

УДК 621.327

А. Лупенко, докт. техн. наук

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

ФОРМУВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИЧНОЇ КРИВОЇ НАТРІЄВОЇ ЛАМПИ ВИСОКОГО ТИСКУ ЕЛЕКТРОННИМ ПУСКОРЕГУЛЮВАЛЬНИМ АПАРАТОМ

Резюме. Проаналізовано чотири варіанти формування характеристичної кривої натрієвої лампи високого тиску високочастотним електронним пускорегулювальним апаратом упродовж усього терміну її служби. Варіанти відрізняються розташуванням та значеннями максимальних додатних та від'ємних відхилень потужності відносно номінальної потужності лампи. Формування таких кривих базується на властивостях коливального контуру резонансного інвертора напруги. Запропоновано варіант характеристичної кривої, використання якої зменшить інтенсивність деградації лампи та дасть змогу забезпечити регламентований термін її служби.

Ключові слова: натрієва лампа високого тиску, підтримання потужності, характеристична крива, електронний пускорегулювальний апарат, резонансний інвертор.

A. Lupenko

FORMING OF CHARACTERISTIC CURVE OF HIGH PRESSURE SODIUM LAMP BY ELECTRONIC BALLAST

Summary. The problems of reducing the influence of high pressure sodium (HPS) lamp resistance variations during the lamp aging on lamp power taking advantage of electronic ballast with open-loop structure is considered. The four variants of characteristic curves forming as a «power-voltage» dependences for HPS lamp with electronic ballast are analyzed. The curves differ from each other in locations and values of positive and negative power deviations from the nominal lamp power. These characteristic curves are the following: 1) the curve with start lamp power equal to a nominal lamp power and specified power positive deviation from the nominal power; 2) the curve with start and finish powers, which are equal to the nominal lamp power; 3) the curve with start power negative deviation and equal to its maximum power positive deviation from the nominal power and finish power equal to the nominal lamp power; 4) the curve with equal start and finish power negative deviations and equal to the maximum power positive deviation from the nominal power. The forming of such curves is based on the properties of parametric power maintenance by the resonant voltage inverter operating at frequency a little higher than its resonant frequency. The resonant inverter in the power source mode as an output stage of electronic ballast is analyzed. In this mode the resonant inverter maintains the power delivered to the lamp in the limits of «power-voltage» admissible values. This analysis deals with the determination of analytical expressions, which describe the interrelations between start, nominal, maximum, finish lamp powers and corresponding values of resonant tank quality factor. On the basis of these expressions the equations for power relative deviation and parameters of resonant inverter are obtained. As the result of analysis it was found that the second characteristic curve provides the minimum lamp power positive deviation from its nominal power. The third characteristic curve decreases the lamp degradation intensity and makes possible to increase the lamp lifetime. The fourth characteristic curve provides with equal minimum power negative and positive deviations from the nominal power and can be used in some applications of resonant inverter as a power source.

Key words: high-pressure sodium lamp, power maintenance, characteristic curve, electronic ballast, resonant inverter.

Постановка проблеми. Натрієві лампи високого тиску (НЛВТ) масово застосовуються в зовнішньому освітленні у зв'язку із високою світловою віддачею та тривалим терміном служби. НЛВТ, як і інші розрядні лампи, безпосередньо живитися від промислової мережі не можуть і потребують додаткового обладнання – пускорегулювальних апаратів, які виконують функцію їх запалювання та забезпечення робочого режиму. Недоліком НЛВТ є чутливість до перенавантаження по потужності, а традиційні електромагнітні пускорегулювальні апарати (ПРА) не спроможні забезпечити стабілізацію потужності в заданих межах при зміні умов їх експлуатації (наприклад, при зростанні напруги мережі живлення), а також при зміні їх параметрів

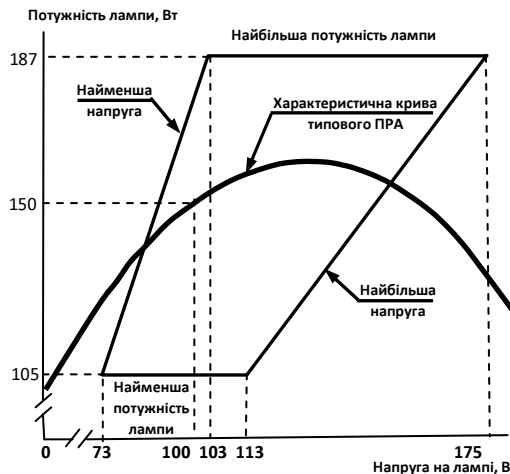


Рисунок 1. Характеристична крива НЛВТ потужністю 150 Вт

Figure 1. Characteristic curve of 150 W HPS

споживаної лампою, в заданих межах. Робоча потужність НЛВТ відповідно до вимог ГОСТу Р 53073-2008 регламентується характеристичною кривою (ХК) – залежністю потужності лампи від напруги на ній [1]. Така крива повинна розташовуватись у межах трапецієподібної області допустимих значень у координатах «напруга – потужність». На рис.1, як приклад, наведено характеристичну криву для НЛВТ потужністю 150 Вт [1]. У цій області лампа може працювати з прийнятними електротехнічними та світлотехнічними характеристиками впродовж усього терміну її експлуатації. Верхня і нижня границі визначають максимальну P_{max} і мінімальну P_{min} допустимі потужності лампи. Ліва і права границі співвідносять потужність лампи і напругу на ній відповідно для нової лампи і для лампи в кінці терміну служби. Перевищення допустимої потужності лампи скорочує термін її служби. Перевищення допустимої напруги на ній призводить до циклічного погасання, наступного охолодження та перезапалювання лампи, що скорочує термін її служби.

