

УДК 621.314.214

**К.О.Липківський**, докт.техн.наук (Інститут електродинаміки НАН України, Київ)

## **ДУАЛЬНІСТЬ ПОБУДОВИ ТРАНСФОРМАТОРНО-КЛЮЧОВИХ ВИКОНАВЧИХ СТРУКТУР ДИСКРЕТНИХ СТАБІЛІЗАТОРІВ ТА РЕГУЛЯТОРІВ НАПРУГИ ЗМІННОГО СТРУМУ**

*Розглянуто особливості побудови трансформаторно-ключових виконавчих структур (ТКВС) двох різновидів перетворювачів величини напруги змінного струму – дискретних регуляторів та стабілізаторів. Доведено, що дуальність цих перетворювачів прослідковується як при формуванні функціонального завдання й організації керування, так і при визначенні раціональної конфігурації виконавчої структури. Проаналізовано повноту їх оберненості та розроблено рекомендації щодо доцільного вибору топології ТКВС для кожного різновиду на основі порівняльної оцінки запропонованих вольтамперних діаграм, які наочно характеризують розрахункову встановлену потужність електромагнітного елемента. Досліджено можливість побудови на основі ТКВС дискретних стабілізаторів змінного струму.*

*Рассмотрены особенности построения трансформаторно-ключевых исполнительных структур (ТКИС) двух разновидностей преобразователей величины напряжения переменного тока – дискретных регуляторов и стабилизаторов. Доказано, что дуальность этих преобразователей прослеживается как при формировании функционального задания и организации управления, так и при определении рациональной конфигурации исполнительной структуры. Проанализирована полнота их обратимости и разработаны рекомендации по целесообразному выбору топологии ТКИС для каждой разновидности на основе сравнительной оценки предложенных вольтамперных диаграмм, которые наглядно характеризуют расчетную установленную мощность электромагнитного элемента. Исследована возможность построения на основе ТКИС дискретных стабилизаторов переменного тока.*

**Вступ.** Цілеспрямована зміна величини напруги електричного струму займає особливе місце у множині функціональних перетворень електричного сигналу. Це пояснюється не тільки тим, що вона широко використовується як основний вид перетворення, а й тим, що певне регулювання напруги відбувається у значній більшості пристроїв, які реалізують інші види перетворень – частоти, числа фаз, виду джерела тощо [6].

Згідно з існуючою тенденцією переважного використання статичних (тобто без рухомих частин) пристроїв перетворювачі для здійснення зміни величини напруги будуються зараз або на базі напівпровідникових приладів, що працюють у ключовому режимі, або на їхньому поєднанні з трансформуючими елементами (ТЕ). У першому варіанті напівпровідникові ключі "у чистому вигляді" реалізують фазове регулювання або різні види високочастотної імпульсної модуляції. Тобто, регулювання у цьому випадку можна трактувати як свідоме спотворення первинної незайманої синусоїдальної напруги, дієве значення якої необхідно змінити (з метою отримання нового – спотвореного – сигналу, дієве значення якого буде мати бажану величину), з наступним вилученням забруднюючого "гармонічного мотлоху", який скидається до споживача та мережі живлення під час цієї процедури. Крім того, ці перетворювачі не дозволяють підвищувати вихідну напругу відносно вхідної без введення додаткових елементів – накопичувачів енергії.

У протилежність цьому комбіновані перетворювачі, в яких органічно комплексуються напівпровідникові ключові елементи (КЕ) та трансформатори (автотрансформатори, вольтодавчі трансформатори або їхні сполучення) і використовуються дискретно-разові принципи управління [7], априорі не вносять ніяких спотворень у вихідну напругу й у струм, що споживається з мережі, та дозволяють реалізувати як віднімання, так і додавання напруги. Силові органи цього виокремленого класу перетворювачів отримали назву трансформаторно-ключових виконавчих структур – ТКВС [4].

Здебільшого, під перетворенням напруги мають на увазі регулювання її величини, а стабілізація трактується як вид регулювання за таким законом, який би дозволяв підтримувати вихідну напругу незмінною (з певною припустимою похибкою) при дії всіх дестабілізуючих факторів.

На перший погляд, дуальність цих двох видів перетворення напруги (підкреслимо, що у даній роботі мова буде йти виключно про напругу змінного струму) виявляється тільки на перших етапах формування завдання та вибору методів управління: при регулюванні передбачається живлення перетворювача від напруги незмінної (номінальної) величини ( $U_1=U_{1н}=\text{const}$ ) і зміна вихідної або за певною програмою, або за вимогою споживача ( $U_2\approx\text{var}$ ); при стабілізації, навпаки, необхідно підтримувати вихідну напругу незмінною ( $U_2\approx\text{const}$ ) при стохастичній зміні вхідної напруги та можливій зміні навантаження ( $U_1\approx\text{var}$ ,  $Z_n\approx\text{var}$ ).

Для "чисто" напівпровідникового перетворювача дуальність на цьому "закінчується" (ключовий елемент у колі силового струму буде однаковим для регулятора і для стабілізатора), а для ТКВС вона прослідковується і на етапі вибору схемотехнічного рішення та розрахунку його параметрів.

