**Jacek CHĘCIŃSKI, Zdzisław FILUS**

Politechnika Śląska

doi:10.15199/48.2018.08.02

# Stabilność strumienia światła lamp LED zasilanych z sieci 230VAC

***Streszczenie.*** *Obecnie podejmuje się intensywne działania mające na celu całkowite zastąpienie instalacji bazujących na lampach fluoroscencyjnych, rozwiązaniami wykorzystującymi diody LED. Wysoka wydajność świetlna (ponad 160lm/W) oraz żywotność przekraczająca 50 tys. godzin (przy wciąż akceptowalnej wartości utraconego strumienia światła) sprawiają, że są to najbardziej energooszczędne i długowieczne systemy oświetleniowe. Jednak w przypadku lamp LED bezpośrednio zasilanych z sieci 230V AC (np. „żarówki" LED z trzonkiem E14 i E27), sprawa jest znacznie bardziej skomplikowana. Spełnienie zapisów obowiązujących norm i specyficznych warunków technicznych wymaga bardzo nietypowych układów zasilających, niespotykanych w innych zastosowaniach. Jednym z nich jest opisany w artykule układ sekwencyjnego zasilania modułów LED.*

***Abstract.*** *Today many intensive actions are taken in order to replace lighting installations based on fluorescent lamps with solutions that make use of LEDs. Thanks to high luminous efficiency (over 160lm/W) and lifetime exceeding 50,000 hours (with the still acceptable remaining luminous flux) they are the most energy saving and long lasting lighting systems. However, in the case of LED lamps directly supplied from the 230VAC network (eg. LED bulbs with the E14 or E27 base) the problem is more complicated. In order to satisfy the binding standards and specific technical specifications dedicated supply systems are necessary that are not met in other applications. One of such systems is the sequential supply system for LED modules, described in this paper* ***(Stability of the luminous flux of LED lamps supplied from the 230VAC network****).*

**Słowa kluczowe:** SSL, LED, PWM, PF, sekwencyjne zasilanie lamp LED, współczynnik migotania, wysoki współczynnik mocy
**Keywords:** SSL, LED, PWM, PF, sequential LED power supply, percent flicker, high power factor

## Wprowadzenie

Oświetlenie oparte na wykorzystaniu diod LED szybko wypiera tradycyjne sposoby oświetlenia przy użyciu żarówek z włóknem wolframowym lub lamp fluorescencyjnych. Główne zalety lamp LED to duża wydajność świetlna, sięgająca stu kilkudziesięciu lm/W, żywotność dochodząca do 50 tys. godzin oraz łatwość zmiany zarówno barwy jak i natężenia oświetlenia. W przeciwieństwie do tradycyjnych żarówek zasilanie lamp LED jest jednak znacznie bardziej skomplikowane, zwłaszcza z sieci prądu przemiennego. Przede wszystkim pojedyncza dioda LED przewodzi prąd tylko w jednym kierunku przy napięciu wynoszącym kilka woltów. Duża stromość charakterystyki prądowo-napięciowej diody LED pociąga za sobą konieczność wymuszania prądu płynącego przez diodę, a nie napięcia na jej zaciskach. Przy zasilaniu napięciowym niewielkie zmiany napięcia skutkowałyby dużymi zmianami płynącego przez nią prądu, a tym samym również wytwarzanego przez nią strumienia świetlnego. Zmiany prądu mogłyby też powodować zauważalne zmiany parametrów chromatycznych diody. Niekorzystną własnością diod LED w odniesieniu do ich zastosowań w technice oświetleniowej jest ich bardzo mała bezwładność; przerwanie przepływu prądu przez diodę powoduje praktycznie natychmiastowy zanik jej świecenia, co w przypadku zasilania diod wyprostowanym przebiegiem sieciowym o częstotliwości 50Hz będzie skutkować wyraźnym migotaniem. Zjawisko to jest praktycznie niezauważalne w przypadku tradycyjnych żarówek, w których światło jest wytwarzane na zasadzie zjawisk cieplnych we włóknie żarówki nagrzewanej przez przepływający prąd.