Еквівалентний опір лампи в процесі експлуатації зазнає значних змін, зростаючи приблизно в 2 рази відносно опору нової лампи [2]. В результаті потужність, споживана лампою, може вийти за межі області допустимих значень, що суттєво зменшить термін її служби. Тому актуальним є питання забезпечення робочої потужності НЛВТ у межах допустимих значень за допомогою ЕПРА шляхом формування ним відповідної ХК.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В роботах [4–5], присвячених підтриманню потужності в НЛВТ в заданих межах, переважно розглядаються замкнені структури ЕПРА з керуванням по потужності. Їх перевагою є висока точність

та характеристик у процесі старіння. В даний час широкого поширення набули високочастотні електронні пуско-регулювальні апарати (ЕПРА), які порівняно з традиційними електромагнітними апаратами мають значні переваги (кращі масогабаритні показники, високу енергоефективність, підвищують світлову віддачу лампи, забезпе-чують високу якість електро-енергії, дозволяють регулювати потужність лампи, легко інтегруються в системи керування освітленням, покращують якість освітлення і т.п.).

Основною задачею таких засобів є забезпечення потужності,

стабілізації потужності лампи, що гарантує її роботу в області допустимих значень потужності. Однак практична реалізація таких замкнених структур є досить складною, потребує додаткових апаратурних витрат на формування сигналу зворотного зв'язку, пропорційного потужності лампи, побудову регулятора, вирішення проблеми стійкості системи з таким нелінійним, інерційним та нестационарним об'єктом регулювання, яким є розрядна лампа. Тому ЕПРА, побудовані за замкненою структурою, мають високу вартість, що в умовах масового виробництва є їх основним недоліком.

Оскільки нормативні матеріали [1] дозволяють варіацію потужності НЛВТ у досить широких межах, актуальним є питання побудови простіших і дешевших ЕПРА з розімкненою структурою, які задовольняють вимоги до потужності НЛВТ. У розімкнених структурах ЕПРА підтримання потужності в заданих межах є параметричним, а саме, досягається шляхом відповідного вибору параметрів вихідного каскаду, який виконують на базі резонансного інвертора. При зростанні опору навантаження добротність коливального контуру резонансного інвертора зростає, а це дає змогу при раціональному виборі параметрів контуру та відомому діапазоні зміни навантаження забезпечити підтримання потужності в НЛВТ у межах області допустимих значень.

Дослідженню характеристичної кривої комплексу «ЕПРА-НЛВТ», присвячена робота [6], де на основі аналізу потужності в навантаженні коливального LC_sC_p -контуру розроблено методику розрахунку його параметрів на задане відхилення потужності від номінального значення. При зростанні опору НЛВТ характеристична крива спочатку зростає, досягає максимуму, а потім зменшується, досягаючи проміжного значення між початковим її значенням і максимумом, не виходячи за межі допуску. Але результати, отримані в [6], не повною мірою реалізують можливості резонансного інвертора щодо мінімуму зміни потужності в НЛВТ. У роботі [7] запропоновано методику розрахунку параметрів резонансного інвертора як джерела потужності, за якою характеристична крива має однакові потужності при мінімальному та максимальному опорі НЛВТ. За рахунок такого розташування крайніх точок на ХК досягається зменшення максимуму відхилення потужності лампи впродовж всього терміну її експлуатації.

Однак результати, отримані в [6,7], щодо формування ХК комплексу «ЕПРА-НЛВТ» не вичерпують можливих варіантів їх розташування в області допустимих значень та відносно номінальної потужності. Тому потребують дослідження й інші варіанти ХК для обґрунтування раціонального формування характеристичної кривої на основі порівняльного аналізу варіантів ХК.

Метою роботи є аналіз варіантів характеристичних кривих НЛВТ, які формуються електронним пускорегулювальним апаратом, побудованим за розімкненою структурою, на основі властивостей коливального контуру резонансного інвертора.

Постановка завдання – шляхом аналізу вихідного каскаду ЕПРА встановити аналітичні залежності між його параметрами та визначальними точками характеристичної кривої, необхідні для формування характеристичної кривої НЛВТ електронним пускорегулювальним апаратом, яка не виходить за межі області допустимих значень упродовж усього терміну експлуатації лампи.

Виклад основного матеріалу. Вихідний каскад ЕПРА найчастіше виконують на основі резонансного інвертора напруги з послідовним коливальним контуром, навантаження (лампа) в якому під'єднано паралельно до конденсатора [6]. Така схема характеризується не тільки простотою реалізації, але й забезпечує резонансне запалювання лампи без додаткового пристрою запалювання, що здешевлює ЕПРА. Послідовний коливальний контур при його роботі на резонансній частоті має властивості генератора струму, внаслідок чого вирішується проблема забезпечення

стійкості роботи розрядної лампи, але водночас потужність у навантаженні коливального контуру є пропорційною до опору лампи. Однак, якщо робоча частота інвертора відрізняється від резонансної частоти, з'являється можливість його роботи в режимі, наближеному до режиму джерела потужності [7]. Саме такий режим дає змогу

