

ОСОБЛИВОСТІ РЕГУЛЮВАННЯ РІВНЯ НАПРУГИ, ЩО СТАБІЛІЗУЄТЬСЯ, ЗА ДОПОМОГОЮ ПЕРЕТВОРЮВАЧА З ТРАНСФОРМАТОРНО-КЛЮЧОВОЮ ВИКОНАВЧОЮ СТРУКТУРОЮ

К.О.Липківський, докт.техн.наук,
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна.

Проблему побудови перетворювача напруги, який міг би одночасно виконувати два види перетворення (цілеспрямовану зміну рівня напруги та стабілізацію її на цьому рівні) доцільно вирішувати за допомогою трансформаторно-ключових виконавчих структур. У роботі досліджено граничні (ідеалізовані) та практично досяжні характеристики вхід-вихід таких перетворювачів. Доведено, що в них, незважаючи на дискретно-разовий характер дії, можлива плавна уставка рівня напруги, що стабілізується. Показано, що в разі необхідності стабілізація на кожному рівні може відбуватися у своєму діапазоні, який є значно ширшим за нормований для всіх рівнів загалом. Бібл. 4, рис. 1.

Ключові слова: перетворення параметрів електроенергії, регулятор/стабілізатор напруги змінного струму, трансформаторно-ключова виконавча структура.

Вступ. Значна частина споживачів електричної енергії (ЕЕ), що живляться від стандартної низьковольтної розподільної мережі, вимагає для ефективного виконання свого призначення певного функціонального перетворення напруги змінного струму. Єдиним шляхом реалізації перетворення параметрів ЕЕ, зокрема напруги, без зміни її якості (тобто без генерування вищих гармонік у мережу живлення та навантаження) є використання трансформаторно-ключових виконавчих структур (ТКВС). Вони складаються з трансформуючих елементів (ТЕ) та комутатора (К) на напівпровідникових ключових елементах (КЕ) (тиристорів, симісторів), які комутують відпайки зазначених ТЕ за сигналами відповідної системи керування і тим самим забезпечують необхідне перетворення напруги [3]. Під цим терміном розуміємо обидва його види – регулювання, тобто цілеспрямовану зміну вихідної напруги при незмінній вхідній, та стабілізацію, тобто підтримання з певною припустимою похибкою вихідної напруги на номінальному рівні при відхиленнях вхідної напруги та дії інших дестабілізуючих факторів. У [1] розглянуто дуальність цих видів і доведено, що для перетворювачів з ТКВС вона прослідковується не тільки на етапах формування завдання та вибору способу керування, а й на етапі синтезу схемотехнічного рішення. Визначено, що комутатор необхідно встановлювати у тому колі, де відбувається найбільша зміна напруги, тобто при стабілізації – на вході перетворювача, а при регулюванні – на його виході.

Проте, на практиці може виникнути необхідність реалізації і "комбінованого" виду перетворення – регулювання рівня напруги, що стабілізується, або – що те ж саме – стабілізації напруги на декількох рівнях.

У [3] в цьому випадку пропонувалися прості рішення – використання або двох окремих блоків перетворення, кожний з яких виконує своє функціональне призначення, або єдиного ТЕ з двома комутаторами, один з яких (що має J_1 коефіцієнтів передачі) забезпечує зміну рівня напруги (причому кількість можливих рівнів N дорівнює J_1), а другий (що має J_2 коефіцієнтів передачі) – її стабілізацію на певному рівні (причому, коефіцієнт стабілізації приблизно дорівнює J_2). Це рішення не вбачається прийнятним, бо загальна кількість необхідних станів ТКВС $J = J_1 \times J_2$ є надто великою, що вимагає використання значної кількості КЕ. До того ж, як видно, рівні напруги жорстко визначаються відповідними співвідношеннями регулювальних обвиток ТЕ і не можуть варіюватися.

