowej podłączono trzy oprawy w następujący sposób: do fazy L1 podłączono oprawę LED8, do fazy L2 podłączono oprawę SOD1 oraz do fazy L3 podłączono oprawę MH1. Pomiary wykonano dla stanu ustalonego pracy opraw w miejscu ich instalacji (słup 1). Dla omawianego przypadku uzyskano wyniki podobne do tych, jakie otrzymano w badaniach każdej oprawy pojedynczo.

W drugim wariantie, oprócz już pracujących opraw włączonych na słupie nr 1, dołączono kolejne oprawy do słupa oświetleniowego nr 4 (odległego o 190 m od złącza zasilającego) w następujący sposób: do fazy L1 podłączono oprawę LED2, do fazy L2 dołączono oprawę SOD3 oraz do fazy L3 podłączono oprawę MH2. W ten sposób w każdej fazie w złączu zasilającym płyną prądy wypadkowe z dwóch opraw. Wyniki pomiarów przeprowadzonych na zaciskach słupa nr 4 pokrywały się z wynikami otrzymanymi we wcześniejszych, indywidualnych badaniach każdej oprawy. Natomiast wyniki pomiarów dokonanych na słupie nr 1 przedstawiono na rys. 5. Przebiegi prądów w fazach L2 i L3 potwierdzają przypuszczenia sformułowane w poprzednim punkcie artykułu. Na rys. 5b wyraźnie widać

„dominację” kształtu przez kształt prądu lampy ze źródłem światła o większej mocy (SOD3 250 W).

W trzecim wariantie połączeń opraw w instalacji oświetleniowej, obciążonej już oprawami na słupach 1 i 4, dołączono kolejne oprawy do słupa nr 8 (odległego o 300 m od złącza zasilającego) w następujący sposób: do fazy L1 podłączono oprawę LED3, do fazy L2 dołączono oprawę SOD6 oraz do fazy L3 podłączono oprawę MH3. Wyniki pomiarów przeprowadzonych na słupie nr 8 pokrywały się z wynikami otrzymanymi we wcześniejszych, indywidualnych badaniach każdej oprawy. Natomiast wyniki pomiarów dokonanych na słupie nr 1 zaprezentowano na rys. 6. W ten sposób w każdej fazie w złączu zasilającym płyną prądy wypadkowe z trzech opraw, każda ze źródłem światła tego samego typu.

W czwartym wariantie połączeń opraw w instalacji oświetleniowej o długości 300 m do fazy L1 na kolejnych słupach instalacji włączono 8 opraw typu LED (LED8, LED2, LED3, LED5, LED6, LED4, LED7, LED9), do fazy L2 dołączono 6 opraw typu SOD (SOD1, SOD3, SOD6, SOD2, SOD4, SOD7), natomiast do fazy L3 dołączono 3 oprawy typu MH (MH1, MH2, MH3). Wyniki pomiarów przeprowadzonych na słupie nr 1 w fazach L1 i L2 zaprezentowano na rys. 7. Jakościowo zostały potwierdzone

sformułowane w punkcie 4 tego artykułu przypuszczenia dotyczące kształtu prądów wypadkowych w złączu zasilającym.

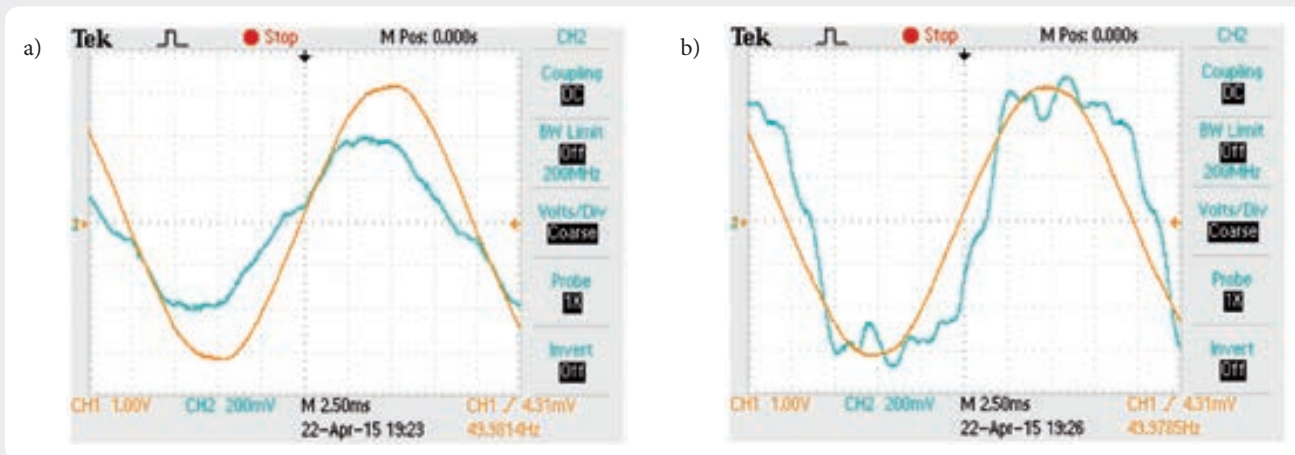
5. Analiza ilościowa wyższych harmonicznych prądów

