

## ВПЛИВ ГІСТЕРЕЗИСУ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВХІД-ВИХІД ДИСКРЕТНОГО СТАБІЛІЗАТОРА НА ЙОГО ПАРАМЕТРИ

*Наведено результати досліджень впливу гістерезису в характеристиці вхід-вихід дискретного стабілізатора на його параметри для двох законів вибору коефіцієнтів передачі регулюючого органу.*

На якість електроенергії, зокрема на параметри напруги змінного струму, існують законодавчо встановлені норми, але, незважаючи на це, в деяких випадках величина напруги не задовольняє споживача, тому її необхідно підтримувати на навантаженні в заданих межах. Це реалізується за допомогою перетворювачів. Серед їх широкого різноманіття можна виділити такі, що побудовано на основі трансформаторно-ключових виконавчих структур (ТКВС), і які мають властивості, котрі сприяють їх широкому використанню: незначні втрати енергії, високу надійність, низьку вартість.

Один з видів перетворювачів, у яких застосовують такий виконавчий орган, – це дискретні стабілізатори величини напруги змінного струму. Напруга на вході перетворювача варіюється від мінімального значення  $U_{1\min}$  до максимального  $U_{1\max}$ , при цьому величина напруги на його виході не повинна виходити за межі  $U_{2\min}=U_{2\text{ном}}(1-\delta)$  та  $U_{2\max}=U_{2\text{ном}}(1+\delta)$ , де  $U_{2\text{ном}}$  – номінальне значення вихідної напруги, а  $\delta$  – її відносна похибка. Зону, в якій змінюються вхідні та вихідні напруги, названо в [1] полем стабілізації (ПС).

Часто немає потреби підтримувати прецизійну точність величини напруги. У цьому випадку достатньо застосовувати у перетворювачах ТКВС, що реалізують кінцеву множину коефіцієнтів передачі  $K_j$  виконавчого органу, загальна кількість яких складає  $J$  (в більшості випадків  $J$  не перевищує 16) й відповідає числу робочих станів.

При реалізації дискретного стабілізатора на такому принципі дуже важливе значення має те, як формується характеристика вхід-вихід, тобто закон вибору величини  $K_j$ , оскільки він визначає основні параметри всього пристрою. Зокрема, реальні границі ПС, тип ТКВС, що використовується, а звідси її топологію, кількість електромагнітних елементів та силових ключів, вимоги та алгоритм роботи системи керування. При цьому намагаються при мінімальному числі робочих станів ТКВС досягти максимального вхідного діапазону та мінімальної похибки. В [3] доведено: для того щоб виконати ці умови й сформуванню гранично можливої характеристики вхід-вихід ДС, яка не має розривів та перекриттів, а  $U_2$  не виходила за розрахункові значення  $U_{2p\min}$  та  $U_{2p\max}$ , необхідно вибрати  $K_j$  відповідно до закону геометричної прогресії:

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

де  $\gamma$  – постійний коефіцієнт, більший одиниці.

Графік цієї характеристики має пилкоподібний вид (жирна лінія на рис. 1). При певному значенні  $U_1$  виконавчий орган формує відповідний коефіцієнт передачі  $K_j$ , при якому  $U_{2p\min} \leq U_2 \leq U_{2p\max}$ . Якщо  $U_1$  змінюється й  $U_2$  виходить за допустимі межі, то переходимо на інший  $K_j$ , при якому  $U_2$  буде в допустимих межах. У точках переходу між суміжними коефіцієнтами передачі  $U_2$  змінюється за величиною з  $U_{2p\min}$  на  $U_{2p\max}$  або навпаки.

