

ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВХІД-ВИХІД ДИСКРЕТНОГО СТАБІЛІЗАТОРА НАПРУГИ З ВОЛЬТОДОДАВЧИМ ТРАНСФОРМАТОРОМ

А.Г. Можаровський, канд. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

Наведено результати досліджень законів вибору характеристики вхід-вихід дискретного стабілізатора змінної напруги, що містить трансформаторно-ключову виконавчу структуру з вольтододавчим трансформатором. Отримано вирази для визначення параметрів характеристики з однаковою шириною петель гістерезису на окремих інтервалах зміни вхідних напруг. Бібл. 2, рис. 2.

Ключові слова: дискретний стабілізатор змінної напруги, трансформаторно-ключова виконавча структура, характеристика вхід-вихід, петля гістерезису.

Працездатність і правильність функціонування електрообладнання суттєво залежать від якості електроенергії живлячої мережі. Встановлені норми параметрів електроенергії, зокрема, величини напруги змінного струму, навіть, коли вони виконуються, не завжди задовольняють користувачів. Тому не втрачає актуальності проблема розробки засобів, що підтримують цей параметр в необхідних межах.

Одними з них є так звані дискретні стабілізатори напруги змінного струму, що мають у своєму складі трансформаторно-ключові виконавчі структури (ТКВС), характеристика вхід-вихід яких формується з кінцевого числа нетотожних коефіцієнтів передачі K_j (де j – номер коефіцієнта, загальна кількість яких складає J), яка обмежена значеннями вхідної ($U_{1\min}, U_{1\max}$) та вихідної ($U_{2\min}, U_{2\max}$) напруг. Кожен з коефіцієнтів передачі дискретного стабілізатора реалізується при зміні конфігурації структури, яка здійснюється, коли силові ключі приєднуються до відповідних відводів трансформатора (трансформаторів). При цьому намагаються, щоб для заданого числа J характеристика мала найбільший діапазон зміни вхідної напруги U_1 та найменший вихідної напруги U_2 . На практиці необхідною умовою її використання є наявність при переході між суміжними K_j перекриття, тобто петлі гістерезису, ширина якої ΔU_{pi} . З урахуванням цього фактора в [1] запропоновано гранично можливий закон вибору коефіцієнтів передачі характеристики вхід-вихід, при якому всі петлі характеристики мають однакову ширину $\Delta U_{p1} = \Delta U_{p2} = \dots = \Delta U_{pi} = \Delta U_p$.

Серед стабілізаторів можна виділити ті, в яких використано принцип розділення потужностей на регульовану та нерегульовану, що дає змогу застосувати в структурі вольтододавчий трансформатор (ВДТ) та живлячий автотрансформатор (ЖАТ) і винести ключі з кола силового струму, в результаті чого більш ефективно використовуються електромагнітні елементи та досягається більш висока надійність пристрою в порівнянні зі структурами з ключами в колі силового струму. В [2] на прикладі типових структур цього класу показано, що для них реалізувати характеристику, у якій ширина петлі гістерезису однакова в усьому діапазоні зміни вхідної напруги, неможливо, а ширина петлі змінюється залежно від закону вибору коефіцієнтів передачі. При цьому залишалось недослідженим питання, як вибрати коефіцієнти передачі характеристики вхід-вихід, щоб зміна ширини петель гістерезису задовольняла споживача, тобто вона була б оптимальною за цим показником, і які параметри дискретних стабілізаторів реалізуються у пристроях цього класу.

Метою роботи є дослідження законів вибору коефіцієнтів передачі характеристики вхід-вихід дискретних стабілізаторів напруги змінного струму, що мають у своєму складі ТКВС з вольтододавчим трансформатором.

При дослідженні параметрів характеристики вхід-вихід для загального представлення будемо оперувати не їх абсолютними величинами, а відносними. Введемо показники, що визначають величину зміни діапазонів вхідної напруги $G = U_{1\max}/U_{1\min}$ та вихідної $g = U_{2\max}/U_{2\min}$,

та пронормуємо коефіцієнти передачі K_j за значенням першого коефіцієнта K_1 , а ширину петлі – за $U_{1\min}$ й позначимо $d = \Delta U_n / U_{1\min}$.