Analiza ilościowa zawartości wyższych harmonicznych w prądach płynących w przewodach instalacji elektrycznej oświetlenia ulicznego (modelu fizycznego) została dokonana na podstawie widma amplitudowego wyższych harmonicznych (do 25 harmonicznej włącznie) oraz całkowitego współczynnika odkształcenia harmonicznymi. Widmo amplitudowe uzyskano przy zastosowaniu klasycznego rozkładu funkcji okresowych w szereg Fouriera. Danymi wejściowymi były wartości chwilowe (dyskretne) przebiegu uzyskane za pomocą oscyloskopu cyfrowego (częstotliwość próbkowania 100 kHz). Całkowity współczynnik odkształcenia harmonicznymi obliczono wg zależności

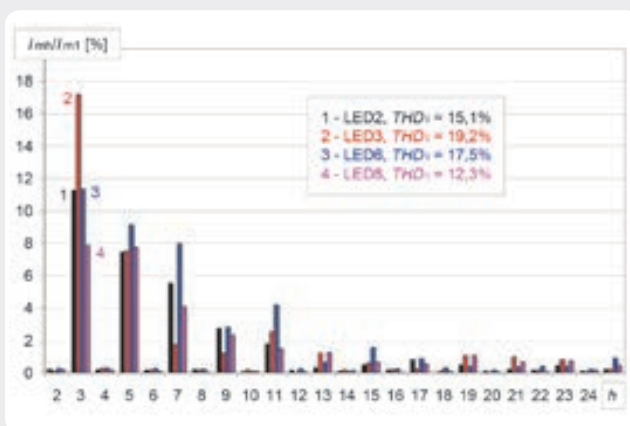
$$THDi = 100 \cdot \sqrt{\sum_{h=2}^{25} \left(\frac{I_{mh}}{I_{m1}} \right)^2} \quad (1)$$

gdzie:

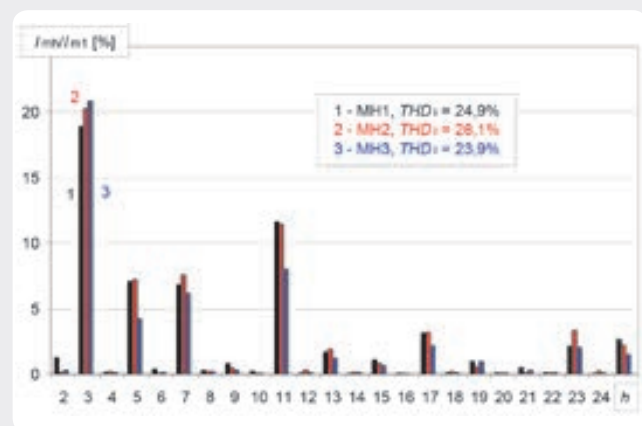
I_{mh} – amplituda h -tej harmonicznej prądu,
 I_{m1} – amplituda harmonicznej podstawowej prądu.