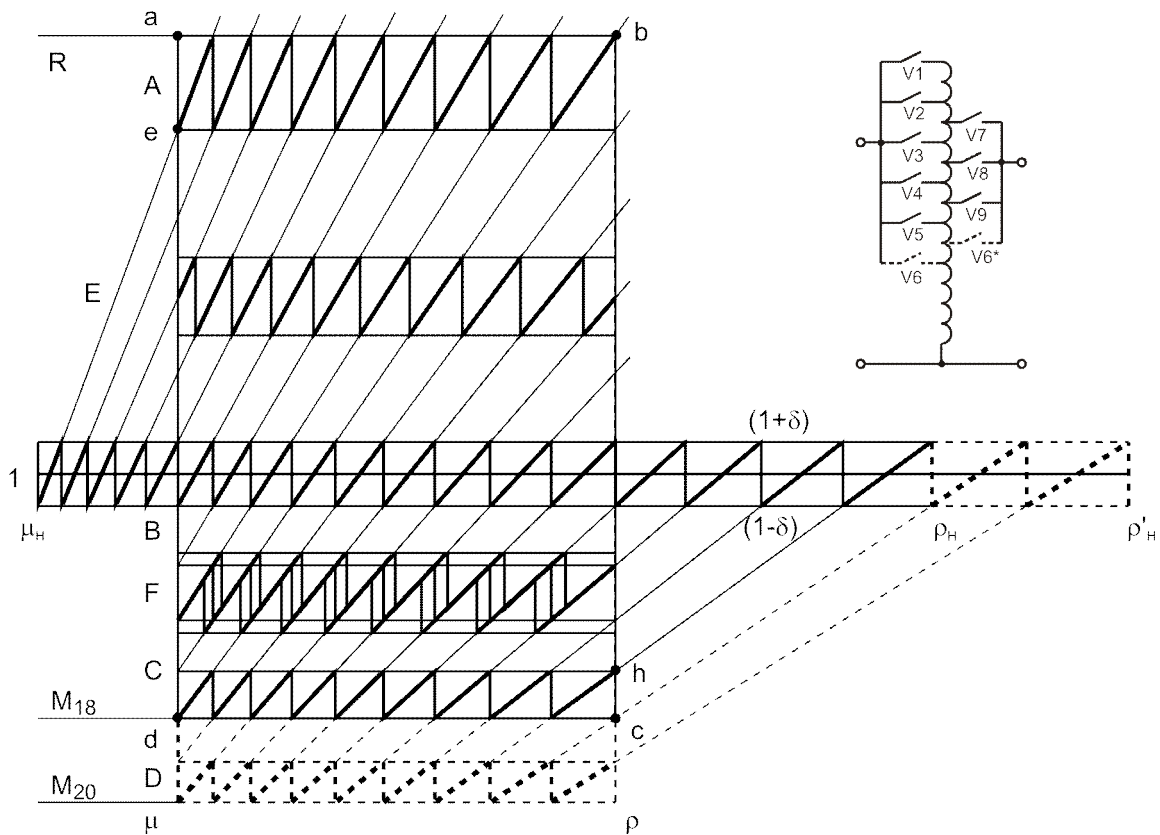
Згодом у [4] було доведено можливість і доцільність об'єднання обох функцій у одній ТКВС, де всі коефіцієнти передачі за напругою $K = U_2/U_1$ формуються з єдиної множини K_j ($j = \overline{1, J}$), члени якої вибрані за законом геометричної прогресії $K_j = K_1 \gamma^{1-j}$, де $K_1 = K_{\max}$ ($K_j = K_{\min} = K_{\max} \gamma^{1-j}$), а γ – чисельний коефіцієнт, сутність якого буде пояснена пізніше.

Проте особливості такого рішення проблеми докладно досліджено не було.

Метою цієї роботи є аналіз особливостей реалізації та додаткових властивостей двофункціональних перетворювачів напруги змінного струму на основі єдиної трансформаторно-ключової виконавчої структури.

Поле перетворення двофункціональної ТКВС. Зазначене функціональне перетворення напруги за вибраним законом зміни коефіцієнтів передачі орієнтоване на те, що стабілізація на кожному n -му рівні ($n = \overline{1, N}$) повинна відбуватися з однаковою відносною похибкою, тобто $\delta_n = U_{2n\max}/U_{2n\min} = \delta = \text{const}$. (Це обмеження не є вадою, бо варіант підтримання на кожному рівні однакової абсолютної похибки $\Delta_n = U_{2n\max} - U_{2n\min} = \Delta = \text{const}$ взагалі не є прийнятним, бо на нижчих рівнях стабілізація буде надто "грубою", а на вищих – не виправдано "точною").

