УДК 621.327

БАГАТОСЕКЦІЙНІ РЕЗОНАНСНІ ІНВЕРТОРИ НАПРУГИ В ЕЛЕКТРОННОМУ ПУСКОРЕГУЛЮВАЛЬНОМУ АПАРАТІ

А.М.Лупенко, канд.техн.наук,
Тернопільський національний університет імені Івана Пулюя,
вул. Руська, 56, Тернопіль, 46001, Україна.

Проведено аналіз резонансного інвертора напруги, побудованого на базі довільної кількості паралельно ввімкнених напівмостових секцій, як вихідного каскаду електронного пускорегулювального апарата для натрієвих ламп високого тиску. Отримано аналітичні вирази для струмів та потужностей n*-секційного інвертора, розглянуто особливості фазового регулювання потужності в його навантаженні*. Бібл. 7, рис. 5.

Ключові слова: резонансний інвертор напруги, математична модель, натрієва лампа високого тиску, електронний пускорегулювальний апарат.

Резонансні інвертори напруги широко використовуються у високочастотних (30÷200 кГц) електронних пускорегулювальних апаратах (ЕПРА) для живлення розрядних джерел світла [1], в установках індукційного нагріву у частотному діапазоні 10–440 кГц [3], для живлення електроакустичних перетворювачів і т.п.

В ЕПРА для натрієвих ламп високого тиску (НЛВТ), побудованих на основі резонансних інверторів, крім живлення ламп в режимі номінальної потужності, можна вирішувати задачі регулювання потужності, а також реалізувати їхнє «м'яке» запалювання. При цьому відпадає потреба у додатковому запалювальному пристрої, що зменшує вартість ЕПРА, а також збільшує термін служби НЛВТ [1]. У зовнішньому освітленні поширені потужні (1 кВт і більше) натрієві лампи високого тиску та металогалогенні лампи. Оскільки НЛВТ проектують на робочу напругу приблизно 100 В, то в лампах великої потужності суттєво збільшуються робочі струми, і, як результат, зростають струми у компонентах ЕПРА та втрати в них. Тому в потужних ЕПРА доцільно використовувати паралельне ввімкнення інверторів як окремих секцій, які працюють на спільне навантаження. Такі багатосекційні інвертори дають можливість побудови ЕПРА потужних ламп на дешевших менш потужних транзисторах і дроселях з меншими струмами насичення та габаритами, оскільки струми інвертора рівномірно розподіляються між його секціями. Крім того, такі ЕПРА повинні забезпечувати можливість регулювання потужності НЛВТ в області її допустимих значень, що є основою для побудови сучасних автоматизованих систем керування освітленням.

Питанню використання багатосекційних резонансних інверторів напруги в ЕПРА присвячено відносно мало робіт. У роботі [6] розглянуто частковий випадок побудови такого ЕПРА – двосекційний інвертор для НЛВТ потужністю до 250 Вт, а у роботі [5] – чотирисекційний інвертор для НЛВТ потужністю 600 Вт. Однак загальний випадок побудови інверторів для НЛВТ на основі довільного числа секцій та їхній аналіз з метою дослідження особливостей роботи у загальному вигляді розглянуто в недостатньому обсязі.

Метою даної роботи є розробка математичної моделі багатосекційного резонансного інвертора напруги, побудованого шляхом паралельного ввімкнення довільної кількості напівмостових секцій, які працюють на спільне навантаження. Така модель дасть можливість досліджувати багатосекційні інвертори та проводити їхній порівняльний аналіз для вибору реалізації ЕПРА, адекватної конкретній задачі.