**Мета роботи** полягає у виявленні характерних особливостей трансформаторно-ключових виконавчих структур двох різновидів перетворювачів величини напруги змінного струму та їх дослідження з позиції дуальності та оберненості.

**Викладення основних положень.** У кожний момент часу (у кожному режимі) ТКВС – це виключно трансформуючий елемент з певним коефіцієнтом передачі по напрузі. (Ми свідомо будемо користуватися цим терміном, а не коефіцієнтом трансформації, тому що у загальному випадку до складу ТКВС може входити кілька ТЕ, кожний зі своїм коефіцієнтом трансформації, а нас цікавить результуюче співвідношення вхідної  $U_1$  та вихідної  $U_2$  напруг перетворювача). Для перетворення величини напруги змінного струму ТКВС повинна мати деяку певну множину  $J$  нетотожних станів або, що те ж саме, коефіцієнтів передачі  $K_j=U_{2j}/U_{1j}$  ( $j=\overline{1, J}$ ) та реалізувати необхідну зміну стану шляхом переключення КЕ напівпровідникового комутатора, який є другою складовою ТКВС.

Вказана множина повинна мати упорядкований характер. Згідно з [2] найдоцільніше змінювати коефіцієнт передачі за законом геометричної прогресії

$$K_j=K_1\gamma^{(j-1)}, \quad (1)$$

де  $\gamma$  – певний чисельний коефіцієнт, сутність якого буде пояснено пізніше (зазвичай,  $1,02\leq\gamma\leq 1,1$ ).

При такому виборі закону зміни коефіцієнтів передачі їхній множині відповідає множина тангенсів нахилу до осі абсцис прямих, що виходять з центру ординат, і площа розміщення яких обмежується першим (максимальним) і останнім,  $J$ -тим (мінімальним) коефіцієнтами передачі (рис. 1)

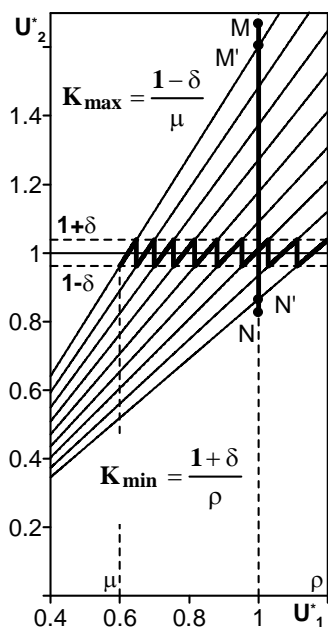


Рис. 1

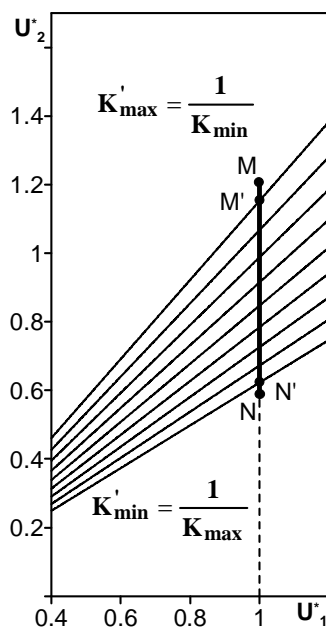


Рис. 2

$$K_1=K_{\max}, \quad (2)$$

$$K_j=K_{\min}=K_{\max}\gamma^{(1-j)}. \quad (3)$$

Почнемо зі стабілізації напруги. Припустимо, що вхідна напруга може змінюватися від  $U_{1\min}^*=U_{1\min}/U_n=\mu=0,6$  до  $U_{1\max}^*=U_{1\max}/U_n=\rho=1,2$ . (Тут і далі все будемо нормувати для узагальнення по номінальних значеннях вихідної напруги, струму, потужності; зауважимо, до речі, що максимальна вихідна потужність залишається внаслідок стабілізації незмінною у всіх режимах  $P_{2j\max}^*=P_{2\max}^*$ , причому, оскільки ми розглядатимемо ідеальні трансформуючі елементи, максимальна вхідна потужність  $P_{1\max}^*=P_{2\max}^*$ ). Позначимо їхнє співвідношення, яке назвемо глибиною діапазону стабілізації, через  $G$  ( $G=\rho/\mu$ ). Тоді для коефіцієнта  $\gamma$  можна записати

$$\gamma=\sqrt[G]{G}. \quad (4)$$

Якщо приймемо, наприклад, що ТКВС може знаходитись у дев'яти станах ( $J=9$ ), то маємо  $\gamma = \sqrt{2} \approx 1,08$ . При стабілізації коефіцієнт  $\gamma$  дорівнює відношенню максимального і мінімального значень вихідної напруги

$$\gamma = U_{2\max}/U_{2\min} = (1+\delta)/(1-\delta), \quad (5)$$

де  $\delta$  – відносна похибка стабілізації (відхилення від номінального значення  $U_n^* = 1$  напруги, що надходить до споживача),  $\delta = (\gamma - 1)/(\gamma + 1) \approx 0,0385$ .