В [2] показано, що для реалізації характеристики вхід-вихід, у якої всі петлі гістерезису мають однакову ширину $d_n = \text{const}$ для $n = \overline{1, (J-1)}$, де n – номер петлі, коефіцієнти передачі необхідно вибрати за законом

$$K_j = 1 \text{ для } j=1; \quad K_j = \left[g^{j-1} - d \cdot \sum_{i=0}^{j-2} g^i \right]^{-1} \text{ для } j = \overline{2, J}. \quad (1)$$

Однією з особливостей проектування дискретного стабілізатора, де у регулюючому органі застосовані ТКВС такого типу, ВДТ працює в режимі вольтододавання (і на цьому інтервалі вхідного діапазону формується половина коефіцієнтів передачі K_j $j = \overline{1, (0,5J)}$) та вольтовіднімання (інша половина коефіцієнтів передачі K_j $j = \overline{(0,5J+1), J}$) і в обох режимах він приєднується до одних і тих самих відводів ЖАТ. Завдяки цьому забезпечуються максимально ефективно використання електромагнітних елементів та оптимальна конфігурація структури. Проте досягти в цьому випадку однаковості ширини петель гістерезису можливо лише в межах вказаних інтервалів, але на другому інтервалі, як показано в [2], петля ширша.

Між коефіцієнтами передачі кожного з режимів, як зазначалось у [2], існує зв'язок, який можна представити у вигляді виразу

$$K_{j+0,5J} = \frac{K_j}{1 + \alpha}, \quad j = \overline{1, (0,5J)}, \quad (2)$$

де $\alpha = W_2 / W_1$ – коефіцієнт трансформації ВДТ; W_2 – число витків вторинної і W_1 – первинної обмоток ВДТ. Тобто значення відповідних коефіцієнтів передачі пропорційні між собою. Розглянемо як впливає на поведінку характеристики вхід-вихід ця властивість.

Попередньо задаються початкові параметри характеристики вхід-вихід – величини J , g та d . У режимі вольтододавання ширина петель гістерезису $d_{(n)} = d$ ($n = \overline{1, (0,5J-1)}$), а значення коефіцієнтів передачі K_j ($j = \overline{1, (0,5J)}$) розраховуються з формули (1). Наступний $K_{0,5J+1}$, який формується, коли ВДТ знаходиться в режимі вольтовіднімання, – невідомий, його необхідно знайти, чого буде достатньо для визначення інших коефіцієнтів, оскільки, як зазначалось, в обох режимах вони відповідно пропорційні між собою. Під час аналізу задаємо ширину перехідної між режимами петлі гістерезису $d_{0,5J}$. У результаті необхідно визначити величину параметрів, які поки що залишаються невідомими: по-перше, коефіцієнти передачі K_j на другому інтервалі ($j = \overline{(0,5J+2), (J)}$), по-друге, ширина всіх інших петель гістерезису d_n ($n = \overline{(0,5J+1), (J-1)}$), по-третє, діапазон зміни вхідної напруги G .

Для наочності розглянемо графічне зображення фрагменту характеристики вхід-вихід (рис. 1), на якому показано відрізки променів, що відповідають окремим коефіцієнтам передачі виконавчого органу на інтервалі, коли ВДТ переходить з режиму вольтододавання ($K_{0,5J-1}$ і $K_{0,5J}$) у режим вольтовіднімання ($K_{0,5J+1}$ і $K_{0,5J+2}$). Крім того, для заданих нормованих по $U_{2\min}$ меж вихідної напруги (1 та g) на рисунку зображено ширину петель гістерезису.

Нехай ширина перехідної петлі гістерезису дорівнює $d_{0,5J}$ (заштрихована ділянка на рис. 1). Необхідно знайти $K_{0,5J+1}$. На рис. 1 відрізок променя, що відповідає коефіцієнту передачі $K_{0,5J}$, перетинає нормоване значення g вихідної напруги U_2 в точці "Б", абсциса якої $U_{1(B)}$ на графіку являє собою праву межу петлі $d_{0,5J}$. За означенням коефіцієнт передачі K_j – це коефіцієнт пропорційності між вхідною та вихідною напругами, тобто $U_2 = K_j \times U_1$, тому маємо $U_{1(B)} = U_{2(B)} / K_{0,5J}$. З формули (1)

