



УКРАЇНА

(19) UA (11) 48865 (13) A

(51) 6 H02P13/30; H02M5/10

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ  
І НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІОПИС  
ДО ДЕКЛАРАЦІЙНОГО ПАТЕНТУ  
НА ВИНАХІДвидається під  
відповідальність  
власника  
патенту

(54) СПОСІБ ПЛАВНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ЗМІННОЇ НАПРУГИ НА АКТИВНО-ІНДУКТИВНОМУ НАВАНТАЖЕННІ

1

2

(21) 2002020939

(22) 05 02 2002

(24) 15 08 2002

(46) 15 08 2002, Бюл. № 8, 2002 р.

(72) Волков Ігор Володимирович, Липківський Костянтин Олександрович, Чиженко Олександр Іванович

(73) Волков Ігор Володимирович, Липківський Костянтин Олександрович, Чиженко Олександр Іванович

(57) Спосіб плавного регулювання змінної напруги на активно-індуктивному навантаженні, що включає автоматичну зміну індуктивності дроселя, який відрізняється тим, що діапазон регулювання напруги розбивається на ряд інтервалів, кожному з яких відповідає певне значення індуктивності дроселя, дискретна зміна якої здійснюється шляхом переключення відводів обмотки дроселя у моменти переходу напруги з одного інтервалу регулювання в другий, причому у моменти переключення

відводів обмотки дроселя кут управління тиристорів змінюється таким чином, що еквіваленти опору кола залишаються незмінними і, як наслідок, залишається незмінною напруга навантаження, всередині кожного інтервалу регулювання кут управління тиристорів змінюється в окопі значення, рівного арктангенса відношення сумарного (навантаження та частини дроселя, що використовується) індуктивного опору кола до її активного опору, у міру наближення до якого форма мережного струму і форма напруги навантаження наближаються до синусоїдальних (при співпаданні значень кута управління та вищевказаного арктангенса струм і напруга - синусоїдальні), кількість відводів обмотки дроселя та значення індуктивності частин дроселя між сусідніми відводами обмотки визначаються заданими значеннями коефіцієнтів спотворення струму мережі і напруги навантаження, а також діапазоном регулювання напруги

Винахід належить до сфери електротехніки і може бути використаний у системах живлення активно-індуктивного навантаження, де потребується плавне регулювання діючого значення змінної напруги, що здійснюється гад навантаженням.

Відомий (аналог) спосіб плавного регулювання змінної напруги на активно-індуктивному навантаженні [1] у пристрої, що має у кожній фазі включені послідовно з навантаженням (однофазною або симетричною трифазною) регулятор, виконаний за схемою з зустрічно-паралельно включеними тиристорами, і лінійний дросель, наявність якого істотно покращує якість мережного струму. Його недоліком є несинусоїдальність напруги навантаження на більшій частині діапазону регулювання, а також відчутна засміченість живлячої мережі вищими гармоніками струму.

Найбільш близьким за технічною сутністю (прототипом) є спосіб регулювання змінної напруги на активному навантаженні, запропонований в [2] і призначений для реалізації у відомих тиристорних схемах регулювання мостовий (схема зображена

на фіг. 1), де одна діагональ моста через послідовно включене навантаження підключена до живлячої мережі, а у другій включено згладжувальний дросель, бітиристорний, де послідовно з навантаженням включено лінійний дросель та ланка регулювання з зустрічно-паралельно включеними тиристорами, які відрізняються тим, що дроселі в них виконані із відводами обмотки які переключаються з допомогою спеціальної групи тиристорів (на фіг. 1 повністю управляємі тиристири  $T_i$ ,  $i = 1, 2, n$ ). Спосіб полягає у тому, що у процесі плавного регулювання діючого значення напруги навантаження, що здійснюється шляхом зміни кута управління тиристорів регулюючої групи (на фіг. 1 тиристири  $T_I - T_{IY}$ ), з метою одержання багатоступінчастої форми мережного струму (він же струм навантаження), в якій вміст вищих гармонік нижче у порівнянні з прямокутною формою, індуктивність згладжувального дроселя у кожному напівперіоді змінюється з допомогою переключення групи тиристорів ( $T_i$ ), що переключаються, стільки разів, скільки потребується ступенів у формі мережного

(13) A

(11) 48865

(19) UA

струму. Кількість ступенів, їхня амплітуда та протяжність варіюються в залежності від обмежень, що накладаються на коефіцієнт спотворення мережного струму.

