

В роботі розглянуто пікові та діючі значення струмів і напруг, значення коефіцієнту амплітуди струму люмінесцентної лампи та значення коефіцієнту гармонік при високочастотному живленні лампи електронним пускорегулювальним апаратом. Показано вплив коефіцієнту заповнення імпульсів на форму напруг і струмів вихідного каскаду. Отримані залежності є основою для розрахунку параметрів та показників вихідного каскаду електронного пускорегулювального апарату.

УДК 621.327

А. М. Лупенко, канд. техн. наук,
Л. Т. Мовчан, канд. техн. наук,
І. М. Сисак, асп.

*Тернопільський національний
 технічний університет імені
 Івана Пулюя,
 e-mail: kaf_et@tu.edu.te.ua*

ДОСЛІДЖЕННЯ ФОРМИ НАПРУГ І СТРУМІВ ВИХІДНОГО КАСКАДУ ЕЛЕКТРОННОГО БАЛАСТУ ЛЮМІНЕСЦЕНТНОЇ ЛАМПИ

Одним із шляхів підвищення енергоефективності в світлотехнічній галузі є широке впровадження люмінесцентних ламп (ЛЛ) як джерел світла в системах та пристроях внутрішнього освітлення. Живлення таких ЛЛ від промислової мережі здійснюється за допомогою пускорегулювальних апаратів, причому в останні два десятиліття спостерігається інтенсивний перехід від традиційних електромагнітних апаратів до високочастотних електронних пускорегулювальних апаратів (ЕПРА). Такі ЕПРА фактично виконують функцію силового інтерфейсу, забезпечуючи «комфортні» умови функціонування ЛЛ, з одного боку, та промислової мережі – з іншого. Завдяки високій робочій частоті ЕПРА (30-100 кГц) розрядна лампа збільшує світлову віддачу на 15÷20%, зростає її термін служби, покращуються умови запалювання ЛЛ, підвищується якість та комфортність освітлення. Крім того, ЕПРА дозволяють реалізувати ряд нових важливих функцій – регулювання світлового потоку ЛЛ, контроль її стану та підтримання оптимальних режимів ЛЛ на всіх етапах її роботи, дистанційне керування окремої ЛЛ в рамках автоматизованої системи керування освітленням. ЕПРА мають високий коефіцієнт корисної дії та забезпечують високу якість електроенергії шляхом корекції форми струму, споживаного від мережі живлення.

Одним із основних вузлів високочастотного електронного пускорегулювального апарату для живлення розрядних ламп, який забезпечує високі енергетичні показники комплекту ЕПРА-ЛЛ та досконалий алгоритм керування лампою, є його вихідний каскад. Вихідний каскад сучасного ЕПРА належить до резонансних інверторів напруги [1-3] або, рідше, струму [4, 5].

На стадії проектування ЕПРА постає проблема вибору параметрів елементів його вихідного каскаду, які б задовольняли цілому ряду вимог: забезпечити задану потужність в ЛЛ та заданий діапазон її регулювання, підтримувати режими роботи лампи та комутуючих елементів в області допустимих значень, не перевищувати заданого коефіцієнта амплітуди, забезпечити мінімальні втрати у каскаді і т.п. Рациональний вибір цих параметрів можна здійснити лише на основі аналізу його математичної моделі, і чим точніше така модель описує електричні процеси, тим

досконалішим буде проведений аналіз, тим оптимальнішими будуть шукані параметри ЕПРА.

Створенню математичної моделі вихідного каскаду ЕПРА в коливальному режимі, яка дозволяє суттєво розширити якість аналізу та підвищити його точність присвячено роботу [6]. Модель базується на операторному методі розрахунку електричних кіл, тобто точнішому ніж метод основної гармоніки [1-5]. В ній проаналізовано вихідний каскад, в якому навантаження (ЛЛ) під'єднано паралельно до конденсатора послідовного коливального контуру. В інверторі використано асиметричне керування ключами, яке забезпечує широкий діапазон регулювання потужності ЛЛ та комутацію транзисторів при нульовій напрузі. Також запропоновано методику розрахунку каскаду та одержано вирази для напруг і струмів в елементах коливального контуру та навантаженні.

Модель [6] дає можливість врахувати “тонші” ефекти, які мають місце в реальних схемах ЕПРА. Так, при малому значенні коефіцієнта заповнення відбувається “підтягування” амплітуд вищих гармонічних складових до рівня амплітуди першої гармоніки, на основі чого можна визначити такий показник коливальної системи електронного баласту ЛЛ як коефіцієнт гармонік. Крім того, необхідно знати пікові значення напруг і струмів в елементах коливальної системи вихідного каскаду ЕПРА, їх залежності від коефіцієнта заповнення для раціонального вибору елементної бази вихідного каскаду. Ще одним явищем, яке проявляється при регулюванні коефіцієнту заповнення імпульсів є зміна форми напруг і струмів коливального контуру та навантаження.