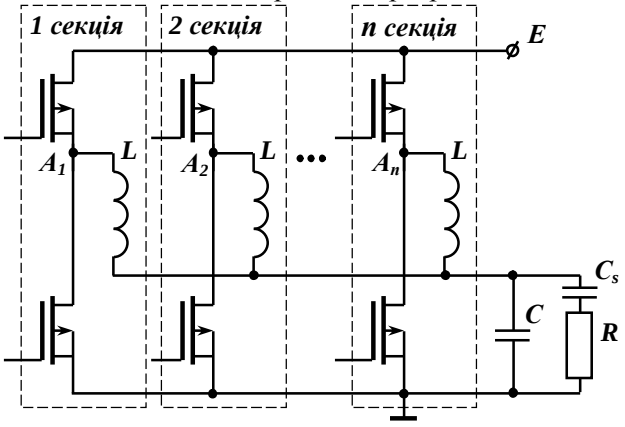

Рис. 1

Схема *n*-секційного інвертора показана на рис. 1. Кожна секція є напівмостовим резонансним інвертором напруги, в якому навантаження R (лампа) через роздільний конденсатор C_s підключено до конденсатора C послідовного резонансного контура, до складу якого також входять n однакових індуктивностей L. Середні точ-

© Лупенко А.М., 2012

ки A_1, A_2, …, A_n кожної з секцій через ці індуктивності підключено до конденсаторів C і C_s. Напруги в точках A_1, A_2, …, A_n є періодичними прямокутними імпульсами з амплітудою, що дорівнює напрузі живлення E інвер-тора, та з коефіцієнтом заповнення d=0,5. У загальному випадку кожна з напруг має довільний фазовий зсув α_i, ($i=\overline{1,n}$) відносно початку періоду.

Зважаючи на фільтруючі властивості резонансного контура, аналіз n-секційного інвертора виконаємо методом основної гармоніки [2].

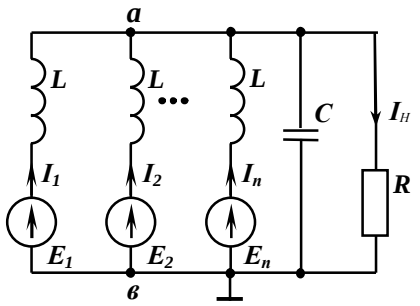

Рис. 2

Еквівалентна схема інвертора показана на рис. 2, де ємність C_s (рис. 1) не врахована у зв'язку з тим, що опір роздільного конденсатора набагато менший за опір навантаження, тому для аналізу можна прийняти $C_s=\infty$. Електрорушійні сили джерел напруг E_1, E_2, …, E_n можна записати у вигляді

$$\underline{E}_1 = 2Ee^{-j\alpha_1}/\pi\,; \qquad \underline{E}_2 = 2Ee^{-j\alpha_2}/\pi\,; \qquad \underline{E}_n = 2Ee^{-j\alpha_n}/\pi\,. \tag{1}$$

Введемо такі позначення: ω – робоча частота; ω_0 – резонансна частота резонансної системи $\omega_0=\omega/\Omega=\sqrt{n/LC}$; Z_0 – її характеристичний опір ($Z_0=\sqrt{n/\omega_0 C}$); D – її добротність ($D=nR/Z_0$); ωC та ωL – модулі провідності конденсатора C та опору індуктивності L ($\omega C = n\Omega/Z_0$, $\omega L = \Omega Z_0$).

Комплексний опір навантаження та напруга в точках a, $в$ дорівнюють (рис. 2)

$$\underline{Z} = \left(j\omega C + \frac{1}{R}\right)^{-1} = \frac{DZ_0}{n(1+j\Omega D)}. \qquad \underline{U}_{ab} = \frac{\sum_{i=1}^{n}\underline{E}_i (j\omega L)^{-1}}{n(j\omega L)^{-1}+Z^{-1}} = \frac{2E}{\pi}\frac{n^{-1}\sum_{i=1}^{n}e^{-j\alpha_i}}{\left(1-\Omega^2\right)+j\Omega/D}. \tag{2,3}$$

Поєднуючи вирази (1) і (3), знайдемо комплексний струм $\underline{I}_k$, який генерує k-секція інвертора, ($k=\overline{1,n}$):

$$\underline{I}_k = \frac{2E}{\pi Z_0}\frac{\left(\frac{1}{\Omega}-\Omega+j\frac{1}{D}\right)e^{-j\alpha_k}-\frac{1}{n\Omega}\sum_{i=1}^{n}e^{-j\alpha_i}}{j\left(1-\Omega^2\right)-\Omega/D}. \tag{4}$$

