

**О. Ю. Колларов (канд. техн. наук, доц.),**  
ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»

**І.В. Придятько (ст. викл.),**  
ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»

**А. І. Пупченко,**  
ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»

**В. А. Єрмишев**  
ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»

## **БЕЗТРАНСФОРМАТОРНЕ ПЕРЕТВОРЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ**

*Анотація:* Стаття присвячена дослідженню моделі без трансформаторного перетворювача параметрів електроенергії у додатку для математичного пакету MATLAB Simulink. Показано, що можливо трансформування змінної напруги, підсумовуючи послідовні в часі порції енергії з необхідними коефіцієнтами трансформації та пульсації вихідної напруги.

**Ключові слова:** перетворення параметрів електроенергії, безтрансформаторний перетворювач, дискретне перетворення.

Предметом дослідження є пристрої, що перетворюють електричний струм чи напругу за допомогою напівпровідникових ключів, індуктивності та ємності.

Актуальність її зумовлена можливістю знизити матеріаломісткість перетворювачів та підвищити їх надійність.

**Мета статті** – представити залежність вихідних величин (струму та напруги) від часових параметрів дискретного перетворювача.

**Викладення основного матеріалу дослідження.** В указаних пристроях перетворення проходить дискретно, імпульсами струму та напруги. Сутність дискретного перетворювання енергії полягає в тому, що кожна наступна порція енергії, що надходить від джерела, запасається в електричному чи магнітному полі та передається в накопичувач, що виступає вихідним елементом перетворювача, таким чином, вихідна величина є сума порцій енергії в часі.

Дискретний спосіб перетворення використовується в пристроях, що називаються безтрансформаторними перетворювачами [1, с.480-495]. Як правило, вони використовуються в якості джерел вторинного живлення. Поява потужних силових ключів дозволила використати дискретне перетворення у силових електропередачах, наприклад [2].

Безтрансформаторне перетворення дозволяє усунути магнітопровід та міжвиткову ізоляцію, які є невід’ємними елементами традиційних трансформаторів, знижуючи матеріаломісткість та підвищуючи надійність пристрою.

Пристрій включає джерело живлення  $E$ , опір  $R_{\text{и}}$ , ключі  $K_1$  і  $K_2$ , які поперемінно з’єднують індуктивність  $L_{\text{д}}$  з джерелом живлення  $E$  та електричним конденсатором  $C_{\text{н}}$ , в електричному полі якого накопичується енергія, порціями, що надходить від індуктивності  $L_{\text{д}}$ , навантаження  $R_{\text{н}}$ , в якому електрична енергія конденсатора перетворюється в інший вид.

Пристрій працює наступним чином. Ключем  $K_1$  індуктивність  $L_{\text{д}}$  з’єднується з джерелом живлення  $E$ . Поки ключ  $K_1$  замкнутий, у магнітному полі індуктивності накопичується енергія. Потім розмикається  $K_1$ , одночасно замикається  $K_2$ , енергія магнітного поля індуктивності  $L_{\text{д}}$  перетворюється в енергію електричного поля конденсатора  $C$ . Ці операції повторюються періодично, так що у конденсаторі накопичується енергія, що використовується навантаженням  $R_{\text{н}}$ .

