

А.Лупенко. *Енергоефективні електротехнічні системи живлення та керування для багатолампових люмінесцентних світильників* / А.Лупенко // *Вісник ТНТУ*. — 2014. — Том 73. — № 1. — С.194-201. — (приладобудування та інформаційно-вимірювальні технології).

УДК 621.314.2

А. Лупенко, докт. техн. наук

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

## ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ СИСТЕМИ ЖИВЛЕННЯ ТА КЕРУВАННЯ ДЛЯ БАГАТОЛАМПОВИХ ЛЮМІНЕСЦЕНТНИХ СВІТИЛЬНИКІВ

*Резюме.* Обґрунтовано метод побудови енергоефективних ресурсоекономних електротехнічних систем високочастотного живлення та керування для багатолампових люмінесцентних світильників. Метод базується на поєднанні дискретного регулювання потужності шляхом комутації окремих ламп та наступного неперервного регулювання потужності на міжкомутаційних інтервалах потужності. За рахунок нової структури системи зекономлено  $N$  силових ключів та їх драйверів, де  $N$  – кількість ламп світильника.

*Ключові слова:* високочастотне живлення, люмінесцентна лампа, резонансний інвертор, регулювання потужності, енерго- та ресурсоефективність.

A. Lupenko

## ENERGY-EFFECTIVE ELECTROTECHNICAL SYSTEMS OF OPERATION AND CONTROL FOR MULTIPLE FLUORESCENT LAMPS

*Summary.* The method of design of energy- and resource-efficient electrical systems for high-frequency operation of multiple fluorescent lamps lighting installations with their continuous-discrete power control is presented in this paper. The method is based on a combination of discrete power control by changing the amount of on-off lamps and further continuous power control on the intercommutation intervals. If the installation running power can be provided by the number of lamps which is smaller than  $N$  ( $N$  is a lamp number in the installation), the redundant lamps are switched off. Thus the unproductive power consumption for redundant lamps electrode heating is eliminated and the system efficiency is increased. The total power control range is divided into  $N$  power intervals. Within each interval the power control is continuous, and the intervals change is discrete by the way of fluorescent lamps tuning on-off. The extension of the first (lowest) interval, which is enabled only for one lamp, is equal to a half of effective power of fluorescent lamp, which is indicated as the nominal lamp power minus power heating of its electrodes. The remaining ( $N-1$ ) intervals, which is enabled for more than one lamp, have the same extensions, which are equal to the effective power of one lamp. The control range of each lamp, regardless of the number of lamps in installation, is equal to a half of lamp effective power, which ensures the high quality control. Hysteresis is introduced to ensure the lamps accurate tuning on-off in commutation regions. The analytical expressions for lighting installation power and its efficiency as a functions of running power and number of turn-on lamps are established. Comparison of continuous and continuous-discrete power control testifies the increasing of system efficiency up to 1,8 times in the case of use of proposed continuous-discrete control in 4-lamps installation.

To achieve high quality of electric energy and system component reduction the single-stage approach to the system structure design is implemented by combining the stage of power factor corrector and the  $N$  stages of high-frequency half-bridge resonance inverters. One inverter is a master inverter and others are slave inverters (semiinverters). Each semiinverter has only one own active switch and utilizes the active switch which is common to all semiinverters and master inverter. Thus  $N$  active power switches and their drivers are saved due to such system structure.

*Key words:* high-frequency operation, fluorescent lamp, resonant inverter, power control, energy and resource efficacy.

**Постановка проблеми.** Електротехнічні системи, які використовуються у внутрішньому та зовнішньому освітленні, споживають понад 15% електричної енергії, генерованої в Україні. Підвищення енергоефективності таких систем при забезпеченні високої якості освітлення є важливим завданням, яке стоїть перед електротехнічною та світлотехнічною галузями. На сьогодні одним із основних високоефективних джерел

світла у внутрішньому освітленні є люмінесцентні лампи (ЛЛ), які мають високу світлову віддачу, тривалий термін служби, добре кольоропередавання. Їх живлення забезпечується переважно високочастотними (30–200 кГц) електронними пускорегулювальними апаратами. В системах внутрішнього освітлення широкого поширення набули багатолампові світильники на основі двох, трьох, чотирьох і більше люмінесцентних ламп. Такі світильники дозволяють проводити регулювання світлового потоку (потужності ЛЛ) дискретним методом – шляхом вмикання-вимикання необхідної кількості ламп для забезпечення нею достатнього світлового потоку, що дає суттєву економію електроенергії. Однак відсутність плавності регулювання потужності ЛЛ зменшує якість освітлення, що є недоліком такого підходу.