Недоліками цього способу є непридатність його для регулювання напруги на активно-індуктивному навантаженні, оскільки в цьому випадку не може бути реалізована ступінчаста форма струму навантаження, що припускає можливість стрибкоподібних змін струму, неможливість, при обмеженій кількості переключаємих відводів обмотки дроселя, для всіх без винятку режимів навантаження повністю позбутися у мережному струмі вищих гармонік, досить велике значення індуктивності  $L$  дроселя, яке в [2] (див стор. 52) передбачається допущенням  $L = \infty$ , що приймається при представленні способу.

Задача цього винаходу - покращення форми мережного струму та форми напруги навантаження, в тому числі й при активно-індуктивному її характері шляхом реалізації більш ефективного алгоритму переключення відводів обмотки дроселя, що дозволяє для найбільш суттєвих режимів навантаження при обмеженому числі відводів обмотки дроселя забезпечити синусоїдальність струму та напруги навантаження, тобто покращення електромагнітної сумісності використовуваних вентильних напівпровідникових перетворювачів з живлячою їх мережею і підвищення якості споживаємої навантаженням електроенергії.

Ще однією перевагою запропонованого способу у порівнянні з прототипом є істотне поліпшення умов функціонування тиристорів переключаємої групи та іншого обладнання, призначеного для переключення відводів обмотки дроселя. При способі-прототипі відводів обмотки переключаються по кілька разів на кожному напівперіоді мережного струму незалежно від того змінюється при цьому чи ні напруга навантаження, а при тому, що пропонується, - лише у випадках змін діючого значення напруги або опору навантаження, причому, коли указані величини протягом ряду періодів у відповідності з реалізуємою технологією пишуться незмінними, мережний струм на цих періодах замикається тільки по одній з відводів обмотки дроселя і, отже, тиристори, підключені до інших відводів обмотки при цьому, обезструмлені.

Постановка задачі вирішується таким чином.

Спосіб плавного регулювання змінної напруги на активно-індуктивному навантаженні полягає в автоматичній зміні індуктивності дроселя, при цьому діапазон регулювання напруги розбивається на ряд інтервалів, кожному із яких відповідає певне значення індуктивності дроселя, дискретна зміна якої здійснюється шляхом переключення відводів обмотки дроселя у моменти переходу напруга з одного інтервалу регулювання в другий, причому у моменти переключення відводів обмотки дроселя, кут управління тиристорів змінюється таким чином, що еквівалентний опір кола залишається незмінним і, як наслідок, залишається незмінною напруга навантаження, всередині кожного інтервалу регулювання кут управління тиристорів змінюється в околі значення, рівного арктангенса, відношення сумарного (навантаження та частини дроселя, що використовується) індуктивного опору

кола до її активного опору, по мірі наближення до якого форма мережного струму і форма напруги навантаження наближаються до синусоїдальних (при співпадінні значень кута управління та вищевказаного арктангенса струм і напруга - синусоїдальні), кількість відводів обмотки дроселя та значення індуктивності частин дроселя між сусідніми відводами обмотки визначаються заданими значеннями коефіцієнтів спотворення струму мережі і напруга навантаження, а також діапазоном регулювання напруги.