Таким чином, залежність вхід-вихід ТКВС, що має пилкоподібний характер (рис. 1), буде повністю знаходитись у полі стабілізації [7] – зоні, обмеженій по горизонталі  $\mu$  та  $\rho$ , а по вертикалі –  $(1+\delta) = 2\gamma/(\gamma+1)$  та  $(1-\delta) = 2/(\gamma+1)$ . При виході  $U_1^*$  за межі  $\mu$  та  $\rho$  стабілізація порушується і вихідна напруга буде змінюватись відповідно за максимальним та мінімальним коефіцієнтами передачі

$$K_{\max} = (1-\delta)/\mu = 2/(\mu(\gamma+1)) = 1,6025, \quad (6)$$

$$K_{\min} = (1+\delta)/\rho = 2\gamma/\rho(\gamma+1) = K_{\max}\gamma/G = 0,8654. \quad (7)$$

Перейдемо до регулювання напруги змінного струму.

Якщо ми захочемо при незмінній (номінальній) вхідній напрузі  $U_1^* = 1$  у тій самій ТКВС з тією ж множиною коефіцієнтів передачі реалізувати дискретне регулювання вихідної напруги з тією ж відносною похибкою  $\delta$ , то це можна буде зробити лише у межах між точками М та N

$$U_{2M}^* = K_{\max}(1+\delta) = (1-\delta^2)/\mu \approx 1,6642, \quad (8)$$

$$U_{2N}^* = K_{\min}(1-\delta) = (1-\delta^2)/\rho \approx 0,8321. \quad (9)$$

Певна річ, ТКВС не може забезпечити на виході напругу, яка б відповідала точці М, але з точкою М співпадає реальна точка М' з припустимою похибкою  $\delta$ . Те ж саме стосується й нижньої межі – точок N та N'. Таким чином, повний діапазон регулювання  $U_{2M}^*/U_{2N}^* = 2$ , але межі цього діапазону жорстко прив'язані до величини вхідної напруги  $U_1^* = 1$ .

Якщо ми хочемо регулювати вихідну напругу у тих самих межах, у яких змінювалась вхідна напруга при стабілізації, тобто  $\mu$  та  $\rho$ , необхідно або вести регулювання при зниженій вхідній напрузі

$$U_1^* = \frac{\rho}{1+\delta} \cdot \frac{1}{K_{\max}} = \frac{\rho}{1+\delta} \cdot \frac{\mu}{1-\delta} = \frac{\mu\rho}{1-\delta^2} \approx 0,7211, \quad (10)$$

що недоцільно, або так розрахувати ТКВС, щоб масив коефіцієнтів передачі змістився у бік зменшення і при  $U_1^* = 1$  ми мали наступні значення максимальної та мінімальної вихідної напруг (рис. 2):

$$U_{2M}^{*'} = \rho = K'_{\max}(1+\delta), \quad (11)$$

$$U_{2N}^{*'} = \mu = K'_{\min}(1-\delta). \quad (12)$$

З цих рівнянь знаходимо нові необхідні величини граничних коефіцієнтів передачі

$$K'_{\max} = \rho/(1+\delta) = K_{\max}\mu\rho/(1-\delta^2) = K_{\max}\mu\rho 4\gamma/(\gamma+1)^2 = 1,1555, \quad (13)$$

$$K'_{\min} = \mu/(1-\delta) = K_{\min}\mu\rho/(1-\delta^2) = K_{\min}\mu\rho 4\gamma/(\gamma+1)^2 = 0,624, \quad (14)$$

а також коефіцієнта передачі для j-го стану системи

$$K'_j = K_j\mu\rho 4\gamma/(\gamma+1)^2. \quad (15)$$

Порівнюючи (13), (14) з (6), (7) бачимо, що  $K'_{\max} = 1/K_{\min}$  та  $K'_{\min} = 1/K_{\max}$ . Саме це відбудеться, якщо, переходячи від стабілізації до регулювання чи навпаки, ми поміняємо місцями приєднання до ТКВС мережі та споживача, що свідчить про принципову оберненість цих двох процесів. Повноту цієї оберненості можна оцінити лише після аналізу схемотехнічної реалізації ТКВС стабілізаторів і регуляторів напруги змінного струму.