Плавного регулювання потужності ЛЛ можна досягти шляхом регулювання одного чи кількох параметрів їх живлення (напруги, частоти, коефіцієнта заповнення імпульсів живлення і т.п.) [3].

**Аналіз відомих досліджень і публікацій.** Дослідженню дискретного регулювання потужності люмінесцентних світильників присвячені роботи авторів Y.C. Chuang, H.W. Chen, H.Y. Wang, A.V. Stankovic, D. Kachmarik, L. Nerone [1, 2]. Перевагою такого методу регулювання є простота його реалізації, а суттєвим недоліком – відсутність плавного регулювання потужності РДС, що зменшує комфортність світлового середовища. Неперервне регулювання потужності люмінесцентних ламп, яке дає змогу усунути цей недолік, досліджувалось у роботах Є.А. Обжеріна, Д.І. Панфілова, В.Д. Полякова, С.С. Моо, Н.Л. Cheng, Т.Ф. Lin, Н.С. Yen [3–5]. Особливістю люмінесцентних ламп є те, що для забезпечення їх регламентованого терміну служби необхідно, незалежно від поточної потужності лампи, підтримувати температуру катодів на рівні, при якому має місце термоелектронна емісія, і при цьому розпилення або випаровування оксидного шару електродів є в допустимих межах [6]. Підігрівання катодів до необхідної температури здійснюється за рахунок робочого струму лампи та додаткового струму підігрівання. Через це у процесі неперервного регулювання потужності одночасно для всіх люмінесцентних ламп багатолампового світильника погіршується загальний коефіцієнт корисної дії (ККД) комплексу «пускорегулювальний апарат-ЛЛ», що зумовлено необхідністю підтримання майже незмінної потужності підігрівання електродів. Ця потужність не використовується для створення світлового потоку. Тому при зменшенні потужності лампи зростає частка потужності підігрівання електродів ЛЛ у загальній потужності, споживаній комплектом. Отже, енергоефективність такого комплексу при цьому буде зменшуватися [7].

Поєднання ж дискретного регулювання з наступним неперервним регулюванням решти ввімкнених ламп може покращити енергоефективність системи. Однак при цьому зростає обсяг електронного обладнання електротехнічної системи регулювання та її вартісні показники. Дослідження такого комбінованого регулювання не проводились.

Тому на даний час актуальним є завдання дослідження та створення таких електротехнічних систем високочастотного живлення ЛЛ, які, поєднуючи переваги вищевказаних методів регулювання потужності ЛЛ, мали б високу енергоефективність та зменшений обсяг електронного обладнання. Такі системи дадуть змогу отримувати додаткове енергозбереження до 70% за рахунок регулювання потужності (світлового потоку) джерел світла [7], високу комфортність світлового середовища, збільшення терміну служби джерел світла, кращі масогабаритні показники й ін.

**Метою роботи** є обґрунтування методу побудови енергоефективних електротехнічних систем високочастотного живлення та керування (ЕСВЧЖК) для багатолампових люмінесцентних світильників, які забезпечують неперервне

регулювання їх світлового потоку, високий ККД і мають при цьому відносно невисокий обсяг електронного обладнання.

**Результати досліджень.** Для підвищення ККД системи «ЕСВЧЖК-ЛЛ» пропонується метод побудови ЕСВЧЖК, призначений для живлення та регулювання потужності мультисвітильників з  $N$  однотипними люмінесцентними лампами, шляхом поєднання дискретного регулювання потужності ЛЛ за рахунок комутації окремих ламп та наступного неперервного регулювання решти ввімкнених ламп у межах міжкомутаційних інтервалів потужності.

При традиційному неперервному регулюванні потужності всіх  $N$  ламп світильника проводиться зміна параметрів живлення одночасно й однаково для всіх ЛЛ. Забезпечення робочої температури електродів ЛЛ здійснюється шляхом розігрівання електродів робочим струмом лампи та додатковим струмом підігрівання. Керування струмом підігрівання виконується на основі експериментальних залежностей катодного падіння потенціалу лампи [8]. Такі залежності є основою для підтримання його в допустимих межах  $10,4 \div 15$  В [9].