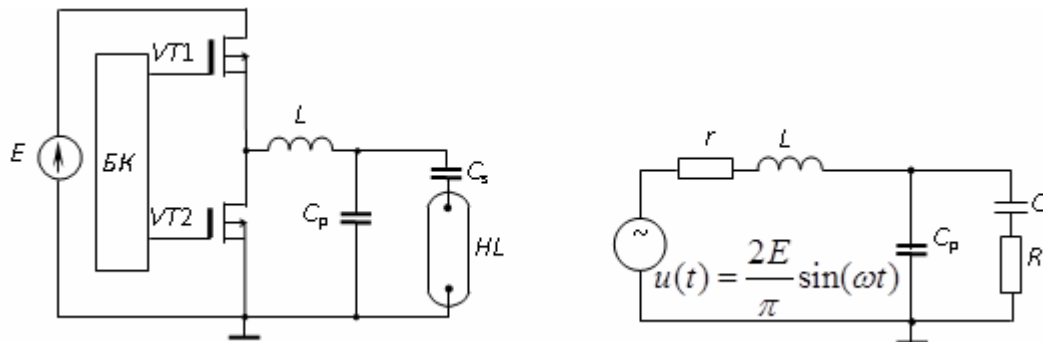


Рисунок 2. Схема вихідного каскаду ЕПРА (а) та його еквівалентна схема (б)

Figure 2. Electronic ballast output stage (a) and its simplified circuit (b)

цілеспрямовано формувати характеристичну криву НЛВТ. Тому розглянемо основні співвідношення між параметрами резонансного інвертора для аналітичного опису залежності «потужність–опір НЛВТ», або баластної кривої [8], яка є аналогом характеристичної кривої.

До складу вихідного каскаду ЕПРА (рис.2а), а входять напівмостовий інвертор, в якому роль ключів виконують транзистори $VT1$ і $VT2$, та коливальний контур з індуктивністю L та ємностями C_s та C_p , а навантаженням контуру є лампа HL . Ключі по черговою комутуються під дією протифазних керуючих напруг, які формуються драйвером високовольтних ключів. E – напруга живлення вихідного каскаду. Тому на коливальний контур подаються додатні прямокутні імпульси з амплітудою E .

Таблиця 1

| Резонансна частота «паралельного» резонансу | Характеристичний опір контуру | Добротність контуру | Відносна робоча частота | Відносна ємність | Відносний опір втрат |
|---------------------------------------------|-------------------------------|---------------------|------------------------------------|-----------------------|------------------------|
| $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC_p}}$ | $Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C_p}}$ | $Q = \frac{R}{Z_0}$ | $\Omega = \frac{\omega}{\omega_0}$ | $c = \frac{C_p}{C_s}$ | $\alpha = \frac{r}{R}$ |

Аналіз вихідного каскаду ЕПРА виконаємо методом основної гармоніки. Для цього від схеми рис.2, а перейдемо до еквівалентної схеми рис.2б, де r – еквівалентний опір втрат, який враховує втрати в каскаді; $u(t)$ – еквівалентний генератор змінної напруги першої гармоніки з амплітудою $2E/\pi$; R – еквівалентний опір НЛВТ.

Для записування аналітичних виразів в компактній формі введемо додаткові позначення, які зведені в табл.1.

Тоді комплексний вхідний опір коливального контуру можна записати у вигляді

$$Z_{ex} = R \frac{-\left[\Omega + c\left(\Omega - \frac{1}{\Omega}\right) + \alpha\Omega Q^2\right] + jQ[1 - \Omega^2 + \alpha(1+c)]}{-\Omega Q^2 + jQ(1+c)} \quad (1)$$

Його модуль та фаза відповідно дорівнюють

$$Z_{\delta x} = Z_0 Q \sqrt{\frac{\frac{1}{Q^2} \left[\Omega + c \left(\Omega - \frac{1}{\Omega} \right) + \alpha \Omega Q^2 \right]^2 + Q^2 [1 - \Omega^2 + \alpha(1+c)]}{(\Omega Q^2)^2 + (1+c)^2 \cdot Q^2}}, \quad (2)$$

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{\left[\Omega + c \left(\Omega - \frac{1}{\Omega} \right) \right] (1+c) - \Omega Q^2 (1 - \Omega^2)}{Q \left\{ \left[1 + \alpha \left[1 + \Omega^2 Q^2 + c(2+c) \right] \right] \right\}}. \quad (3)$$

З умови $\varphi=0$ визначається відносна резонансна частота коливального контуру

$$\Omega_{\text{рез}} = \frac{\omega_{\text{рез}}}{\omega_0} = \sqrt{\frac{1}{2} \left\{ 1 - \frac{1}{Q^2} (1+c)^2 + \sqrt{\left[1 - \frac{1}{Q^2} (1+c)^2 \right]^2 + \frac{4}{Q^2} c(1+c)} \right\}}. \quad (4)$$

Потужність у лампі описується виразом

$$P = \frac{2E^2}{\pi^2 Z_0} \cdot \frac{Q}{\left[\Omega + c \left(\Omega - \frac{1}{\Omega} \right) + \alpha \Omega Q \right]^2 + Q^2 [1 - \Omega^2 + \alpha(1+c)]^2}. \quad (5)$$

