

інші навантаження окрім опору підшипників. Враховано дію реактивних моментів, що діють на привод основного (робочого) ротора, характер яких відповідає в'язкому тертю і моменту пружності. Бібл. 2, рис. 4, таблиця.

Ключові слова: активна компенсація, електромагнітний момент, система керування.

O. Antonov, K. Akynin, V. Kyreyev, A. Filomenko

Institute of electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Peremohy, 56, Kyiv-57, 03057, Ukraine

COMPENSATION OF THE REACTIVE TORQUE IN ELECTRIC DRIVE OF A RETURN-ROTARY MOTION

The control system of a two-rotor motor of reciprocating rotational motion which compensates for the reactive moments during the operation of hand tools with electric drive, is developed and investigated. The system of compensation in which only are load bearing are consider. The action of reactive moments acting on the drive of the main (working) rotor, the character of which corresponds to viscous friction and moment of elasticity, is taken into account. References 2, figures 4, table.

Key words: active compensation, electromagnetic moment, control system.

1. Antonov A.E., Filomenko A.A. Active compensation of reactive moments in electric machines of a magnetoelectric type. *Pratcy Instytutu elektrodynamiky NAN Ukrainy*. 2014. Вуп. 39. С. 20–24. (Rus).

2. Voronin S.G., Kurnosov D.A., Kulmukhametova A.S. Vector control of synchronous motors with excitation from permanent magnets. *Elektrotehnika*. 2013. № 10. С. 50–54. (Rus).

Надійшла 02.08.2018

Received 02.08.2018

УДК 621.314

ОСОБЛИВОСТІ КОМПЛЕКСУВАННЯ СЕКЦІЙ ОБВИТКИ ТРАНСФОРМУЮЧОГО ЕЛЕМЕНТА ТРАНСФОРМАТОРНО-КЛЮЧОВОЇ ВИКОНАВЧОЇ СТРУКТУРИ ПЕРЕТВОРЮВАЧА ЗМІННОЇ НАПРУГИ

К.О. Липківський*, докт. техн. наук, **А.Г. Мажаровський****, канд. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03057, Україна
e-mail: lypkivskyk@ukr.net, AnatMozhrvsk@ukr.net

Трансформаторно-ключова виконавча структура реалізує перетворення напруги змінного струму за рахунок дискретно-разової (discrete time) зміни коефіцієнтів передачі за напругою шляхом зміни кількості витків обвитки трансформуючого елемента. Основними критеріями якості ТКВС зазвичай обирається ефективність використання трансформуючого та ключових елементів. Показано доцільність врахування й інших критеріїв якості пристрою, зокрема кількості одночасно працюючих ключових елементів, яка визначає сукупні втрати енергії в цих елементах, необхідні параметри радіаторів для відведення тепла від напівпровідникових ключових елементів. Бібл. 12, рис. 3.

Ключові слова: трансформаторно-ключова виконавча структура, перетворювач змінної напруги, discrete time, discrete smart transformer, секція обвитки, ефективність використання.

Виконавчі структури перетворювачів напруги змінного струму, у яких реалізується дискретно-разове (discrete time) [1] регулювання коефіцієнта передачі трансформуючого елемента (ТЕ), широко використовуються у системах електроживлення споживачів, які для оптимального функціонування потребують певного узгодження (adjusting) з конкретними умовами електропостачання [2]. Такі, за нашим визначенням, трансформаторно-ключові виконавчі структури (ТКВС) [3] (у технічній літературі вони мають різноманітні назви, зокрема, discrete smart transformer [4]) апіорі характеризуються багатоваріантністю принципів побудови та виконання.

