ги, що підводиться до цеху, та за рахунок цього покращити роботу електроустаткування;

— виключити комутаційні провали напруги, які призводять до збою в роботі сусіднього комп'ютерного і офісного електронного обладнання та засобів зв'язку;

— зменшити навантаження струму на кабель, що живить цех, та зменшити в ньому спотворення і за рахунок цього забезпечити можливість підключення додаткового устаткування, що в даний момент неможливо;

— зменшити реактивну потужність, яка споживається з мережі живлення;

— радикально покращити коефіцієнт потужності за рахунок застосування компенсаторів реактивної потужності (без лінеатора їх застосування неможливе через масовий вихід з ладу компенсуючих конденсаторів при спотворенні напруги та струму).

Надійшла 28.05.2008

УДК 621.314

К.О.ЛИПКІВСЬКИЙ К.О., докт.техн.наук (Ін-т електродинаміки НАН України, Київ)

Особливості комплексування регулювальних блоків дискретних стабілізаторів напруги змінного струму

Прослідковано вплив на установлені потужності електромагнітних елементів та струмову завантаженість ключових елементів черговості розташування регулювальних блоків у виконавчій структурі дискретного стабілізатора напруги змінного струму.

Прослежено влияние на установленные мощности электромагнитных элементов и токовую загрузку ключевых элементов очередности размещения регулирующих блоков в исполнительной структуре дискретного стабилизатора напряжения переменного тока.

Вступ. Трансформаторно-ключові виконавчі структури (ТКВС) дискретних систем стабілізації напруги змінного струму, в яких ключові елементи (КЕ) винесено з кіл силового струму, мають певні позитивні властивості [1—4]. По-перше, в них можна використовувати напівпровідникові прилади, які розраховані на значно менші струми, ніж максимальний струм навантаження. (Пізніше ми зупинимось на цьому поки що декларативному твердженні). Наслідком цього, певна річ, є значно менші потрібні площі охолоджуючих радіаторів, тобто значно кращі малогабаритні та вартісні показники КЕ. По-друге, вони дещо надійніші — навіть при виході з ладу КЕ споживач продовжує отримувати живлення, щоправда, при пониженій напрузі.

У найпростіших ТКВС цього класу використовується, зазвичай, кілька регулювальних блоків (РБ), кожен з яких складається з мостового комутатора на чотирьох напівпровідникових ключах змінного струму (зустрічно-паралельні пари тиристорів, симістори або тріаки) та силового понижуючого вольтододавчого трансформатору (ВДТ), первинна обмотка якого введена у діагональ цього мосту, а вторинна — у коло силового струму. Кожний РБ в залежності від співвідношення працюючих КЕ може знаходитись в одному з трьох стійких станів — вольтододавання (коефіцієнт передачі $K_1=(1+\alpha)$, де $\alpha=W_1/W_0$), прямої передачі ($K_2=1$) та вольтоднімання ($K_3=(1+\alpha)^{-1}$). Крім РБ до ТКВС входить також силовий автотрансформатор (АТ), функція якого полягає в узгодженні середини діапазону можливих змін вхідної напруги з номінальною вихідною напругою. Неузгодженість цих величин є наслідком того, що вхідна напруга найчастіше має тенденцію до зниження, спричинену недостатньою якістю живлячої мережі — її відходу від мережі безкінечної потужності. (Зауважимо, що мова йде саме про узгодженість, а не про рівність цих напруг, на чому буде наголошено у цій роботі

© Липківський К.О., 2008

пізніше).

Варіанти побудови характеристики вхід-вихід. На рис. 1 показано схему ТКВС з двома регулювальними блоками (для одного $\alpha_1=(\gamma^3-1)$, для другого $\alpha_2=(\gamma-1)$, де γ — відношення максимального та мінімального значень вихідної напруги, $\gamma=U_{2\max}/U_{2\min}=(1+\delta)/(1-\delta)$, δ — похибка стабілізації, $\delta=(U_{2\max}-U_{2\min})/2U_{2n}$) та автотрансформатором, що передує навантаженню та розміщується після обох регулюючих блоків. У [5] доведено, що саме таке рішення є оптимальним з точки зору мінімізації розрахункового значення його установленої потужності. Коефіцієнт трансформації АТ визначається залежністю [5]

$$K_{\text{АТ}}=2/\mu\gamma^4\left(\gamma+1\right), \qquad (1)$$

де μ — нормоване по номінальній напрузі (що приймається однаковою для входу та виходу) мінімально можливе значення вхідної напруги, $\mu=U^*_{1\min}=U_{1\min}/U_n$. В разі $\mu<2/(\gamma^4+1)$ АТ має бути підвищувальним, а в разі $\mu>2/(\gamma^4+1)$ — знижувальним.

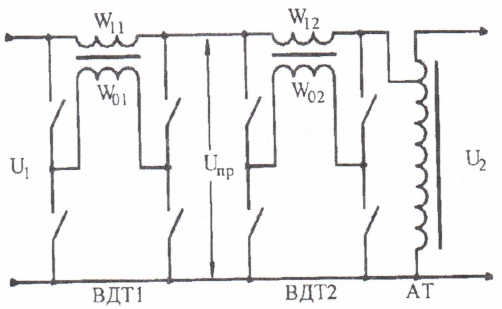


Рис. 1

Таким чином, тут для одного РБ (позначимо його РБ1) маємо такі коефіцієнти передачі: $K_{11}=\gamma^3$, $K_{12}=1$, $K_{13}=\gamma^{-3}$, а для другого (позначимо його РБ2) — відповідно $K_{21}=\gamma$, $K_{22}=1$, $K_{23}=\gamma^{-1}$. При цьому загальний коефіцієнт передачі ТКВС по напрузі з урахуванням наявності АТ запишеться таким чином:

$$K_{\text{П}}=K_{1i}\cdot K_{2j}\cdot K_{\text{АТ}}=K_{2i}\cdot K_{1j}\cdot K_{\text{АТ}},$$
$$i=\overline{1,3}; \quad j=\overline{1,3}, \qquad (2)$$