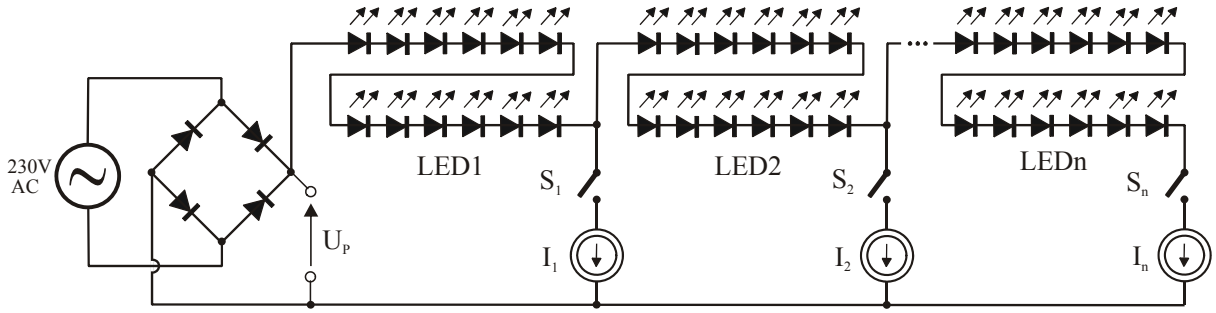
## Układy zasilania lamp Led

Lampy LED z natury przewidziane są do zasilania z sieci napięcia przemiennego o napięciu 230V i częstotliwości 50Hz. Będą one zatem wymagać zastosowania układów zasilających o parametrach spełniających zasygnalizowane powyżej wymagania. Ze względu na niskie napięcie przewodzenia pojedynczej diody LED są one zazwyczaj łączone szeregowo w łańcuchy diod o napięciu przewodzenia wynoszącym co najmniej kilkadziesiąt woltów.

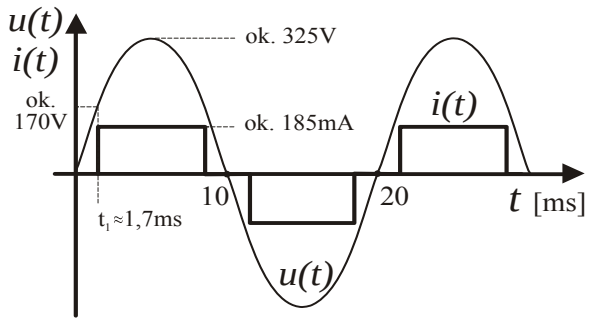
Układy zasilania lamp LED zasadniczo dzieli się na układy pasywne i zasilacze impulsowe; ich szeroki przegląd zawiera praca [1]. W układach pasywnych napięcie sieciowe jest bezpośrednio lub poprzez transformator obniżający podawane na prostownik, którego napięcie wyjściowe jest wygładzane przez kondensator elektrolityczny, który poprzez rezystor ograniczający prąd do żądanej wartości zasila łańcuch diod LED. Zastosowanie kondensatora o dużej pojemności ma na celu znaczną redukcję migotania wytwarzanego światła. Przy braku transformatora sieciowego napięcie sieci jest obniżane do odpowiedniego poziomu za pomocą szeregowo włączonego przed prostownikiem kondensatora lub dławika. Rozwiązanie takie jest proste i tanie. Jego podstawową wadą jest jednak zastosowanie kondensatora elektrolitycznego, którego trwałość jest znacznie krótsza niż trwałość zasilanej przez niego lampy. Poza tym prostownik z obciążeniem pojemnościowym stanowi bardzo niekorzystne obciążenie sieci pod względem generowanych harmonicznych i wartości współczynnika mocy. Znacznie lepsze warunki zasilania lamp LED zapewniają zasilacze impulsowe. Są one realizowane jako jednostopniowe i dwustopniowe [1]. W zasilaczach jednostopniowych impulsowy stabilizator prądu zasilany jest – podobnie jak w przypadku zasilaczy pasywnych – z wyjścia prostownika z kondensatorem elektrolitycznym. W zasilaczach dwustopniowych pierwsza przetwornica DC/DC zasilana jest niefiltrowanym napięciem wyprostowanym, pełniąc rolę układu korekcji współczynnika mocy, a właściwym stabilizatorem prądu jest druga przetwornica. Wadami zasilaczy impulsowych są również konieczność zastosowania kondensatora elektrolitycznego dla redukcji tętnień o częstotliwości 100Hz oraz – ze względu na gabaryty – użycie elementów indukcyjnych.