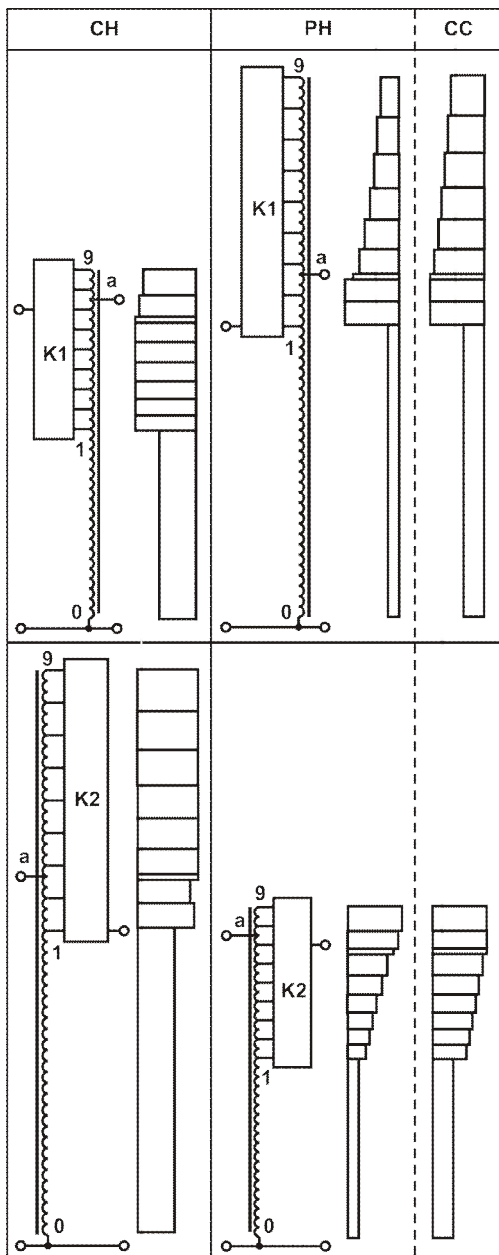
За об'єкт дослідження візьмемо найбільш простий та зручний для розгляду варіант ТКВС, що складається з силового секціонованого автотрансформатора (АТ) та тиристорного комутатора К, що може бути розміщений як на первинному (К1), так і на вторинному (К2) боці АТ: обидві конфігурації придатні, у принципі, як для регулювання, так і стабілізації напруги змінного струму (див. таблицю).

У цьому комутаторі в кожному режимі працює лише один ключовий елемент, тобто кількість можливих станів структури дорівнює кількості ключів  $J=N$ . У процесі роботи необхідний перехід з одного стану в інший реалізується шляхом перекомутації КЕ, внаслідок чого відповідним чином змінюється коефіцієнт передачі. При розміщенні комутатора на вході маємо  $K_j = W_{20} \left( W_{10} + \sum_{i=1}^j W_{1i} \right)^{-1}$ , а

при розміщенні його на виході –  $K_j = \left( W_{20} + \sum_{i=1}^j W_{2i} \right) \times (W_{10})^{-1}$ , де  $W_{10}(W_{20})$  – кількість витків основної

первинної (вторинної) обвитки, а  $\sum_{i=1}^j W_{1i} \left( \sum_{i=1}^j W_{2i} \right)$  – загальна кількість витків у  $j$  регулюючих секціях

регулювальної частини первинної (вторинної) обвитки у  $j$ -тому стані. Виконуючи конкретні розрахунки, параметри поля стабілізації та зони регулювання візьмемо з наведених вище прикладів побудови характеристики вхід-вихід ТКВС стабілізаторів і регуляторів напруги.



Почнемо зі стабілізатора напруги, ТКВС якого має комутатор К1 (верхній лівий сектор у таблиці). Максимальна напруга на обвитці  $W_{10}$  (між відпайками 1 та 0) спостерігається при переході від першого режиму ( $j=1$ ) до другого ( $j=2$ ), тобто у момент, коли  $U_1^* = \mu\gamma$  (див. рис. 1), і має ту ж саму величину  $U_{10}^* = \mu\gamma = 0,6 \cdot 1,08 = 0,648$ . У цьому ж режимі максимального значення набуває і струм навантаження  $I_2^* = I_{2\max}^* = 1 + \delta = 1,0385$ , що проходить по всіх секціях між відпайками  $a$  та 1, і вхідний струм, який обчислюється за формулою

$$I_{1\max}^* = P_{1\max}^* / \mu\gamma = [2\gamma / (\gamma + 1)]^2 / \mu\gamma = 1,6642, \quad (16)$$

а також максимальний струм, що проходить по обвитці

$$\begin{aligned} I_{10\max}^* &= I_{1\max}^* - I_{2\max}^* = \\ &= 2\gamma [2 / \mu(\gamma + 1) - 1] / (\gamma + 1) = 0,6257. \end{aligned} \quad (17)$$

Подальше збільшення вхідної напруги адекватно супроводжується підключенням відповідних регулювальних секцій.

Максимальна напруга на  $j$ -тій відпайці (напруга між точками  $j$  та 0)

$$U_{j0\max}^* = U_{10\max}^* \cdot \gamma^{j-1} = \mu\gamma \cdot \gamma^{j-1} = \mu\gamma^j, \quad j = \overline{1, J}, \quad (18)$$

а напруга на  $j$ -ій регулювальній секції (їхня кількість на одну менша, ніж загальна кількість відпайок)

$$\begin{aligned} U_{cj\max}^* &= U_{(j+1)0\max}^* - U_{j0\max}^* = \\ &= \mu\gamma^j(\gamma - 1), \quad j = \overline{1, (J-1)}. \end{aligned} \quad (19)$$