тобто маємо масив з дев'яти ($J=9$) нетотожних коефіцієнтів передачі:

$$\gamma^4K_{\text{АТ}},\ \gamma^3K_{\text{АТ}},\ \gamma^2K_{\text{АТ}},\ \gamma K_{\text{АТ}},\ K_{\text{АТ}},$$
$$\gamma^{-1}K_{\text{АТ}},\ \gamma^{-2}K_{\text{АТ}},\ \gamma^{-3}K_{\text{АТ}},\ \gamma^{-4}K_{\text{АТ}}.$$

У (2) навмисно наведено подвійний запис множення коефіцієнтів передачі блоків регулювання. Перший відповідає послідовності встановлення РБ1-РБ2, а другий — РБ2-РБ1. Незважаючи на незмінність кінцевого результату та однаковий алгоритм роботи ключових елементів у обох випадках, процеси формування залежності вхід-вихід у них суттєво відрізняються. (Раніше цей цікавий феномен не було виявлено та належним чином проаналізовано).

На рис. 2, *а* показано випадок I, коли першим стоїть більш "грубий" РБ1 з $\alpha_1=(\gamma^3-1)$, а другим — більш "прецизійний" РБ2 з $\alpha_2=(\gamma-1)$. (Задля конкретики прийнято $\gamma=1{,}1$, $\mu=0{,}6$, звідки $K_{\text{АТ}}=1{,}0841$). Тут через $U_{\text{ПР}}$ позначено проміжну напругу між РБ1 та РБ2, якій відповідає ламана суцільна лінія *ABCDEF*. На трьох ділянках, що виділені потовщенням цієї лінії, РБ2 має $K_{22}=0$, тобто він не впливає на $U_{\text{ПР}}$. На інших ділянках РБ2 "коригує" $U_{\text{ПР}}$: на трьох, що передують виділеним ділянкам, він "підіймає" $U_{\text{ПР}}$, а на трьох ділянках, що йдуть слідом за виділеними — він "опускає" $U_{\text{ПР}}$. Таким чином, кінцева характеристика вхід-вихід має пилкоподібний характер (ламана пунктирна лінія *MN*), звичайний для ТКВС дискретних стабілізаторів напруги змінного струму.

Рисунок 2, *б* відповідає випадку II, коли першим стоїть прецизійний РБ2, а другим — грубий РБ1. Тут напруга $U_{\text{ПР}}$ (ламана суцільна лінія *ABCDEF*) формується РБ2 за більш складним, як видно, законом, ніж у попередньому випадку. РБ1 "коригує" , підвищуючи у γ^3 разів на ділянці *AB* і

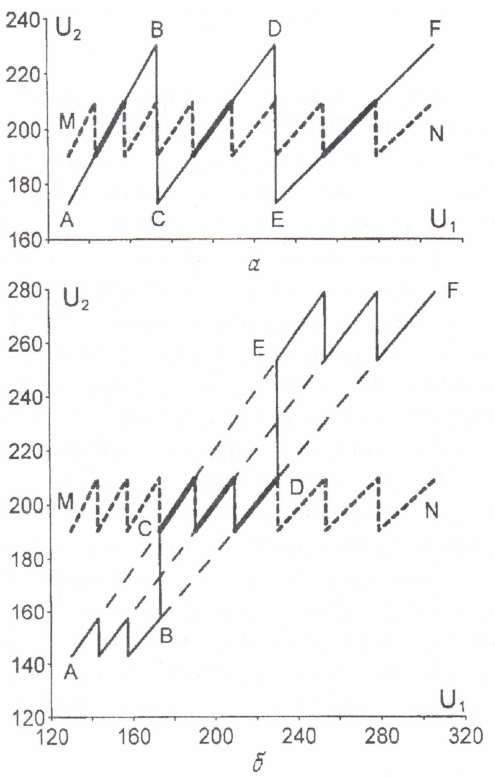


Рис. 2

зменшуючи у γ^3 разів на ділянці EF таким чином, що кінцева характеристика вхід-вихід співпадає з отриманою раніше графічною залежністю (ламана лінія MN).

Визначення установлених потужностей електромагнітних елементів ТКВС. Наслідком дослідженого явища є те, що вирази для напруг і струмів у первинних обвитках вольтододавчих трансформаторів W_{01} та W_{02} (а саме вони є визначальні і достатні для розрахунку установлених потужностей ВДТ) різні для обох випадків. У табл. 1 наведено умовні схеми з'єднань обвиток ВДТ1 і ВДТ2 та — у компактному спрощеному вигляді — формули для визначення напруг і струмів у вказаних обвитках для всіх дев'яти станів ТКВС. Для того, щоб отримати значення відповідних напруг і струмів, нормовані по номінальних значеннях напруги і струму навантаження U_{2n} та I_{2n}, вміст чарунку таблиці необхідно домножити на коефіцієнт $\left(\frac{2\gamma}{\gamma+1}\cdot\frac{1}{K_{AT}}\right)$ — для напруг і $\left(\frac{2\gamma}{\gamma+1}\cdot K_{AT}\right)$ — для струмів.