На практиці виконується умова $r \gg R$, тому потужність у лампі можна описати простішим виразом [6,7]

$$P = \frac{2E^2}{\pi^2 Z_0} \cdot \frac{Q}{\left[\Omega + c \left(\Omega - \frac{1}{\Omega} \right) \right]^2 + Q^2 (1 - \Omega^2)^2}. \quad (6)$$

Для випадку змінного опору навантаження та постійних інших параметрів резонансного інвертора цей вираз є рівнянням відносно змінних P та Q і фактично описує баластну криву як залежність між потужністю лампи та добротністю контуру. Нехай опір навантаження (лампи) змінюється в межах від початкового (мінімального) значення R_0 до кінцевого (максимального) значення R_K . Відповідно добротність Q резонансного контуру зростає від початкового значення Q_0 до кінцевого Q_K . Необхідно розрахувати параметри РІН так, щоб сформувати певну залежність потужності резонансного інвертора від опору навантаження (добротності контуру). Кількість варіантів розташування цієї залежності в області допустимих значень теоретично є безмежною. Будемо вважати, що варіанти, які не охоплюють точки номінальної потужності є неприйнятними. Раціональними варіантами, які слід проаналізувати, вважатимемо такі, які охоплюють точку (точки) номінальної потужності та мають зростаючу ділянку, а після досягнення точки максимуму – спадаючу ділянку. До таких варіантів віднесемо чотири, зображення яких наведено на рис.3.

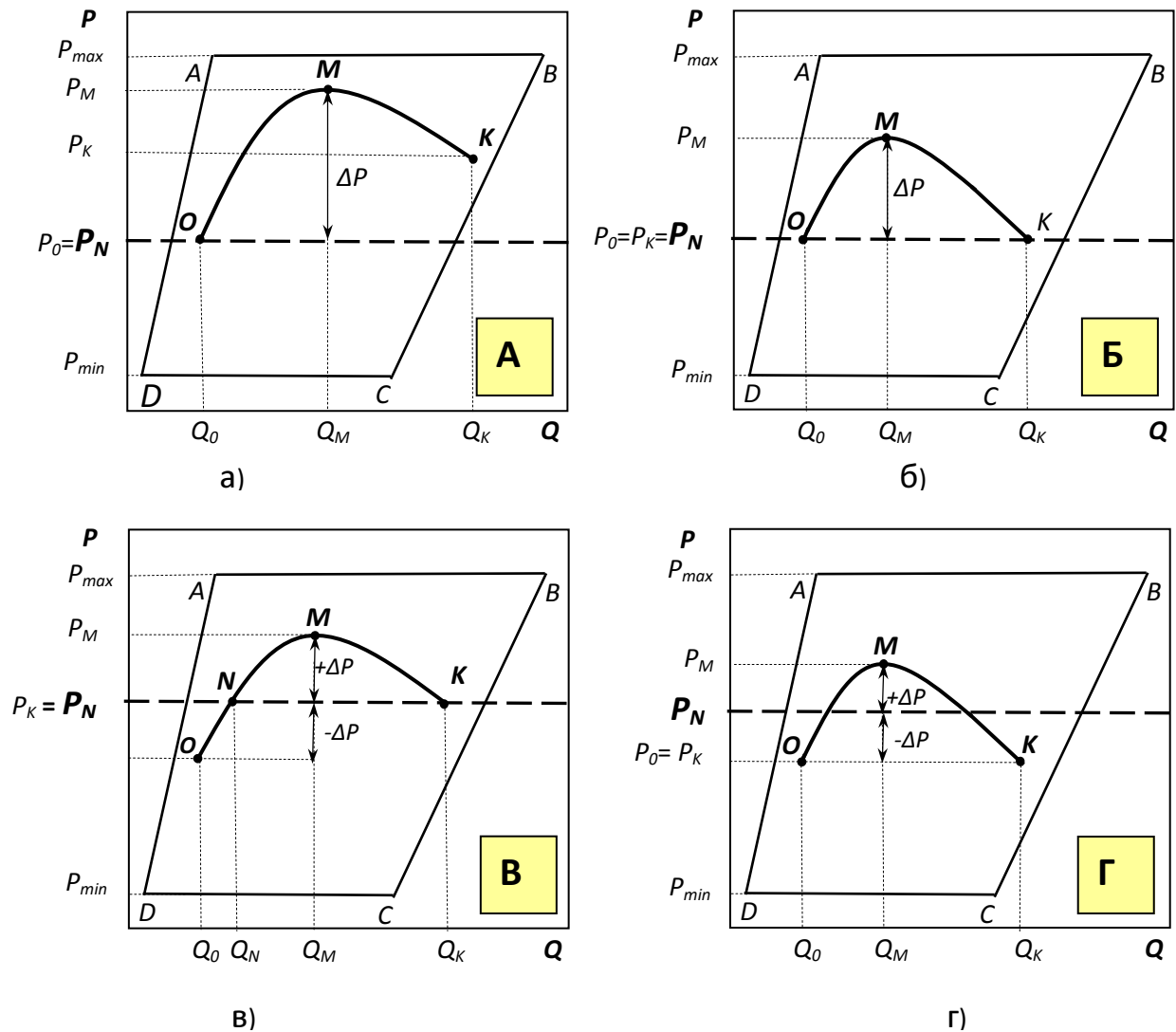


Рисунок 3. Варіанти залежностей потужності інвертора від добротності його коливальної системи

Figure 3. Variants of dependences of inverter power vs. quality factor of its resonant tank

Варіант А (рис.3а). Потужність в навантаженні резонансного інвертора «пробігає» відрізок кривої OMK . На цій кривій точка O відповідає мінімальній добротності Q_0 при початковій потужності P_0 , яка дорівнює номінальній потужності P_N лампи ($P_0=P_N$), точка M – добротності Q_M при максимальній потужності P_M , точка K – максимальній добротності Q_K при кінцевій потужності P_K , причому $P_M > P_K > P_N$. При такій характеристиці відхилення потужності ΔP від номінальної є завжди додатним.