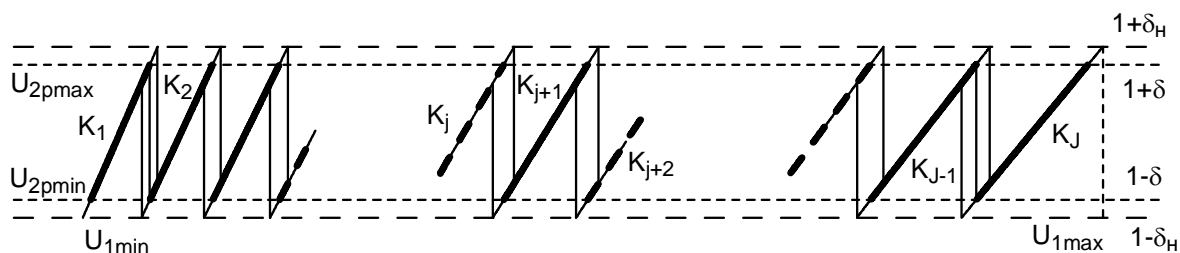


Рис. 1

В [2] показано, що при використанні на практиці в перетворювачі будь-якого закону вибору  $K_j$ , необхідно формувати його робочу характеристику вхід-вихід таким чином, щоб при переході між суміжними  $K_j$  в ній були перекриття, тобто в цих місцях вона мала гістерезис. Так, відомо, що в реальній живлячій мережі величина напруги незначною мірою завжди коливається. Це може відбуватись безсистемно. Якщо вхідна напруга буде такою, що вона співпаде з точкою переходу між суміжними коефіцієнтами передачі, то вихідна напруга буде в такі моменти змінюватись між граничними значеннями  $U_{2pmin}$  та  $U_{2pmax}$ . Оскільки таке звичайно відбувається протягом невизначеного проміжку часу, то це призводить до коливань напруги на виході перетворювача, що не може задовольняти споживача. Крім того, завжди існують певні технологічні обмеження, які не дозволяють абсолютно точно реалізувати розрахункову характеристику, а це може призвести до виникнення в ній розривів, що, в свою чергу, спричинить вихід напруги за межі ПС, тобто перетворювач не буде нормально функціонувати. Наявність гістерезису певної ширини повністю виключає ці фактори. При цьому матимемо інше розрахункове ПС. Проведемо дослідження впливу на параметри поля стабілізації введення гістерезису в характеристику вхід-вихід.

Нехай є гранична характеристика вхід-вихід ДС, коефіцієнти передачі  $K_j$  якого вибрано за законом (1) з числом станів  $J$ . ПС, яке ми отримуємо, має параметри  $U_{1min0}$ ,  $U_{1max0}$ ,  $U_{2min0}$ ,  $U_{2max0}$  й відповідно відносну похибку вихідної напруги  $\delta_0$ . При цьому, як показано в [2],  $\gamma = U_{2max0}/U_{2min0}$ . Аналіз зручніше проводити, використовуючи безрозмірні величини:  $g = U_{2max}/U_{2min}$ ,  $G = U_{1max}/U_{1min}$ . Тоді для даного ПС маємо  $g_0 = \gamma$  й  $G_0$ . Зазначимо, що параметр  $g$  практично лінійно залежить від похибки  $\delta$ .

Щоб у характеристиці виник гістерезис, достатньо взяти нову – більшу похибку вихідної напруги  $\delta_n > \delta_0$ , або  $g_n > \gamma$ . Отримаємо новий діапазон вхідних напруг, який можна оцінити з виразу  $G_n = g_n \cdot \gamma^{J-1}$  [1]. З нього видно, що, по-перше, вхідний діапазон пропорційно збільшиться, по-друге, його величина визначається параметрами розрахункової граничної характеристики. Зазначимо, що змінюються обидві межі діапазону: нижня – знижується, а верхня – підвищується. Абсолютні значення цих змін різні: для нижньої вона визначається величиною першого коефіцієнта передачі  $K_1$ , а для верхньої – останнього  $K_J$ , тобто зміна нижньої межі у  $\gamma^{J-1}$  менша за верхню.