Зауважимо, що у нашому випадку восьма секція (за інших співвідношень  $\mu$  та  $\rho$  це може бути інша секція) поділена вихідною відпайкою  $a$  на дві частини – верхню та нижню, для яких відповідно маємо

$$\begin{aligned} U_{8a\max}^* &= U_{80\max}^* - U_{2\max}^* = \\ &= \mu\gamma^8 - 2\gamma / (\gamma + 1) = 0,0726, \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} U_{a7\max}^* &= U_{2\max}^* - U_{70\max}^* = \\ &= 2\gamma / (\gamma + 1) - \mu\gamma^7 = 0,0098. \end{aligned} \quad (21)$$

Струм у нижній частині восьмої секції, як було зазначено раніше, дорівнює  $I_{2\max}^*$ , а у верхній він визначається вхідним струмом у восьмому режимі

$$I_{8a \max}^* = P_{\max}^* / \mu \gamma^8 = 4 / \mu \gamma^6 (\gamma + 1) = 0,9707. \quad (22)$$

Струм у дев'ятій секції є найбільшим у останньому дев'ятому режимі

$$I_{98 \max}^* = P_{\max}^* / \mu \gamma^9 = 4 / \mu \gamma^7 (\gamma + 1) = 0,8987. \quad (23)$$

Обчисливши максимальні напруги та струми для всіх секцій за виведеними формулами (16)–(23), знаходимо встановлену потужність автотрансформатора  $P_{AT}^*$ , нормовану по номінальній потужності навантаження, як напівсуму добутків цих величин

$$P_{AT}^* = P_{CH1}^* = 0,5 \left[ U_{10 \max}^* I_{10 \max}^* + \sum_{j=1}^{J-1} U_{j(j-1) \max}^* I_{j(j-1) \max}^* \right] = 0,4807. \quad (24)$$

Задля наочності у секторі таблиці поруч зі схемою ТКВС зображено контурну фігуру, що складається з  $(J+1)$  прямокутників, вертикальні розміри яких пропорційні максимальним напругам на відповідних секціях, а горизонтальні – максимальним значенням струмів через них. Назвемо її вольтамперною діаграмою – скорочено ВАД. Вона, по-перше, ілюструє "внесок" окремих секцій у встановлену потужність АТ, а, по-друге, допоможе порівнювати різні варіанти ТКВС.

Перейдемо до варіанту ТКВС стабілізатора напруги з комутатором на виході АТ, тобто з К2 (нижній лівий сектор у таблиці). Тут максимальна напруга на основній вторинній обвитці  $U_{20}^*$  дорівнює максимальній напрузі навантаження –  $U_{20 \max}^* = U_{2 \max}^* = 2\gamma / (\gamma + 1)$ , а для максимальної напруги на  $j$ -тій відпайці (між точками  $j$  та 0) маємо

$$U_{j0 \max}^* = U_{20 \max}^* \cdot \gamma^{j-1} = \frac{2\gamma}{\gamma + 1} \gamma^{j-1} = 2\gamma^j / (\gamma + 1), \quad j = \overline{1, J}. \quad (25)$$

Максимальна напруга на  $j$ -тій регульовальній секції

$$U_{j0 \max}^* = 2\gamma^j (\gamma - 1) / (\gamma + 1), \quad j = \overline{1, (J-1)}. \quad (26)$$

У цій структурі при вибраному співвідношенні  $\mu$  та  $\rho$  друга регульовальна секція поділена вхідною відпайкою  $a$  на дві частини – верхню та нижню, для яких відповідно

$$U_{a2 \max}^* = U_{1 \max}^* - U_{20 \max}^* = \mu \gamma^9 - 2\gamma^2 / (\gamma + 1) = 0,07837, \quad (27)$$

$$U_{3a \max}^* = U_{30 \max}^* - U_{1 \max}^* = 2\gamma^3 / (\gamma + 1) - \mu \gamma^9 = 0,01143. \quad (28)$$

Максимальний струм у всіх секціях між точками  $a$  та 9 дорівнює максимальному струму навантаження  $I_{2 \max}^* = 2\gamma / (\gamma + 1)$ , а струм у обвитці  $W_{20}$  такий самий, як і струм у обвитці  $W_{10}$  у попередньому випадку:  $I_{20 \max}^* = 0,6257$ . З умови незмінності максимального значення вхідної і вихідної потужностей у всіх режимах стабілізації знаходимо  $I_{21 \max}^* = 0,9707$ ,  $I_{a2 \max}^* = 0,8987$ . Зрозуміло, що всі секції між точками 9 та  $a$  необхідно розраховувати на максимальний струм навантаження  $I_{2 \max}^* = 1,0385$ .

Таким чином, у цьому варіанті для встановленої потужності автотрансформатора маємо

$$P_{AT}^* = P_{CH2}^* = 0,5 \left[ U_{20 \max}^* I_{20 \max}^* + \sum_{j=1}^{J-1} U_{j(j-1) \max}^* I_{j(j-1) \max}^* \right] = 0,7755. \quad (29)$$

Як бачимо,  $P_{CH2}^*$  більше ніж на 60% перевищує  $P_{CH1}^*$ , причому при інших параметрах поля стабілізації та кількості КЕ ситуація буде відрізнятися лише кількісно, а не якісно. Порівняння ВАД обох варіантів дозволяє наочно переконатися, що при однакових або близьких струмах у обвитках у другому варіанті значно підвищується максимальна (розрахункова) напруга на основній обвитці, яка є визначальною, і, внаслідок цього, зростають розрахункові напруги на всіх регульовальних секціях.