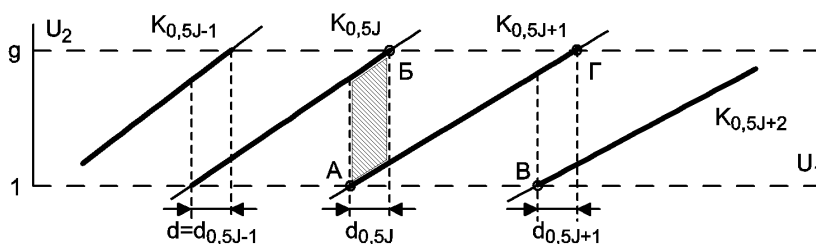


Рис. 1

розрахуємо $K_{0,5J} = \left[g^{0,5J-1} - d \times \sum_{i=0}^{0,5J-2} g^i \right]^{-1}$, а

оскільки $U_{2(B)}=g$, то $U_{1(B)}=g^{0,5J}-g \cdot d \times \sum_{i=0}^{0,5J-2} g^i$. На рис. 1 відрізок променя, що відповідає $K_{0,5J+1}$, перетинає нормоване значення 1 напруги U_2 , що є відповідно лівою межею петлі $d_{0,5J}$, в точці "А", абсциса якої $U_{1(A)}=U_{1(B)}-d_{0,5J}$, а оскільки $K_{0,5J+1}=1/U_{1(A)}$, то остаточно маємо

$$K_{0,5J+1} = \left[g^{0,5J} - d_{0,5J} - g \cdot d \times \sum_{i=0}^{0,5J-2} g^i \right]^{-1}. \quad (3)$$

Знаючи $K_{0,5J+1}$ і беручи до уваги те, що це перший коефіцієнт передачі в режимі вольтододавання і йому відповідає в режимі вольтовіднімання коефіцієнт K_1 , величина якого 1, то за умови (2) знаходимо

$$1+\alpha = g^{0,5J} - d_{0,5J} - g \cdot d \times \sum_{i=0}^{0,5J-2} g^i. \quad (4)$$

(До речі, суму у цих виразах за необхідності можна представити в іншому вигляді, оскільки це кінцевий степеневий ряд, то маємо $\sum_{i=0}^{0,5J-2} g^i = \frac{1-g^{0,5J-1}}{1-g}$).

Це коефіцієнт пропорційності між відповідними коефіцієнтами передачі у режимах вольтододавання та вольтовіднімання ВДТ характеристики вхід-вихід регулюючого органу дискретного стабілізатора змінної напруги.

Оскільки коефіцієнти передачі K_j ($j=\overline{1, (0,5J)}$) відомі, то з врахуванням умови (2) визначаємо значення інших коефіцієнтів K_j ($j=\overline{(0,5J+2), (J)}$). Крім того, в роботі [2] показано, що ширина всіх наступних петель дорівнює

$$d_n = d(1+\alpha), \quad n=\overline{(0,5J+1), (J-1)}. \quad (5)$$

З цього виразу можна зробити висновок, що в порівнянні з заданою початковою шириною петлі гістерезису в режимі вольтододавання петлі мають завжди більшу ширину.

Розрахувавши $K_{0,5J}$ і застосувавши вираз (2), знаходимо останній коефіцієнт передачі $K_J=K_{0,5J}/(1+\alpha)$ та визначаємо реальну ширину діапазону вхідної напруги:

$$G = \frac{g}{K_J}. \quad (6)$$

Маємо всі вирази, щоб розрахувати параметри характеристики вхід-вихід при зміні ширини початкової петлі гістерезису d , для якої, між іншим, існують певні обмеження. По-перше, за мінімальним значенням – це 0, тобто її відсутність при переході між суміжними коефіцієнтами, і тоді характеристика перетвориться в гранично можливу, а її коефіцієнти передачі визначатимуться виразом $K_j=g^{1-j}$ ($j=\overline{1, J}$). По-друге, за її максимальним значенням, яке визначається умовою, коли коефіцієнт передачі K_2 співпадає з K_1 , тобто, коли $d=g$.

Зазначимо, що обмежено також границі зміни перехідної петлі $d_{0,5J}$. Нижня, що очевидно, – це 0, а верхня визначається умовою, коли коефіцієнт передачі $K_{0,5J+1}$ співпадає з $K_{0,5J}$,

тобто, коли коефіцієнт $K_{0,5J}$ буде рівний g , і тоді матимемо $K_{0,5J} = \left[g^{0,5J-1} - d \times \sum_{i=0}^{0,5J-2} g^i \right]^{-1} = g$, звід-

ки максимально можлива ширина перехідної петлі $d_{0,5J} = g^{0,5J} \times \left[g \times \sum_{i=0}^{0,5J-2} g^i \right]$.