Варіант Б (рис.3б). Відрізняється від варіанта А тим, що початкова і кінцева потужності є однаковими ($P_0=P_N$). Кінцева точка K , переміщуючись вниз до прямої $P = P_N$, «тягне» точку M у тому ж напрямі. Тому відхилення потужності ΔP від номінальної досягає мінімуму $\Delta P = \Delta P_{min}$, залишаючись завжди додатним.

Варіант В (рис.3в). Потужність у навантаженні резонансного інвертора «пробігає» відрізок кривої $ONMK$, де точка N відповідає номінальній потужності P_N . Відхилення потужності ΔP від номінальної на інтервалі ON є від'ємними, а на відрітку NK є додатними. Максимальні від'ємне та додатне відхилення є однаковими і

відповідно дорівнюють $+\Delta P$ і $-\Delta P$ і стають меншими, ніж для варіанта **Б**. Тому $P_O = P_N - \Delta P$, $P_M = P_N + \Delta P$, а $P_K = P_N$.

Варіант Г (рис.3б). Відрізняється від варіанта **Б** тим, що характеристична крива *ОМК* є зміщеною вниз на половину максимальної зміни потужності відносно рівня номінальної потужності. Тому відхилення потужності від номінальної P_N буде найменшим, а саме, приблизно в два рази меншим, ніж для варіанта **Б**.

Знайдемо аналітичні вирази для добротностей Q_0 , Q_M і Q_K (рис.4) для нової лампи, для максимальної потужності лампи та для лампи в кінці терміну експлуатації.

Діюче значення напруги U_0 лампи визначимо з виразу (6), враховуючи, що опір лампи дорівнює R_0

$$U_0 = \frac{\sqrt{2E}}{\pi} \cdot \frac{Q_0}{\sqrt{\left[\Omega + c\left(\Omega - \frac{1}{\Omega}\right)\right]^2 + Q_0^2(1 - \Omega^2)}}. \quad (7)$$

Звідси визначаємо добротність Q_0

$$Q_0 = \frac{\Omega + c\left(\Omega - \frac{1}{\Omega}\right)}{\sqrt{\left(\frac{\sqrt{2E}}{\pi U_0}\right)^2 - (1 - \Omega^2)}}. \quad (8)$$

Застосовуючи умову максимуму потужності $dP_H/dQ=0$ до виразу (6), визначаємо добротність Q_M

$$Q_M = \pm \frac{\Omega + c\left(\Omega - \frac{1}{\Omega}\right)}{1 - \Omega^2}. \quad (9)$$

При визначенні параметра добротності Q_K для лампи в кінці терміну служби візьмемо до уваги, що параметр Q_K у точці *K* досягає своїх максимальних значень. Тому резонансна частота (4) стає максимальною. Згідно з умовою комутації транзисторів при нульовій напрузі [9] частота комутації Ω повинна бути більшою за резонансну $\Omega_{рез}$. Приймаючи, що в граничному випадку $\Omega_{рез} = \Omega$ та розв'язуючи (4) відносно $Q = Q_K$, знаходимо

$$Q_K = \sqrt{\frac{(1+c)(\Omega^2 - c)}{\Omega^2(1 - \Omega^2)}}. \quad (10)$$

Визначимо відносну частоту комутації Ω , виходячи з умови забезпечення заданого модуля максимального відхилення потужності ΔP . Для цього спочатку знайдемо максимальну потужність P_M , підставляючи (9) у (6),

$$P_M = \frac{E^2}{\pi^2 Z_0 (1 - \Omega^2) \left[\Omega + c\left(\Omega - \frac{1}{\Omega}\right) \right]}. \quad (11)$$

Використовуючи вираз (11), запишемо модуль відносної зміни потужності δ_P

$$\delta_p = \frac{\Delta P}{P_N} = \frac{P_M - P_N}{P_N} = \frac{\left[\Omega + c \left(\Omega - \frac{1}{\Omega} \right) \right]^2 + Q_N^2 (1 - \Omega^2)^2}{2Q_N (1 - \Omega^2) \left[\Omega + c \left(\Omega - \frac{1}{\Omega} \right) \right]} - 1, \quad (12)$$

де P_N – номінальна потужність (вираз (6) при $Q=Q_N$).

Перетворивши вираз (12), отримуємо рівняння

$$1 + \delta_p = \frac{1 - \Omega^2}{2 \sqrt{\left(\frac{\sqrt{2}E}{\pi U_0} \right)^2 - (1 - \Omega^2)^2}} + \frac{\sqrt{\left(\frac{\sqrt{2}E}{\pi U_0} \right)^2 - (1 - \Omega^2)^2}}{2(1 - \Omega^2)}, \quad (13)$$

яке зводиться до бікватратного рівняння, а розв'язок останнього дає вираз для відносної робочої частоти, яка забезпечує відносну зміну потужності лампи δ_p

$$\Omega = \sqrt{1 - \frac{\sqrt{2}E}{\pi U_0} \sqrt{\frac{1}{2} - \frac{\sqrt{\delta_p^2 + 2\delta_p}}{2(\delta_p + 1)}}}. \quad (14)$$

Отже, робоча частота визначається через відносну зміну потужності δ_p , початкову напругу на лампі U_0 та напругу живлення E вихідного каскаду.