Для подальшого розгляду пронормуємо абсолютні значення параметрів ПС за номінальною напругою  $U_{ном}$ , величину якої приймемо однаковою для вхідної та вихідної напруг. Для меж вхідного діапазону буде:  $\mu_0 = U_{1min0}/U_{ном}$ ,  $\rho_0 = U_{1max0}/U_{ном}$ , а вихідного –  $1 + \delta_0 = U_{2max0}/U_{ном}$ ,  $1 - \delta_0 = U_{2min0}/U_{ном}$ . Тоді  $K_1 = (1 - \delta_0)/\mu_0$ , а  $K_J = (1 + \delta_0)/\rho_0$ , й оскільки коефіцієнти передачі залишаються незмінними для  $\delta_n$ , то нові межі вхідного діапазону  $\mu_n = \mu_0 \frac{1 - \delta_n}{1 - \delta_0}$ ,  $\rho_n = \rho_0 \frac{1 + \delta_n}{1 + \delta_0}$ , а відповід-

ні "добавки" до кожної з них  $\Delta\mu = \mu_0 - \mu_n = \mu_0 \frac{\delta_n - \delta_0}{1 - \delta_0}$ ,  $\Delta\rho = \rho_n - \rho_0 = \rho_0 \frac{\delta_n - \delta_0}{1 + \delta_0}$ . З врахуванням вве-

дених позначень  $G_0 = \rho_0/\mu_0$ , а  $G_n = \rho_n/\mu_n$ , а їх співвідношення  $G_n = G_0 \frac{1 + \delta_n}{1 - \delta_n} \cdot \frac{1 - \delta_0}{1 + \delta_0}$ . Оскільки  $g$

$$= \frac{1 + \delta}{1 - \delta}, \text{ маємо } G_n = \frac{g_n}{g_0} G_0 = \frac{g_n}{\gamma} G_0.$$

З останнього виразу слідує, що новий діапазон пропорційний значенню  $g_n$ , й у скільки разів воно більше за  $\gamma$ , у стільки разів  $G_n$  більше за  $G_0$ .

При гістерезисі в характеристиці вхід-вихід важливо знати ширину петель. У роботі [1] показано, що для закону (1) петлі різні, а найвужча (визначальна) – перша:

$$\Delta U_{П1} = U_{1min} \left( g_n - \sqrt[J]{G_n/g_n} \right), \quad (2)$$

а величина будь-якої  $j$ -ї петлі

$$\Delta U_{Пj} = U_{1min} \gamma^{j-1} (g_n - \gamma) = \Delta U_{П1} \gamma^{j-1}. \quad (3)$$

З формул видно, що ширина петель лінійно залежить від  $g$ . Обчисливши їх значення, розробник оцінює, чи достатня вона для нормального функціонування пристрою.

Наявність гістерезису означає, що при деякій  $U_1$  існують два коефіцієнти передачі, при яких  $U_2$  не виходить за допустимі межі. Подальше збільшення похибки призводить до ще більшого розширення петель й настає момент, коли буде три коефіцієнти передачі, при яких  $U_2$  знаходиться в допустимих межах, тобто відбувається стикування петель. Це не означає, що характеристика не виконує своєї функції – реалізації необхідного поля стабілізації. У цьому випадку виникає надмірність станів характеристики, тобто мова йде про нераціональний закон вибору її коефіцієнтів передачі. Слід зазначити той факт, що стикуються одночасно всі петлі. Визначимо умови, за яких таке може трапитись.

Нехай на характеристиці вхід-вихід (рис. 1) при  $j$ -му коефіцієнті передачі  $K_j$  вихідна напруга  $U_2$  набуває значення  $U_{2\max}$  при  $U_{1j(U_{2\max})}$ , а при  $(j+2)$ -му коефіцієнті передачі  $K_{j+2}$  – значення  $U_{2\min}$  при  $U_{1(j+2)(U_{2\min})}$ . Петлі стикуються, коли  $U_{1j(U_{2\max})}=U_{1(j+2)(U_{2\min})}$  або

$$\frac{U_{2\max}}{K_j} = \frac{U_{2\min}}{K_{j+2}}. \quad (4)$$

Оскільки для закону (1)  $K_j=\gamma^2 K_{j+2}$ , то маємо  $\frac{U_{2\max}}{K_j} = \frac{U_{2\min}}{K_j} \gamma^2$ , звідки  $\frac{U_{2\max}}{U_{2\min}} = g = \gamma^2$ .