Один з найбільш розповсюджених типів ТКВС базується на основі виокремлення базової секції $W_{\text{баз}}$ та низки регульовальних секцій обвитки (обвиток) трансформуючого елеме-

нта, які у разі комплексування з N ключовими елементами (КЕ) утворюють послідовно з'єднані регулювальні блоки (РБ). За необхідності регулювання коефіцієнта передачі перетворювача змінної напруги на основі ТКВС шляхом зміни кількості витків обвитки ТЕ тільки в одному напрямку (збільшення або зменшення без реверсування регулювальних секцій), прийнятними є кілька варіантів формування регулювальних блоків. У найпростішому випадку кожен РБ складається з однієї секції обвитки ТЕ та двох КЕ: одного – для введення цієї секції у коло струму, другого – для створення обвідного шляху (bypass). Для виконання своїх функцій за умови лінійної зміни кількості витків обвитки ТЕ за максимально ефективного використання ключових елементів необхідно комплексування декількох РБ цього типу – позначимо їх РБ2. У цьому разі кількість витків секції i -го РБ2 визначається залежністю $W_i = W_1 \cdot 2^{i-1}$, де W_1 – мінімальний крок зміни кількості витків, а кількість можливих нетотожних коефіцієнтів передачі за напругою ТКВС – залежністю $J_2 = 2^{N/2}$. Саме такі РБ2 завдяки простоті та наочності побудови та розрахунку часто використовуються розробниками.

Більша ефективність використання ключових елементів, яку можна оцінити за допомогою коефіцієнта ефективності використання ключових елементів $\xi = J/N$, притаманна структурам, що мають три КЕ та дві однакові секції обвитки – $W_i = W_1 \cdot 3^{i-1}$, що було доведено, зокрема, у [5, 6]. Дійсно, для цієї структури $J_3 = 3^{N/3} = J_2 \times 1,0198^N > J_2$. У [6] було також вказано на тотожність за ефективністю використання КЕ структур, що складаються з регулювальних блоків з двома та чотирма КЕ, у яких i -й РБ має три однакові секції обвитки з кількістю витків $W_i = W_1 \cdot 4^{i-1}$, у цьому разі $J_4 = 4^{N/4} = 2^{N/2} = J_2$. Подальше збільшення кількості КЕ у одному РБ не має сенсу, оскільки, наприклад, при $N=10$ маємо $J_{10} = 5 \times 5 = 25 \ll 36 = 3 \times 3 \times 4$. Також обґрунтовано можливість, а інколи й доцільність комплексування в одній виконавчій структурі різних регулювальних блоків, причому вони можуть розміщуватись як у первинному, так і вторинному колі трансформуючого елемента [5, 7].

Коефіцієнт ефективності використання ключових елементів ξ визначає, по суті, за якої мінімальної кількості КЕ виконавча структура може реалізувати задане функціональне перетворення у заданому діапазоні напруги із заданою точністю. Втім він, як і ефективність використання встановленої потужності трансформуючого елемента (це питання досліджувалось в інших роботах, зокрема в [8], і тут не розглядається) є важливим, але не єдиним коефіцієнтом якості ТКВС. Є й інші показники, що характеризують структуру в складі перетворювача напруги й які можуть стати визначальними у певних випадках, але вони залишалися поза увагою розробників.

Метою роботи є розширення кола показників якості трансформаторно-ключової виконавчої структури, пов'язаних з роботою ключових елементів, визначення структур зі зменшеними сумарними втратами енергії у напівпровідникових ключових елементах, меншою потужністю живлення системи керування КЕ та спрощенням її реалізації.

Аналіз ТКВС, трансформуючі елементи яких виконано з секціонуванням обвиток, показав, що схемні рішення, що мають однакову кількість ключових елементів та однакову ефективність їхнього використання (J/N), можуть бути нетотожними за таким показником, як кількість ключових елементів n , що працюють одночасно. Саме він визначає сумарні втрати енергії у ключових елементах, які можуть бути достатньо вагомими у разі використання значної кількості КЕ (зазвичай $N \geq 6 \dots 12$, зокрема у [9] $N=16$). Величина цих втрат позначається як на коефіцієнті корисної дії всього пристрою, так, і це головне, на параметрах радіаторів для відведення тепла, що виділяється під час роботи КЕ.