Rys. 7. Przebiegi napięć (CH1 × 100 V/V) i prądów (CH2 × 10 A/V) zarejestrowane w fazie L1 (a) oraz L2 (b) w złączu pierwszego słupa w wariantie 4



Rys. 8. Widmo amplitudowe (do 25 harmonicznej) prądów dla opraw: LED2, LED3, LED6 oraz LED8



Rys. 9. Widmo amplitudowe (do 25 harmonicznej) prądów dla opraw: MH1, MH2 oraz MH3

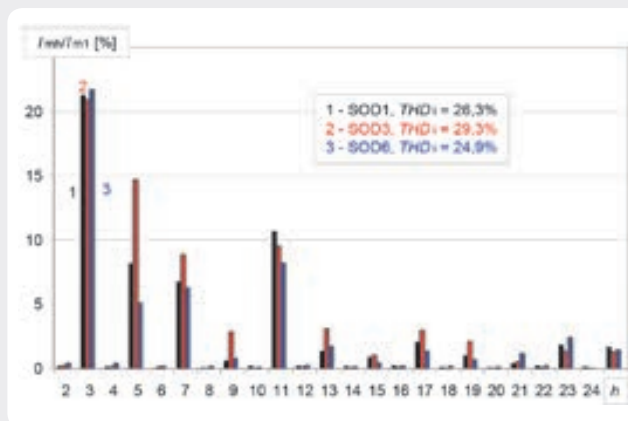
Na rys. 8–10 przedstawiono wyniki analizy ilościowej dla opraw typu: LED (rys. 8), MH (rys. 9) i SOD (rys. 10), badanych pojedynczo. Analizując wartości całkowitego współczynnika odkształcenia harmonicznymi dla poszczególnych lamp LED, można zaobserwować, że bezwzględna różnica pomiędzy wartością najwyższą i najniższą dla tych wybranych lamp wynosi 6,9%. Jednak do oceny kształtu należy analizować widma amplitudowe, które różnią się dla tych wybranych opraw. Mniejsze różnice uzyskuje się dla lamp typu SOD i MH.

Na rys. 11 przedstawiono wyniki analizy ilościowej w postaci widm amplitudowych prądów płynących ze złącza zasilającego w dwóch fazach L1 i L2 dla różnych wariantów konfiguracji badanej instalacji. Podano również wartości całkowitego współczynnika odkształcenia harmonicznymi.

Przedstawione wyniki potwierdzają, że połączenie różnego typu lamp, ale z tym samym typem źródła światła LED, powoduje zmniejszenie zawartości harmonicznymi dominujących rzędów (3, 5 i 7) w wypadkowym przebiegu prądu (w złączu zasilającym), a tym samym zmniejszenie wartości całkowitego współczynnika odkształcenia harmonicznymi.

6. Podsumowanie

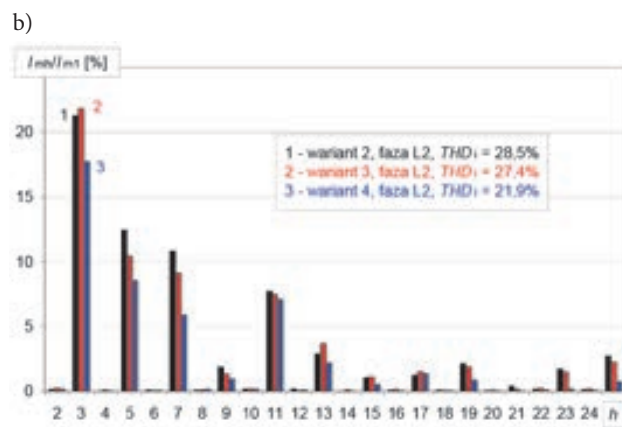
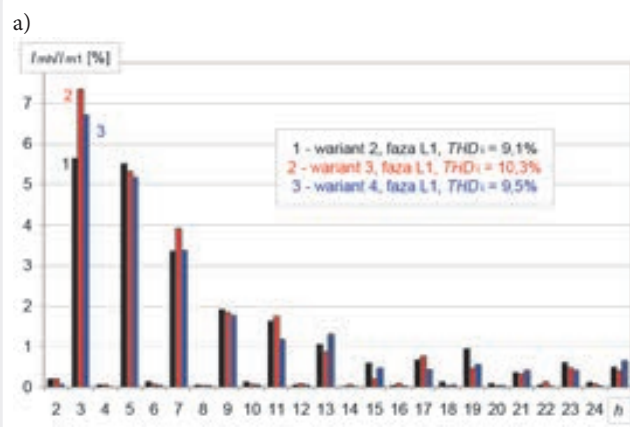
Przedstawione wyniki badań eksperymentalnych są przyczynkiem do kontynuowania prac w zakresie rzeczywistego oddziaływania wyższych harmonicznymi prądów na elementy systemu elektroenergetycznego (głównie straty mocy) i sposobów na zmniejszanie niekorzystnych skutków istnienia harmonicznymi prądów. Istnieją specyficzne instalacje elektryczne, w których w sposób naturalny (bez dodatkowych układów i nakładów finansowych) można uzyskać zmniejszenie ich negatywnego oddziaływania na elektroenergetyczną sieć dystrybucyjną niskiego napięcia.