Однак в роботі [6] ці питання не розглянуті. Тому є актуальною задача врахування цих “тонших” ефектів реальних схем ЕПРА.

Метою роботи є визначення пікових та діючих значень струмів і напруг та можливого критичного значення коефіцієнту амплітуди струму лампи, визначення амплітуд вищих гармонічних складових та на основі цих даних коефіцієнту гармонік і побудова часових залежностей для елементів вихідного каскаду для різних значень коефіцієнту заповнення імпульсів.

Вираз для струму лампи протягом дії додатного імпульсу [6]:

$$i_{\infty}^{+}(t) = \frac{(1-D)U_0}{R} - \frac{1}{RLC\omega_{\text{вл}}\sqrt{A_0^2 + B_0^2}} \sqrt{k_{12}^2 + d_{12}^2} e^{-\alpha t'} \cos(\omega_{\text{вл}}t' + \arctan(\frac{d_{12}}{k_{12}}) - \arctan(\frac{B_0}{A_0})), \quad (1)$$

а протягом дії від'ємного імпульсу:

$$i_{\infty}^{-}(t) = -\frac{DU_0}{R} - \frac{1}{RLC\omega_{\text{вл}}\sqrt{A_0^2 + B_0^2}} \sqrt{k_{14}^2 + d_{14}^2} e^{-\alpha t'} \cos(\omega_{\text{вл}}t' + \arctan(\frac{d_{14}}{k_{14}}) - \arctan(\frac{B_0}{A_0})), \quad (2)$$

де D - коефіцієнт заповнення імпульсів;

U_0 - постійна напруга живлення вихідного каскаду;

R - навантаження (ЛЛ);

L і C - елементи коливального контуру;

$\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ – резонансна частота;

$\xi = \sqrt{L/C}/2R$ – параметр згасання;

$\omega_{\text{вл}} = \omega_0\sqrt{1-\xi^2}$ – частота вільних згасаючих коливань;

$$\alpha = \xi \omega_0 - \text{коефіцієнт згасання};$$

$$k_{12} = U_0 \left[1 - e^{\alpha(DT-T)} \cos[\omega_{\text{вЛ}}(DT-T)] \right]; \quad d_{12} = U_0 e^{\alpha(DT-T)} \sin[\omega_{\text{вЛ}}(DT-T)];$$

$$A_0 = \omega_{\text{вЛ}} \left[1 - e^{-\alpha T} \cos(\omega_{\text{вЛ}} T) \right] + \alpha e^{-\alpha T} \sin(\omega_{\text{вЛ}} T),$$

$$B_0 = -\omega_{\text{вЛ}} e^{-\alpha T} \sin(\omega_{\text{вЛ}} T) + \alpha \left[1 - e^{-\alpha T} \cos(\omega_{\text{вЛ}} T) \right];$$

$$k_{14} = U_0 \left[1 - e^{\alpha DT} \cos(\omega_{\text{вЛ}} DT) \right]; \quad d_{14} = U_0 e^{\alpha DT} \sin(\omega_{\text{вЛ}} DT).$$

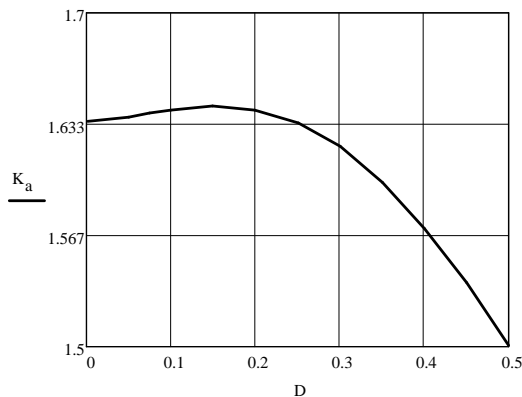


Рис. 1. - Залежність коефіцієнта амплітуди струму лампи від коефіцієнта заповнення імпульсів