Розглянемо з цих позицій ТКВС з регулювальними блоками, що мають по два КЕ (РБ2) або по чотири КЕ (РБ4). Секціоновані обвитки трансформуючих елементів цих структур зображено на рис. 1 та 2 відповідно.

Оскільки незалежно від кількості ключових елементів у РБ, у кожному з них у будь-який момент може бути відкритим лише один ключ, кількість ключів, що одночасно працюють, дорівнює кількості регулювальних блоків. Так, у відомій структурі [10] з РБ2 (рис. 1 а) $n_2 = N/2$, а у запропонованій у [6] структурі з РБ4 $n_4 = N/4 = 0,5n_2$, тобто остання вдвічі економніша за структуру з РБ2 і потребує розсіювання вдвічі меншої кількості тепла. (Для згадуваної вище ТКВС з РБ3, яка оптимальна за ефективністю використання ключових елементів,

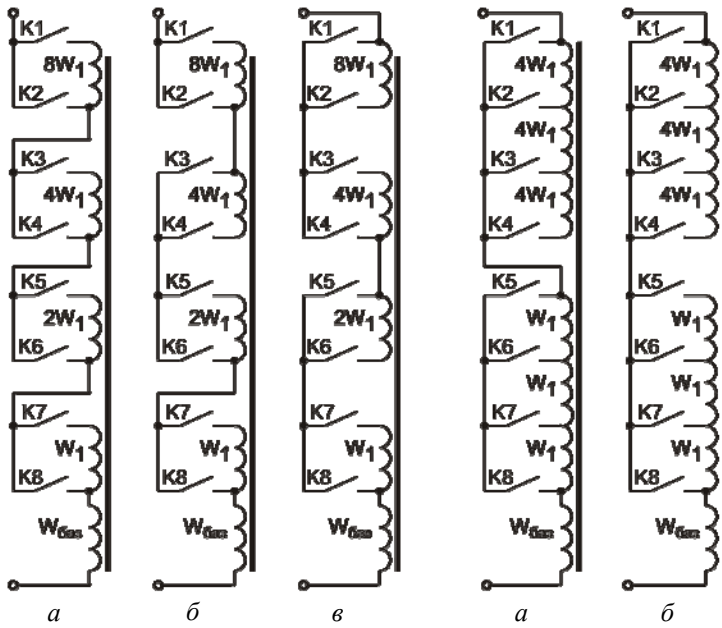


Рис. 1

Рис. 2

Використання цієї ідеї для структури з РБ4 (рис. 2 а) дає значно більші переваги – всі КЕ можна розмістити на єдиному радіаторі (рис. 2 б), розрахованому на відведення тепла лише від двох ключів, що працюють одночасно. Крім того, у структурі з РБ4 вдвічі менша кількість сигналів керування ключами, що генерує система керування (СК). Тобто потрібна вдвічі менша потужність для живлення СК та, як наслідок, спростуються вимоги до елементної бази, що використовується. Крім того, у разі конструювання немає потреби виконувати вимогу щодо електроізоляції між окремими радіаторами і забезпечувати гальванічний розв'язок між ними, що суттєво спрощує практичне виготовлення перетворювача. Все це ще раз підкреслює доцільність використання чотири-, а не двоключових РБ.

Зазначимо, що введений показник n у певних випадках може стати визначальним у разі вибору варіанта комплексування регулювальних блоків. Наприклад, за необхідності реалізації у ТКВС 15 нетотожних коефіцієнтів передачі за напругою можна обмежитися 10 ключовими елементами та використати або варіант з двома РБ3 і одним РБ2 (при цьому $J=3 \times 3 \times 2=18 > 15$), для якого $n=3$, або варіант з двома РБ4 (при цьому $J=4 \times 4=16 > 15$), для якого $n=2$. Логічним, певна річ, буде вибір другого варіанта з суттєво (у 1,5 разу) меншими втратами енергії у КЕ, хоча він дещо (у 1,1 разу) поступається першому варіанту ефективністю використання ключових елементів.