Rys. 10. Widmo amplitudowe (do 25 harmonicznymi) prądów dla opraw: SOD1, SOD3 oraz SOD6

Należy te aspekty analizować, szczególnie w przypadkach stosowania inteligentnych systemów sterowania.

Wyniki badań przedstawione w tym artykule są efektem realizacji projektu pt.: „Projekt Inteligentnego Systemu Sterowania Oświetleniem Ulicznymi”, który jest dofinansowany z programu GEKON.



Rys. 11. Widmo amplitudowe (do 25 harmonicznymi) prądów na stopie nr 1 dla faz L1 (a) oraz L2 (b) dla różnych wariantów

Bibliografia

1. Bieliński K., Monitorowanie jako narzędzie wspomagające zarządzanie energią, *Rynek Energii* 2012, nr 6, s. 10–14.
2. Bieliński K., Monitorowanie czynne procesu oświetlania ulicznego, *Zarządzanie Energią i Teleinformatyka ZET 2015, Matematyka i Studia*, KAPRINT, Lublin, s. 39–47.
3. Norma PN-EN 13201 (1–4): 2007, Oświetlenie dróg, PKN Warszawa 2007.
4. Czapp S., Odkształcenie prądu pobieranego przez urządzenia oświetleniowe i jego wpływ na instalację zasilającą, *Acta Energetica* 2009, nr 1, s. 25–40.
5. Czapp S., Efektywność energetyczna urządzeń oświetleniowych a jakość energii elektrycznej, *Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej* 2012, nr 31.
6. Maciążek M., Pasko M., Wybrane metody eliminacji wyższych harmonicznymi z przebiegów prądów i napięć, *Elektronika* 2010, r. 51, nr 2, s. 9–14.
7. Cieślak S., Boniewicz P., Wpływ wyższych harmonicznymi napięcia na pracę odbioru zasilanego przez transformator, *Materiały XVI Sympozjum „Współczesne urządzenia oraz usługi elektroenergetyczne, telekomunikacyjne i informatyczne”*, Poznań 2013, s. 28–31.
8. PN - EN 61000 - 3 - 2 : 2007 , Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC), część 2–3: Poziomy dopuszczalne. Poziomy dopuszczalne emisji harmonicznymi prądu (fazowy prąd zasilający odbiornika < lub = 16 A).

Kazimierz Bieliński

dr inż.

e-mail: kbiel@utp.edu.pl

Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy

Studia na kierunku elektrotechnika ukończył w Akademii Techniczno-Rolniczej w Bydgoszczy (1980). W roku 1993 obronił doktorat na Politechnice Lubelskiej. Jego zainteresowania naukowe dotyczą: efektywności energetycznej, systemów aktywnego monitorowania obiektów technicznych, zarządzania energią, zagadnień związanych z funkcjonowaniem systemów energetycznych i elektroenergetycznych współpracujących z generacją rozproszoną. Autor i współautor ponad 60 artykułów i referatów naukowych oraz 10 monografii naukowych i wielu opracowań o charakterze audytów energetycznych lub analiz opłacalności realizacji przedsięwzięć proefektywnościowych.

Sławomir Cieślík

dr hab. inż., prof. nadzw. UTP

Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy

e-mail: slawcies@utp.edu.pl

Studia na kierunku elektrotechnika ukończył w Akademii Techniczno-Rolniczej w Bydgoszczy (1995). W 2000 roku obronił doktorat na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej. W 2014 roku uzyskał stopień naukowy doktora habilitowanego na Wydziale Elektrycznym Politechniki Poznańskiej. Jego zainteresowania naukowe dotyczą modelowania matematycznego i symulacji komputerowej złożonych układów elektromechanicznych i elektroenergetycznych, w tym symulatorów cyfrowych układów elektroenergetycznych pracujących w czasie rzeczywistym oraz zagadnień funkcjonowania systemów elektroenergetycznych, szczególnie z generacją rozproszoną. Autor ponad 95 artykułów i referatów naukowych oraz 2 monografii naukowych. Jest autorem i konsultantem ponad 300 opracowań związanych z przyłączaniem jednostek wytwórczych do systemu elektroenergetycznego.