Це переконливо свідчить про доцільність використання у стабілізаторах напруги змінного струму ТКВС з комутатором на первинному боці автотрансформатора. (Зауважимо, що цей результат є передбачуваним [1], проте раніше він акцентовано не розглядався).

Перейдемо до регуляторів напруги. Припустимо, ми хочемо мати змогу змінювати її у тих самих межах, у яких змінювалась вхідна напруга вже розглянутих стабілізаторів, а саме  $\mu = 0,6$ ,  $\rho = 1,2$ .

Задля конкретності будемо вважати, що максимальна потужність навантаження залишається на тому ж рівні –  $P_{\max}^* = 1,0385^2 = 1,0785$ . Оскільки максимальна вихідна напруга при заданому діапазоні, як було визначено раніше, знаходиться на рівні  $\rho/(1+\delta) = 1,1555$ , максимальний вихідний струм буде меншим, ніж у випадку стабілізації

$$I_{2\max}^* = P_{\max}^* / U_{2\max}^* = 1,0785 / 1,1555 = 0,9333. \quad (30)$$

Зі збільшенням  $j$  на одиницю вихідна напруга та вихідний струм зменшуються у  $\gamma$  разів, тобто вихідна (і вхідна) потужність зменшується у  $\gamma^2$  разів. Оскільки  $U_{1\max}^* = 1$ , то у  $\gamma^2$  разів зменшується і вхідний струм. Ці міркування справедливі для обох варіантів регулятора, що будуть розглянуті.

Почнемо з варіанта ТКВС регулятора з комутатором на вході автотрансформатора (верхній правий сектор таблиці).

Напруга основної частини вхідної обвитки (між точками 1 та 0) максимальна у режимі максимальної вихідної напруги і дорівнює номінальній вхідній напрузі, тобто  $U_{10\max}^* = 1$ , а максимальні розрахункові напруги на відпайках та на секціях обчислюються за формулами

$$U_{j0\max}^* = U_{10\max}^* \cdot \gamma^{j-1} = \gamma^{j-1}, \quad j = \overline{1, J}, \quad (31)$$

$$U_{cj\max}^* = U_{(j+1)0\max}^* - U_{j0\max}^* = \gamma^{j-1}(\gamma - 1), \quad j = \overline{1, (J-1)}. \quad (32)$$

Зазначимо, що друга регульовальна секція поділена відпайкою  $a$  у такому співвідношенні

$$U_{3a\max}^* = U_{30\max}^* - U_{a0\max}^* = \gamma^2 - \rho/(1+\delta) = 0,011, \quad (33)$$

$$U_{a2\max}^* = U_{a0\max}^* - U_{20\max}^* = \rho/(1+\delta) - \gamma = 0,0755. \quad (34)$$

Максимальна різниця між струмом навантаження та вхідним струмом, що визначає максимальний струм у основній частині первинної обвитки, припадає на останній дев'ятий режим:  $I_{10\max}^* = 0,504 - 0,3145 = 0,1895$ . Струм у секціях між точкою 1 та вихідною відпайкою  $a$  дорівнює максимальному вихідному струму за формулою (30), а струми у секціях між відпайкою  $a$  та точкою 9 визначаються вхідними струмами у відповідних режимах ( $I_{3a\max}^* = 0,7925$ ;  $I_{43\max}^* = 0,6794$ ;  $I_{54\max}^* = 0,5824$ ;  $I_{65\max}^* = 0,4993$ ;  $I_{76\max}^* = 0,428$ ;  $I_{87\max}^* = 0,3669$ ;  $I_{98\max}^* = 0,3145$ ). Підставляючи отримані значення напруг і струмів окремих секцій обвитки у формулу (24), знаходимо розрахункове значення встановленої потужності автотрансформатора у ТКВС розглянутого варіанта регулятора

$$P_{AT}^* = P_{PH1}^* = 0,3057 \quad (35)$$

та будемо відповідну вольтамперну діаграму.

У ТКВС регулятора з комутатором на виході АТ (нижній правий сектор таблиці) максимальна напруга, що прикладається до основної частини вторинної обвитки (між точками 1 та 0), дорівнює

$$U_{10\max}^* = \frac{\mu}{1-\delta} = 0,624. \quad (36)$$

Максимальні напруги на відпайках та у секціях визначаються таким чином:

$$U_{j0\max}^* = U_{10\max}^* \gamma^{j-1} = 0,624 \gamma^{j-1}, \quad j = \overline{1, J}, \quad (37)$$

$$U_{cj\max}^* = 0,624 \gamma^{j-1} (\gamma - 1), \quad j = \overline{1, (J-1)}. \quad (38)$$