Можливість зменшення кількості КЕ, що працюють одночасно, прослідковується й у інших типах ТКВС, трансформуючий елемент яких має секціоновану обвитку. Зокрема, у тих, що дають змогу як збільшувати, так і зменшувати загальну кількість витків обвитки відносно певного початкового значення шляхом реверсування регулювальних секцій.

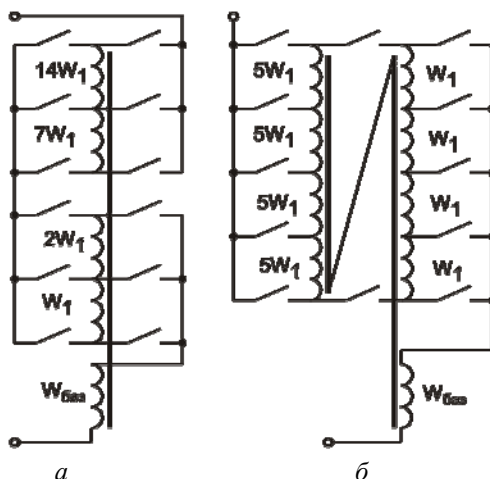


Рис. 3

маємо $n_3=N/3=0,66 n_2$).

Необхідно звернути увагу ще на один схемотехнічний момент – однакові регулювальні блоки можуть мати різну топологію з'єднань між собою. Наприклад, на рис. 1 б наведено схемне рішення [9], у якому ключі другого та третього РБ мають єдину спільну точку, а дві інші спільні точки мають ключі першого та третього РБ. Логічним продовженням у цьому напрямку може бути організація двох спільних точок (шин) для першого та другого РБ, також для третього та четвертого РБ (рис. 1 в) і відповідно двох радіаторів з метою певного спрощення встановлення та керування КЕ.

Для прикладу розглянемо структуру, в якій i -й регулювальний блок складається з двох різних секцій ($W_1 \cdot 7^{i-1}$ та $W_1 \cdot 2 \cdot 7^{i-1}$) та шести ключових елементів, що створюють своєрідну мостову структуру та реалізують як пряме, так і реверсивне під'єднання або однієї з секцій, або обох секцій разом [6, 11]. ТКВС з двома такими РБ (рис. 3 а) дає змогу отримати 49 станів роботи (49 нетотожних коефіцієнтів передачі за напругою), тобто має коефіцієнт ефективності використання КЕ на рівні чотирьох ($K=49/12=4,08$). Такий саме показник має і запропонований у [12] так званий комбінований регулювальний блок з чотирма секціями обвитки W_1 та чотирма секціями $4W_1$ (рис. 3 б), проте одночасно у ньому працюють лише три КЕ, що

в 1,33 разу менше, ніж у попередній структурі, відповідно менші й втрати енергії у напівпровідникових ключах.

Наведені приклади свідчать, що у разі створення ТКВС, які априорі відзначаються багатоваріантністю схемотехнічних та алгоритмічних рішень, необхідне врахування (з можливим попереднім ранжуванням залежно від сформульованих вимог) усіх критеріїв якості пристрою, що впливають на його енергетичні та масогабаритні показники та спрощення конструювання.

Висновки. У разі вибору варіанта трансформаторно-ключової виконавчої структури перетворювача напруги змінного струму, трансформуючий елемент якого має секціоновану обмотку, необхідно, орієнтуючись у першу чергу на досягнення максимальної ефективності використання трансформуючих і ключових елементів, брати до уваги й інші показники якості пристрою, які можуть у конкретних випадках стати визначальними.