Аналіз цієї таблиці, навіть без використання чисельних прикладів, вказує на те, що максимальні значення напруг на обвитках припадають на останню дев'яту ділянку діапазону стабілізації, а струмів — на першу ділянку, коли струм, що споживається з мережі, є найбільшим ($I_{1max}=P_2/U_{1min}$). Тобто маємо

— для випадку I:

$$U^*_{W_{01max}}=\frac{2\gamma}{\gamma+1}\cdot\frac{\gamma}{K_{AT}}, \qquad (3)$$

$$U^*_{W_{02max}}=\frac{2\gamma}{\gamma+1}\cdot\frac{1}{K_{AT}}, \qquad (4)$$

$$I^*_{W_{01max}}=\frac{2\gamma}{\gamma+1}\cdot\gamma\left(\gamma^3-1\right)K_{AT}, \qquad (5)$$

$$I^*_{W_{02max}}=\frac{2\gamma}{\gamma+1}\cdot\left(\gamma-1\right)K_{AT}, \qquad (6)$$

— для випадку II:

$$U^*_{W_{01max}}=\frac{2\gamma}{\gamma+1}\cdot\frac{1}{K_{AT}}, \qquad (7)$$

$$U^*_{W_{02max}}=\frac{2\gamma}{\gamma+1}\cdot\frac{\gamma^3}{K_{AT}}, \qquad (8)$$

$$I^*_{W_{01max}}=\frac{2\gamma}{\gamma+1}\cdot\left(\gamma^3-1\right)K_{AT}, \qquad (9)$$

$$I^*_{W_{02max}}=\frac{2\gamma}{\gamma+1}\cdot\gamma^3\left(\gamma-1\right)K_{AT}. \qquad (10)$$

Визначаючи установлені потужності електромагнітних елементів, що приймаються безвтратними, як напівсуми добутків відповідних максимальних значень напруг і струмів обвиток, знаходимо

— для випадку I:

$$P^*_{ВДТ1}=\left(\frac{2\gamma}{\gamma+1}\right)^2\cdot\left(\gamma^3-1\right)\gamma^2, \qquad (11)$$

$$P^*_{ВДТ2}=\left(\frac{2\gamma}{\gamma+1}\right)^2\cdot\left(\gamma-1\right), \qquad (12)$$

$$P^*_{ВДТ\Sigma}=\left(\frac{2\gamma}{\gamma+1}\right)^2\cdot\left(\gamma-1\right)\left(\gamma^4+\gamma^3+\gamma^2+1\right), \qquad (13)$$

— для випадку II:

$$P^*_{ВДТ1}=\left(\frac{2\gamma}{\gamma+1}\right)^2\cdot\left(\gamma^3-1\right), \qquad (14)$$

$$P^*_{ВДТ2}=\left(\frac{2\gamma}{\gamma+1}\right)^2\cdot\left(\gamma-1\right)\gamma^6, \qquad (15)$$

$$P^*_{ВДТ\Sigma}=\left(\frac{2\gamma}{\gamma+1}\right)^2\cdot\left(\gamma-1\right)\left(\gamma^6+\gamma^2+\gamma+1\right). \qquad (16)$$

Для повноти розгляду наведемо також виведену у [5] формулу для визначення установленої потужності автотрансформатора:

$$P^*_{AT}=\left(\frac{2\gamma}{\gamma+1}\right)^2\left[1-0{,}5\mu\gamma^4(\gamma+1)\right]. \qquad (17)$$

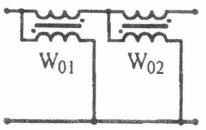
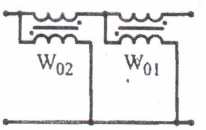
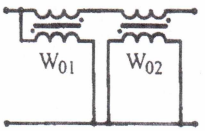
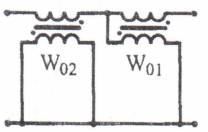
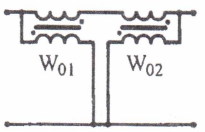
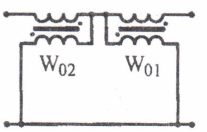
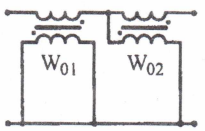
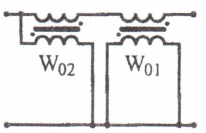
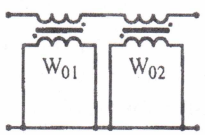
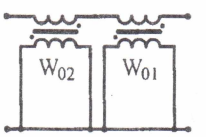
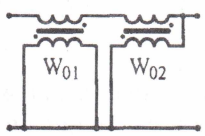
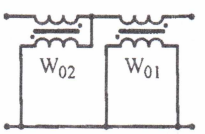
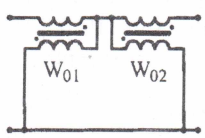
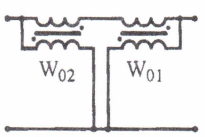
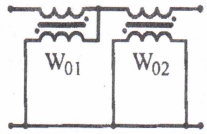
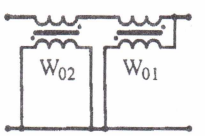
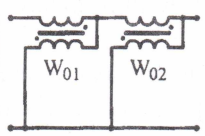
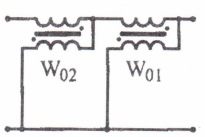
Аналізуючи отримані залежності, можна зробити кілька важливих висновків.

По-перше, установлені потужності вольтододавчих трансформаторів не залежать від розташування поля стабілізації ПС [6], тобто від конкретних значень його меж, а тільки від їх співвідношення, бо $\gamma=G^{-9}$, де $G=U_{1max}/U_{1min}$. Натомість, установлена потужність автотрансформатора є функцією μ, що характеризує нижню межу ПС, або, що те ж саме, $\rho=\mu G$, що характеризує верхню межу ПС.