Вхідними даними для розрахунку ТКВС, крім похибки стабілізації δ , є граничні напруги: можливі мінімальна та максимальна напруги живлення – $U_{1\min}$ і $U_{1\max}$ відповідно (або при нормуванні їх за U_H для зручності запису – $\mu = U_{1\min}/U_H$ і $\rho = U_{1\max}/U_H$) та необхідні мінімальна і максимальна вихідна напруга $U_{2\min}$ і $U_{2\max}$ (або $M = U_{2\min}/U_H$ і $R = U_{2\max}/U_H$). Ці граничні напруги на графіку $U_2 = f(U_1)$ обмежують прямокутник $abcd$, який можна умовно назвати "полем перетворення" (ПП), тобто полем, у межах якого при будь-якій вхідній напрузі U_{1j} гарантовано можна забезпечити отримання на виході будь-якої необхідної напруги U_{2j} з похибкою $\pm\delta$. Останню можна визначити через введений раніше параметр $\gamma = U_{2n\max}/U_{2n\min}$ таким чином: $\delta = (\gamma - 1) / (\gamma + 1)$ і, навпаки, $\gamma = (1 + \delta) / (1 - \delta)$.



На рисунку показано "поле перетворення" для випадку, коли ТКВС має ТЕ з 6 відпайками (і, відповідно, 6 КЕ) на вході та 3 відпайками (і, відповідно, 3КЕ) на виході, що забезпечує одержання $J = 6 \times 3 = 18$ нетотожних станів системи, тобто 18 коефіцієнтів передачі за напругою, які вибрані за згадуваним законом геометричної прогресії. (Ще раз наголосимо, що тут немає поділу КЕ за виконанням "свого" виду перетворення – кожний з КЕ бере участь як у регулюванні рівня, так і у стабілізації напруги).

ПП "складається" таким чином, що всі рівні, які названо базовими (їхня кількість дорівнює N), попарно межують між собою, тобто найменша та найбільша можливі напруги n -го рівня співпадають, відповідно, з найбільшою та найменшою напругою $(n+1)$ -го рівня та найменшою можливою на-

пругою (n-1)-го рівня: $U_{2nmin}=U_{2(n+1)max}$ та $U_{2nmax}=U_{2(n-1)min}$. Найбільша напруга на першому рівні є верхньою межею ПП, а найменша напруга n-го рівня – нижньою межею ПП. Найбільший, номінальний та найнижчий базові рівні позначено на рисунку літерами А, С, Е відповідно.

Як видно, максимальний коефіцієнт передачі ТКВС визначається точкою *e*, напруга в якій у γ разів менша за R ($K_1=K_{max}=R/\gamma\mu$), а мінімальний коефіцієнт передачі – точкою *h*, напруга у якій у γ разів більша за M ($K_J=K_{min}=M/\gamma\rho$), причому $K_1/K_J=\gamma^{J-1}$, тобто $R\rho/M\mu\gamma^2=\gamma^{J-1}$, звідки $\gamma=\sqrt[J+1]{R\rho/M\mu}$.

У даному конкретному випадку межі ПП обрано такими: $\rho=1,2$ ($U_{1max}=264$ В), $\mu=0,6$ ($U_{1min}=132$ В), $R=1,5264$ ($U_{2max}=335,8$ В), $M=0,7067$ ($U_{2min}=155,5$ В), тобто $\gamma=1,08006$, $\delta=0,03849$.

Зауважимо, що цей варіант побудови ТКВС (6КЕ на вході та 3КЕ на виході) не є оптимальним за ефективністю використання ключових елементів. Його наведено на початку для того, щоб показати – вірний вибір розташування КЕ є принципово важливим. Дійсно, якщо перенести ключ V6 з вхідного кола ТКВС до вихідного (див. рис.), то досяжна кількість коефіцієнтів передачі зростає з 18 до 20 ($J=5\times 4$). При цьому можливі різні варіанти використання такого збільшення параметра J.