Тут вже передостання сьома секція поділена відпайкою  $a$  на дві частини

$$U_{8a\max}^* = U_{80\max}^* - U_{1\max}^* = 0,624 \gamma^7 - 1 = 0,0698, \quad (39)$$

$$U_{a7\max}^* = U_{1\max}^* - U_{70\max}^* = 1 - 0,624 \gamma^6 = 0,0095. \quad (40)$$

Щодо струмових навантажень, то у останній секції максимальний струм дорівнює максимальному струму навантаження (0,9334), у верхній (8а) частині сьомої секції він у  $\gamma$  разів менший (0,8641); струми у секціях між відпайкою  $a$  та точкою 1 визначаються вхідними струмами у відповідних режимах ( $I_{a7\max}^* = 0,7925$ ;  $I_{76\max}^* = 0,6794$ ;  $I_{65\max}^* = 0,5824$ ;  $I_{54\max}^* = 0,4993$ ;  $I_{43\max}^* = 0,428$ ;

$I_{32\max}^* = 0,3669$ ;  $I_{21\max}^* = 0,3145$ ), а струм у основній частині вихідної обвитки (між точками 1 та 0) має найбільше значення у останньому режимі – 0,1895.

Підставляючи отримані значення напруг і струмів секцій у формулу (29), знаходимо розрахункове значення встановленої потужності АТ у ТКВС цього варіанту регулятора

$$P_{AT}^* = P_{PH2}^* = 0,2239, \quad (41)$$

а також відповідну вольтамперну діаграму.

Порівняння двох розглянутих варіантів ТКВС регулятора напруги свідчить, що при комутаторі на виході досягається суттєве (у 1,36 рази) зменшення розрахункового значення встановленої потужності АТ. Аналіз ВАД підтверджує, що і тут причина вказаної різниці є наслідком значно менших напруг на регульовальних секціях в останньому варіанті, який і слід вважати найбільш прийнятним схемотехнічним рішенням ТКВС регуляторів напруги. Зауважимо, що цей висновок буде справедливим і у разі зміни діапазону регулювання або його зсуву відносно номінальної напруги.

Завершуючи розгляд ТКВС регуляторів напруги цього класу, слід додати, що регулювання можливе й при вихідній напрузі, відмінній від номінальної. Так, при  $U_1^* = 0,95$  маємо "зсунутий униз" діапазон регулювання з межами 0,57 та 1,14, а при  $U_1^* = 1,05$  – "зсунутий вгору" з межами 0,63 та 1,26.

Перед тим, як перейти до узагальнюючих висновків щодо визначення можливостей ТКВС стабілізаторів та регуляторів напруги, наголосимо, що на основі останніх можуть бути реалізовані стабілізатори змінного струму (СС), в яких його величина підтримуватиметься з тією ж відносною похибкою  $\pm \delta$  при зміні опору навантаження за рахунок того, що кожного разу при зміні вихідного опору в  $\gamma$  разів система зворотнього зв'язку (за струмом) буде збільшувати у  $\gamma$  разів вихідну напругу. Таким чином залежність  $I_2^* = f(R_2^*)$  буде мати також пилкоподібний характер (рис. 3).

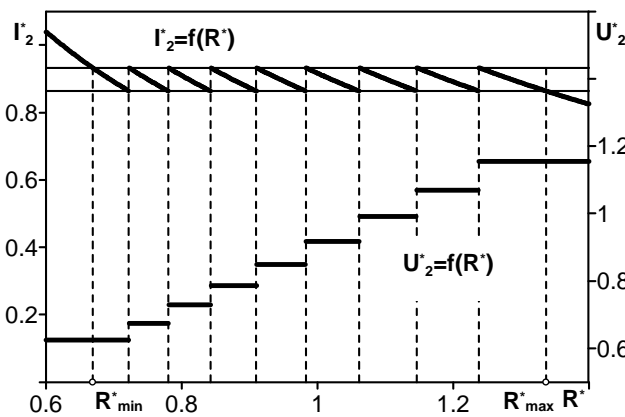


Рис. 3

Оскільки, як доведено вище, максимальне значення вихідного струму згідно з (30)  $I_{2\max}^* = 0,9333$ , то при мінімальній вхідній напрузі  $U_{2\min}^* = 0,624$

$$R_{2\min}^* = U_{2\min}^* / I_{2\max}^* = 0,6686. \quad (42)$$

При  $R_2^* = R_{2\min}^* \gamma = 0,7221$  знаходимо

$$I_{2\min}^* = U_{2\min}^* / R_{2\min}^* \gamma = I_{2\max}^* / \gamma = 0,8641. \quad (43)$$

Стабілізація струму продовжується до досягнення вихідним опором значення

$$R_{2\max}^* = U_{2\max}^* / I_{2\min}^* = 1,3372, \quad (44)$$

тобто діапазон припустимої зміни  $R_2$  також дорівнює двом.