По-друге, РБ, що стоїть першим у ТКВС, знаходиться у більш завантаженому стані, бо він працює не лише на спільне навантаження, а й на інший РБ. Наслідком цього є збільшення установленої потужності РБ при переміщенні його на першу позицію: $P^*_{ВДТ1}$ зростає при цьому у γ^2 разів, а $P^*_{ВДТ2}$ — у γ^6 разів.

По-третє, у першому випадку різниця у потужностях обох ВДТ складає $(\gamma^2+\gamma+1)\gamma\approx 3\gamma^3$, тобто при $\gamma=1{,}1$ вона стає чотирикратною, що не завжди зручно з технологічної точки зору. У другому ви-

Таблиця 1

j	U_1^*	$K_П = K_1 \times K_2 \times K_{АТ}$			$K_П = K_2 \times K_1 \times K_{АТ}$		
1	γ^{-4}		W_{01}	$U^* = \gamma^{-4}$ $I^* = (\gamma^3 - 1)\gamma$		W_{01}	$U^* = \gamma^{-3}$ $I^* = (\gamma^3 - 1)$
			W_{02}	$U^* = \gamma^{-1}$ $I^* = (\gamma - 1)$		W_{02}	$U^* = \gamma^{-4}$ $I^* = (\gamma - 1)\gamma^3$
2	γ^{-3}		W_{01}	$U^* = \gamma^{-3}$ $I^* = (\gamma^3 - 1)$		W_{01}	$U^* = \gamma^{-3}$ $I^* = (\gamma^3 - 1)$
			W_{02}	$U^* = 0$ $I^* = (\gamma - 1)$		W_{02}	$U^* = 0$ $I^* = (\gamma - 1)\gamma^3$
3	γ^{-2}		W_{01}	$U^* = \gamma^{-2}$ $I^* = (\gamma^3 - 1)\gamma^{-1}$		W_{01}	$U^* = \gamma^{-3}$ $I^* = (\gamma^3 - 1)$
			W_{02}	$U^* = 1{,}0$ $I^* = (\gamma - 1)\gamma^{-1}$		W_{02}	$U^* = \gamma^{-2}$ $I^* = (\gamma - 1)\gamma^2$
4	γ^{-1}		W_{01}	$U^* = 0$ $I^* = (\gamma^3 - 1)\gamma$		W_{01}	$U^* = 0$ $I^* = (\gamma^3 - 1)$
			W_{02}	$U^* = \gamma^{-1}$ $I^* = (\gamma - 1)$		W_{02}	$U^* = \gamma^{-1}$ $I^* = (\gamma - 1)$
5	1		W_{01}	$U^* = 0$ $I^* = (\gamma^3 - 1)$		W_{01}	$U^* = 0$ $I^* = (\gamma^3 - 1)$
			W_{02}	$U^* = 0$ $I^* = (\gamma - 1)$		W_{02}	$U^* = 0$ $I^* = (\gamma - 1)$
6	γ		W_{01}	$U^* = 0$ $I^* = (\gamma^3 - 1)\gamma^{-1}$		W_{01}	$U^* = 0$ $I^* = (\gamma^3 - 1)$
			W_{02}	$U^* = 1{,}0$ $I^* = (\gamma - 1)\gamma^{-1}$		W_{02}	$U^* = 1{,}0$ $I^* = (\gamma - 1)\gamma^{-1}$
7	γ^2		W_{01}	$U^* = \gamma^{-1}$ $I^* = (\gamma^3 - 1)\gamma^{-2}$		W_{01}	$U^* = 1{,}0$ $I^* = (\gamma^3 - 1)\gamma^{-3}$
			W_{02}	$U^* = \gamma^{-1}$ $I^* = (\gamma - 1)$		W_{02}	$U^* = \gamma^2$ $I^* = (\gamma - 1)\gamma^{-3}$
8	γ^3		W_{01}	$U^* = 1{,}0$ $I^* = (\gamma^3 - 1)\gamma^{-3}$		W_{01}	$U^* = 1{,}0$ $I^* = (\gamma^3 - 1)\gamma^{-3}$
			W_{02}	$U^* = 0$ $I^* = (\gamma - 1)$		W_{02}	$U^* = 0$ $I^* = (\gamma - 1)\gamma^{-3}$
9	γ^4		W_{01}	$U^* = \gamma$ $I^* = (\gamma^3 - 1)\gamma^{-4}$		W_{01}	$U^* = 1{,}0$ $I^* = (\gamma^3 - 1)\gamma^{-3}$
			W_{02}	$U^* = 1{,}0$ $I^* = (\gamma - 1)\gamma^{-1}$		W_{02}	$U^* = \gamma^3$ $I^* = (\gamma - 1)\gamma^{-4}$

падку ця різниця складає $(\gamma^2+\gamma+1)\gamma^{-6}\approx 3\gamma^{-5}$, тобто при $\gamma=1{,}1$ вона стає менш ніж двократною (1,87), що може бути більш прийнятним. Підкреслимо, що вказана різниця зменшилась як за рахунок збільшення потужності "меншого" ВДТ2, так і, а це — головне, за рахунок зменшення "більшого" ВДТ1.

По-четверте, в обох випадках сумарна потужність обох вольтододавчих трансформаторів (формули (13) та (16)) майже однакова (різниця між ними $\Delta P=4\gamma^3\left(\gamma^3-1\right)\left(\gamma-1\right)^2/\left(\gamma+1\right)$ при $\gamma=1{,}1$ становить лише 0,0084), тому при виборі оптимального варіанту можна виходити лише з міркувань наявності тих чи інших типономіналів магнітопроводів ВДТ.