Порівняльний аналіз з відомими технічними рішеннями [1 - 4] показує, що технічне рішення, яке пропонується, відрізняється наявністю нових елементів, що складають новий алгоритм переключення відводів обмотки дроселя, які дозволяють покращити форму мережного струму та форму напруги навантаження у вентильних напівпровідникових регуляторах з плавним регулюванням напруги і тим самим покращити електромагнітну сумісність цих перетворювачів з живлячою їх мережею та підвищити якість споживаємої навантаженням електричної енергії.

На підставі вищевикладеного можна зробити висновок про те, що сукупність існуючих ознак, викладена у формулі винаходу, є необхідною та достатньою для досягнення нового технічного результату.

Пропонуємий спосіб плавного регулювання змінної напруги на активно-індуктивному навантаженні може бути здійснено у відомих тиристорних схемах регулювання однофазною мостовою, де одна діагональ моста через послідовно включене навантаження підключена до живлячої мережі, а в другій включено згладжуючий дросель з відводами обмотки, що переключаються (фіг. 1), одно- та трифазною з нульовим проводом, де в кожній фазі послідовно з навантаженням включено лінійний дросель з відводами обмотки, що переключаються, та ланка регулювання з зустрічно-паралельно включеними тиристорами.

Алгоритм реалізації пропонуємого способу регулювання пояснимо на прикладі однофазного мостового регулятора змінної напруги (фіг. 1) при роботі його на чисто активне навантаження  $\Gamma_H$ , величина якого у процесі регулювання залишається незмінною ( $\Gamma_H = \text{const}$ ). Для інших схем регулювання, а також для випадку активно-індуктивного навантаження, поставлена задача вирішується аналогічно.

Мостовий регулятор (фіг. 1) має міст, в плечах якого включені управляємі вентиля  $T_I - T_{IV}$ , одна діагональ цього моста через послідовно включене навантаження  $\Gamma_H$  підключена до мережі синусоїдальної напруги  $U_{\text{мер}}$ , в другій діагоналі включено згладжуючий дросель  $L$  з відпайками, що переключаються з допомогою повністю управляємих вентилів  $T_i$  (де  $i = 1, 2, n$ ).

Цей регулятор, якщо  $L_d \neq \infty$ , при зміні кута управління  $\alpha$  тиристорів вентиля  $T_I - T_{IV}$  (включених у плечах моста) у діапазоні  $-\pi/2 \leq \alpha < \pi$  здатний плавно регулювати діюче значення напруги навантаження  $U_H$  від максимального його значення  $U_{H\text{max}}$ , рівного при відсутності підвищуючого трансформатора діючому значенню напруги мережі  $U_{\text{мер}}$  до нуля.

На фіг 2 наведено характеристики регулятора, які описують залежності діючого значення вищих гармонік  $I_{\text{вг}}$  мережного струму (він же струм навантаження) від регулюємої напруги  $U_{\text{н}}$ , що побудовані для відносних величин  $I_{\text{вг}}^* = I_{\text{вг}}/I_{\text{нmax}}$  та  $U_{\text{н}}^* = U_{\text{н}}/U_{\text{нmax}}$ , де  $I_{\text{нmax}} = U_{\text{нmax}}/r_{\text{н}}$ . Криві  $I_{\text{вг}}^* = F_i(U_{\text{н}}^*)$ , де  $i = 1, 2, \dots, 7$  (на фіг 2 вони позначені цифрами від 1 до 7), відповідають семи різним значенням  $\tau_i$  ( $i = 1, 2, \dots, 7$ ), параметра  $\tau = \omega L_{\text{д}}/r_{\text{н}}$ , де  $\omega = 2\pi f$ ,  $f$  - частота живлячої синусоїдальної напруги,  $L_{\text{д}}$  - індуктивність працюючої частини згладжуючого дроселя. Як витикає з цих кривих, для кожної характеристики  $I_{\text{вг}}^* = F_i(U_{\text{н}}^*)$  (за виключенням характеристик, що відповідають значенням  $\tau = 0$  і  $\tau = \infty$ , на фіг 2 не наведених) існує таке значення  $U_i$  ( $i = 1, 2, \dots, 7$ ) напруги  $U_{\text{н}}$ , де  $0 < U_i < U_{\text{нmax}}$ , при якій  $I_{\text{вг}} = 0$  і, отже, струм у колі синусоїдальний. Абсциси таких точок  $I_{\text{вг}}^* = 0$  на фіг 2 позначені через  $U_i^*$  ( $U_i^* = U_i/U_{\text{нmax}}$ ). На  $i$ -й характеристиці  $I_{\text{вг}}^* = F_i(U_{\text{н}}^*)$  точка  $U_{\text{н}} = U_i$  відповідає такому значенню  $\alpha_i$  кута управління  $\alpha$ , для якого виконуються - співвідношення