Струм у навантаженні n-секційного інвертора визначаємо за виразом

$$\underline{I}_H = \frac{\underline{U}_{ab}}{R} = \frac{2E}{\pi Z_0}\frac{1}{D}\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(\sin\alpha_i + j\cos\alpha_i\right)}{j\left(1-\Omega^2\right)-\Omega/D}. \tag{5}$$

Знайдемо потужність у навантаженні R. Для цього визначимо повні потужності кожної з секцій інвертора та, додавши їх, знайдемо повну потужність всього n-секційного інвертора. При цьому дійсна складова повної потужності становитиме активну потужність, споживану навантаженням.

Повну потужність k-ї секції інвертора можна записати у вигляді

$$-j\frac{2E^2}{\pi^2 Z_0}\frac{\frac{1}{n\Omega}\left(\cos\alpha_k\sum_{i=1}^{n}\sin\alpha_i-\sin\alpha_k\sum_{i=1}^{n}\cos\alpha_i\right)+\frac{1}{D}}{j\left(1-\Omega^2\right)-\Omega/D}. \tag{6}$$

Тоді повна потужність інвертора

$$\underline{S}=\sum_{k=1}^{n}S_k=\frac{2E^2}{\pi^2 Z_0}\frac{n\left(\frac{1}{\Omega}-\Omega\right)-\frac{1}{n\Omega}\left(\sum_{k=1}^{n}\cos\alpha_k\sum_{i=1}^{n}\cos\alpha_i+\sum_{k=1}^{n}\sin\alpha_k\sum_{i=1}^{n}\sin\alpha_i\right)}{j\left(1-\Omega^2\right)-\Omega/D}-$$

$$-j\frac{2E^2}{\pi^2 Z_0}\frac{\frac{1}{n\Omega}\left(\sum_{k=1}^{n}\cos\alpha_k\sum_{i=1}^{n}\sin\alpha_i-\sum_{k=1}^{n}\sin\alpha_k\sum_{i=1}^{n}\cos\alpha_i\right)+\frac{n}{D}}{j\left(1-\Omega^2\right)-\Omega/D}\,. \tag{7}$$

У подальшому будемо вважати ЕРС E_1 за опорну, початкова фаза якої α_1=0. Врахувавши це та той факт, що різниця у чисельнику уявної частини виразу (7) дорівнює нулю, отримаємо загальний вираз для повної потужності n-секційного резонансного інвертора

$$\underline{S}=\frac{2E^2}{\pi^2 Z_0}\frac{-n\Omega+\dfrac{n-1}{\Omega}-\dfrac{2}{n\Omega}\left[\sum\limits_{i=2}^{n}\cos\alpha_i+\dfrac{1}{2}\sum\limits_{k=2}^{n}\sum\limits_{i=2}^{n}\cos\left(\alpha_k-\alpha_i\right)-\dfrac{n-1}{2}\right]-j\dfrac{n}{D}}{-j\left(1-\Omega^2\right)+\Omega/D}. \tag{8}$$

Активна та реактивна потужності інвертора відповідно дорівнюють

$$P=\frac{2E^2}{\pi^2 Z_0}\frac{\dfrac{2}{nD}\left[\dfrac{1-n^2}{2}+\sum\limits_{i=2}^{n}\cos\alpha_i+\dfrac{1}{2}\sum\limits_{k=2}^{n}\sum\limits_{i=2}^{n}\cos\left(\alpha_k-\alpha_i\right)\right]+\dfrac{n}{D}}{\left(1-\Omega^2\right)^2+\left(\Omega/D\right)^2}; \tag{9}$$

$$Q=\frac{2E^2}{\pi^2 Z_0}\frac{\dfrac{2\left(\Omega^2-1\right)}{n\Omega}\left[\left[\dfrac{1-n^2}{2}+\sum\limits_{i=2}^{n}\cos\alpha_i+\dfrac{1}{2}\sum\limits_{k=2}^{n}\sum\limits_{i=2}^{n}\cos\left(\alpha_k-\alpha_i\right)\right]\right]-n\Omega\left(1-\Omega^2-\dfrac{1}{D^2}\right)}{\left(1-\Omega^2\right)^2+\left(\Omega/D\right)^2}. \tag{10}$$

Коефіцієнт корисної дії (ККД) інвертора можна подати виразом

$$\eta=\left(1+rR^{-1}I_H^{-2}\sum_{k=1}^{n}I_k^2\right)^{-1}, \tag{11}$$

де r – еквівалентний опір втрат інвертора; I_k, I_H – амплітудні значення струмів.