Обмеження, притаманні ТКВС при вилученні АТ. Згідно з формулами (1) та (17) за умови

$$\mu_A=\frac{2}{\gamma_A^4(\gamma_A+1)},\qquad \rho_A=\mu_A\gamma_A^9=\frac{2\gamma_A^5}{(\gamma_A+1)} \qquad (18)$$

коефіцієнт трансформації АТ наближається до одиниці, а його установлена потужність — до нуля, тобто ТКВС цього класу можуть працювати без автотрансформатора. Проте, при цьому виникає жорстка залежність похибки стабілізації від положення меж ПС — чим менше його нижня межа, тим гірше точність підтримання вихідної напруги. Як наслідок, занадто може зрости і верхня межа ПС, а також суттєво збільшитись установлена потужність обох вольтододавчих трансформаторів.

На рис. 3 суцільним лініям А*1* та А*2* відповідають залежності $\mu=f(\delta)$ та $\rho=f(\delta)$, обчислені згідно з (18). Як видно, весь діапазон можливих відхилень вхідної напруги, який, нагадаємо, без АТ змінити не можна, поділяється тут таким чином, що частина його, де необхідне підвищення напруги $(1-\mu)$ у 1,2—1,5 рази менша за частину, де необхідне зменшення напруги $(\rho-1)$. Проте, на практиці, внаслідок згадуваної вже переважної слабкості електричних розподільчих мереж, спостерігається цілком протилежне. Вказані піддіапазони, щонайменше, однакові, але, зазвичай, приймається $(1-\mu)\approx 1{,}5(\rho-1)$, звідки $\mu_Б=2{,}5/(1{,}5\gamma_Б^9+1)$ та $\rho_Б=2{,}5\gamma_Б^9/(1{,}5\gamma_Б^9+1)$ — штрихові лінії Б*1* та Б*2*, відповідно.

Припустимо, що нижню межу діапазону стабілізації визначено на рівні $\mu=0{,}65$ ($U_{1\min}=143$ В). При наявності АТ і останньому варіанті розподілу ПС похибка стабілізації становитиме 3,56 % (точка *б*1), а у разі відсутності АТ — 4,76 % (точка *а*1), тобто на третину більше. До того ж, у останньому випадку верхня межа діапазону стабілізації зросте до $\rho=1{,}53$ (точка *а*2), чому відповідає занадто висока напруга $U_{1\max}=337{,}2$ В. При необхідності ще більшого зменшення нижньої межі ПС, наприклад, до $\mu=0{,}6$ ($U_{1\min}=132$ В), у ТКВС з АТ похибка стабі-лізації зросте лише до 4,06 % (точка *б*2), тобто

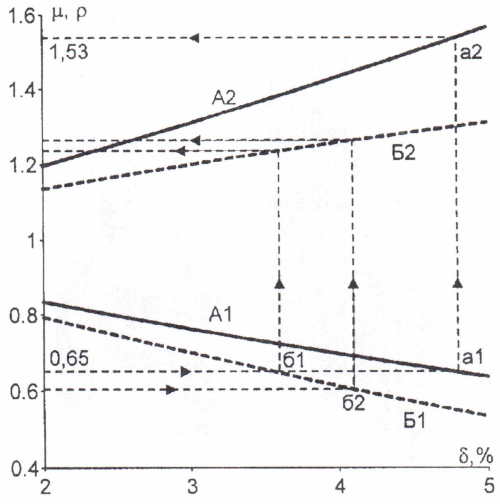


Рис. 3

лише на 14 %, а от без АТ вона перевищить максимально припустиме значення у 5 % (5,65 %, тобто на 18,7 %).

Видається слушним зупинитися на питанні впливу наявності у ТКВС автотрансформатора на розрахункові установлені потужності електромагнітних елементів. У табл. 2 зведено ці показники для кількох характерних випадків при більшому ($\mu=0{,}6$) та меншому ($\mu=0{,}65$) зсуві вниз середини поля стабілізації відносно номінального значення напруги. Як видно, за наявності автотрансформатора не тільки установлені потужності, але й загальна сумарна потужність всіх електромагнітних елементів $P^*_{\text{ЕМЕ}}$ виявляється дещо меншою. До того ж очікувано зменшується при цьому й установлена потужність АТ. Найбільш наочно це ілюструють показані на рис. 4 гістограми, де чітко спостерігається перерозподіл установлених потужностей ВДТ1 та ВДТ2 при зміні місця їх розташування. (Тут $P^*_{\text{ВДТ1}}$ та $P^*_{\text{ВДТ2}}$ відповідають ділянки з більш щільним та менш щільним штрихуванням, а $P^*_{\text{АТ}}$ — незаштрихована ділянка).