Тобто при виборі коефіцієнтів передачі вхід-вихід згідно з (1), значення параметра якого дорівнює  $\gamma$ , відношення меж вихідної напруги  $g$  не повинно перевищувати  $\gamma^2$ . Аналіз показує, що для значення параметра  $g$ , яке звичайно застосовують на практиці, це відповідає збільшенню його приблизно вдвічі у порівнянні з початковим.

Зазначимо, що при законі вибору коефіцієнтів передачі (1) й заданому числі станів  $J$  зміни ширини петель гістерезису можна досягти шляхом варіації похибки вихідної напруги при тих самих за величиною коефіцієнтах передачі  $K_j$ .

Наведемо конкретний приклад, що відбуватиметься з ПС при введенні в характеристику гістерезису. Нехай маємо граничну характеристику вхід-вихід, яка має 9 робочих станів й формує ПС з параметрами:  $U_{1\min 0}=145$  В,  $U_{1\max 0}=248,9$  В,  $U_{2\min 0}=213,4$  В,  $U_{2\max 0}=226,6$  В. При цьому  $\delta_0=3$  %,  $\gamma=1,062$ . Будемо збільшувати похибку  $\delta$  вихідної напруги. В табл. 1 представлено результати розрахунків нових параметрів ПС при різних  $\delta$ .

Таблиця 1

$\delta$ , %	$g$	$U_{1\min}$ , В	$U_{1\max}$ , В	$G$	$D$ , В	$\Delta U_{\text{Пл}}$ , В
3,0	1,062	145,0	248,9	1,716	103,9	0
3,5	1,072	144,3	250,0	1,732	105,7	1,45
4,0	1,084	143,5	251,3	1,752	107,9	3,19
4,5	1,094	142,8	252,4	1,768	109,7	4,64
5,0	1,105	142,0	253,8	1,787	111,8	6,38
5,5	1,116	141,3	254,8	1,804	113,5	7,83
6,0	1,128	140,5	256,1	1,823	115,6	9,57

Видно, що при збільшенні похибки до 6 % (до межі, коли петлі стикуються) вхідний діапазон  $D$  (передостання колонка) розширився на 11,8 В (11,3 %), нижня межа вхідної напруги знизилась на 4,5 В, а верхня підвищилась на 7,3 В. Вже при похибці 4 % ширина першої петлі складає 3,19 В, а останньої відповідно до (3) в  $\gamma^7$  разів більша – 4,86 В. Така ширина вже дозволяє нормально функціонувати пристрою.

З формули (4) видно, що ширина кожної наступної петлі більша за попередню в  $\gamma$  разів. У [1] запропоновано так званий модернізований закон вибору коефіцієнтів передачі, при якому всі петлі гістерезису мають однакову ширину:

$$K_j=K_1 \cdot \frac{g^J - g}{(g^J - G) + g^{j-1}(G - g)}. \quad (5)$$

Тут ширина кожної з петель має величину

$$\Delta U_{\text{ПМ}} = U_{1\text{min}} (g-1) \cdot \frac{g^J - G}{g^J - g}, \quad (6)$$

а співвідношення границь діапазонів визначається формулою

$$G = g^J - \frac{\Delta U_{\text{ПМ}}}{U_{1\text{min}}} \times \frac{g^J - g}{g - 1}.$$

Звернемо увагу на те, що при даному законі вибору коефіцієнтів передачі, зміна ширини петлі досягається шляхом варіації значень коефіцієнтів передачі  $K_j$ .

В цьому випадку також існують обмеження щодо ширини петлі. Як і для закону (1), петлі, якщо їх збільшувати, стикаються. Аналіз показує, що на відміну від попереднього закону, це спочатку відбудеться між першою та другою петлею, тобто умова (4) матиме вигляд  $gK_3 = K_1$ . Підставивши формулу для  $K_3$  в (5), отримаємо  $g = \frac{(g^J - G) + g^2(G - g)}{g^J - g}$ , звідки

після спрощення знаходимо величину мінімального відносного діапазону, при якому петлі стикаються:

$$G_{\text{min}} = \frac{g^J + g^2}{g + 1}.$$

Наведемо приклад, як змінюється ПС при наявності в характеристиці гістерезису для цього закону. Початкові значення параметрів візьмемо такі ж, як і в прикладі, що був раніше. В табл. 2 представлено результати розрахунків.