За такого катодного падіння потенціалу забезпечується регламентований термін служби лампи.

Новий метод побудови системи височастотного живлення  $N$ -лампових світильників з дискретно-неперервним регулюванням потужності ЛЛ та корекцією коефіцієнта потужності полягає у наступному [10, 11]:

1. Якщо біжуча потужність світильника у процесі регулювання може забезпечуватися меншою, ніж  $N$ , кількістю ламп, то надлишкові лампи повинні бути вимкненими. При цьому усуваються непродуктивні витрати потужності на підігрівання катодів надлишкових ламп, що підвищує ККД системи.

2. Оскільки мінімальною багатоламповою структурою є дволампова, то максимальний діапазон зміни потужності кожної із ламп світильника прийемо  $0,5 P_0^*$ , де  $P_0^*$  – «корисна» потужність ЛЛ, яка дорівнює її номінальній потужності лампи мінус потужність підігрівання її електродів.

3. Увесь діапазон регулювання потужності світильника розбивається на  $N$  однакових інтервалів потужності. В межах кожного інтервалу регулювання потужності є неперервним, а зміна інтервалів здійснюється дискретно шляхом вмикання-вимкання чергової люмінесцентної лампи. При цьому протяжність першого інтервалу, на якому ввімкнена лише одна лампа, дорівнює  $\Delta P = P_0^*/2$ , а решта  $(N-1)$  інтервалів, де

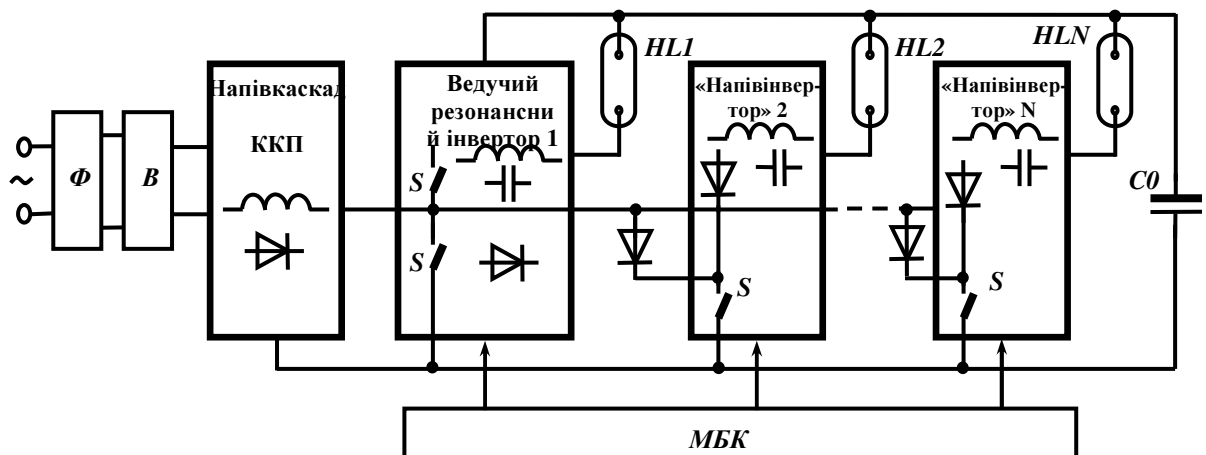


Рисунок 1. Структура системи живлення та керування багатолампового люмінесцентного світильника

Figure 1. Structure of operation and control system of multiple fluorescent lighting

ввімкнено більше однієї лампи, мають однакову протяжність  $\Delta P = P_0^*$ . Тоді «корисна» потужність світильника буде регулюватися в межах від  $0,5 P_0^*$  до  $N P_0^*$ .

4. Для підвищення ресурсоекономності пропонується структуру системи реалізувати за принципом однокаскадності [12], об'єднавши коректор коефіцієнта потужності (ККП) та високочастотні інвертори напруги з одним спільним для всіх вузлів основним (ведучим) інвертором, активні ключі якого використовуються як у ККП, так і у ведених «напівінверторах».