Таблиця 2

μ	$K_П$	$P^*_{\text{АТ}}$	$P^*_{\text{ВДТ1}}$	$P^*_{\text{ВДТ2}}$	$P^*_{\text{ЕМЕ}}$	δ, %
0,60	$K_1\cdot K_2\cdot K_{\text{АТ}}$	0,146	0,351	0,092	0,589	4,06
	$K_2\cdot K_1\cdot K_{\text{АТ}}$		0,299	0,149	0,594	
	$K_1\cdot K_2\cdot K_{\text{АТ}}$	0	0,566	0,134	0,70	5,65
	$K_2\cdot K_1\cdot K_{\text{АТ}}$		0,451	0,264	0,715	
0,65	$K_1\cdot K_2\cdot K_{\text{АТ}}$	0,115	0,295	0,079	0,489	3,56
	$K_2\cdot K_1\cdot K_{\text{АТ}}$		0,255	0,121	0,491	
	$K_1\cdot K_2\cdot K_{\text{АТ}}$	0	0,434	0,11	0,544	4,76
	$K_2\cdot K_1\cdot K_{\text{АТ}}$		0,363	0,195	0,558	

Струмове завантаження ключових елементів. На початку статті було задекларовано твердження

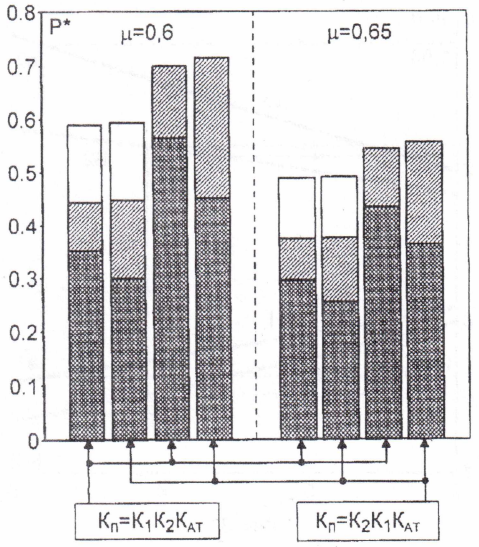


Рис. 4

про суттєво менші струмові завантаження ключових елементів у розглянутих схемах, ніж у ТКВС з ключовими елементами у силових колах. Розглянемо це питання докладніше. Зауважимо при цьому, що розробників ТКВС цікавлять, певна річ, максимальні струми, які визначають типономінали необхідних для побудови КЕ напівпровідникових приладів.

Аналіз даних табл. 1 показує, що у разі $K_{\Pi}=K_1\cdot K_2\cdot K_{AT}$ максимальні струмові навантаження у ключах V_1', V_2', V_4' будуть у першому та четвертому станах:

$$I^*_{V_1'}=I^*_{V_2'}=I^*_{V_4'}=\left(\frac{2\gamma}{\gamma+1}\right)^2\cdot\frac{\gamma^3-1}{\mu\gamma^4}, \qquad (19)$$

у ключі V_3' — у сьомому стані:

$$I^*_{V_3'}=\left(\frac{2\gamma}{\gamma+1}\right)^2\cdot\frac{\gamma^3-1}{\mu\gamma^7}=\frac{I^*_{V_1'}}{\gamma^3}, \qquad (20)$$

у ключах V_1'', V_2'', V_4'' — у першому, другому, четвертому, п'ятому, сьомому та восьмому станах:

$$I^*_{V_1''}=I^*_{V_2''}=I^*_{V_4''}=\left(\frac{2\gamma}{\gamma+1}\right)^2\cdot\frac{\gamma-1}{\mu\gamma^5}\approx\frac{I^*_{V_1'}}{3\gamma^2}, \qquad (21)$$

у ключі V_3'' — у третьому, шостому та дев'ятому станах:

$$I^*_{V_3''}=\left(\frac{2\gamma}{\gamma+1}\right)^2\cdot\frac{\gamma-1}{\mu\gamma^6}\approx\frac{I^*_{V_1'}}{3\gamma^3}. \qquad (22)$$

У разі зміни місцями РБ1 та РБ2, тобто при $K_{\Pi}=K_2\cdot K_1\cdot K_{AT}$, максимальні струмові завантаження у ключах V_1', V_2', V_4' будуть у першому, другому, третьому, четвертому, п'ятому та шостому станах:

$$I^*_{V_1'}=I^*_{V_2'}=I^*_{V_4'}=\left(\frac{2\gamma}{\gamma+1}\right)^2\cdot\frac{\gamma^3-1}{\mu\gamma^5}, \qquad (23)$$

у ключі $I^*_{V_3'}$ — у сьомому, восьмому та дев'ятому станах:

$$I^*_{V_3'}=\left(\frac{2\gamma}{\gamma+1}\right)^2\cdot\frac{\gamma^3-1}{\mu\gamma^8}=\frac{I^*_{V_1'}}{\gamma^3}, \qquad (24)$$

у ключах V_1'', V_2'', V_4'' — у першому та другому станах:

$$I^*_{V_1''}=I^*_{V_2''}=I^*_{V_4''}=\left(\frac{2\gamma}{\gamma+1}\right)^2\cdot\frac{\gamma-1}{\mu\gamma^2}\approx\frac{I^*_{V_1'}\gamma^2}{3}, \qquad (25)$$

у ключі V_3'' — у третьому стані:

$$I^*_{V_3''}=\left(\frac{2\gamma}{\gamma+1}\right)^2\cdot\frac{\gamma-1}{\mu\gamma^3}\approx\frac{I^*_{V_1'}\gamma}{3}. \qquad (26)$$

Аналіз отриманих залежностей (21)—(26) свідчить, що в останньому варіанті зменшується у γ разів максимальне струмове завантаження ключових елементів більш потужного РБ1, що є позитивним моментом, та збільшується у γ^3 разів струмове завантаження ключових елементів менш потужного РБ2 що, проте, є менш важливим (визначальним). Зрозуміло, що при підвищенні точності стабілізації, тобто при $\delta\to 0$ ($\gamma\to 1$) струми всіх ключових елементів, що винесені в цьому класі ТКВС з силових кіл, будуть наближатись до нуля. Зауважимо, що максимальні втрати у КЕ в разі "прямого" та "зворотнього" розташування регулюючих блоків однакові і пропорційні величині $\frac{2}{\mu\gamma^5}\left(\frac{2\gamma}{\gamma+1}\right)^2\left(\gamma^4-1\right)$.