W ostatnich latach w literaturze pojawiła się koncepcja układów zasilających lampy LED, które nie zawierają ani elementów indukcyjnych, ani kondensatorów elektrolitycznych [2,3,4,5,6]. Zasada działania tego typu układów pokazana jest na rys. 1. Zasilana lampa składa się z kilku łańcuchów diod LED, które załączane są kolejno w

zależności od aktualnej wartości napięcia wyjściowego z prostownika sieciowego $U_p$. Gdy napięcie to osiągnie próg przewodzenia łańcucha diod LED1, zamyka się klucz $S_1$ i przez pierwszy łańcuch zaczyna płynąć prąd $I_1$. Po osiągnięciu przez napięcie $U_p$ sumarycznej wartości napięcia przewodzenia łańcuchów LED1 i LED2, zamyka się klucz $S_2$ i otwiera klucz $S_1$. W podobny sposób następuje załączanie kolejnych kluczy; klucz $S_n$ przewodzi, gdy napięcie wyprostowane jest w pobliżu swojej maksymalnej wartości. Gdy napięcie wyprostowane maleje, przełączanie kluczy odbywa się w odwrotnej kolejności. Różne są koncepcje odnośnie do wartości prądów $I_1 \ldots I_n$. W najprostszym przypadku prądy te są jednakowe [6], czyli z sieci pobierany jest stały prąd za wyjątkiem interwału, w którym napięcie sieciowe jest mniejsze od progu przewodzenia pierwszego łańcucha.




Rys. 1. Schemat poglądowy układu zasilania łańcuchów diod LED z sekwencyjnym przełączaniem prądu




Rys.2. Przebiegi czasowe napięcia i prądu lampy LED z pojedynczym łańcuchem diod (lampa użyta do testów – nr 7 w tabeli 1)

Przebieg prądu płynącego przez diody może być schodkowy o obwiedni zbliżonej do sinusoidy [2,3,4]. W najbardziej wyrafinowanym rozwiązaniu poszczególne prądy dobierane są pod kątem stabilizacji mocy pobieranej z sieci, czyli wartości kolejnych schodków maleją ze wzrostem napięcia sieciowego [5].

W cytowanych pracach podawane są wyniki badań sterowników lamp LED działających według opisanej zasady, zrealizowanych jako układy MOS, lub też wyniki ich symulacji. Najczęściej podawane wyniki to 0,98-0,99 dla współczynnika mocy, kilka do kilkunastu procent w odniesieniu do zawartości harmonicznych oraz sprawność zbliżona do 90%. Brak jest jednak danych dotyczących zmienności natężenia wytwarzanego światła.

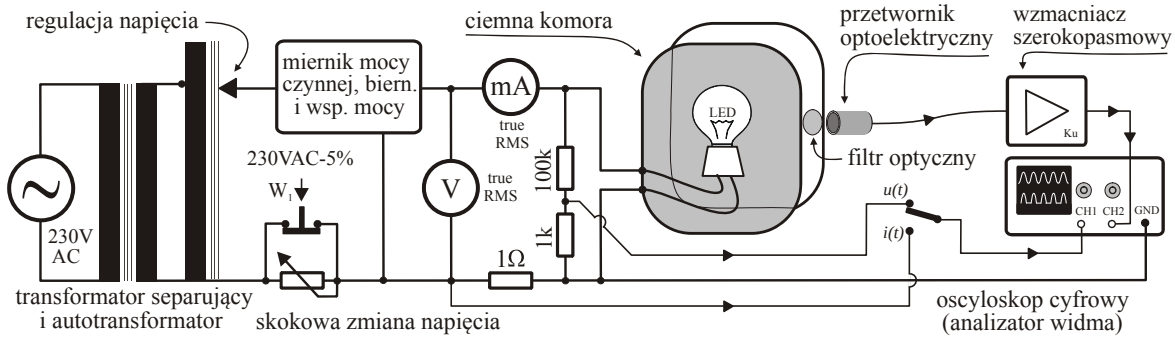
**Układ pomiarowy - mierzone parametry**

Ze względu na małą dostępność na rynku lamp z kilkoma niezależnymi łańcuchami diod LED, testom i badaniom opisanym niżej poddano najbardziej popularną lampę z jednym łańcuchem i kluczem prądowym zasilaną przebiegiem pokazanym na rys. 2. Natomiast dla wersji z wieloma kluczami przeprowadzono symulację programową i wyliczono wartości odpowiednich parametrów.