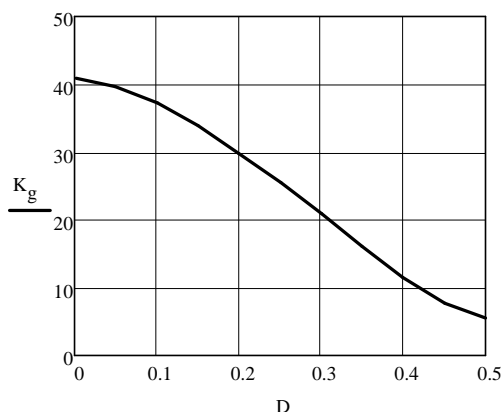


Рис. 2. - Залежність коефіцієнта гармонік від коефіцієнта заповнення імпульсів

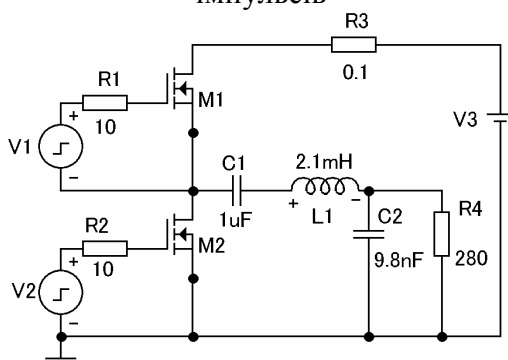


Рис. 3. - Схема моделювання вихідного каскаду в Micro-Cap 9

Мінімальне значення для струму лампи буде мати місце для додатного імпульсу при:

$$t' = \frac{\arctan\left(-\frac{\alpha}{\omega_{\text{вЛ}}}\right) - \arctan\left(\frac{d_{12}}{k_{12}}\right) + \arctan\left(\frac{B_0}{A_0}\right)}{\omega_{\text{вЛ}}}, \quad (3)$$

а максимальне для від'ємного імпульсу:

$$t' = \frac{\arctan\left(-\frac{\alpha}{\omega_{\text{вЛ}}}\right) - \arctan\left(\frac{d_{14}}{k_{14}}\right) + \arctan\left(\frac{B_0}{A_0}\right)}{\omega_{\text{вЛ}}}, \quad (4)$$

Діюче значення струму лампи можна записати у вигляді:

$$I_{\text{д}} = \sqrt{\frac{1}{T} \left(\int_0^{DT} i_{\infty}^+(t)^2 dt + \int_{DT}^T i_{\infty}^-(t)^2 dt \right)} \quad (5)$$

Коефіцієнт амплітуди струму – це відношення пікового значення струму лампи до його діючого значення:

$$K_a = \frac{I_m}{I_{\text{д}}}, \quad (6)$$

Змінюючи D від 0 до 0,5, отримано графічну залежність коефіцієнта амплітуди струму K_a від коефіцієнта заповнення імпульсів D , представлену на рис. 1.

З отриманої залежності можна зробити висновок, що коефіцієнт амплітуди струму не досягає граничного значення, рівного 1,7, яке регламентоване нормативними документами на люмінесцентні лампи. Отже діапазон регулювання коефіцієнту заповнення за цим показником може лежати в межах від 0 до 0,5.

Коефіцієнт гармонік струму ЛЛ визначається по наступній формулі:

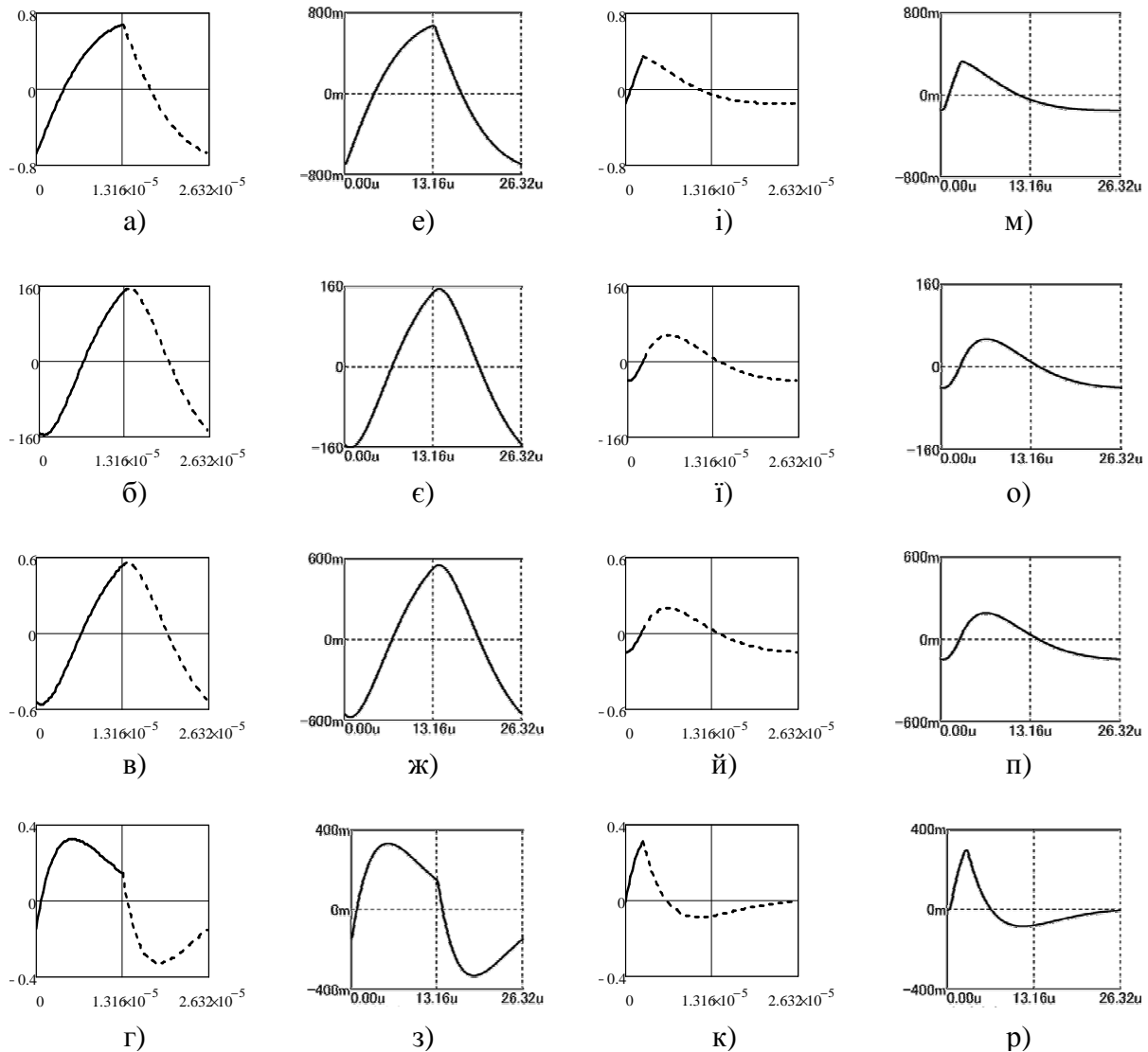
$$K_g = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n I_{\text{д}i}^2}}{I_{\text{д}1}} \cdot 100\%, \quad (7)$$

де I_{di} - діюче значення струму відповідної гармонічної складової.

Залежність коефіцієнта гармонік струму K_g від коефіцієнта заповнення імпульсів D представлено на рис. 2.

З отриманої залежності можна зробити висновок, що із зменшенням коефіцієнту заповнення імпульсів відбувається значне збільшення коефіцієнту гармонік струму лампи, що погіршує електромагнітну сумісність комплексу ЛЛ-ЕПРА при малих значеннях коефіцієнту заповнення.

Для відображення впливу коефіцієнту заповнення імпульсів на зміну форми напруг і струмів вихідного каскаду було вибрано два значення: максимально можливе $D=0,5$ та $D=0,1$, при якому лампа ще не погасає, що встановлено шляхом експерименту. Для представлення отриманих результатів було проведено обчислювальний експеримент за допомогою математичної системи MathCAD 15 та виконано моделювання вихідного каскаду ЕПРА за допомогою системи схемотехнічного моделювання Micro-Cap 9 на типовому вихідному каскаді з параметрами: $C=9,8$ нФ, $L=2,1$ мГн, $R=280$ Ом, робоча частота $f=38$ кГц, напруга живлення каскаду $U_0=415$ В (рис. 3).



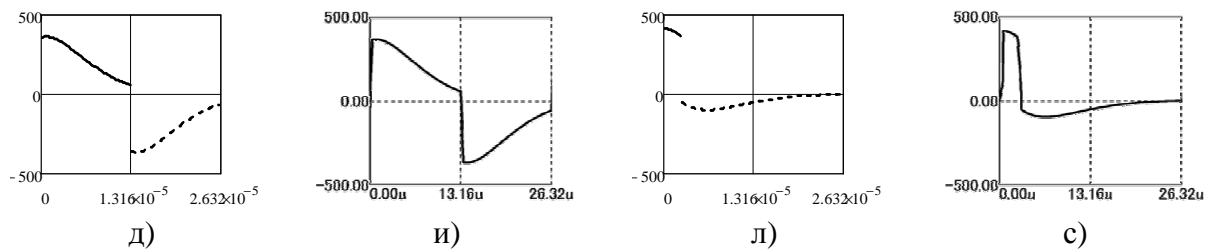


Рис. 4. - Вплив коефіцієнта заповнення (для $D=0,5$ – часові залежності, отримані за допомогою математичної моделі (а-д) та за допомогою схемотехнічного моделювання (е-и); для $D=0,1$ – ті ж залежності (і-л) та (м-с)) на форму струму індуктивності (а,е,і,м), напруги на лампі (б,е,і,о), струму лампи (в,ж,й,п), струму конденсатора (г,з,к,р), напруги на індуктивності (д, и, л,с)