Вирази (4), (5) та (9)÷(11) дозволяють проводити аналіз роботи n-секційного інвертора при різних комбінаціях фазових зсувів α_i. Як видно з виразу (9), змінюючи фазові зсуви, можна регулювати потужність у навантаженні. Для простоти реалізації блока керування інвертором приймемо фазові зсуви α_i у всіх секціях, крім n-ї регулювальної секції, рівними нулю, тобто $\alpha_i=0$, $i=1,\overline{(n-1)}$ та $\alpha_n=var$. Тоді, змінюючи α_n, можна регулювати потужність у НЛВТ, або ж підтримувати потужність у області допустимих значень при зміні опору лампи в процесі експлуатації [4].

Застосуємо отримані вирази (4), (5),(9) та (10) для аналізу інверторів з кількістю секцій n=2,3,4.

Для двохсекційного інвертора:

$$\underline{I}_1=\frac{2E}{\pi Z_0}\frac{\left[\left(\dfrac{1}{\Omega}-\Omega\right)-\dfrac{1}{2\Omega}\cos\alpha_2\right]+j\left[\dfrac{1}{2\Omega}\sin\alpha_2+\dfrac{1}{D}\right]}{j(1-\Omega^2)-\Omega/D}; \tag{12}$$

$$\underline{I}_2=\frac{2E}{\pi Z_0}\frac{\left[-\dfrac{1}{2\Omega}+\left(\dfrac{1}{2\Omega}-\Omega\right)\cos\alpha_2+\dfrac{1}{D}\sin\alpha_2\right]+j\left[\left(\Omega-\dfrac{1}{2\Omega}\right)\sin\alpha_2+\dfrac{1}{D}\cos\alpha_2\right]}{j(1-\Omega^2)-\Omega/D}; \tag{13}$$

$$\underline{I}_H=\frac{2E}{\pi Z_0}\frac{1}{D}\frac{\sin\alpha_2+j\left(1+\cos\alpha_2\right)}{j\left(1-\Omega^2\right)-\Omega/D}; \qquad P=\frac{2E^2}{\pi^2 Z_0}\frac{1}{D}\frac{\left[-1+\cos\alpha_2\right]+2}{\left(1-\Omega^2\right)^2+\left(\Omega/D\right)^2}, \tag{14,15}$$

$$Q=\frac{2E^2}{\pi^2 Z_0}\frac{\dfrac{\Omega^2-1}{\Omega}\left[-1+\cos\alpha_2\right]-2\Omega\left(1-\Omega^2-\dfrac{1}{D^2}\right)}{\left(1-\Omega^2\right)^2+\left(\Omega/D\right)^2}. \tag{16}$$

Для трисекційного інвертора $\underline{I}_1=\underline{I}_2=\dfrac{2E}{\pi Z_0}\dfrac{\left[\left(\dfrac{1}{\Omega}-\Omega\right)-\dfrac{1}{3\Omega}\cos\alpha_3\right]+j\left[\dfrac{1}{3\Omega}\sin\alpha_3+\dfrac{1}{D}\right]}{j(1-\Omega^2)-\Omega/D}$; (17)

$$\underline{I}_3=\frac{2E}{\pi Z_0}\frac{\left[-\dfrac{3}{2\Omega}+\left(\dfrac{2}{3\Omega}-\Omega\right)\cos\alpha_3+\dfrac{1}{D}\sin\alpha_3\right]+j\left[\left(\Omega-\dfrac{2}{3\Omega}\right)\sin\alpha_3+\dfrac{1}{D}\cos\alpha_3\right]}{j(1-\Omega^2)-\Omega/D}; \tag{18}$$