Na rys. 3 zamieszczono schemat stanowiska pomiarowego do badania różnego typu lamp zasilanych z sieci 230V. Stanowisko umożliwiało powolną i skokową zmianę wartości napięcia zasilania (tj. pomiar wpływu $\Delta U_{ZAS}$ na $\Delta P_{cz}$ i $\Delta \Phi_{śr}$), obserwację przebiegów prądowych i napięciowych, pomiar mocy czynnej i biernej, pomiar wartości współczynnika mocy PF (ang. Power Factor) oraz obserwację przebiegu czasowego zmian strumienia światła. Korzystając z funkcji programowych oscyloskopów cyfrowych można było także wyznaczyć wartości amplitud poszczególnych harmonicznych obserwowanych przebiegów. Zastosowany miernik współczynnika mocy wyznaczał jego wartość zgodnie ze wzorem (1):

$$PF = \frac{P_{cz}}{I_{sk} \cdot U_{sk}} \tag{1}$$

gdzie: $P_{cz}$ jest mocą czynną pobieraną przez lampę, $I_{sk}$ oraz $U_{sk}$ to wartości skuteczne pobieranego prądu i napięcia sieci 230VAC („True RMS").




Rys.3. Stanowiska pomiarowe do badania parametrów elektrycznych i stabilności strumienia światła lamp zasilanych z sieci 230VAC

Tabela 1. Wartości zmierzonych parametrów badanych lamp ($U_{ZAS}$=230VAC, f=50,0Hz)

| Lampa nr: | Typ lampy | $P_{cz}$ | PF | $\Delta\%P_{cz}^{*}$ | $\Delta\%\Phi_{śr}^{*}$ | $wsp_{mig}$ | $wsp_{mig100Hz}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1. | żarówka 25W/E14 | 24,5W | 1,00 | 16,3% | 41% | 16% | 13% |
| 2. | żarówka 75W/E27 | 76,1W | 1,00 | 15,8% | 40% | 12% | 10% |
| 3. | świetlówka linowa T8/G13/18W | 28,1W | 0,35 | 21% | 13% | 49% | 35% |
| 4. | świetlówka kompaktowa 18W/E27 | 16,7W | 0,62 | 11,2% | 6% | 9% | 3% |
| 5. | LED 5,5W/GU10 (przetwornica imp.) | 5,5W | 0,53 | 2,1% | 0,4% | 0% | 0% |
| 6. | LED 3,5W/E14 (tzw. włókno LED) | 3,3W | 0,38 | 6,5% | 4,5% | 100% | 65% |
| 7. | LED 30W (zasil. sekwencyjne, 1 klucz) | 33,1W | 0,96 | 16,2% | 7,5% | 100% | 94% |
| 8. | LED (zasil. sekwencyjne, 10 kluczy – symulacja) | | 0,99 | 21% | 21% | 100% | 79% |
| *procentowy przyrost mocy czynnej lub strumienia światła przy wzroście $U_{ZAS}$ o 10% (z 219VAC do 241VAC) | | | | | | | |

Bardziej złożona jest analiza krótkotrwałej stabilności emitowanego przez lampę strumienia światła. W pracy [5] opisano sposób polegający na wyliczeniu „procentowego współczynnika migotania" (*percent flicker*):

$$wsp_{mig} = \frac{\Phi_{\max} - \Phi_{\min}}{\Phi_{\max} + \Phi_{\min}} \cdot 100\% \tag{2}$$

gdzie: $\Phi_{max}$ oraz $\Phi_{min}$ to maksymalna i minimalna wartość chwilowa emitowanego przez badaną lampę strumienia światła.

Łatwo jednak wykazać, że taką samą wartość tak zdefiniowanego współczynnika mogą mieć źródła światła dalece różniące się (postrzeganym przez obserwatora) efektem migotania. Przykładowo będą to lampy, których przebiegi czasowe strumienia światła zamieszczono na rys. 4. Zdaniem autorów niniejszej pracy zagadnienie zmienności strumienia światła należy rozpatrywać w szerszym kontekście, tj. uwzględniającym mechanizmy fizjologiczne ludzkiego oka. Składowa zmienna strumienia światła zwykle będzie powodowała efekty stroboskopowe, jednak tylko w niektórych przypadkach wywołuje bardzo dokuczliwe wrażenie migotania.