Таблиця 2

$\delta, \%$	$g$	$U_{1\text{min}}, \text{В}$	$U_{1\text{max}}, \text{В}$	$G$	$D, \text{В}$	$\Delta U_{\text{ПМ}}, \text{В}$
3,0	1,062	145,0	248,9	1,716	103,9	0
3,5	1,072	144,3	255,5	1,770	111,2	1,45
4,0	1,084	143,5	257,5	1,795	114,1	3,19
4,5	1,094	142,8	264,8	1,854	122,0	4,64
5,0	1,105	142,0	267,0	1,881	125,0	6,38
5,5	1,116	141,3	274,9	1,946	133,6	7,83
6,0	1,128	140,5	277,3	1,974	136,8	9,57

З таблиці видно, що при модернізованому законі вхідний діапазон ширший, ніж для закону (1) при тих же початкових даних. Так, при похибці 4 та 5 % різниця між ними складає відповідно 6,2 В (2,5 %) та 13,2 В (5,2 %). Тобто за рахунок іншого закону вибору коефіцієнтів передачі характеристики вхід-вихід отримано більший вхідний діапазон.

Порівняємо ці два закони з точки зору можливості реалізації певного вхідного діапазону. Для цього, використавши формули (2) та (6), виразимо параметр  $G$  при виборі  $K_j$  для першого закону  $G_r$  та другого  $G_m$ . Після перетворень маємо:

$$G_m = \left[ (g-1) \left( \frac{G_r}{g} \right)^{\frac{1}{J-1}} + g^2 - g^J \right] (g-1)^{-1}.$$

Аналіз формули показує, що співвідношення між діапазонами представляє собою досить непросту залежність. Порівняємо їх в обох варіантах для конкретних прикладів. На рис. 2 представлено, яку величину мають параметри  $G_r$  та  $G_m$  при ширини петлі  $\Delta U_{\text{ПМ}}$ , що збільшується від 0 до 4,5 В, при постійних значеннях  $U_{1\text{min}}=145$  В й  $g=1,06$  та різних  $J$  (9 та 11).