$$\alpha_i = \arctg \tau_i, U_i^* = \cos \alpha_i \quad (1)$$

Очевидно, що при заданому допустимому рівні вмщення вищих гармонік  $I_{\text{вг доп}}$  у мережному струмі, в силу безперервності характеристик  $I_{\text{вг}} = F_i(U_{\text{н}})$   $= F_i[U_{\text{н}}(\alpha)]$  завжди можна вибрати в оточенні значень  $\alpha_i$  такі інтервали зміни кутів  $\alpha$ , для яких значення  $I_{\text{вг}} < I_{\text{вг доп}}$ . Цим інтервалам виповідають відповідні їм інтервали зміни регулюємої напруги  $U_{\text{н}}(\alpha)$ .

Цю обставину й покладено в основу способу, що тут розглядається, при якому характеристики  $I_{\text{вг}} = F_i(U_{\text{н}})$  підбираються таким чином, щоб вказані інтервали напруг (для яких значення  $I_{\text{вг}} < I_{\text{вг доп}}$ ) стикаючись заповнювали собою весь діапазон регулювання напруги навантаження  $U_{\text{н}}$ , який використовується на практиці. Останнє забезпечує можливість (при відповідному управлінні) плавного регулювання напруги  $U_{\text{н}}$  при переході з однієї характеристики  $I_{\text{вг}} = F_i(U_{\text{н}})$  на іншу, що має місце при переключенні відпайок дроселя. При зменшенні величини  $I_{\text{вг доп}}$  ширина інтервалів, що відповідає їй, буде звужуватись, їх межі будуть наблизитись до значень  $U_i$  (а відповідні їм значення кута  $\alpha$  - до значень  $\alpha_i = \arctg \tau_i$ ), тому у цьому випадку кількість інтервалів необхідно збільшувати. Реалізацію цього підходу розглянуто нижче на конкретному прикладі.

Якщо у відповідності з реалізуємою технологією на діапазоні регулювання напруга  $U_{\text{н}}$ , що потребується, є дискретні значення цієї напруга  $U_{\text{н диск}}$ , які відповідають найбільш значимим режимам, то доцільно регулювання здійснювати так, щоб  $U_{\text{н диск}} = U_i(\alpha_i)$ , тобто щоб напруга навантаження і струм мережі при цих режимах були синусоїдальними.

При режимі  $r_{\text{н}} = \text{const}$  маємо  $L_{\text{д}} = \tau_i r_{\text{н}}/\omega$ , тобто кожна з характеристик  $I_{\text{вг}} = F_i(U_{\text{н}})$  відповідає одному певному значенню індуктивності  $L_{\text{д}}$ . Оскільки в регуляторі, що розглядається, зміна індуктивності дроселя здійснюється переключенням його відводів обмотки за допомогою тиристорів перемикаючої групи Ті (підключених безпосередньо до цих відпайок), то семи характеристикам  $I_{\text{вг}} = F_i(U_{\text{н}})$ , які побудовані на фіг 2, у перетворювачі відповідають

сім відповідних відводів обмотки дроселя, при переключенні яких індуктивність дроселя набуває таких дискретних значень

$$L_{\text{д}} = \tau_i r_{\text{н}}/\omega = (r_{\text{н}}/\omega) \text{tg} \alpha_i = (r_{\text{н}}/\omega) \sqrt{1 - (U_i^*)^2} / U_i^*, \quad (2)$$