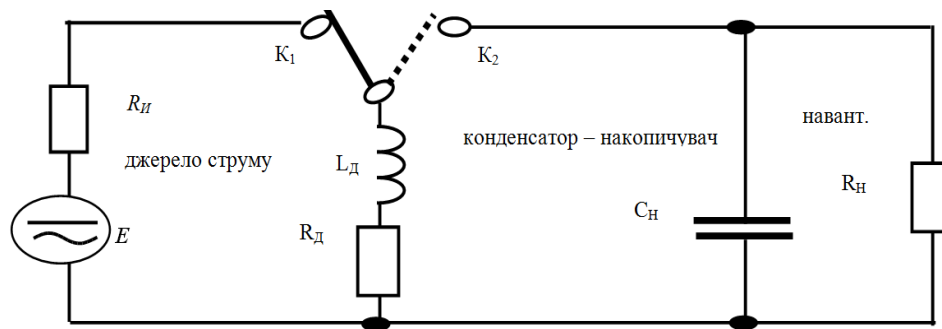


Рисунок 1 – Схема безтрансформаторного перетворювача

Напруга на конденсаторі залежить від його ємності, кількості енергії в ньому та в загальному випадку відрізняється від напруги джерела живлення. В цьому і полягає сутність перетворення.

Напруга на конденсаторі  $C$  зростає, доки кількість енергії, використаної в навантаженні  $R_H$  за період, стане дорівнювати кількості енергії, доданої за період в конденсатор від індуктивності. Ця додана порція енергії визначається наступними рівняннями:

$$W_{Lд} = \frac{L_{д} I_{д}^2}{2}, \quad (1)$$

$$I_{д} \cong \frac{E}{L_{д}} t_1, \quad (2)$$

отже,

$$W_{Lд} \cong \frac{E^2 t_1^2}{2L_{д}}. \quad (3)$$

Тут позначені  $W_{Lд}$  – енергія, накопичена в індуктивності за період (за час замкнутого стану ключа  $K_1$ );  $L_{д}$  – індуктивність;  $I_{д}$  – струм в індуктивності;  $E$  – ЕРС джерела живлення;  $t_1$  – тривалість замкнутого стану ключа  $K_1$ .

Кількість енергії в конденсаторі при підключенні до нього індуктивності ключем  $K_2$ .

$$\Delta W_C = \frac{C}{2} (u_K^2 - u_H^2) = C U_{CP} \Delta u, \quad (4)$$

де  $u_H$  і  $u_K$  – напруга на конденсаторі в моменти замикання і розмикання ключа  $K_2$ .

Кількість енергії, що передано в навантаження  $R_H$  за один період роботи ключей,

$$\Delta W_H = \frac{U_{CP}^2}{R_H} T \quad (5)$$

де  $U_{CP}$  – середня за період напруга на конденсаторі,  $T$  – період роботи ключей,  $R_H$  – опір навантаження.

в першому приближенні приймається, що вся енергія, накопичена в індуктивності за час замкнутого стану  $K_1$ , перейшла у ємність (незначні втрати при комутації  $K_1$  та на опорі  $R_{д}$ ), так що  $W_{Lд} = \Delta W_C$ . тоді з рівнянь (3) і (5) витікає:

$$\frac{E^2 t_1^2}{2L_{д}} = C U_{CP} \Delta u. \quad (6)$$

В сталому режимі, коли  $U_{CP} = \text{const}$ ,  $\Delta W_C = \Delta W_H$ , із співвідношень (4) и (5)

$$\Delta u = \frac{U_{CP}}{CR_H} T. \quad (7)$$

З рівнянь (6) і (7) витікає

$$U_{CP} = Et_1 \sqrt{\frac{R_H}{2L_D T}}, \quad (8)$$

Коефіцієнт перетворення напруги

$$K_U = \frac{U_{CP}}{E} = t_1 \sqrt{\frac{R_H}{2L_D T}}. \quad (9)$$

Напруга на конденсаторі і, відповідно, на навантаженні, має пульсаціїю з тих самих рівнянь (6) і (7)

$$\Delta u = \frac{Et_1}{C} \sqrt{\frac{T}{2R_H L_D}}. \quad (10)$$

Коефіцієнт пульсацій

$$k_{\Pi} = \frac{\Delta u}{2U_{CP}} = \frac{T}{2CR_H}. \quad (11)$$

З цих рівнянь простежується особливість безтрансформаторного перетворення, а саме – коефіцієнт перетворення визначається годинними параметрами перетворення – періодом та тривалістю замкнутого стану ключа  $K_1$  і постійною часу індуктивність-навантаження ( $L_D / R_H$ ). Коефіцієнт пульсацій визначається відношенням періоду до постійної часу ємність-навантаження.