По-перше, можна до вже існуючої множини коефіцієнтів передачі додати ще два. На рисунку, наприклад, – це найменші коефіцієнти $K_{19}=K_{18}/\gamma$ та $K_{20}=K_{18}/\gamma^2$, які зменшують нижню межу ПП у γ^2 разів, тобто тепер $M'=M/\gamma^2=0,8572M=0,6058$. Новий найнижчий рівень ПП позначено літерою F. По-друге, можна, в разі необхідності, додати два найбільші коефіцієнти ($K_{19}=K_1\gamma$, $K_{20}=K_1\gamma^2$), тобто отримати нову верхню межу ПП: $R'=R\gamma^2=R\cdot 1,1665R=1,7806$, або одночасно змістити і нижню, і верхню межі ПП, додаючи $K_{19}=K_{18}/\gamma$ та $K_{20}=K_1\gamma$. А можна, не змінюючи R та M, відповідно "рознести" ρ та μ , тобто розширити діапазон зміни вхідної напруги, у якому відбувається її стабілізація. Нарешті, можна залишити без змін ПП, але зменшити похибку стабілізації з 3,849% до 3,482%, тобто приблизно у 1,1 рази.

Для ілюстрації задекларованої вище можливості плавної уставки рівня стабілізації на рисунку виокремлено довільний рівень напруги, що стабілізується, позначений літерою В. На ньому гарантується та ж сама похибка стабілізації δ , і він відрізняється від базових рівнів А, С, Е та F тільки тим, що перемикання ключових елементів відбувається при інших значеннях вхідної напруги.

Неодноразово, наприклад, у [2] наголошувалося, що граничні характеристики вхід-вихід (зокрема А, В, С, D, Е) є ідеалізованими. Для надійної роботи перетворювача обов'язково необхідно "рознести" точки перемикання з коефіцієнту K_n на коефіцієнт $K_{(n+1)}$ таким чином, щоб утворилася певна "петля гістерезису", як показано для випадку рівня регулювання, позначеного літерою F. (При цьому розраховані для ідеалізованого варіанту множина коефіцієнтів передачі та виткові співвідношення регульованих секцій ТЕ залишаються тими ж самими). Це, звісно, призводить з одного боку, до певного збільшення похибки стабілізації (до $\sim 4\div 4,2\%$), що треба враховувати при проектуванні ТКВС, а з другого – до деякого розширення меж ПП. Хоча збільшення площі ПП є незначним (одиниці відсотків), наявність цього позитивного фактору не можна не відзначити.

Принципові можливості суттєвого розширення поля перетворення. Як впливає з визначення поняття "поля перетворення" та рисунку, можна у межах прямокутника *abcd* гарантувати стабілізацію напруги на будь-якому рівні при відхиленнях вхідної напруги у межах μ – ρ . Проте, на кожному конкретному рівні припустимий діапазон зміни U_1 є значно ширшим. Для прикладу на рисунку наведено "повний" діапазон стабілізації на номінальному рівні вихідної напруги. Очевидно, що тут $\mu_n=(1-\delta)/K_{max}=\mu\gamma(1-\delta)/R$, а $\rho_n=(1+\delta)/K_{min}=\rho(1+\delta)/\gamma M$, тобто діапазон стабілізації $G_{cn}=\rho_n/\mu_n=G_cG_p$, де $G_c=\rho/\mu$ – гарантований діапазон стабілізації для всіх рівнів, а G_p – відношення номінальних значень напруги найвищого та найнижчого рівнів. Кількісно те ж саме буде для всіх рівнів ПП, тобто $G_{cn}=G_{cn}=G_cG_p$. Зауважимо, що для нижчих рівнів розширення діапазону стабілізації відбувається переважно за рахунок зменшення μ – нижньої межі зміни вхідної напруги, причому, це не потребує ніяких змін у трансформуючому елементі ТКВС. Для вищих рівнів збільшується ρ , але це означає збільшення максимальної напруги, що прикладається до ТЕ, і воно повинно враховуватися відповідним збільшенням витків ТЕ, тобто його масогабаритних показників.

Висновки. Для статичного перетворювача параметрів електроенергії, що призначений для стабілізації напруги на кількох рівнях, найбільш доцільним рішенням є використання ТКВС, розрахованої на реалізацію множини коефіцієнтів передачі, що пов'язані між собою законом геометричної прогресії. Це дозволяє при дискретно-разовому характері формування керуючого сигналу забезпечити плавну уставку потрібного рівня стабілізації. Таке рішення відрізняється також принциповою можливістю розширення зони стабілізації на кожному конкретному рівні.