де номер  $i$  в позначенні індуктивності  $L_{\text{д}}$  відповідає номеру відповідної характеристики на фіг 2. Формула (2) встановлює взаємодозначні відповідності 1) між значеннями  $L_{\text{д}}$  та значеннями  $\alpha_i$  кута управління  $\alpha$ , 2) між значеннями  $L_{\text{д}}$  та значеннями  $U_i$  регулюємої напруга  $U_{\text{н}}$ .

Нехай регулювання величини  $U_{\text{н}}(\alpha)$  здійснюється на максимально можливому діапазоні тобто від 0 до значення  $U_{\text{нmax}}$  (змінна  $U_{\text{н}}^*$  при цьому змінюється у межах  $0 < U_{\text{н}}^* < 1$ ), і на всьому цьому діапазоні значення  $I_{\text{вг}}$  у відповідності з вимогами реалізуємої технології не повинні перевищувати, наприклад, 7% від величини  $I_{\text{нmax}}$ . На фіг 2 такий режим відповідає ділянкам кривих  $I_{\text{вг}}^* = F_i(U_{\text{н}}^*)$  що розміщені нижче горизонтальної прямої  $I_{\text{вг}}^* = 0,07$ .

На фіг 2 значеннями  $U_{i+1}^*$  ( $i = 1, 2, \dots, 6$ ) змінної  $U_{\text{н}}^*$  позначені абсциси розміщених нижче прямої  $I_{\text{вг}}^* = 0,07$  точок перетину кривих  $I_{\text{вг}}^* = F_i(U_{\text{н}}^*)$  між собою ( $U_{12}^*$  - відповідає точці перетинання першої і другої кривих,  $U_{23}^*$  - другої і третьої і т.д.). У відповідності зі способом, що пропонується, діапазон  $0 < U_{\text{н}}^* < 1$  розбивається на наступні сім суміжних інтервалів регулювання

$$1) 0 \leq U_{\text{н}}^* \leq U_{12}^*, 2) U_{12}^* \leq U_{\text{н}}^* \leq U_{23}^*, 3) U_{23}^* \leq U_{\text{н}}^* \leq U_{34}^*, \dots, 7) U_{67}^* \leq U_{\text{н}}^* \leq 1, \quad (3)$$

При регулюванні напруги в межах кожного з цих інтервалів індуктивність дроселя залишається незмінною. Перемикання ж відводів обмотки дроселя відбувається лише при переході з одного інтервалу на інший. Таким чином, кожному з інтервалів (3) відповідає один визначений відвод обмотки дроселя. Перехід з одного відводу обмотки дроселя на іншу здійснюється в моменти, коли напруга  $U_{\text{н}}$  в процесі своєї плавної зміни набуває значення  $U_{i+1} = U_{i+1}^* U_{\text{нmax}}$ . При цьому на першому інтервалі індуктивність дроселя береться рівною  $L_{\text{д1}}$ , а величина  $I_{\text{вг}}$  змінюється за першою характеристикою на фіг 2 ( $I_{\text{вг}} = F_1(U_{\text{н}})$ ), другому інтервалу відповідають значення  $L_{\text{д2}}$  і друга характеристика тощо таким чином, що номери інтервалів співпадають з номерами кривих на фіг 2. В результаті при плавній зміні напруги навантаження  $U_{\text{н}}$  значення  $I_{\text{вг}}^*$  описує неперервну "змієподібну" криву  $I_{\text{вг}}^* = F_{\text{перл}}[U_{\text{н}}^*(\alpha)]$  (на фіг 2 виділена жирною лінією), що складається з ділянок всіх семи побудованих на фіг 2 характеристик, що набуває максимальних значень, рівних 0,07 в точках  $U_{\text{н}}^* = U_{i+1}^*$ , і мінімальних - нульових в точках  $U_{\text{н}}^* = U_i^*$  (де  $i = 1, 2, \dots, 7$ ) і  $U_{\text{н}}^* = 0$ ,  $U_{\text{н}}^* = 1$ . Реалізація регулювання, що відповідає кривій  $I_{\text{вг}}^* = F_{\text{перл}}[U_{\text{н}}^*(\alpha)]$ , і є рішенням поставленої вище задачі.