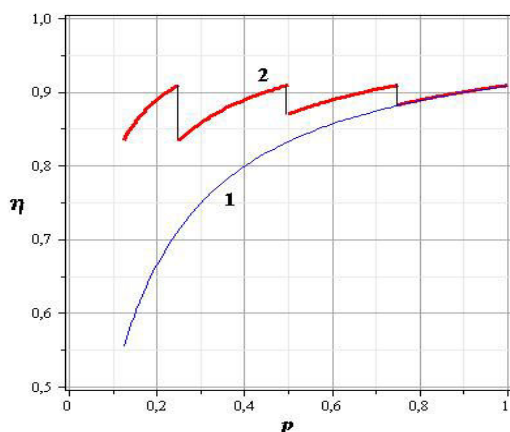
Структура ЕСВЧЖК, яка реалізує даний метод, наведена на рис.1. Ця структура є подальшим розвитком принципу побудови однокаскадних структур, які шляхом використання спільного силового ключа об'єднують в одному каскаді коректор коефіцієнта потужності (ККП) та резонансний інвертор напруги, навантажений лампою. Основний резонансний інвертор 1 є центральним вузлом системи (рис.1), який інтегрує функцію корекції коефіцієнта потужності ЕСВЧЖК, функцію інвертора першої ЛЛ  $HL1$  та функцію ведучого інвертора для ведених «напівінверторів»  $2 \div N$  живлення ламп  $HL2 - HLN$ . Як і ведучий інвертор, «напівінвертори» виконані за напівмостовою схемою, але вони мають у своєму складі лише один активний ключ  $S$  (нижній). Нижні ключі  $S$  напівінверторів також беруть участь у роботі ККП, комутуючи струм дроселя ККП, зменшуючи таким чином надструми нижнього ключа основного інвертора. Роль верхнього ключа в «напівінверторах» відіграє верхній ключ основного інвертора. Крім того, нижні ключі  $S$  «напівінверторів» забезпечують вмикання-вимикання ламп за винятком першої лампи, яка є завжди ввімкненою. Роботою системи керує блок мікроконтролерний керування (МБК). Таким чином, даний підхід дає змогу зекономити  $N$  активних ключів та їх драйверів, що суттєво зменшує вартісні показники системи.

Неперервне регулювання потужності здійснюється шляхом зміни коефіцієнта заповнення імпульсів керування транзисторними ключами. Дискретне регулювання потужності ЛЛ забезпечується вмиканням-вимиканням ламп за допомогою тих же ключів «напівінверторів».

Потужність  $P_e$ , яка виділяється в електродах кожної із ламп, не перетворюється у світловий потік і знижує енергоефективність світильника. В цьому сенсі її можна вважати як потужність втрат. Оскільки потужність  $P_e$  в електродах у процесі регулювання повинна змінюватися у невеликих межах [8], будемо вважати її, у першому наближенні, постійною.

Тоді ККД світильника із  $N$  лампами дорівнює

$$\eta_1 = \frac{P_0^* N p}{P_0^* N p + P_e N} = \frac{p}{p + \delta_e}, \quad (1)$$



**Рисунок 2.** Залежності ККД від відносної потужності:  
1 – для неперервного; 2 – для дискретно-неперервного регулювання

**Figure 2.** Efficiency versus relative power:  
1 – continuous control; 2 – discrete-continuous control

де  $P_0^*=(P_0-P_e)$  – «корисна» потужність однієї лампи, яка дорівнює її номінальній потужності мінус потужність підігрівання її електродів;  $p$  – відносна потужність світильника  $p=P/NP_0$ ;  $P$  – біжуча корисна потужність світильника, максимальне значення якої дорівнює  $P_{max}=NP_0^*$ ;  $\delta_e$  – відносна потужність електродів  $\delta_e=P_e/P_0^*$ .

Розглянемо ЕСВЧЖК для чотирилампового світильника ( $N=4$ ). Виходячи із аналізу параметрів ЛЛ, відносну потужність електродів можна прийняти на рівні  $\delta_e=0,1$  і за виразом (1) побудувати залежність ККД світильника від його відносної потужності при неперервному регулюванні одночасно всіх ламп. Ця залежність наведена на рис.2 (плавна крива 1). Як бачимо з рис.2, ККД світильника при одночасному регулюванні потужності всіх його ламп суттєво зменшується при малих потужностях світильника, досягаючи рівня 0,56 при відносній потужності  $p=0,125$ .