При побудові стабілізатора струму на основі ТКВС регулятора напруги слід враховувати наступне. ТКВС СС відрізняється значно більшим струмовим завантаженням (що прослідковується по відповідних ВАД, розміщених поряд з ВАД регуляторів напруги), й розрахункові значення встановленої потужності АТ тут будуть більшими: для ТКВС з К1  $P_{CC1}^* = 0,4925$  (проти  $P_{PH1}^* = 0,3057$ ), для ТКВС з К2  $P_{CC2}^* = 0,3193$  (проти  $P_{PH2}^* = 0,2239$ ). Тобто ТКВС СС (без збільшення струму в обвитках) повинен розраховуватися на максимальну вихідну потужність, значно меншу (в 1,6÷1,4 рази), ніж при регулюванні напруги змінного струму.

Слід наголосити, що запропонований стабілізатор не є джерелом струму таким, наприклад, як індуктивно-емнісний перетворювач [5]: у кожний момент – це джерело напруги, яке змінюється згідно з законом геометричної прогресії. Проте у певних випадках не дуже широкої зміни опору навантаження такий принцип підтримання струму у необхідних межах може виявитись прийнятним.

## Висновки.

Виконані дослідження дозволяють сформулювати висновки у вигляді низки певних положень, що мають узагальнюючий характер.

По-перше, за допомогою будь-якої ТКВС можна, у принципі, здійснювати обидва різновиди єдиного функціонального перетворення величини напруги змінного струму – і стабілізацію, і регулювання.

По-друге, при побудові перетворювача напруги необхідно пам'ятати, що при використанні ТКВС необхідно дотримуватися принципу дуальності на всіх етапах – не тільки на етапах формулювання завдання та вибору системи керування, а й на етапах вибору топології ТКВС та її розрахунку.

По-третє, вибираючи топологію ТКВС, орієнтовану на конкретний різновид перетворення, необхідно, щоб регульовальні секції АТ розміщувались у тому колі, де відбувається основна зміна напруги. При цьому нерегульована частина обвитки розраховується на мінімально можливу у цьому колі напругу, а її збільшення до максимального значення адекватно супроводжуються підключенням регульованих секцій, завдяки чому магнітна індукція в осерді електромагнітного елемента залишається практично незмінною (з відповідною похибкою  $\pm\delta$ ). Інше рішення призводить до зміни індукції у широких межах, виткової надлишковості обвиток АТ і, внаслідок цього, до зростання розрахункового значення його встановленої потужності. Виходячи з цих позицій, рекомендується у ТКВС стабілізаторів напруги розміщувати комутатор виключно у вхідному колі, а у ТКВС регуляторів напруги – виключно на виході структури.

По-четверте, ТКВС, орієнтована на стабілізацію напруги, може при зміні місць підключення мережі та споживача реалізувати процес регулювання напруги (і навпаки), що свідчить про принципову оберненість цих структур.

По-п'яте, пріоритетна функція ТКВС (регулювання чи стабілізація) визначає її певні (притамані тільки їй) особливості, внаслідок чого задекларована вище принципова оберненість практично не є повною – при використанні ТКВС стабілізатора напруги для регулювання обвитки АТ будуть недозавантажені по струму, тобто АТ буде мати зайву непотрібну масу; у протилежному випадку стабілізатор потрібно буде використовувати для живлення споживачів меншої потужності.

По-шосте, все це справедливо й у разі, коли у ТКВС використовується не автотрансформатор, а силовий трансформатор, одна обвитка якого секціонована.

По-сьоме, всі ці міркування можна перенести на більш складні ТКВС, зокрема структури з кількома електромагнітними елементами, з винесенням ключових елементів з кіл силового струму.

1. Липківський К.О., Можаровський А.Г., Халіков В.А. Порівняльна оцінка трансформуючих елементів дискретних стабілізаторів напруги змінного струму // Техн. електродинаміка. Тем. випуск "Силова електроніка та енергоефективність." – 2003. – Ч.4. – С. 29–32.

2. Липківський К.О. Порівняльна оцінка основних варіантів побудови розрахункових характеристик виконавчих структур дискретних стабілізаторів напруги змінного струму // Техн. електродинаміка. – 2005. – №5. – С. 28–31.

3. Липковський К.А., Можаровський А.Г. Модернизация закона выбора коэффициентов передачи трансформаторно-ключевой исполнительной структуры дискретного стабилизатора напряжения переменного тока // Техн. електродинаміка. Тем. випуск "Силовая електроніка та енергоефективність". – 2005. – Ч.1. – С. 69–72.

4. Липковський К.А. Трансформаторно-ключевые исполнительные структуры преобразователей переменного напряжения. – К.: Наукова думка, 1983. – 216 с.

5. Милях А.Н., Волков И.В. Системы неизменного тока на основе индуктивно-емкостных преобразователей. – К.: Наукова думка, 1974. – 216 с.

6. Шидловський А.К., Липківський К.О. Розвиток досліджень по перетворенню та стабілізації параметрів електромагнітної енергії в Інституті електродинаміки НАН України // Техн. електродинаміка. – 2007. – №3. – С. 11–26.

7. Bimal K.Bose. Power Electronics – Why the Field is so Exciting // IEEE Power Electronics Society Newsletter/ Fourth Quarter –2007/ volume 19, November 4. – Pp. 11–20.

Надійшла 23.04.2010