Для компактності запису наступних виразів введемо параметр F потужності та відносну напругу живлення A

$$F = \sqrt{\frac{1}{2} - \frac{\sqrt{\delta_p^2 + 2\delta_p}}{2(\delta_p + 1)}}, \quad (15)$$

$$A = \frac{\sqrt{2}E}{\pi U_0}. \quad (16)$$

Тоді з виразу (14) можна записати

$$1 - \Omega^2 = A \cdot F. \quad (17)$$

Вирази (8)÷(10) для добротностей Q_0 , Q_M та Q_K тоді запишемо у вигляді

$$Q_0 = \frac{1 - A \cdot F(1 + c)}{A \sqrt{(1 - F^2)(1 - A \cdot F)}}, \quad (18)$$

$$Q_M = \frac{1 - AF(1 + c)}{AF \sqrt{1 - AF}}, \quad (19)$$

$$Q_K = \sqrt{\frac{(1 + c)(1 - AF - c)}{AF(1 - AF)}}. \quad (20)$$

У роботі [7] показано, що у випадку рівності кінцевої й номінальної потужностей ($P_0=P_K$) відношення добротностей Q_K і Q_0 описується виразом

$$\alpha = \frac{Q_K}{Q_0} = \frac{1-F^2}{F^2}. \quad (21)$$

Для варіанта **В** за цим виразом, підставляючи Q_N замість Q_0 , визначимо опір навантаження R_N при номінальній потужності в точці N (рис.3в) через відомий опір R_K , а саме:

$$R_N = \frac{R_K}{R_0} \frac{1-F^2}{F^2}, \quad (22)$$

та напругу U_N на лампі в цій точці

$$U_N = \sqrt{R_N P_N}. \quad (23)$$

Максимальна відносна зміна потужності дорівнює

$$\delta_P = \frac{(\sqrt{\alpha}-1)^2}{2\sqrt{\alpha}}. \quad (24)$$

Для варіанта **Г**, визначивши початкову потужність P_0 за виразом

$$P_0 = P_N \left(1 - \frac{\delta_P}{2}\right), \quad (25)$$

знаходимо початкову напругу на навантаженні

$$U_0 = \sqrt{R_0 P_0}. \quad (26)$$

У [7] також показано, що квадрат добротності паралельно-послідовного резонансного контуру, яка відповідає максимальній потужності в його змінному навантаженні, дорівнює добутку його добротностей, які відповідають однаковим рівням потужностей у навантаженні. Для даного випадку це можна записати так:

$$Q_M^2 = Q_0 Q_K. \quad (27)$$

Тоді, підставляючи вирази (18)–(20) у вираз (27), отримуємо перше рівняння системи двох рівнянь відносно c і A

$$F^2 \sqrt{\frac{A(1+c)(1-AF-c)}{F(1-F^2)}} = 1 - AF(1+c). \quad (28)$$

Друге рівняння запишемо як вираз для відносної параметричної чутливості потужності до індуктивності дроселя, отриманий в [6], яка є найвищою і технологічний розкид якої є найбільшим порівняно з розкидом параметрів компонентів резонансного контуру. Цей вираз після перетворень має вигляд [7]

$$S_L^P = 2(1 - AF) \left[\frac{F}{A} - \frac{1 - F^2}{1 - AF(1 + c)} \right]. \quad (29)$$

Рівняння (28) і (29) утворюють систему двох рівнянь стосовно відносного параметра напруги A і відносної ємності c . Розв'язок цієї системи рівнянь служить основою для розрахунку параметрів коливного контуру, при яких забезпечується відповідна ХК. Ця система не має аналітичного розв'язку, тому для її розв'язання необхідно використати чисельні методи.

На основі проведеного аналізу для кожного з варіантів ХК виконаємо розрахунок вихідного каскаду ЕПРА з натрієвою лампою SON-T 150W PHILIPS при наступних даних: $P_N=150$ Вт, $P_{max}=185$ Вт, $P_{min}=105$ Вт, $R_0=64$ Ом, $R_K=128$ Ом, $S_L^P=-1,5$, робоча частота дорівнює 120 кГц.

Варіант А. Для цього варіанта необхідно задати з практичних міркувань відносну зміну потужності, наприклад, $\delta P=0,1$. Розраховуємо: 1) параметр потужності F з виразу (15); 2) параметри A та c з системи рівнянь (28) і (29) та напругу живлення з (16); 3) відносну частоту комутації за виразом (17); 4) добротності Q_0 , Q_M та Q_K за виразами (18), (19) та (20); 5) характеристичний опір Z_0 як відношення R/Q_0 ; 6) частоту $\omega_0 = \omega / \Omega$ та параметри L , C_p , C_s за табл.1.

Варіант Б. Розраховуємо: 1) параметр відносної потужності F за заданими R_0 та R_K з виразу (21) та відносну зміну потужності δP з виразу (24); Решту пунктів розрахунку взяти з варіанта А (пп.2–5).