$$\underline{I}_H=\frac{2E}{\pi Z_0}\frac{1}{D}\frac{\sin\alpha_3+j\left(2+\cos\alpha_3\right)}{j\left(1-\Omega^2\right)-\Omega/D}; \qquad P=\frac{2E^2}{\pi^2 Z_0}\frac{1}{D}\frac{2\left[-2+2\cos\alpha_3\right]/3+3}{\left(1-\Omega^2\right)^2+\left(\Omega/D\right)^2}; \tag{19,20}$$

$$Q=\frac{2E^2}{\pi^2 Z_0}\frac{\frac{2(\Omega^2-1)}{3\Omega}\left[-2+\cos\alpha_3\right]-3\Omega\left(1-\Omega^2-\frac{1}{D^2}\right)}{\left(1-\Omega^2\right)^2+\left(\Omega/D\right)^2}. \qquad (21)$$

Для чотирьохсекційного інвертора:

$$\underline{I}_1=\underline{I}_2=\underline{I}_3=\frac{2E}{\pi Z_0}\frac{\left[-\Omega-\frac{1}{4\Omega}\left(-1+\cos\alpha_4\right)\right]+j\left[\frac{1}{4\Omega}\sin\alpha_4+\frac{1}{D}\right]}{j(1-\Omega^2)-\Omega/D}; \qquad (22)$$

$$\underline{I}_4=\frac{2E}{\pi Z_0}\frac{\left[-\frac{3}{4\Omega}+\left(\frac{3}{4\Omega}-\Omega\right)\cos\alpha_4+\frac{1}{D}\sin\alpha_4\right]+j\left[\left(\Omega-\frac{3}{4\Omega}\right)\sin\alpha_4+\frac{1}{D}\cos\alpha_4\right]}{j(1-\Omega^2)-\Omega/D}; \qquad (23)$$

$$\underline{I}_H=\frac{2E}{\pi Z_0}\frac{\frac{1}{D}\sin\alpha_4+j\frac{1}{D}\left(3+\cos\alpha_4\right)}{j\left(1-\Omega^2\right)-\Omega/D}; \qquad P=\frac{2E^2}{\pi^2 Z_0}\frac{\frac{1}{2D}\left[-3+3\cos\alpha_4\right]+\frac{4}{D}}{\left(1-\Omega^2\right)^2+\left(\Omega/D\right)^2}, \qquad (24,25)$$

$$Q=\frac{2E^2}{\pi^2 Z_0}\frac{\frac{\Omega^2-1}{2\Omega}\left[-3+3\cos\alpha_4\right]-4\Omega\left(1-\Omega^2-\frac{1}{D^2}\right)}{\left(1-\Omega^2\right)^2+\left(\Omega/D\right)^2}. \qquad (26)$$

Для інверторів з параметрами Ω=0,5 та D=0,5 та кількістю секцій n=2, n=3 та n=4 на рис. 3 у полярній системі координат за виразами (4), (5) та (9)÷(26) побудовано залежності від фазового зсуву в регулювальній n-ій секції: 1) у першому рядку − для модулів струмів окремих секцій та в наванта-