Для проведення аналізу методу дискретно-неперервного регулювання потужності ЛЛ розіб'ємо весь діапазон регулювання потужності світильника, як вказано вище, на  $N$  інтервалів потужності. Тоді потужність світильника залежно від інтервалу може бути наведена виразом

$$P = \left\{ \begin{array}{ll} P_0^* \alpha_1, & \alpha_1 \in \left( \frac{1}{2}, 1 \right) \\ 2P_0^* \alpha_2, & \alpha_2 \in \left( \frac{1}{2}, 1 \right) \\ 3P_0^* \alpha_3, & \alpha_3 \in \left( \frac{2}{3}, 1 \right) \\ \dots & \dots \\ iP_0^* \alpha_i, & \alpha_i \in \left( \frac{i-1}{N}, 1 \right) \\ \dots & \dots \\ NP_0^* \alpha_N, & \alpha_N \in \left( \frac{N-1}{N}, 1 \right) \end{array} \right. \quad (2)$$

де  $\alpha_i=P/(i P_0^*)$  – відносна потужність на  $i$ -му інтервалі, на якому  $i$  ламп є ввімкненими,  $i=2, N$ .

Зміна потужності однієї лампи та номери ввімкнених ламп залежно від інтервалу потужності для 4-лампового світильника наведено на рис.3.

Коефіцієнт корисної дії для випадку регулювання  $i$  ламп дорівнює

$$\eta_2(i) = \frac{i\alpha_i}{i\alpha_i + \delta_e}. \quad (3)$$

Або, переходячи до відносної потужності  $p$   $N$ -лампового світильника, можна записати

$$\eta_2(i) = \frac{\frac{pN}{i}}{\frac{pN}{i} + \delta_e} \quad (4)$$

Залежність ККД 4-лампового світильника від його відносної потужності наведена на рис.2 (ламана крива 2).

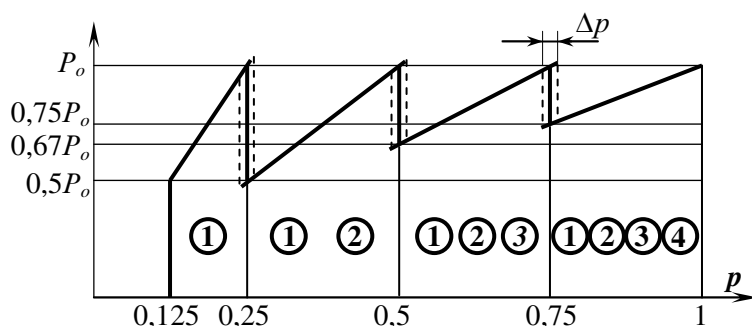
Порівнюючи залежності 1 і 2 (рис.2), можна зробити висновок, що при малих значеннях потужності багатолампового світильника дискретно-неперервний метод регулювання забезпечує суттєво вищий ККД, ніж неперервний метод регулювання.

При мінімальній потужності  $N$  лампового світильника виграш у ККД при цьому складає

$$\frac{\eta_2(i)}{\eta_1} = \frac{p_{\min} + \delta_e}{p_{\min} + \frac{\delta_e}{N}} \quad (5)$$

де  $p_{\min}$  – мінімальна відносна потужність світильника.

Для випадку  $N=4$  виграш у ККД становить 1,8 при  $\delta_e=0,1$ .



**Рисунок 3.** Залежність потужності лампи від відносної потужності світильника та номери ввімкнених ламп на різних інтервалах потужності

**Figure 3.** One lamp power versus relative lighting power and the lamp numbers on various power intervals

У процесі регулювання потужності в точках комутації можуть мати місце хаотичні вмикання-вимикання лампи, зумовлені збуджуючими факторами, та супроводжуючі їх негативні зміни світлового потоку. Для забезпечення чіткого вмикання-вимикання слід в алгоритмі керування передбачити гістерезис із зоною нечутливості  $\Delta p$  (рис.3), достатньою для надійної фіксації встановленого діапазону. Для

цього можна адаптувати методика забезпечення гістерезису, наведену в [13].

До переваг дискретно-неперервного регулювання можна віднести й те, що діапазон регулювання кожної із ламп, незалежно від кількості ламп світильника, становить половину її «корисної» потужності (від  $P_0^*$  до  $0,5 P_0^*$ ), тобто, 2:1. У такому діапазоні легко забезпечується висока якість регулювання. При неперервному ж регулюванні діапазон регулювання ламп є значно ширшим (для 4-лампового світильника він становить 8:1), що ускладнює технічну реалізацію ЕСВЧЖК за неперервним методом та створює додаткові труднощі, пов'язані з усуванням страт та флуктуацій світлового потоку [14].