**Перетворення змінної напруги.**

Описаний спосіб перетворення може бути застосований також і для перетворення змінної напруги: за достатньо малим періодом роботи ключей в порівнянні з періодом перетворюваної напруги за період переключення можна вважати незмінним. Відповідно, для аналізу можуть бути використані приведені вище співвідношення.

При змінній напрузі ЕРС  $E$  змінюється синусоїдально  $e = E_m \sin \Omega t$ , где  $\Omega = 2\pi f$ ,  $f$  – частота перетворюваної напруги.

При виведенні залежності вихідної напруги від параметрів перетворювача був використаний вираз для напруги на конденсаторі при включенні контуру на гармонічну напругу [3, с. 56]. В результаті отримано вираз для значення вихідної напруги:

$$U_D \cong E_m t_1 \sqrt{\frac{R_H}{2L_D T(1 + \Omega^2 R_H^2 C^2)}}. \quad (12)$$

Коефіцієнт перетворення змінної напруги

$$R_U \approx \frac{U_D}{E} \cong t_1 \sqrt{\frac{R_H}{L_D T(1 + \Omega^2 R_H^2 C^2)}}, \quad (13)$$

де  $E$  – діюче значення змінної напруги.

Адекватність ключовий залежностей (8) і (12) була перевірена моделюванням у програмі Simulink. Модель перетворювача представлена на рис. 2, а.

В експерименті варіювалися  $L_D$ ,  $C$ ,  $R_H$ ,  $t_1$ ,  $T$ . Осцилограми вхідних напруги і струму та вихідної напруги представлені на рис. 2, б.

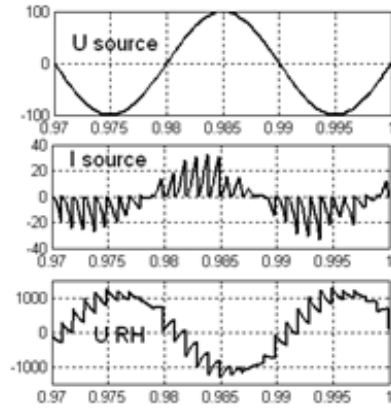
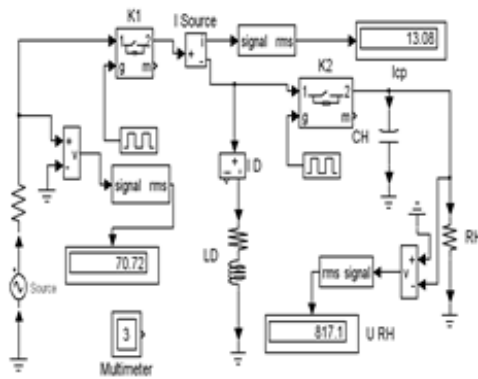


Рисунок 2 – Моделювання безтрансформаторного перетворювача параметрів електроенергії: а – модель перетворювача в програмі Simulink; б – осцилограми струму та напруги

З осцилограм можна побачити, що на виході напруга має ту саму частоту, що і на вході, здвигнуте за фазою на  $180^\circ$  та за амплітудою приблизно у 10 разів більше вхідного. Проглядаються пульсації миттєвих значень вихідної напруги. Обробкою результатів експерименту встановлено, що експериментальне значення корелюється з теоретичним коефіцієнтом кореляції 0,87 – 0,98. Це дозволяє вважати теоретичні залежності адекватними.