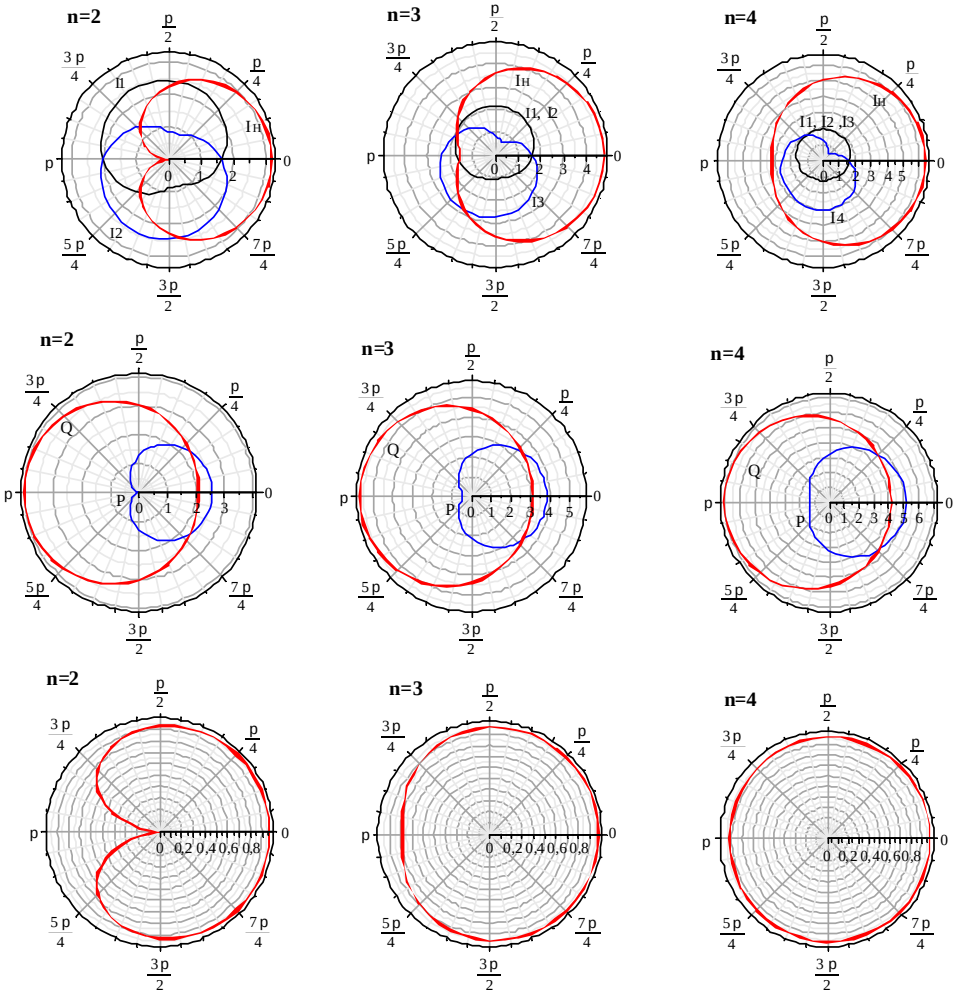

Рис. 3

женні, нормованих по коефіцієнту $2E/(\pi Z_0)$; 2) у другому рядку − для активної та реактивної потужностей, нормованих по коефіцієнту $2E^2/(\pi^2 Z_0)$; 3) у третьому рядку – для коефіцієнтів корисної дії. З рис. 3 видно, що для випадку α_n =0 струм у навантаженні дорівнює сумі струмів окремих секцій, а потужність у навантаженні прямо пропорційна кількості секцій *n*. Зростання фазового зсуву регулювальної секції від 0 до π призводить до зменшення потужності у навантаженні, яка досягає мінімуму при α_n=π, причому значення мінімуму є тим більшим, чим більшою є кількість секцій інвертора. Для двохсекційного інвертора мінімальна потужність у навантаженні дорівнює нулю. ККД інвертора зменшується при зменшенні потужності у навантаженні за рахунок зростання реактивної потужності інвертора, і у двохсекційному інверторі ККД може досягати нуля.

На рис. 4 показано три залежності потужності в навантаженні чотирьохсекційного інвертора від фазового зсуву α_4 в 4-й секції при фіксованих значеннях зсуву (α_3=0, α_3=π/2, α_3=π) у 3-й секції та нульових зсувах в інших секціях. Як видно з рис. 4, діапазон регулювання потужності 4-секційного інвертора може досягати 0–100%.