Для реалізації запропонованого методу розроблено варіанти побудови енергоефективних ресурсоекономних багатолампових ЕСВЧЖК, в основу яких покладено однокаскадну структуру із взємно-інтегрованими інвертором і ККП на базі знижувально-підвищувального або ж знижувального перетворювачів напруги.

Приклад багатолампової ЕСВЧЖК з ККП на базі знижувально-підвищувального перетворювача напруги наведено на рис.4. ЕСВЧЖК складається із фільтра, випрямляча, напівкаскада ККП (транзистор  $T_0$ , діоди  $D_0, D_{1.1}$ , індуктивність  $L_0$ ) та  $N$  резонансних інверторів напруги. На транзисторах  $T_0, T_1$  та діодах  $D_{1.2}, D_{1.3}$  реалізовано ведучий інвертор, а на транзисторах  $T_i$  та діодах  $D_{i.1}-D_{i.5}$ , де  $i=2, \overline{N}$ , виконано ведені інвертори. Робота коректуючого та інверторного вузлів є подібною до аналогічних вузлів однокаскадної ЕСВЧЖК [12].

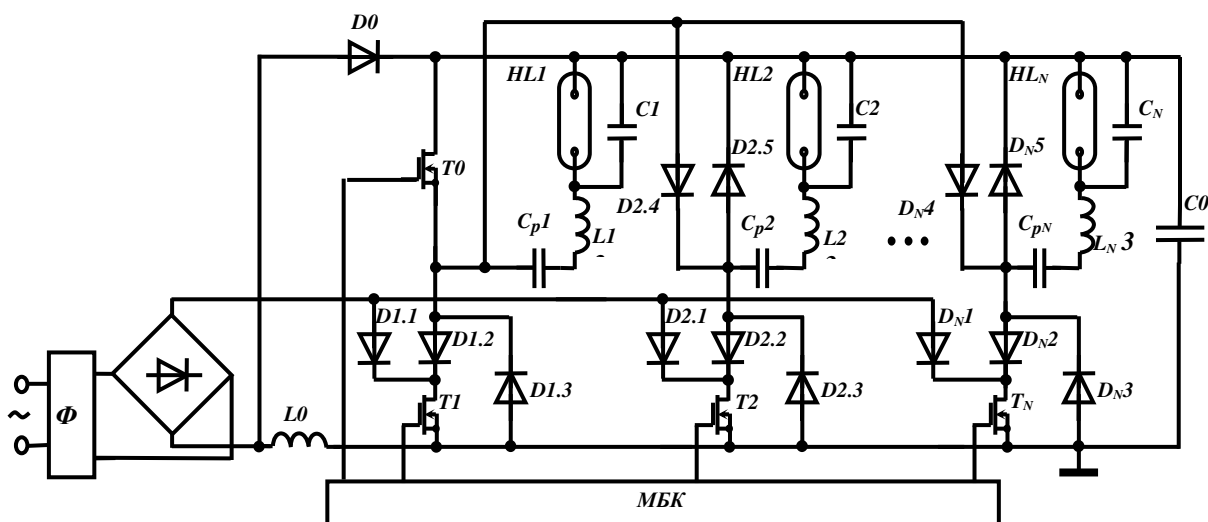


Рисунок 4. Багатолампова система живлення та керування із понижувально-підвищувальним коректором коефіцієнта потужності

Figure 4. Multilamp operation and control system with buck-boost power factor corrector

Дискретне регулювання забезпечується шляхом комутації ламп за допомогою «нижніх» транзисторів  $T_2-T_N$ . Неперервне регулювання потужності в кожному міжкомутаційному інтервалі здійснюється зміною коефіцієнта заповнення керуючих імпульсів на затворах транзисторів  $T_1-T_N$ . Керування ОЕСВЧЖК в усіх режимах його роботи здійснює мікроконтролерний блок керування МБК.

**Висновки.** Запропоновано метод неперервно-дискретного регулювання потужності багатолампових люмінесцентних світильників. Розроблено однокаскадну структуру електротехнічних систем високочастотного живлення та керування для люмінесцентних світильників. Такий підхід дає змогу підвищити енерго- та ресурсоефективність багатолампових світильників з плавним регулюванням їх світлового потоку та забезпечити високу якість споживання електроенергії.