При вилученому АТ діють всі залежності (21)—(26), однак, внаслідок того, що при одному й тому ж параметрі μ похибка стабілізації при цьому збільшується, зростуть відповідно й струмові завантаження КЕ.

У табл. 3 показано відносні (нормовані по номінальному струму навантаження) максимальні значення струмів у КЕ для випадків $\mu=0{,}65$, коли $\delta=3{,}56\,\%$ в разі $K_{AT}\neq 1$ і $\delta=4{,}76\,\%$ — в разі $K_{AT}=1$, та $\mu=0{,}725$, коли $\delta=2{,}72\,\%$ в разі $K_{AT}\neq 1$ і $\delta=3{,}56\,\%$ в разі $K_{AT}=1$. Як видно, наочно спостерігається зменшення вимог до КЕ при "зворотньому" розташуванні РБ1 та РБ2 та при введенні до складу ТКВС узгоджувального автотрансформатора, тобто наявність АТ є позитивним фактором з позиції побу-

дови не тільки вольтододавчих трансформаторів, але й комутуючих блоків.

Таблиця 3

μ	КЕ	$K_П=K_1\cdot K_2\cdot K_{AT}$		$K_П=K_2\cdot K_1\cdot K_{AT}$	
		$K_{AT}\neq 1$	$K_{AT}=1$	$K_{AT}\neq 1$	$K_{AT}=1$
0,65	V_1', V_2', V_4'	0,296	0,382	0,275	0,347
	V_3'	0,239	0,287	0,222	0,261
	V_1'', V_2'', V_4''	0,085	0,105	0,106	0,139
	V_3''	0,079	0,095	0,098	0,127
0,725	V_1', V_2', V_4'	0,207	0,296	0,196	0,275
	V_3'	0,176	0,239	0,167	0,222
	V_1'', V_2'', V_4''	0,062	0,085	0,073	0,106
	V_3''	0,059	0,079	0,069	0,098

Щодо визначення струмового навантаження КЕ простих однотрансформаторних ТКВС з ключами у колі силового струму, зупинимось на варіанті такої ТКВС, що має на вході дев'ять ключів ($N=9$), кожен з яких підключено до відповідного відводу обвитки силового автотрансформатора. При цьому забезпечується робота ТКВС з дев'ятьма нетотожніми коефіцієнтами передачі ($J=9$). Максимальний (розрахунковий) струм через j-ий КЕ дорівнює вхідному струму наприкінці відповідного j-ого стану. Так, перший ключ, який працює у першому піддіапазоні зміни вхідної напруги від $U_{1\min}=\mu U_n$ до $U_1=\mu\gamma U_n=\gamma U_{1\min}$, слід розраховувати на максимальний струм

$$I_{V1}=P_{2\max}/U_{1\min}\cdot\gamma. \qquad (27)$$

Беручи до уваги, що $P_{2\max}$ більше номінальної потужності навантаження у $[2\gamma/(\gamma+1)]^2$ разів, переходимо до струму, нормованому по номінальному струму навантаження

$$I^*_{V1}=\frac{I_{V1}}{I_{2n}}=\left(\frac{2\gamma}{\gamma+1}\right)^2\frac{1}{\mu\gamma}. \qquad (28)$$

Струм через другий ключ розраховується при $U_1^*=\mu\gamma^2$, тобто він буде у γ разів менший за розрахунковий струм першого ключа. Таким чином, струм у кожному наступному ключі у γ разів менший, ніж у попередньому, звідки

$$I^*_{Vj}=\frac{I_{V1}}{I_{2n}}=\left(\frac{2\gamma}{\gamma+1}\right)^2\frac{1}{\mu\gamma^j}. \qquad (29)$$

Струм через останній дев'ятий ключ у γ^8 разів менше за найбільший струм першого ключа, проте він буде лише дещо менший за номінальний струм навантаження.

Як видно, у цьому випадку, покращення стабілізації — зменшення похибки δ та, відповідно, γ — також веде до зменшення струмової завантаженості КЕ, проте не до нульового рівня, як раніше, а до рівня μ^{-1}.

Якщо виконати у такій структурі декомпозицію ключових елементів, тобто розмістити, наприклад, три ключі на первинному боці автотрансформатора, а три — на вторинному ($N=3+3=6$, $J=3\text{x}3=9$), то останні треба розраховувати на максимальний струм навантаження $I^*_{2\max}=2\gamma/(\gamma+1)$. З тих ключів, що стоять на вході, у одного струм перевищував би $I^*_{2\max}$ у γ^4 разів, у другого — у γ разів, а у третього він у γ^2 разів був би меншим. Таким чином, різниця між найбільш завантаженим ключем (його струм визначається тією ж формулою (28)) та найменш завантаженим тут дещо менша ($\gamma^6<\gamma^8$), проте виконана декомпозиція, як видно, не змінює принципово ситуацію з вибором типів КЕ при проектуванні ТКВС.

Переходячи до чисельної оцінки максимальної струмової завантаженості КЕ у цих структурах та їх співставлення з аналогічними показниками структур з винесенням ключів з силових кіл, наведемо такі цифри: $I^*_{V1}=1{,}45$ при $\delta=2{,}72$ % ($\gamma=1{,}056$), $I^*_{V1}=1{,}54$ при $\delta=3{,}56$ % ($\gamma=1{,}0738$), $I^*_{V1}=1{,}68$ при $\delta=4{,}76$ % ($\gamma=1{,}1$), тобто вона відповідно у 7; 5,6; 4,4 рази (у загальному вигляді — у $(\gamma^3-1)/\gamma^4$ разів) перевищує струмове завантаження ключів V_1', V_2' та V_4' у РБ1.