На рис. 5 наведено залежності потужності у навантаженні та ККД чотирьохсекційного інвертора від фазового зсуву α_4 в 4-й секції при двох фіксованих значеннях зсуву у 3-й секції (α_3=0 та α_3=π) та нульових зсувах у першій та другій секціях. З рис. 5 видно, що при α_3=0 відносна потужність змінюється у межах від 5,3 до 1,3 одиниць, а ККД – відповідно від 0,97 до 0,91; при α_3=π відносна

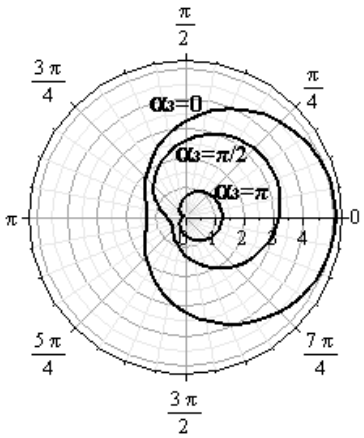

Рис. 4

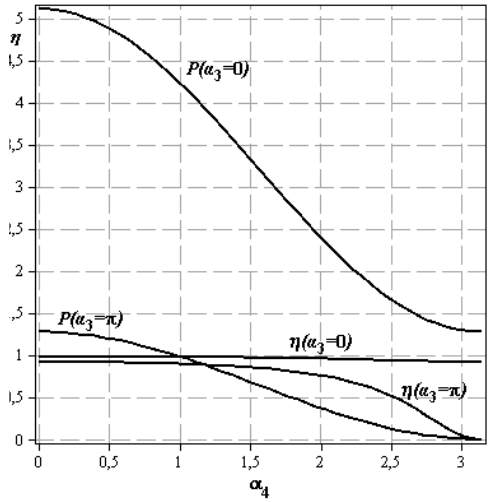

Рис. 5

потужність змінюється в межах від 1,3 до 0 одиниць, а ККД – відповідно від 0,91 до 0.

Аналізуючи ці залежності можна зробити висновок, що найбільший діапазон регулювання потужності (від 0 до P_{max}) мають інвертори з парною кількістю секцій, в яких одна половина секцій мають нульові фазові зсуви напруг, а фазові зсуви іншої половини секцій змінюються від 0 до π, а їхній ККД при малих зсувах зменшується в невеликих межах та може досягати нуля при нульовій потужності у навантаженні.

Беручи до уваги, що при регулюванні світлового потоку НЛВТ (її димінгу) потужність лампи не повинна зменшуватися нижче за 50% від номінальної [4], на основі виконаного аналізу можна зробити висновок, що багатосекційні інвертори можуть забезпечити регулювання потужності лампи в області допустимих значень з високим ККД. У процесі експлуатації опір НЛВТ зростає майже в два рази за рахунок її старіння, що призводить до зміни потужності в лампі. Для компенсації цього відхилення потужності можна використати такі багатосекційні інвертори.

У зв'язку із тим, що фазове регулювання потужності в навантаженні здійснюється на сталій частоті комутації, досить легко забезпечується комутація транзисторів при нульовій напрузі в процесі регулювання. Незмінність частоти комутації також дозволяє відносно просто вирішувати проблему усунення акустичного резонансу в розрядних лампах високого тиску шляхом вибору робочої частоти інвертора в частотних «вікнах», вільних від акустичного резонансу [7].

Висновки. Багатосекційні інвертори можуть забезпечити регулювання потужності розрядних ламп високого тиску в області її допустимих значень з високим ККД, а також компенсацію відхилення її потужності від номінального значення за рахунок її старіння і можуть бути використаними в автоматизованих системах керування освітленістю.

Потужність у навантаженні при синфазній паралельній роботі всіх секцій є прямо пропорційною до їхньої кількості. ККД багатосекційного інвертора при синфазній роботі усіх його секцій не залежить від кількості секцій, а визначається ККД однієї секції, оскільки струми через ключі інвертора рівномірно розподіляються між його секціями. При зменшенні потужності в навантаженні ККД інвертора зменшується і може досягати нуля при нульовій потужності у навантаженні.

1. *Евстифеев А*. Особенности построения балластов для ламп высокого давления (HID lamp ballasts) // Силовая электроника. – 2008. – №3. – С. 132–136.

2. *Мелешин В*. Транзисторная преобразовательная техника. – Москва: Техносфера, 2005. – 632 с.