Часові залежності струму індуктивності, напруги на лампі, струму на лампі, струму конденсатора та напруги на індуктивності, отримані за допомогою математичної моделі для ширини заповнення імпульсів $D = 0,5$, наведені відповідно на рис. 4, а-д (суцільна лінія для додатного імпульсу вхідної напруги, штрихова лінія для від'ємного імпульсу вхідної напруги), а для $D = 0,1$ - на рис. 4, і-л. Ті ж залежності, отримані за допомогою Мікро-Сар 9 наведені відповідно на рис. 4, е-и та рис. 4, м-с.

Результати математичного моделювання добре узгоджується з результатами, отриманими за допомогою схемотехнічного моделювання.

Висновки:

1. Визначено пікові та діючі значення струмів і напруг та на основі цих даних значення коефіцієнту амплітуди струму лампи в залежності від різної ширини заповнення імпульсів, показано, що даний коефіцієнт при використанні схеми з використанням послідовного коливального контуру не набуває критичного значення, яке регламентується нормативними документами.
2. Визначено амплітуду вищих гармонічних складових та на основі цих даних побудовано залежність коефіцієнту гармонік від ширини заповнення імпульсів.
3. Побудовано часові залежності для елементів вихідного каскаду для різних значень коефіцієнту заповнення імпульсів і показано вплив останнього на їх форму.
4. Отримані залежності є основою для розрахунку параметрів та показників вихідного каскаду електронного пускорегулювального апарату та раціонального вибору елементів його схеми.

Список літератури:

1. Kazimierczuk M.K. Electronic Ballast for Fluorescent Lamps / M.K.Kazimierczuk, W.Szaraniec // Proc. of IEEE on Power Electronics. - 1993. - vol.8. - No.4. - pp. 386-395.
2. Steigerwald R.L. A Comparison of High-Bridge Converter Topologies / R.L.Steigerwald //IEEE on Power Electronics. - 1988. - vol. 3. - No.2. – pp. 174-182.
3. Ribarich T.J. A New Control Method for dimmable high frequency electronic ballasts / T.J.Ribarich, J.J.Ribarich // Proc. of IEEE Appl. Power Electronics Conf. -1998. – pp. 2038 – 2043.
4. M.Gulko. Current-Sourcing Push-Pull Parallel-Resonance Inverter (CS-PPPI): Theory and Application, as a Fluorescent Lamp Driver / M.Gulko, S.Ben-Yaakov // Proc. of IEEE APEC'93. – 1993. - pp.411- 417.
5. B.L.Hesterman. Parallel-Resonant Programmed Ballast / B.L.Hesterman, T.M.Poehlman, M.Tek //Darnell Group Inc. - 2000.
6. А. Лупенко. Математична модель вихідного каскаду електронного пускорегулювального апарату в коливальному режимі / А.Лупенко, Л.Мовчан, В.Натяга, І.Сисак // Вісник Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя. – 2010. – том 15 №2. – с. 135-145.

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМЫ НАПРЯЖЕНИЙ И ТОКОВ ВЫХОДНОГО КАСКАДА ЭЛЕКТРОННОГО БАЛЛАСТА ЛЮМИНЕСЦЕНТНОЙ ЛАМПЫ

А. Н. Лупенко, Л. Т. Мовчан, И. М. Сысак

В работе рассмотрены максимальные и действующие значения токов и напряжений, значения коэффициента амплитуды тока люминесцентной лампы и значение коэффициента гармоник при высокочастотном питании лампы от электронного пускорегулирующего аппарата. Показано влияние коэффициента заполнения импульсов на форму напряжений и токов выходного каскада. Полученные зависимости являются основой для расчета параметров и показателей выходного каскада электронного пускорегулирующего аппарата.

STUDY OF VOLTAGE AND CURRENT SHAPES OF FLUORESCENT LAMP ELECTRONIC BALLAST OUTPUT STAGE

A. M. Lupenko, L. T. Movchan, I. M. Sysak

Fluorescent lamp peak and rms currents and voltages values, crest factor and total harmonic distortion it's electronic ballast operation is analysed in this paper. Duty cycle influence on the shapes of output stage voltages and currents is shown. The received dependences are the basis for parameters calculation of electronic ballast output stage.