Певна річ, реально вибір напівпровідникових приладів для ключових елементів повинен відбуватися з урахуванням дискретності шкали струмів типономіналів тиристорів чи тріаків (10 А, 16 А, 25 А, 40 А, 63 А, 80 А, 100 А, 125 А...). Крім того, задля технологічності побудови окремого пристрою розробники повинні максимально уніфікувати КЕ, що в ньому використовуються. Виходячи з цього, у комутаторах РБ1 та РБ2 (рис. 1) доцільно використовувати дві групи по чотири однакових напівпровідникових прилади, що різняться між собою по допустимому струму, а, значить, і по масі охолоджуючих радіаторів та по вартості у 2—3 рази.

Розглянемо, наприклад, вимоги до КЕ стабілізатора напруги змінного струму, що працює на навантаження номінальною потужністю 15 кВт (номінальний струм 68,2 А) в умовах зміни вхідної напруги в межах $U_1=143$—270 В і забезпечує похибку стабілізації на рівні 3,76 %. У ТКВС з винесенням ключів з кола силового струму (рис. 1) згідно з табл. 3 максимальний струм через ключі РБ1 буде дорівнювати 68,2x0,275 = 18,7 А, а через ключі РБ2 — 68,2x0,106 = 7,2 А. Тобто, як ключі РБ1 можна використати вітчизняні симертичні тиристори

(тріаки) — ТС-122-25, а РБ2 — ТС-115-10 з коефіцієнтом запасу по струму 1,35. У варіанті ТКВС з ключами у колі силового струму останні треба розраховувати на максимальний вхідний струм $I_{1max} = 68{,}2x1{,}54 = 105$ А, тобто тут для кожного з дев'яти ключів слід використовувати значно дорожчі та більші за масою і габаритами радіаторів охолодження тріаки типу ТС-152-125 (з коефіцієнтом запасу 1,19), або, краще, ТС-152-160 (з коефіцієнтом запасу 1,52).

Висновки. У класі виконавчих структур дискретних стабілізаторів напруги змінного струму, що розглядаються у роботі, установлені потужності електромагнітних елементів та струмове завантаження ключових елементів залежить від взаємного розташування окремих блоків. Найбільш доцільним є така послідовність: блок регулювання з меншим коефіцієнтом трансформації — блок регулювання з більшим коефіцієнтом трансформації — узгоджуючий автотрансформатор. Винесення ключів з кіл силового струму дозволяє використовувати менш вартісні напівпровідникові прилади, що знаходяться значно нижче у шкалі типономіналів та вимагають суттєво менших розмірів радіаторів охолодження.

1. *Липковский К.А.* Трансформаторно-ключевые исполнительные структуры преобразователей переменного напряжения. — Киев: Наук. думка, 1983. — 216 с.

2. *Липковский К.А., Халиков В.А., Можаровский А.Г.* Выбор электромагнитных элементов исполнительных структур дискретных стабилизаторов напряжения переменного тока // Техн. електродинаміка. — 2004. — №2. — С. 21—25.

3. *Липковский К.А., Можаровский А.Г., Халиков В.А.* Сравнение стабилизаторов напряжения дискретного действия по установленной мощности силовых трансформирующих элементов // Техн. електродинаміка. Тем. вип. "Проблеми сучасної електротехніки". — Ч.1. — 2004. — С. 125—127.

4. *Липковский К.А., Можаровский А.Г.* Особенности использования модернизированной мостовой структуры в исполнительном органе стабилизатора напряжения переменного тока // Техн. електродинаміка. Тем. вип. "Силова електроніка та енергоефективність". — Ч.2. — 2004. — С. 9—11.

5. *Липковский К.А., Халиков В.А., Можаровский А.Г.* Расчет установленной мощности трансформирующих элементов дискретных стабилизаторов напряжения переменного тока // Техн. електродинаміка. — 2004. — №1. — С. 30—35.

6. *Липковский К.А., Можаровский А.Г.* Исполнительные структуры стабилизаторов напряженя с двумя электромагнитными элементами // Техн. електродинаміка. — 2006. — №1. — С. 31—38.

Надійшла 11.07.2008

УДК 621.316.722.1

А.И.ЧИЖЕНКО, канд.техн.наук (Ин-т электродинамики НАН Украины, Киев), И.А.КУРИЛО, канд.техн.наук (Нац. техн. ун-т Украины "КПИ", Киев)

Управление вентильным регулятором переменного напряжения

Изложены результаты исследования режимов работы и алгоритмов управления вентильного преобразователя, предназначенного для плавного регулирования синусоидального напряжения в широком диапазоне и с малыми искажениями формы.

Викладено результати дослідження режимів роботи і алгоритмів керування вентильного перетворювача, призначеного для плавного регулювання синусоїдної напруги в широкому діапазоні і з малими спотвореннями форми.

Разработка и исследование эффективных устройств быстродействующего и плавного регулирования переменного напряжения промышленной частоты остается актуальной проблемой преобразовательной техники. Известны схемотехнические решения вентильных регуляторов переменного напряжения (РПН) на базе: трансформаторно-ключевых исполнительных структур [2]; вентильно-дроссельных систем, содержащих звенья со встречно-параллельным соединением тиристоров [5]; вентильных управляемых мостов, цепь постоянного тока которых содержит дроссель с неизменным или периодически изменяемым числом витков и индуктивностью, достаточной для практически

© Чиженко А.И., Курило И.А., 2008