Втрати в ключах є специфічним енергетичним параметром безтрансформаторного перетворювача. Для їх визначення прийнято, що при розмиканні ключа струм в ньому змінюється від  $I_H$  при замкнутому стані до 0 при розімкнутому. Напруга змінюється від 0 при замкнутому стані до напруги конденсатора  $U_C$  при розімкнутому. Струм і напруга змінюються в процесі розмикання лінійно. Тоді миттєве значення струму в процесі розмикання

$$i = I_H - \frac{I_H}{t_P} t, \quad u = \frac{U_C}{t_P} t. \quad (14)$$

$t_P$  – тривалість розмикання,

$t$  – поточне значення часу, від 0 до  $t_P$ .

Енергія, розсіюється в ключі за час розмикання,

$$\Delta W_K = \int_0^{t_P} u i dt = 0,17 U_C I_H t_P. \quad (15)$$

Підстановкою виразів (14) отримується

$$\Delta W_K = 0,12 E^2 t_1^2 t_P \sqrt{\frac{R_H}{L_D^3 T}} \quad (16)$$

Відношення енергії, розсіяної в ключі, до переданої у конденсатор, а потім у навантаження, на основі формул (3) та (16)

$$\frac{\Delta W_K}{\Delta W_H} = 0,34 t_P \sqrt{\frac{R_H}{L_D T}}. \quad (17)$$

З цього співвідношення видно, що зменшити відносні втрати в ключах можна знижуючи тривалість розмикання чи збільшуючи індуктивність перетворювача.

#### Висновки.

1. Можливо трансформування змінної напруги, підсумовуючи послідовні в часі порції енергії.

2. Задані коефіцієнти трансформації та пульсації вихідної напруги можуть бути отримані підбором значень індуктивності та ємності.

3. Виходячи з сутності дискретного перетворення, необхідно очікувати м'які зовнішні характеристики пристрою. При необхідності жорсткість зовнішніх характеристик повинна бути скорегована зворотнім зв'язком за періодом чи тривалістю замкнутого стану вхідного ключа.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Довідник з електротехніки, т. 2, 1998.
2. Зінов'єв Г.С., Левін Є.Ю., Обухів А.Є., Попов В.І., Підвищуючи-понижуючі регулятори змінної напруги і безпосередні перетворювачі частоти. Електротехніка, №11, 2000., С.16-20.
3. Гінсбург С.Г. Методи вирішення задач з перехідних процесів в електричних ланцюгах. М.: «Вища школа», 1967, 388 с.
4. Довідник по електричним машинам: У 2 т. / За заг. ред. І. П. Копилова. Т. 1. - М.: Вища школа, 1988. - 456 с.

**А. Ю. Колларов (канд. техн. наук, доц.),**

ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет»

**И. В. Придатыко (ст. преп.),**

ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет»

**А. И. Пупченко,**

ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет»

**В. А. Ермышев**

ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет»

### БЕСТРАНСФОРМАТОРНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

*Аннотация:* Работа посвящена исследованию модели бестрансформаторного преобразователя параметров электроэнергии в приложении для математического пакета MATLAB Simulink. Показано, что возможна трансформация переменного напряжения, суммируя последовательные во времени порции энергии с необходимыми коэффициентами трансформации и пульсации выходного напряжения.

**Ключевые слова:** преобразование параметров электроэнергии, бестрансформаторный преобразователь, дискретное преобразование.

**O.Y. Kollarov (Ph.D., Associate Professor),**

Donetsk National Technical University

**I.V. Pridatko (Senior Teacher),**

Donetsk National Technical University

**A. I. Pupchenko,**

Donetsk National Technical University

**V. A. Yermishev**

Donetsk National Technical University

### TRANSFORMER-FREE TRANSFORMATIONS OF ELECTRICITY PARAMETERS

*Annotation:* The work is devoted to the study of the transformer-free converter model of electric power parameters in the application for the mathematical package MATLAB Simulink. It is shown that it is possible to transform an alternating voltage, summing up consecutive energy portions in time with the necessary transformation coefficients and pulsations of the output voltage.

**Keywords:** transformation of parameters of electric energy, transformer-free transformer, discrete transformation.