Najbardziej istotna dla rozpatrzenia tych kwestii okazuje się częstotliwość składowej zmiennej ze szczególnym uwzględnieniem amplitudy pierwszej harmonicznej. W przypadku lamp zasilanych z sieci 230VAC, w których zastosowano prostownik pełnookresowy, harmoniczne mogą wystąpić dla częstotliwości podstawowej 2·50Hz = 100Hz i kolejnych wyższych: $f_n$= n·100Hz. Najbardziej dokuczliwy efekt migotania wystąpi dla składowej o najniższej częstotliwości (tj. 100Hz). W przypadku starszych źródeł światła (żarówki, lampy fluoroscencyjne) częstotliwość 100Hz była uważana za tzw. ergonomiczną. Pojemność cieplna włókna wolframowego czy duża poświata luminoforu powodowała, że efekt migotania był niedostrzegalny. Dla lamp wykorzystujących diody LED tak już nie jest. Przebieg czasowy strumienia światła jest ściśle powiązany z przebiegiem czasowym prądu zasilającym diodę. Traktując diodę świecącą jako modulator amplitudy strumienia światła, to częstotliwości graniczne takiej modulacji (dla spadku -3dB) w przypadku diod białych, wykorzystujących konwersję światła niebieskiego poprzez luminofor, wynoszą kilka MHz, natomiast w przypadku diod monochromatycznych osiągają nawet kilkadziesiąt MHz [7].

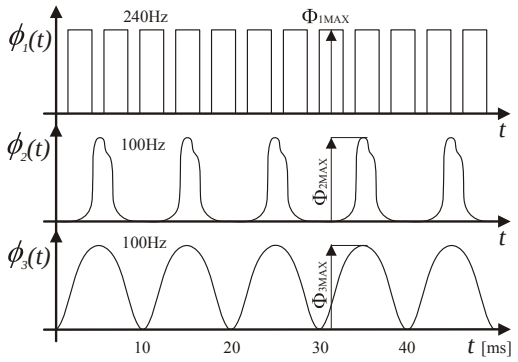
Przydatność wzoru (2) okazuje się także problematyczna w przypadku oceny lamp, w których zastosowano regulację strumienia światła bazującą na metodzie PWM (ang. Pulse Width Modulation). Taka metoda regulacji zapewnia najlepszą stabilność parametrów chromatycznych diody LED i najbardziej liniowy zakres zmian strumienia światła [8]. Przy odpowiednio wysokiej częstotliwości sygnału PWM efekt migotania staje się całkowicie niedostrzegalny. Pomimo tego, współczynnik migotania wyliczony zgodnie ze wzorem (2) przyjmie najgorszą możliwą wartość, tj. 100%. Współczynnik ten może jednak znaleźć praktyczne zastosowanie. Lampy sygnowane zerową wartością *percent flicker*, to lampy z najmniejszą chwilową odchyłką strumienia światła. Takie oświetlenie znajdzie zastosowanie w studiach telewizyjnych (brak interferencji z częstotliwością przetwarzania obrazu) czy też w pobliżu układów realizujących transmisję danych w torze podczerwieni [9].

Uwzględniając fizjologię ludzkiego oka oraz możliwy rozkład harmonicznych strumienia światła lampy LED zasilanej z sieci 230VAC, można zaproponować modyfikację współczynnika *percent flicker*, która umożliwi znacznie lepszą korelację z odczuciami obserwatora. Zaproponowano modyfikację wzoru (2) do następującej postaci:

$$wsp_{mig_100Hz} = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\Phi_{100Hz}}{\Phi_{\max} + \Phi_{\min}} \cdot 100\% \tag{3}$$

gdzie: $\Phi_{100Hz}$, to amplituda pierwszej harmonicznej składowej zmiennej strumienia światła, której f=100Hz, $\Phi_{max}$ oraz $\Phi_{min}$ to maksymalna i minimalna wartość chwilowa strumienia, natomiast $\pi/2$ jest współczynnikiem normalizującym (tak, aby wartość całego wyrażenia nie przekroczyła 100%).