Для установки потужністю  $P_{\text{нmax}} = 5 \text{ кВт}$  і з  $U_{\text{нmax}} = U_{\text{мер}} = 220 \text{ В}$  (при цьому  $r_{\text{н}} = U_{\text{нmax}}^2/P_{\text{нmax}} = 9,68 \text{ Ом}$ ,  $I_{\text{нmax}} = P_{\text{нmax}}/U_{\text{нmax}} = 22,7 \text{ А}$ ) в табл 1 наведені результати розрахунків режимів перетворювача при  $U_{\text{н}} = U_i$  (де  $i = 1, 2, \dots, 7$ ), тобто коли струм у колі синусоїдальний.

В табл 2 наведено розрахунки для режимів  $U_{\text{н}} = U_{i+1}$  (де  $i = 1, 2, \dots, 6$ ), коли  $I_{\text{вг}} = 0,07 I_{\text{нmax}}$ , а форма

мережного струму найбільш далека від синусоїдальної

Для того щоб у момент переходу з одного інтервалу (3) на другий, що відповідає переходу з однієї характеристики (фіг. 2) на другу, напруга навантаження залишалась незмінною (без чого неможливе плавне регулювання) необхідно, щоб кут управління тиристорами змінювався стрибкоподібно, оскільки на різних характеристиках  $I_{\text{вг}} = F_i[U_n(\alpha)]$  одному й тому ж значенню напруги  $U_n$  відповідають різні значення кутів  $\alpha$ . Так, напруги  $U_{n+1}$  на  $i$ -й характеристиці відповідає значення кута управління, позначене в табл. 2 через  $a_{i+1}$ , а на  $i+1$ -й характеристиці значення позначене через  $a_{i+1}$ . При переході зростаючої напруги  $U_n$  з  $i$ -ї характеристики на  $i+1$ -у кут  $\alpha$  змінюється стрибком від значення  $a_{i+1}$  до значення  $a_{i+1}$ , і, навпаки, при переході напруга, що зменшується, з  $i+1$ -ї характеристики на  $i$ -у - від значення  $a_{i+1}$  до значення  $a_i$ . Незважаючи на стрибкоподібну зміну кута  $\alpha$  на межах інтервалів (3), всі величини, що характеризують режими перетворення, на цих межах змінюються плавно (про що свідчать проведені теоретичний аналіз і експериментальні дослідження електромагнітних процесів у перетворювачі, що розглядається). Це пояснюється тим, що при стрибкоподібній зміні індуктивності дроселя, внаслідок переключення його відводів обмотки, система управління тиристорами відпрацьовує таку стрибкоподібну зміну кута управління  $\alpha$ , що еквівалентний за першою гармонікою індуктивний опір кола  $X_{L(1)} = U_{\text{мер}} I_{(1)p} / I_{(1)}^2$  (де  $I_{(1)p}$  - діюче значення реактивної складової першої гармоніки мережного струму) залишається незмінним.

З розрахунків, наведених у таблицях, зокрема випливає, що обмотка дроселя під'єднана до першого відвода обмотки, може виконуватись проводом, розрахованим на струм (10-1 А) більш ніж у два рази менший максимального (22-7 А), обмотка, що знаходиться між першим і другим відводом обмотки, - на струм у півтора рази менший максимального, обмотка між другим і третім відводами обмотки - на струм на чотири ампері менший максимального і т.д.