1. Bimal, K Bose. Power Electronics – Why the Field is so Exciting. *IEEE Power Electronics Society Newsletter Fourth Quarter*. 2007. V. 19. № 4. P. 11–20.
2. Liu Zhiyong. Voltage deviation adjustor. Patent CN103178527B. 2015.07.01.
3. Липковский К.А. Трансформаторно-ключевые исполнительные структуры преобразователей переменного напряжения. Киев: Наук. думка, 1983. 216 с.
4. Willems W., Vandoorn T.L., De Kooning, J. D., Vandeveld L., Development of a smart transformer to control the power exchange of a microgrid. 4th International Conf. "Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe" (ISGT - Europe 2013). IEEE, 6-9 Oct. 2013, At Lyngby, Denmark. P. 1–5.
5. Липковский К.А, Тонкаль В.Е., Озерянский А.А. Устройство для регулирования переменного напряжения. А.с. СССР №413468. 30.01.1974.
6. Липковский К.А. Способы секционирования трансформаторно-ключевых исполнительных структур дискретных регуляторов напряжения. Киев: Ин-т электродинамики АН Украины, 1984. 16 с. (Препринт/АН Украины, Ин-т электродинамики; № 394).
7. Robert C. Degeneff, Friedrich K. Schaeffer; Robert H. Frazer, David A. Torrey, Osman Demirci. Tap changing system having discrete cycle modulation and fault rotation for coupling to an inductive device. US Patent 5604423. Feb. 18. 1997.
8. Липківський К.О., Можаровський А.Г. Вплив особливостей регулювання рівня напруги, що стабілізується, на потужність трансформуючого елемента перетворювача напруги змінного струму. *Технічна електродинаміка*. 2017. № 3. С. 35–41.
9. Allan David Crane, Warren Mark Blewitt. Power converters. Patent US 2015/0295498A1. Oct. 15, 2015.
10. William O. Kramer, Alireza Daneshpooy. Static voltage regulator and controller. US Patent 6351106B1. Feb. 26, 2002.
11. Robert C. Degeneff, Steven Raedy. Regulator with asymmetrical voltage increase/decrease capability for utility system. US Patent 5990667. Nov. 23, 1999.
12. Липковский К.А. Топологические преобразования трансформаторно-ключевых исполнительных структур дискретных регуляторов напряжения. Киев: Ин-т электродинамики АН Украины, 1985. 20 с. (Препринт/АН Украины, Ин-т электродинамики; № 564).

УДК 621.314

К.А. Липковский, докт. техн. наук, **А.Г. Можаровский**, канд. техн. наук
Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03057, Украина

ОСОБЕННОСТИ КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ СЕКЦИЙ ОБМОТКИ ТРАНСФОРМИРУЮЩЕГО ЭЛЕМЕНТА ТРАНСФОРМАТОРНО-КЛЮЧЕВОЙ ИСПОЛНИТЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПЕРЕМЕННОГО НАПЯЖЕНИЯ

Трансформаторно-ключевая исполнительная структура реализует преобразование напряжения переменного тока за счет дискретно-разового (discrete time) изменения коэффициентов передачи по напряжению путем изменения количества витков обмотки трансформирующего элемента. Основными критериями качества ТКВС обычно выбирается эффективность использования трансформирующего и ключевых элементов. Показана целесообразность учета и других критериев качества устройства, в частности количества одновременно работающих ключевых элементов, которая определяет совокупные потери энергии в этих элементах, необходимые параметры радиаторов для отвода тепла от полупроводниковых ключевых элементов. Библ. 12, рис. 3.

Ключевые слова: трансформаторно-ключевая исполнительная структура, преобразователь переменного напряжения, discrete time, discrete smart transformer, секция обмотки, эффективность использования.

К.О. Lypkivskyi, A.G. Mozharovskyi

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,

Peremohy, 56, Kyiv-57, 03057, Ukraine

FEATURES OF THE INTEGRATION OF SECTIONS OF THE TURNS OF THE TRANSFORMING ELEMENT OF THE TRANSFORMER-AND-SWITCHES EXECUTIVE STRUCTURE OF THE AC VOLTAGE CONVERTER

The transformer-and-switches executive structure implements the transformation of an AC voltage by changing the voltage transmission coefficients by changing the number of turns of the transformation element. The main criterion of the quality of the transformer-and-switches executive structure is the efficiency of the use of transforming and switch elements. It is shown the expediency of taking into account other criteria of the quality of the device, including the number of simultaneously operating switch elements. This number determines the total energy losses in these elements and the necessary parameters of heatsink for the heat rejection from semiconductor switch elements. References 12, figures 3.