Przy takiej formule, współczynnik uzyska wartość 100% tylko w przypadku, gdy strumień światła ma przebieg prostokątny o wypełnieniu ½ i częstotliwości 100Hz, co dobrze odpowiada wrażeniom wzrokowym.




Rys.4. Przebiegi czasowe strumienia światła lamp o różnej dokuczliwości migotania i tej samej wartości *percent flicker* (100%)

Na potrzeby powyższej analizy przyjęto, że okresowo zmienny strumień światła można przedstawić za pomocą rozkładu Fouriera, jako składową stałą strumienia $\Phi_{śr}$ i kolejne harmoniczne o amplitudzie $\Phi_{n\cdot 100Hz}$. Założenie to jest poprawne matematycznie, zawiera jednak pewną sprzeczność fizyczną. Nie istnieją źródła światła, które generowałyby dodatni i ujemny strumień (a takowy opisują wyliczone harmoniczne). Takiej sprzeczności można jednak nie brać pod uwagę jeśli przyjmiemy, że analiza dotyczy nie

samego strumienia światła tylko sygnału liniowo z nim powiązanego, generowanego przez przetwornik fotoelektryczny (jak ma to miejsce w rzeczywistych przyrządach pomiarowych).

Testom poddano osiem różnego rodzaju lamp. Żarówki z włóknem wolframowym o mocy (1) 25W i (2) 75W. Następnie lampy fluorescencyjne: (3) świetlówka liniowa T8/18W zasilana poprzez układ z szeregowym dławikiem 50Hz i (4) świetlówka kompaktowa zasilana z samowzbudnej przetwornicy impulsowej pracującej na częstotliwości ok. 40kHz. Należy zaznaczyć, że powyższe lampy uznaje się już dziś za przestarzałe. Uwzględnienie ich w badaniach ma jednak sens, gdyż są to źródła światła doskonale wszystkim znane, a przez to stanowią dobry materiał porównawczy. Testowane lampy LED to: (5) zamiennik żarówki halogenowej z trzonkiem GU10 (z wewnętrzną przetwornicą impulsową stabilizującą prąd diod LED; przetwornica zawiera kondensator elektrolityczny), (6) lampa z tzw. włóknami LED imitującymi włókna wolframowe żarówki, (7) lampa LED z sekwencyjnym układem zasilania z pojedynczym kluczem zrealizowanym na układach SM2082, oraz (8) symulacja komputerowa lampy LED z układem zasilania sekwencyjnego (dla 10 i więcej kluczy) optymalizowanym pod kątem wysokiej wartości wskaźnika mocy i sprawności energetycznej (skuteczności świetlnej). Wyniki pomiarów zamieszczono w tab.1.

Analizując wpływ $\Delta U_{ZAS}$ na $\Delta\Phi_{śr}$ warto zwrócić uwagę na pewne istotne zjawisko. Oko ludzkie nie jest w stanie zauważyć nawet dość dużych, ale powolnych zmian strumienia światła. Także kilkunastoprocentowa różnica luminancji (przy zachowaniu stałych parametrów chromatycznych) nie jest dostrzegalna. Inaczej się jednak dzieje, kiedy zmiany te odbywają się gwałtownie (np. poprzez naciśnięcie $W_1$ na stanowisku pomiarowym). W takim przypadku kilkuprocentowa zmiana strumienia światła staje się już łatwo dostrzegalna. Powtarzanie się takich zmian będzie przez obserwatora odczuwane jako dokuczliwe. Ma to istotne znaczenie, jeśli w sieci zasilającej często pojawiają się niewielkie wahania napięcia spowodowane pracą innych odbiorników zasilanych z tej samej linii 230VAC (np. praca silników czy komutacja dużych obciążeń). Na taką wtórną modulację strumienia światła najbardziej będą narażone proste konstrukcje lamp, i często będą to lampy z sekwencyjnym układem zasilania, z największą wartością parametru $\Delta\%\Phi_{śr}$.