Варіючи кількістю і шириною інтервалів (3), можна завжди побудувати криву  $I_{\text{вг}} = F_{\text{перл}}[U_n^*(\alpha)]$  і тим самим визначити алгоритм переключення відводів обмотки дроселя для будь-якого наперед заданого відсотка вміщення вищих гармонік у мережному струмі. Так, якщо для установки з  $P_{\text{нmax}} = 5 \text{ кВт}$  вимагається, щоб  $I_{\text{вг}} < 0,15 U_{\text{нmax}} / r_{\text{гн}}$  то, як видно з фіг. 2, можна обмежитись лише двома інтервалами, утвореними точкою перетину кривих 3 та 4, де першому інтервалу  $0 \leq U_n^* \leq U_{34}^*$  відповідає значення індуктивності 26 мГн, а другому -  $U_{34}^* \leq U_n^* \leq 1 - 18 \text{ мГн}$ . Крива  $I_{\text{вг}}^* = F_{\text{перл}}[U_n^*(\alpha)]$  для цього випадку утворюється відповідними ділянками третьої та четвертої характеристик на фіг. 2. Якщо  $I_{\text{вг}} \leq 0,2 U_{\text{нmax}} / r_{\text{гн}}$ , то при значенні індуктивності дроселя 18 мГн достатньо лише одного інтервалу  $0 \leq U_n^* \leq 1$ . Крива  $I_{\text{вг}}^* = F_{\text{перл}}[U_n^*(\alpha)]$  при цьому співпадає з четвертою характеристикою на фіг. 2.

Найчастіше на практиці регулювання потребується в діапазоні, що не перевищує інтервал  $0,5 \leq U_n^* \leq 1$ . В цьому випадку побудова кривої  $I_{\text{вг}}^* =$

$F_{\text{перл}}[U_n^*(\alpha)]$  істотно полегшується, а сама установка здешевлюється, оскільки при цьому істотно зменшується індуктивність дроселя, що використовується. Так, для прикладу, що розглядається вище, на діапазоні  $0,5 \leq U_n^* \leq 1$  потребується дросель, індуктивність якого у 2,3 рази менша, ніж та, що потребується у цьому ж пристрої при регулюванні напруги від нуля до максимуму. Форма напруга навантаження при глибині регулювання 50%, як витікає з характеристик фіг. 3, практично синусоїдальна. Характеристики, побудовані на фіг. 3, відповідають відповідним характеристикам фіг. 2 і показують як змінюється коефіцієнт спотворення  $v = I_{(1)p} / I_n = U_{(1)n} / U_n$  при регулюванні напруги  $U_n$ . З кривих фіг. 3 видно, що починаючи з другого інтервалу регулювання (3) точки перетину характеристик, які мають абсциси рівні  $U_{n+1}^*$  ( $i = 2, 3, \dots, 6$ ), знаходяться між прямими  $v = 0,995$  і  $v = 1$ . У цьому коридорі знаходиться і уся відповідна ділянка характеристики  $v(U_n)$  (на фіг. 2 виділено жирною лінією), що відповідає алгоритму переключення відпайок, що розглядається. З цього витікає, що при регулюванні на діапазоні  $0 \leq U_n^* \leq 1$  коефіцієнт гармонік напруга навантаження коливається в межах 0 - 10%, досягаючи свого максимального значення 10% тільки в початковій точці діапазону, тобто при  $U_n^* = 0,5$ .