Key words: transformer-and-switches executive structure, AC voltage converter, discrete time, discrete smart transformer, winding section, efficiency of use.

1. Bimal, K Bose. Power Electronics – Why the Field is so Exciting. *IEEE Power Electronics Society Newsletter Fourth Quarter*. 2007. V. 19. № 4. P. 11–20.
2. Liu Zhiyong. Voltage deviation adjustor. Patent CN103178527B. 2015.07.01.
3. Lypkivskiy K.O. Transformer-and-switches executive structures of alternating current voltage converters. Kyiv: Naukova Dumka, 1983. 216 p. (Rus).
4. Willems W., Vandoorn T.L., De Kooning, J. D., Vandeveld L., Development of a smart transformer to control the power exchange of a microgrid. 4th International Conf. "Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe" (ISGT - Europe 2013), IEEE, 6-9 Oct. 2013, At Lyngby, Denmark. P. 1–5.
5. Lypkivskiy K.O., Tonkal V.E., Ozerianskiy A.O. Device for regulation of alternating voltage. Patent USSR No. 413468. 30.01.1974. (Rus)
6. Lypkivskiy K.O. Methods of sectioning of transformer-and-switches executive structures of discrete voltage regulators. Preprint-394. Kyiv. 1984. 16 p. (Rus).
7. Robert C. Degeneff, Friedrich K. Schaeffer; Robert H. Frazer, David A. Torrey, Osman Demirci. Tap changing system having discrete cycle modulation and fault rotation for coupling to an inductive device. US Patent 5604423. Feb. 18. 1997.
8. Lypkivskiy K.O., Mozharovskiy A.G. Effect of the features of the level control of the stabilized voltage on the power of the transforming element of the AC voltage converter. *Tekhnichna Electrodynamika*. 2017. No. 3. P. 35–41. (Ukr).
9. Allan David Crane, Warren Mark Blewitt. Power converters. Patent US 2015/0295498A1. Oct. 15, 2015.
10. William O. Kramer, Alireza Daneshpooy. Static voltage regulator and controller. US Patent 6351106B1. Feb. 26, 2002.
11. Robert C. Degeneff, Steven Raedy. Regulator with asymmetrical voltage increase/decrease capability for utility system. US Patent 5990667. Nov. 23, 1999.
12. Lypkivskiy K.O. Topological transformations of transformer-and-switches executive structures of discrete voltage regulators. Preprint-564. Kyiv. 1988. 20 p. (Rus).

Надійшла 27.08.2018

Received 27.08.2018

УДК 621.3:539.3

ИМПУЛЬСНЫЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ СИЛЫ В МНОГОВИТКОВОМ ТОРЦЕВОМ ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ ИНДУКТОРЕ

А.П. Ращепкин*, докт. техн. наук

Институт электродинамики НАН Украины,

пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина

e-mail: anatoly_raschepkin@ukr.net

В процессах электро- и магнитопластической деформаций металлов обоснован метод ослабления импульсных электродинамических сил взаимодействия между обрабатываемым металлом и многовитковым торцевым цилиндрическим индуктором путем использования электропроводного металлического экрана. Полное устранение электродинамических усилий достигается регулированием зазора между индуктором и экраном. Однополярные импульсы тока в индукторе возбуждаются путем разряда электрической емкости на индуктор с использованием управляемого тиристора. Электромагнитные процессы в такой электродинамической системе рассмотрены с использованием известных, разработанных в теоретической электротехнике, методов анализа разрядных процессов конденсатора на активно-индуктивную нагрузку, а также численных методов конечных элементов расчетов. Библ. 7, рис. 6.

© Ращепкин А.П., 2018

* ORCID ID : <https://orcid.org/0000-0002-3308-8032>