Розглянемо випадки вибору характеристики вхід-вихід з певними властивостями.

Нехай характеристика має таку властивість: перехідна петля $d_{0,5J(1)}$ дорівнює попередній $d_{0,5J(1)}=d_{0,5J-1}$, тобто $d_n=\text{const}$ для $n=\overline{1, (0,5J)}$ – це перший інтервал. Тоді безпосередньо з

виразу (1) для $j=0,5J+1$ знаходимо $K_{0,5J+1(1)} = \left[g^{0,5J+1} - d \sum_{i=0}^{0,5J} g^i \right]^{-1}$ та $(1+\alpha)_{(1)} = g^{0,5J} - d \cdot \sum_{i=0}^{0,5J+1} g^i$. Відповідно до виразу (5) на другому інтервалі петлі характеристики теж однакові між собою:

$d_{(m)}=d \times (1+\alpha)_{(1)}$ для $m=(0,5J+1), (J-1)$. Таким чином, вирази для характеристики, що має таку властивість, дещо простіші в порівнянні з загальними.

Аналіз отриманих виразів показує, що для попередньої оцінки поведінки деяких параметрів характеристики достатньо визначити їх залежність від коефіцієнта $1+\alpha$. Візьмемо конкретний приклад, для якого $J=18$; $g=1,12$; $d=0,1$.

Зауваження. Для практичного використання не часто застосовують показник $g=U_{2\max}/U_{2\min}$, який більш доречний при аналізі, а звичайно в ужитку інший показник – похибка вихідної напруги $\delta(\%)=(U_2-U_{2\text{ном}})/U_{2\text{ном}}$, де U_2 – поточне, а $U_{2\text{ном}}$ – номінальне значення вихідної напруги. Ці показники пов'язані між собою виразом $g=\frac{1+\delta}{1-\delta}$, і чисельно зміні $\delta=1\dots 10$ (%) відповідає $g=1,02\dots 1,22$, яка у вказаному діапазоні майже лінійна. У прикладі $g=1,12$ або в іншому вигляді $\delta=5,66$ %.

Розглянемо як залежать ширини перехідної петлі $d_{0,5j}$ та петель в режимі вольтовіднімання d_j для $j=(0,5J+1), (J-1)$ при зміні $1+\alpha$ від 1,2 до 1,4. Результати розрахунків представлено на рис. 2, де на графіку залежності від згадуваного коефіцієнта неперервною лінією показано ширину петлі $d_{0,5j}$, а пунктирною – петель d_j .

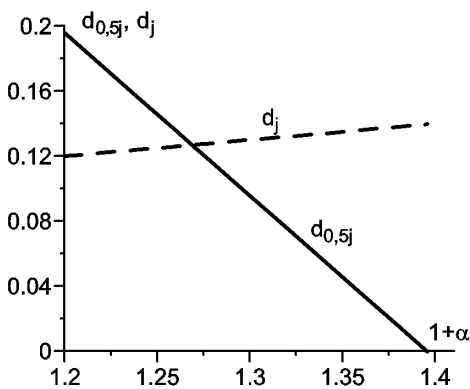


Рис. 2

З рисунка видно, що при зростанні коефіцієнта $1+\alpha$ відповідного пропорційного збільшення зазнають ширина петлі d_j , що є ілюстрацією виразу (5), а ширина петлі $d_{0,5j}$ при цьому з суттєво більшою крутизною зменшується і при деякому значенні стає рівною 0 – вона зникає. Це ілюструє твердження про те, що є обмеження на можливу зміну ширини петлі. На рисунку також спостерігається наявність характерної точки перетину цих двох графіків. Це означає, що при деякому значенні $1+\alpha$ петлі рівні між собою. Тобто в цьому випадку характеристика вже має іншу властивість ширини петель, яка відрізняється від наведеної вище. Змінилися інтервали їх рівності: перший $j=1, (0,5J-1)$, а другий $j=(0,5J+1), (J-1)$.

Розглянемо як для будь-яких заданих початкових параметрів характеристики вхід-вихід знайти коефіцієнт $1+\alpha$, щоб характеристика мала цю властивість, або, дещо в іншому вигляді, щоб виконувалась умова $d_{0,5j}=d_{0,5j+1}$.