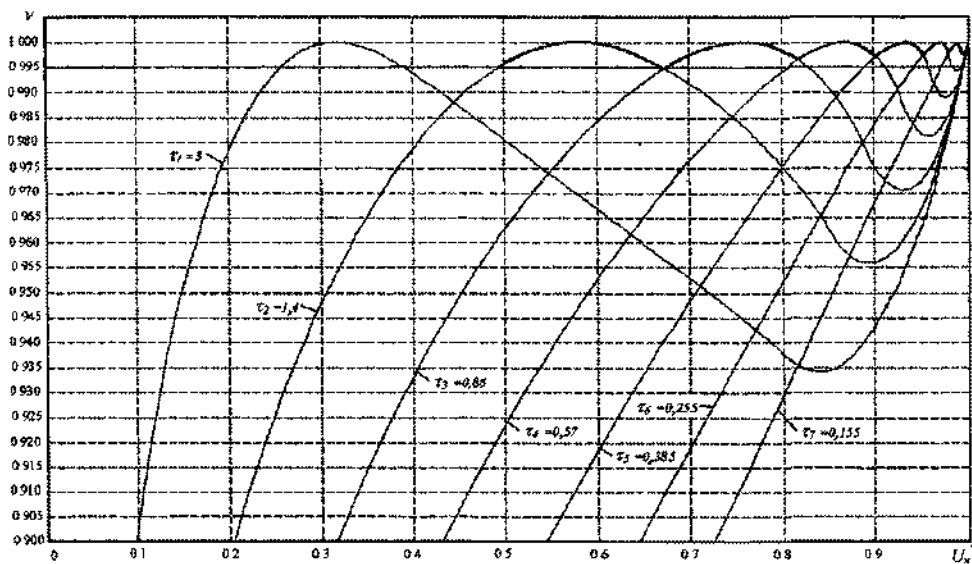
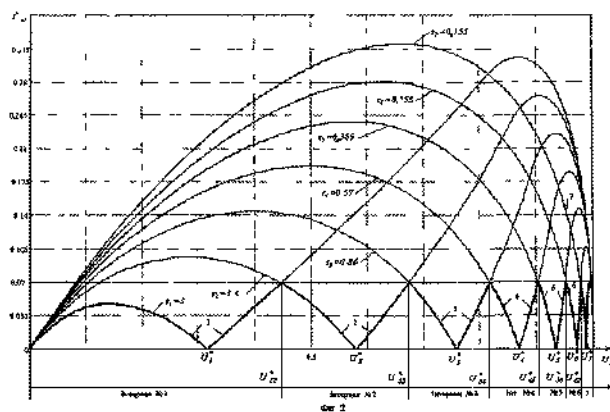
Отже, на практиці рішення задачі досягнення відповідної якості мережного струму та напруга навантаження зводиться до розбиття у відповідності з описаним вище алгоритмом заданого діапазону регулювання величини  $U_n$  на інтервали, кожному з яких відповідає визначене значення індуктивності переключаемого дроселя. Кількість і ширина таких інтервалів залежить від допустимих значень  $I_{\text{вг}}$  і  $v$  та від діапазону регулювання напруга навантаження  $U_n$ .

Таким чином, у порівнянні з прототипом використання плавного регулювання напруга у відповідності з описаним вище алгоритмом дозволяє досягти нових технічних результатів - покращення електромагнітної сумісності обладнання, що використовується, з живлячою його мережею та підвищення якості споживаємої електроенергії.

#### ЛІТЕРАТУРА

- [1] Собчук А.С. Тиристорно-дроссельное регулирование переменного напряжения. Автореф. дис. канд. техн. наук. К. 1980. - 24 с.
- [2] Оявезер М., Саккос Т., Сарв В. Вентильно-индуктивные цепи непрерывного регулирования переменного напряжения. - Таллинн: Валгус, 1978. - 140 с.
- [3] Липковский К.А. Трансформаторно-ключевые исполнительные структуры преобразователей переменного напряжения. - К. Наук. думка, 1983. - 214 с.
- [4] Волков И.В., Чиженко А.М. Вентильные источники реактивной мощности и регуляторы переменного напряжения. - К. Изд. Ин-та электродинамики НАН Украины, 1994. - Ч. 1. - 169 с.





Фиг. 3

ДП «Український інститут промислової власності» (Укрпатент)

вул. Сим'ї Хохлових, 15, м. Київ, 04119, Україна

(044) 456 – 20 – 90

ТОВ «Міжнародний науковий комітет»

вул. Артема, 77, м. Київ, 04050, Україна

(044) 216 – 32 – 71