**Podsumowanie**

Sekwencyjny układ zasilania diod LED to bardzo nowoczesne rozwiązanie. Jego największymi zaletami są: prostota, mała liczba elementów i wyjątkowo niski poziom emitowanych zaburzeń radioelektrycznych (w odniesieniu do przetwarzanej mocy). W takich układach nie zachodzi konieczność stosowania rozbudowanych filtrów EMC ani kondensatorów elektrolitycznych. Dzięki temu cały blok zasilający ma niewielkie gabaryty i jest bardzo trwały (wysoka temperatura wewnątrz lampy powoduje „wysychanie" kondensatorów elektrolitycznych). Odpowiednio dobrana sekwencja przełączeń: progi napięciowe i wielkości prądów poszczególnych kluczy, umożliwiają uzyskanie bardzo wysokiej wartości współczynnika mocy i sprawności energetycznej.

Niestety poza wymienionymi zaletami układy te posiadają też szereg istotnych wad. Najważniejszą z nich wydaje się wysoki stopień migotania ($\Phi_{100Hz}$) i zauważalna podatność strumienia światła na wahania napięcia w sieci zasilającej 230VAC. Teoretycznie można tak zaprojektować układ sekwencyjny, aby zapewniał bardziej stabilny strumień światła. Odbywa się to jednak kosztem znacznego spadku współczynnika mocy i wzrostem wyższych harmonicznych prądu zasilania – kłopotliwe wówczas staje się spełnienie rygorystycznych warunków zapisanych w normach. Lampy z sekwencyjnym układem zasilania to przede wszystkim proste, tanie i trwałe konstrukcje, jednak nie powinny być bezwarunkowo zalecane do zastosowań w charakterze tzw. oświetlenia ogólnego.

Przedstawione w tym komunikacie układy pomiarowe i wyniki uzyskane zostały w ramach badań statutowych BK2018 Instytutu Elektroniki.

***Autorzy:*** *dr inż. Jacek Chęciński, Wydział Automatyki, Elektroniki i Informatyki ,Politechnika Śląska, ul. Akademicka 16, 44-100 Gliwice, dr hab. inż. Zdzisław Filus, prof. Pol. Śl. Wydział Automatyki, Elektroniki i Informatyki ,Politechnika Śląska, ul. Akademicka 16, 44-100 Gliwice,*

LITERATURA

[1] S. Li, S-C. Tan, C-K. Lee, „A Survey, Classification, and Critical Review of Light-Emitting Diode Drivers", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 31, No. 2, February 2016, pp. 1503-1515.

[2] Y.-P. Su i inni, „Inductorless and Electrolytic Capacitorless Pseudo-Sine Current Controller in LED Lighting System with 1.1W/2.2W Power Reduction", European Solid-State Circuits Conference Dig. Tech. Papers, September 2012, pp. 442-445.

[3] J. Kim, J. Lee, S. Park, „A Soft Self-Commutating Method Using Minimum Control Circuitry for Multiple-String LED Drivers", 2013 IEEE International Solid-State Circuits Conference, San Francisco, USA, February 2013, pp. 376-377.

[4] N. Ning i inni, „Self-adaptive load technology for multiple-string LED drivers, Electronics Letters", Vol. 49, No. 18, August 2013, pp. 1170-1171.

[5] Y. Gao, L. Li, P. Mok, „An AC Input Switching-Converter-Free LED Driver With Low-Frequency-Flicker Reduction", IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol. 52, No. 5, May 2017, pp. 1424-1434.

[6] Y. Boxin, L. Zhiming , W. Zhaohui, L. Guoyunan, „Design of a Novel AC LED Driver with no Current Glitch Based on Soft Switching Operation", Semiconductor Technology International Conference, 12-13 March 2017, Shanghai, China.

[7] J. Chęciński, Z. Filus, „Badanie możliwości transmisji danych poprzez instalacje oświetleniowe LED", Przegląd Elektrotechniczny, 2017/8, Wydawnictwo SIGMA-NOT.

[8] J. Chęciński, Z. Filus, „Wpływ metody sterowania na stabilność parametrów chromatycznych diod LED", Przegląd Elektrotechniczny, 2015/9, Wydawnictwo SIGMA-NOT.

[9] J. Chęciński, Z. Filus, „Sterowane sygnałem PWM lampy LED jako źródło zakłóceń układów podczer-wieni", Elektronika-Konstrukcje, Technologie, Zastosowania, 2012/10, Wydawnictwo SIGMA-NOT.