З рис. 1 видно, що $d_{0,5j}=U_{1(A)}-U_{1(B)}$, а $d_{0,5j+1}=U_{1(B)}-U_{1(\Gamma)}$. Значення абсцис знаходяться з виразів $U_{1(A)}=1/K_{0,5j+1}$; $U_{1(B)}=g/K_{0,5j}$; $U_{1(B)}=1/K_{0,5j+2}$; $U_{1(\Gamma)}=g/K_{0,5j+1}$. Якщо взяти до уваги початкові параметри характеристики, матимемо $K_1=1$, а $K_2=1/(g-d)$. Врахувавши зв'язок між коефіцієнтами (2), отримаємо $K_{0,5j+1}=K_1(1+\alpha)^{-1}=(1+\alpha)^{-1}$; $K_{0,5j+2}=K_2(1+\alpha)^{-1}=(g-d)^{-1} \times (1+\alpha)^{-1}$ та з формули (1) – $K_{0,5j}=\left[g^{0,5j-1} - d \times \sum_{i=0}^{0,5j-2} g^i \right]^{-1}$. У результаті $d_{0,5j}=(1+\alpha)-g \cdot \left[g^{0,5j-1} - d \times \sum_{i=0}^{0,5j-2} g^i \right]$ та $d_{0,5j+1}=(g-d) \times (1+\alpha) - g(1+\alpha)$. Прирівнявши останні вирази, отримаємо $1+\alpha=g \cdot \left[g^{0,5j-1} - d \times \sum_{i=0}^{0,5j-2} g^i \right] (1+d)^{-1}$. При такому значенні коефіцієнта $1+\alpha$ петлі d_j в діапазоні $j=(0,5J+1), (J-1)$ однакові.

Висновки. У результаті проведених досліджень отримано вирази для розрахунку параметрів характеристики вхід-вихід регулюючого органу дискретного стабілізатора змінної напруги, що має в своєму складі ТКВС з вольтододавчим трансформатором. Особливістю такого органу є те, що відповідні коефіцієнти передачі в режимі вольтододавання та вольтовіднімання характеристики пропорційні між собою у кожному з піддіапазонів вхідних напруг. Доведено, що від величини цього співвідношення залежать всі параметри характерис-

тики. Отримані вирази дають змогу побудувати характеристику, у якій ширина петель гістерезису характеристики однакова на вказаних піддіапазонах.

Отримані результати дають змогу розробити методику визначення конфігурації структури такого класу та розрахувати виткові співвідношення електромагнітних елементів. Вирішення цього завдання потребує окремих досліджень.

1. Липковский К.А., Можаровский А.Г. Модернизация закона выбора коэффициентов передачи трансформаторно-ключевой исполнительной структуры дискретного стабилизатора напряжения переменного тока // Техн. електродинаміка. Темат. вип. "Силовая електроніка та енергоефективність". – 2005. – Ч. 1. – С. 69–72.
2. Халіков В.А., Можаровський А.Г. Реалізація характеристики вхід-вихід дискретного стабілізатора змінної напруги на основі трансформаторно-ключової виконавчої структури // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАН України. – 2012. – Вип. 31. – С. 106–111.

УДК 621.314.214

А.Г. Можаровский, канд. техн. наук

Институт электродинамики НАН Украины,

пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина

Исследование характеристики вход-выход дискретного стабилизатора напряжения с вольтодобавочным трансформатором

Приведены результаты исследований законов выбора характеристики вход-выход дискретного стабилизатора переменного напряжения, содержащего трансформаторно-ключевую исполнительную структуру с вольтодобавочным трансформатором. Получены выражения для определения параметров характеристики с одинаковой шириной петель гистерезиса на отдельных интервалах изменения входных напряжений. Библ. 2, рис. 2.

Ключевые слова: дискретный стабилизатор переменного напряжения, трансформаторно-ключевая исполнительная структура, характеристика вход-выход, петля гистерезиса.

A.G. Mozharovskyi

Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,

Peremogy, 56, Kyiv-57, Ukraine

The research characteristics of the discrete input-output voltage regulator with a booster transformer

The results of research of selecting the input-output characteristics of a discrete variable voltage regulator comprising a transformer switching executive structure with a booster transformer.

The expressions for the parameters of performance with the same width of the hysteresis loops at selected intervals of the input voltage. References 2, figures 2.

Key words: discrete alternating current voltage stabilizer, transformer switching executive structure, input-output characteristic, hysteresis loop.

Надійшла 5.06.2013

Received 5.06.2013