**Conclusions.** The method of continuous-discrete power control of multiple fluorescent lighting installation is presented in this paper. Single-stage structure of electrotechnical system of high-frequency operation and control for fluorescent lamps is elaborated. Thus the approach makes possible to increase energy and resource efficacy of multiple fluorescent lighting installation with its smooth light flux control and to insure a high quality of electric energy consumption.

#### Список використаної літератури

1. Chuang, Y.A Novel Single-Stage High-Power-Factor Electronic Ballast with Boost Topology for Multiple Fluorescent Lamps / Ying-Chun Chuang, Hsien-Wen Chen // Conference Record of the 2007 IEEE Industry Applications Conference, 2007. – P. 1434–1441.

2. Wang, H.A Novel Discrete Dimming Ballast for Linear Fluorescent Lamps / H. Y. Wang, A. V. Stankovic, D. Kachmarik, L. Nerone // 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, 2004. – P. 815–820.
3. Обжерин, Е. А. Сравнительный анализ способов регулирования светового потока люминесцентных ламп [Текст] /Е.А. Обжерин, Д.И. Панфилов, В.Д. Поляков // Светотехника, 2003. – № 3. – С. 21–23.
4. Moo, C.S. Designing a Dimmable Electronic Ballasts with Voltage Control for Fluorescent Lamp / C.S. Moo, H.L. Cheng, T.F. Lin, H.C. Yen // Proc. of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE'99), 1999. – P. 786–791.
5. Moo, C.S. Designing a Dimmable Electronic Ballasts with Frequency Control / C.S. Moo, H.L. Cheng, T.F. Lin, H.C. Yen // Proc. of Applied Power Electronics Conference APEC '99, 1999. — Vol. 2. — P. 727–733.
6. Уэймаус, Д. Газоразрядные лампы [Текст]; перевод с англ.; под ред. Г.Н. Рохлина и М.И. Фугенфирова. – М.: Энергия, 1977. – 344 с.
7. Айзенберг, Ю.Б. Энергосбережение в светотехнических установках [Текст] / Ю.Б. Айзенберг, Н.В. Рожкова // Новости светотехники. – 1999. – Вып. 4 (16). – 24 с.
8. Кунгс, Я.А. Автоматизация управления электрическим освещением [Текст] / Я.А. Кунгс . – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 112 с.
9. Hsieh, G. Modeling and Estimating of the Fluorescent Lamp and Its Pre-heating control / G. Hsieh, C. Lin // Journal of light and visual environment, 1999. – Vol. 23, No. 1. – P. 1–9.
10. Waymouth, J.F. Apparatus and methods for making capacitive measurements of cathode fall in fluorescent lamps / J.F. Waymouth, R.T. Nachtrieb, F. Khan, M.A. Hartfield, M.S. Taipale, R.C. DeMeo, R.L. MacAdam // Patent US 7,002,301 B2, Feb. 21,2006.
11. Лупенко, А. Енергоефективний мультіламповий димінговий електронний пускорегулювальний апарат з дискретно-неперервним регулюванням потужності [Текст] / А. Лупенко // Матеріали п'надцятої наукової конференції Тернопільського державного університету імені Івана Пулюя, Тернопіль, 14-15 грудня 2011. – 2011. – С. 152.
12. Лупенко, А. Енерго- та ресурсоефективна система живлення та керування потужністю розрядних джерел світла багатолампового світильника [Текст] / А. Лупенко // Матеріали IV Міжнародної конференції «Світлотехніка й електроніка: історія, проблеми й перспективи», Тернопіль, 24-26 квітня 2012. – 2012. – С. 10–11.
13. Лупенко, А. Однокаскадний електронний пускорегулювальний апарат з корекцією коефіцієнта потужності та димінговими властивостями [Текст] / А. Лупенко // Вісник Тернопільського державного університету. – 2007. – Т. 12, № 2. – С. 118–129.
14. Буняк, А.М. Цифровой частотозависимый коммутатор информационных каналов [Текст] / А.М. Буняк, А.Н. Лупенко // Приборы и системы управления. 1982. – № 9. – С. 33–34.
15. Hsiesh, G.C. Harmonized Strategy for Breaking the Striations in the Fluorescent Lamps / G.C. Hsiesh // IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2001. – Vol. 48, № 2. – P. 352–366.

*Отримано 25.11.2013*