1. Липківський К.О. Дуальність побудови трансформаторно-ключових виконавчих структур дискретних стабілізаторів та регуляторів напруги змінного струму // Техн. електродинаміка. – 2010. – №6. – С. 16–23.
2. Липковский К.А. Влияние параметров питающей сети на рабочую характеристику исполнительного органа дискретного стабилизатора напряжения переменного тока // Техн. електродинаміка. Тематичний випуск "Проблеми сучасної електротехніки". – 2006. – Ч.5. – С. 74–76.
3. Липковский К.А. Трансформаторно-ключевые исполнительные структуры преобразователей переменного напряжения. – Киев: Наукова думка, 1983. – 216 с.
4. Липковский К.А., Лялько О.В., Бирук Б.Д., Уваров Д.Б. Плавное регулирование выходного напряжения в дискретных стабилизаторах на основе ТКИС / Проблемы преобразовательной техники, ч.4. – ИЭД АН УССР, Киев, 1987. – С. 133–135.

УДК.621.314.214

Особенности регулирования уровня стабилизируемого напряжения при помощи преобразователя с трансформаторно-ключевой исполнительной структурой

К.А.Липковский, докт.техн.наук,
Институт электродинамики НАН Украины, Киев,
пр. Победы, Киев-57, 03680, Украина.

Проблему построения преобразователя напряжения, который мог бы одновременно выполнять два вида преобразования (целенаправленное изменение уровня напряжения и стабилизации ее на этом уровне) целесообразно решать с помощью трансформаторно-ключевых исполнительных структур. В работе исследованы предельные (идеализированные) и практически достижимые характеристики вход-выход таких преобразователей. Доказано, что в них, несмотря на дискретно-разовый характер действия, возможна плавная уставка уровня стабилизируемого напряжения. Показано, что в случае необходимости стабилизация на каждом уровне может происходить в своем диапазоне, который значительно шире нормированного для всех уровней в целом. Библ. 4, рис. 1.

Ключевые слова: преобразование параметров электроэнергии, регулятор/стабилизатор напряжения переменного тока, трансформаторно-ключевая исполнительная структура.

Features of regulation of stabilized voltage level by means of converter with transformer-and-switches executive structure

К.О.Лypkivskyi,
Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,
Peremogy pr., 56, Kyiv-57, 036890, Ukraine.

The problem of voltage changer design that will maintain two types of transformation simultaneously (purposeful change of the voltage level and its stabilization at this level) is reasonable to solve by means of transformer-and-switches executive structures. The overall (idealized) and practically reachable Input-Output characteristics of such changers are examined in the research paper. It was proved that in spite of discretely-one manner, a smooth setpoint of stabilized voltage level is possible. It was shown that in case of need the stabilization at each level may happen over its range that is much wider than normalized range for all the levels in whole. References 4, figure 1.

Key words: transformation of electricity parameters, alternating voltage regulator/stabilizer, transformer-and-switches executive structure.

1. Lypkivskyi K.O. Duality of Transformer-and-Switches Executive Structures of Alternating Current Voltage Stabilizers and Regulators // Tekhnichna elektrodynamika. – 2010. – №6. – P. 16–23. (Ukr)
2. Lipkovskii K.A. Influence of parameters of supply main on the performance of the executive body of Alternating Voltage Discrete Stabilizer // Tekhnichna elektrodynamika. Tematychnyi vypusk "Problemy suchasnoi elektrotekhniki". – 2006. – Vol.5. – P. 74–76. (Rus)
3. Lipkovskii K.O. Transformer-and-Switches Executive Structures of Alternating Current Voltage Converters. – Kiev: Naukova Dumka, 1983. – 216 p. (Rus)
4. Lipkovskii K.O., Lialko O.V., Biruk B.D., Uvarov D.B. Smooth Regulation of the Output Voltage in the Discrete Stabilizers based on TSES / Problemy preobrazovatelnoi tekhniki, part 4. – IED of AS of USSR, Kiev, 1987. – Pp. 133–135. (Rus)

Received 20.07.2011
 Надійшла 20.07.2011