Варіант В. Розраховуємо: 1) параметр відносної потужності F за заданими R_0 та R_K з виразу (21); 2) для визначення відносної зміни потужності необхідно, задаючись значеннями δP як параметром, побудувати сімейство характеристик «потужність–опір навантаження», за яким визначити значеннями δP , при якому додатні та від'ємні відхилення потужності є однаковими; 3) параметри A та c з системи рівнянь (28) і (29); 4) відносну частоту комутації за виразом (17); 5) добротності Q_N , (підставляючи Q_N замість Q_0) за виразом (18) та Q_M , Q_K за виразами (19), (20); 6) характеристичний опір Z_0 як відношення R/Q_0 ; 6) частоту $\omega_0 = \omega / \Omega$ та параметри L , C_p , C_s за табл.1. 8) Визначаємо опір R_N та напругу U_N за виразами (24) та (25); 9) За виразом (16), підставляючи в нього U_N замість U_0 , визначаємо напругу живлення.

Варіант Г. Розраховуємо: 1) за опорами R_0 і R_K параметр F з виразу (21) та відносну; 2) параметри A та c з системи рівнянь (28) і (29); 3) відносну частоту комутації за виразом (17); 4) добротності Q_0 , Q_M та Q_K за виразами (18), (19) та (20); 5) початкові потужність P_0 , напругу U_0 та напругу E живлення РІН за виразами відповідно (25), (26) та (16); 6) характеристичний опір Z_0 як відношення R/Q_0 ; 6) частоту $\omega_0 = \omega / \Omega$ та параметри L , C_p , C_s за табл.1.

Таблиця 2

| Варіант | E , В | L , мкГн | C_p , нФ | C_s , нФ | P_0 , Вт | P_M , Вт | P_K , Вт | δ_p , % |
|----------|---------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|----------------|
| А | 268,7 | 114 | 5,1 | 48,9 | 150,06 | 165,07 | 162,75 | 10 |
| Б | 240 | 110 | 6,2 | 32,7 | 150 | 160,8 | 150,6 | 6,1 |
| В | 242 | 84 | 7,8 | 317 | 143,7 | 156 | 150 | 4 |
| Г | 242 | 106 | 6,35 | $C_s=33,6$ | 145,45 | 154,27 | 145,45 | 3,03 |

Результати розрахунків параметрів резонансного інвертора для чотирьох варіантів ХК наведено в табл.2.

За результатами розрахунків, використовуючи вирази (6), (8) для всіх варіантів, побудовано баластні криві та характеристичні криві, які наведено відповідно на рис.4

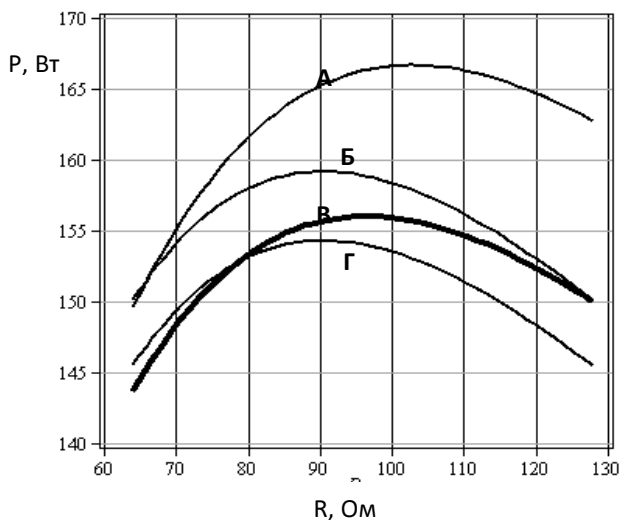


Рисунок 4. Баластні криві для варіантів А – Г

Figure 4. Ballast curves for variants A – Г

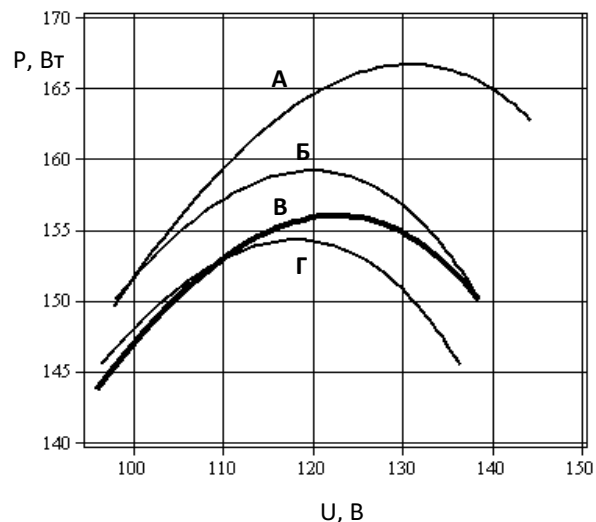


Рисунок 5. Характеристичні криві для варіантів А– Г

Figure 5. Characteristic curves for variants A – Г

та 5. Порівнюючи ХК рис.1 та рис.5, можна зробити висновок, що всі ХК задовольняють вимоги до роботи НЛВТ в області допустимих значень. Найбільше відхилення потужності має ХК варіанта А, а найменше – варіанта Г.

Аналізуючи ці криві, можна бачити, що найдоцільнішою для комплекту «ЕПРА-НЛВТ» є ХК варіанта **В**, виходячи з наступного.

1. Відхилення потужності від номінальної в процесі старіння НЛВТ є незначними (4%).