3. *Юрченко О.М., Гуцалюк В.Я., Герасименко П.Ю., Слєсаревський І.О.* Модель резонансного транзисторного інвертора напруги з низькочастотною імпульсною модуляцією // Техн. електродинаміка. – 2011. – №1. – С. 24–29.

4. *Лампы натриевые* высокого давления. Эксплуатационные требования. ГОСТ Р 53073-2008 (МЭК 60662:2002) // Москва: Стандартинформ, 2009. – 53 с.

5. *Branas C., Azcondo F.J., Casanueva R., Bracho S.* Phase-controlled Quadruple LCp Resonant Inverter to drive 600W HPS Lamps // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2007. – Vol.22. – №3. – Pp. 831–838.

6. *Czarkowski D., Kazimierczuk M.K.* Phase-controlled series-parallel resonant converter // IEEE Transactions on Power Electronics. – 1993. – Vol. 8. – №3. – Pp. 309–319.

7. *Epron S., Aubes M., Damelincourt J.J., Cojocaru A.P.* Acoustic resonance phenomena in high pressure discharge lamps // High Temperature Material Processes. – 1999. – Vol.3. – Pp. 141–155.

УДК 621.327

Многосекционные резонансные инверторы напряжения в электронном пускорегулирующем аппарате

А.Н.Лупенко, канд.техн.наук,
Тернопольский национальный университет имени Ивана Пулюя,
ул. Русская, 56, Тернополь, 46001, Украина.

Проведен анализ резонансного инвертора напряжения, построенного на базе произвольного количества параллельно включенных полумостовых секций, как выходного каскада электронного пускорегулирующего аппарата для натриевых ламп высокого давления. Получены аналитические выражения для токов и мощностей n-секционного инвертора, рассмотрены особенности фазового регулирования мощности в его нагрузке. Библ. 7, рис. 5.

***Ключевые слова**:* резонансный инвертор напряжения, математическая модель, натриевая лампа высокого давления, электронный пускорегулирующий апарат.

Parallel operation of voltage resonant inverters in electronic ballast

A.M.Lupenko,
Ternopil Ivan Pul'uj National Technical University,
Ruska str., 56, Ternopil, 46001, Ukraine.

The voltage resonant inverter with parallel connection of arbitrary numbers of half bridge sections as electronic ballast output stage for high pressure sodium lamps is analyzed. The analytical expressions for n-sections inverter currents and powers are obtained, the features of its power phase control are considered. References 7, figures 5.

***Key words**:* resonant inverter, high-pressure sodium lamp, electronic ballast.

1. *Evstifeev A.* The features of construction of ballasts for high pressure lamps (HID lamp ballasts) // Silovaia elektronika. – 2008. – №3. – Pp. 132–136. (Rus)

2. *Meleshin V.* Transistor conversion technology. – Moskva: Tekhnosfera, 2005. – 632 p. (Rus)

3. *Yurchenko O.M., Gutsaliuk V.Ya., Gerasymenko P.Yu., Slesarevskyi I.O.* Mathematical model of resonance transistor voltage inverter with low frequency pulse modulation // Tekhnichna elektrodynamika. – 2011. – №1. – C. 24–30. (Ukr)

4. *High pressure sodium lamps.* Operating standard. ГОСТ Р 53073-2008 (IEC 60662:2002) // Moskva: Standartinform, 2009. – 53 p. (Rus)

5. *Branas C., Azcondo F.J., Casanueva R., Bracho S.* Phase-controlled Quadruple LCp Resonant Inverter to drive 600W HPS Lamps // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2007. – Vol.22. – №3. – Pp. 831–838.

6. *Czarkowski D., Kazimierczuk M.K.* Phase-controlled series-parallel resonant converter // IEEE Transactions on Power Electronics. – 1993. – Vol. 8. – №3. – Pp. 309–319.

7. *Epron S., Aubes M., Damelincourt J.J., Cojocaru A.P.* Acoustic resonance phenomena in high pressure discharge lamps // High Temperature Material Processes. – 1999. – Vol.3. – Pp. 141–155.

Надійшла 30.06.2011
Received 30.06.2011