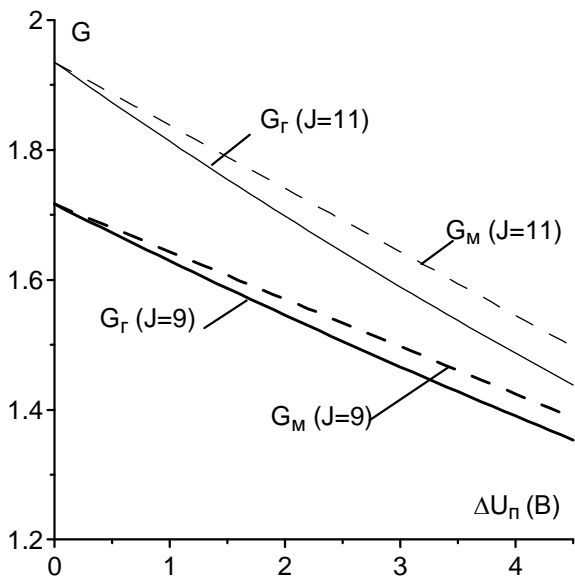


Рис. 2

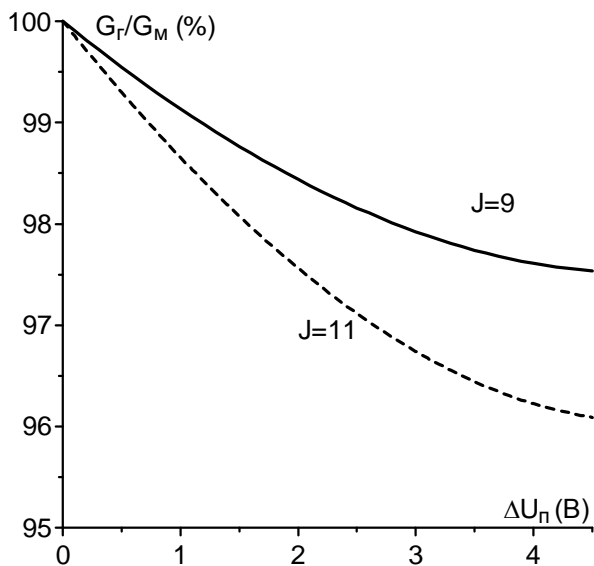


Рис. 3

З графіків видно, що вхідний діапазон при розширенні петлі для обох законів та різних  $J$  зменшується. Характер зміни параметра  $G$  для них подібний. У першому варіанті зміна для  $J=9$  й  $J=11$  сягає відповідно 31 та 37,2 %, й для другого – 26 та 30 %. Збільшення петлі зменшує різницю між  $G$  при різних  $J$ .

На рис. 3 зображено як співвідносяться між собою діапазони  $G_{Г}$  та  $G_{М}$  при тих же умовах, що й у попередньому прикладі.

Графіки наочно показують, що при зміні ширини петлі характер функції  $G_{Г}/G_{М}=f(\Delta U_{П})$  для різного числа станів подібний. У першому варіанті закону вхідний діапазон менший, а найбільша різниця між ними при  $\Delta U_{П}=4,5$  В для  $J=9$  та 11 становить відповідно 2,5 та 4 %, причому ріст  $J$  значно збільшує цю величину.

Дослідження параметрів ПС при інших початкових даних показали, що характер залежностей не змінюється, а іншими стають їх значення.

На рис. 3 зображено як співвідносяться між собою діапазони  $G_{Г}$  та  $G_{М}$  при тих же умовах, що й у попередньому прикладі.

Графіки наочно показують, що при зміні ширини петлі характер функції  $G_{Г}/G_{М}=f(\Delta U_{П})$  для різного числа станів подібний. У першому варіанті закону вхідний діапазон менший, а найбільша різниця між ними при  $\Delta U_{П}=4,5$  В для  $J=9$  та 11 становить відповідно 2,5 та 4 %, причому ріст  $J$  значно збільшує цю величину.

Дослідження параметрів ПС при інших початкових даних показали, що характер залежностей не змінюється, а іншими стають їх значення.

Таким чином, введення гістерезису в характеристику вхід-вихід дискретного стабілізатора або зменшує діапазон вхідних напруг у порівнянні з граничною характеристикою, або збільшує похибку вихідної напруги, що вимагає корекції характеристики шляхом збільшення числа робочих станів  $J$ . Запропонований модернізований закон вибору коефіцієнтів передачі з постійною шириною петлі гістерезису дозволяє збільшити вхідний робочий діапазон. Жоден з законів, що розглядалися, однозначно не кращий за інший: кожен з них має свої вади й переваги. При застосуванні одного з них на практиці слід враховувати фактори, які впливають на параметри та споживацькі властивості стабілізатора в цілому, зокрема, можливість виконувати свої функції, технологічність та складність реалізації виконавчого органу та системи керування.

*Приведены результаты исследований влияния гистерезиса в характеристике вход-выход дискретного стабилизатора на его параметры для двух законов выбора коэффициентов передачи регулирующего органа.*

*Results on the effect of hysteresis in the input-output characteristics of discrete stabilizer on its options for the two laws of selection coefficients of the transfer of regulatory authority.*

1. *Липковский К.А., Можаровский А.Г.* Модернизация закона выбора коэффициентов передачи трансформаторно-ключевой исполнительной структуры дискретного стабилизатора напряжения переменного тока // Техн. электродинамика: Темат. вып. "Силовая электроника та енергоефективність". – 2005. – Ч. 1. – С. 69–72.
2. *Липківський К.О., Можаровський А.Г., Халіков В.А.* Особливості побудови розрахункової характеристики дискретного стабілізатора напруги змінного струму // Техн. электродинамика. – 2003. – № 1. – С. 32–36.
3. *Липковский К.А.* Трансформаторно-ключевые исполнительные структуры преобразователей переменного напряжения.– К.: Наук. думка, 1983. – 216 с.

Надійшла 24.06.2010