2. Нова лампа працює з потужністю, на 4% меншою за номінальну, а світловий потік нової лампи та її світлова віддача при такому малому зменшенні потужності залишаються високими, її ресурс витрачається економніше.

3. Максимальне перевищення номінальної потужності в процесі експлуатації є також незначним (4%), що також зменшує інтенсивність зносу електродів та фізико-хімічних процесів у лампі.

4. Через це в кінці регламентованого терміну експлуатації лампа матиме кращі світлотехнічні та електротехнічні показники (світловий потік, світлову віддачу, напругу, опір), ніж при використанні традиційних електромагнітних ПРА, чи при формуванні ХК за варіантами **А**, **Б**, **Г**. Таким чином, формування ХК за варіантом **В** дає

зможу зменшити спад світлового потоку НЛВТ у кінці регламентованого терміну служби, або ж продовжити термін її служби. Питання кількісного оцінювання позитивного ефекту від формування такої ХК комплектом «ЕПРА-НЛВТ» потребує подальших досліджень.

ХК варіанта Г має найменше відхилення потужності від номінальної, тому таку криву доцільно використовувати в резонансних інверторах напруги, які працюють у режимі джерела потужності.

Висновки. Серед запропонованих варіантів характеристичних кривих НЛВТ, які формуються ЕПРА впродовж усього терміну її служби, кращою є характеристична крива, яка має такі визначальні точки: точка початкової потужності лампи з фіксованим від'ємним відхиленням потужності від її номінальної потужності (для нової лампи); точка максимальної потужності лампи з фіксованим додатним відхиленням потужності, й це додатне відхилення дорівнює від'ємному відхиленню в початковій точці; точка кінцевої потужності лампи, яка дорівнює номінальній потужності (для лампи в кінці терміну служби). Така крива дасть змогу зменшити варіації потужності лампи впродовж терміну її служби і, як результат, зменшити інтенсивність деградації в лампі в процесі її експлуатації та отримати більший світловий потік у кінці регламентованого терміну служби НЛВТ, або ж збільшити термін її служби в порівнянні з електромагнітними ПРА.

Характеристична крива, для якої відхилення потужності при мінімальному та максимальному навантаженні є від'ємними та однаковими і дорівнюють максимальному додатному відхиленню при максимальній потужності, забезпечує малу зміну потужності в навантаженні. Тому таку криву доцільно використовувати в резонансних інверторах напруги, які працюють у режимі, близькому до режиму джерела потужності.

Conclusions. Among the proposed power-voltage characteristic curves of HPS lamp formed by high-frequency electronic ballast, which modify the power delivered to the lamp throughout its lifetime, the better is the characteristic curve, which has the following specific points: start lamp power point with fixed power negative deviation from nominal power (for new lamp); maximum lamp power point with fixed positive power deviation from nominal power and this positive deviation is equal to negative deviation at start point; finish lamp power point with power equal to nominal power (for lamp at the end of lifetime). This curve makes possible to reduce the lamp power variations regarding the lamp aging ensuring that the correct amount of power is dissipated in the lamp and as result to reduce the intensity of lamp aging and to obtain higher lamp light flux at the end of its relative lifetime or to increase the lamp lifetime as compared with the electromagnetic ballasts.

The characteristic curve with power deviations at minimum and maximum loads are negative and equal to its positive deviation at maximum power and provides small output power variation. Therefore this curve is worth being used for some applications of resonant inverter as a power source.

Список використаної літератури

1. Лампы натриевые высокого давления. Эксплуатационные требования. ГОСТ Р 53073-2008 (МЭК 60662:2002) / Москва: Стандартинформ, 2009. – 53с.
2. Branas, C. Contributions to the Design and Control of LCsCp Resonant Inverters to Drive High-Power HPS Lamps [Text] / C. Branas, F.I. Azcondo, S. Bracho. // IEEE Transactions on Power Electronics, vol.52, No.1, 2003. – P.56–65.
3. Рохлин, Г.Н. Разрядные источники света [Текст] / Г.Н. Рохлин. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 720 с.
4. Azcondo, F.J. Power-Mode-Controlled Power-Factor-Corrector for Electronic Ballast [Text] / F.J. Azcondo, C. Branas, R. Casanueva, S. Bracho. // IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 47, No.4, 2000. – P.796–808.
5. Kaiser, W. Hybrid Electronic Ballast Operating the HPS Lamp at Constant Power [Text] / W. Kaiser // IEEE Transactions on Industry Applications Vol.34, No.2, 1998. – P.319–324.

6. Branas, C. Design of LCpCs Resonant Inverters as a Power Source for HI Lamp Ballast Application [Text] / C. Branas, F.J. Azcondo, S. Bracho // IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol.41, 2005. – P.1584–1593.
7. Лупенко, А.М. Електронний пускорегулювальний апарат натрієвої лампи високого тиску як джерело потужності [Текст] / А.М. Лупенко, С.А. Лупенко // Вісник Тернопільського національного технічного університету. – Тернопіль, 2011. – Т.16, №1. – С.133–145.
8. Melis, J. Bllast Curves for HPS Lamps Operating on High Frequency [Text] / J. Melis // Conference Record IEEE-IAS Annu. Meeting, Vol.2, 1992. – P.1908–1914.
9. Kazimierchuk, M.K. Resonant power converters [Text] / M.K. Kazimierchuk, D. Charkovski. // Wiley – IEEE Press. 2 edition. – 2011. – 632 p.

Отримано 15.01.2015