

УДК 621.314.2

**АНАЛІЗ РЕЖИМІВ РОБОТИ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ  
У ЧАСТОТНІЙ ОБЛАСТІ****А. П. Калінов, М. С. Малякова, В. О. Мельников**

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

вул. Першотравнева, 20, Кременчук, 39600, Україна. E-mail: mariia.maliakova@gmail.com, andrii.kalinov@gmail.com

Запропоновано метод удосконалення аналізу в аналітичному вигляді енергетичних характеристик електричних кіл з напівпровідниковими перетворювачами із застосуванням одиничної комутаційної функції шляхом реалізації в частотній області за рахунок використання алгоритму дискретної згортки. Перевірка запропонованого методу здійснювалась на прикладі електричної схеми з керованим ключовим регулятором напруги, синусоїдною напругою живлення та активно-індуктивним навантаженням. У рамках запропонованого методу для можливості визначення енергетичних характеристик досліджуваної електричної схеми комутаційна функція була надана в частотній області у вигляді масивів косинусної та синусної складових. Наступним етапом було отримання напруги навантаження як дискретної згортки у частотній області гармонійних складових комутаційної функції та напруги живлення. На основі масивів гармонійних складових визначеної напруги навантаження та виразів для повного опору навантаження були визначені гармонійні складові струму. Дискретна згортка масивів струму та напруги на навантаженні дозволила визначити частотні складові миттєвої потужності на навантаженні, отримання яких дозволить визначити енергетичні характеристики досліджуваної електричної схеми. Перевірка правильності визначених у частотній області аналітичних виразів комутаційної функції, напруги, струму та потужності навантаження здійснювалась за рахунок співставлення кривих, побудованих на основі отриманих аналітичних виразів, із кривими, побудованими за оберненим перетворенням Фур'є, – результатів операцій над електричними сигналами в частотній області. Показано, що метод аналізу електричних кіл із напівпровідниковими пристроями з використанням комутаційної функції, реалізований у частотній області із застосуванням алгоритму дискретної згортки, дозволяє значно скоротити витрати часу на проведення аналізу, спростити реалізацію аналітичних розрахунків та досягти їх автоматизації й отримання прогнозованого результату.

**Ключові слова:** напівпровідниковий перетворювач, аналітичний аналіз, частотна область, перетворення Фур'є.

**АНАЛИЗ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ  
В ЧАСТОТНОЙ ОБЛАСТИ****А. П. Калинов, М. С. Малякова, В. А. Мельников**

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского

ул. Первомайская, 20, Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: mariia.maliakova@gmail.com, andrii.kalinov@gmail.com

Представлен метод усовершенствования анализа в аналитическом виде энергетических характеристик электрических цепей с полупроводниковыми преобразователями с применением единичной коммутационной функции путем реализации в частотной области за счет использования алгоритма дискретной свертки. Проверка предложенного метода осуществлялась на примере электрической схемы с управляемым ключевым регулятором напряжения, синусоидальным напряжением питания и активно-индуктивной нагрузкой. В рамках представленного метода для возможности определения энергетических характеристик исследуемой электрической схемы коммутационная функция была представлена в частотной области в виде массивов косинусной и синусной составляющих. Следующим этапом было получение напряжения нагрузки как дискретной свертки в частотной области гармонических составляющих коммутационной функции и напряжения питания. На основе массивов гармонических составляющих определенного напряжения нагрузки и выражений для полного сопротивления нагрузки были определены гармонические составляющие тока. Дискретная свертка массивов тока и напряжения на нагрузке позволила определить частотные составляющие мгновенной мощности на нагрузке, получение которых позволит определить энергетические характеристики исследуемой электрической схемы. Проверка правильности определенных в частотной области аналитических выражений коммутационной функции, напряжения, тока и мощности нагрузки осуществлялась за счет сопоставления кривых, построенных на основе полученных аналитических выражений, с кривыми, построенными по обратным преобразованиям Фурье, – результатов операций над электрическими сигналами в частотной области. Показано, что метод анализа электрических цепей с полупроводниковыми устройствами с использованием коммутационной функции, реализованный в частотной области с применением алгоритма дискретной свертки, позволяет значительно сократить затраты времени на проведение анализа, упростить реализацию аналитических расчетов и достичь их автоматизации и получения прогнозируемого результата.

**Ключові слова:** полупроводниковый преобразователь, аналитический анализ, частотная область, преобразование Фурье.

**АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ.** На сьогодні не втрачає актуальності завдання дослідження процесів, що протікають у колах із напівпровідниковими перетворювачами, які є елементами із суттєво вираженою нелінійністю [1–3]. До головних питань, які ставлять перед собою дослідники при аналізі таких систем, можна віднести: визначення закономірностей і підвищення ефективності енергоперетворення [1–5], визначення природи виникнення реактивної потужності [1], розробку ефективних методів розрахунку струмів [3–4].

Використання чисельних методів істотно полегшує завдання дослідникам, оскільки дозволяє при відносній легкості реалізації одержати інформацію про практично будь-які процеси в нелінійних електричних колах [5–10]. Через стрімкий розвиток комп'ютерної техніки та наявність великої кількості спеціалізованих програмних продуктів, таких як SAPWIN [5–6], SPICE [7], SEQUEL [8], MATLAB [9], які дозволяють реалізувати розрахунки й чисельне моделювання, чисельні методи використовуються найчастіше. Однак необхідно відзначити, що ці методи мають наступні недоліки:

- чисельне рішення є частинним, одним із багатьох рішень, що не дозволяє провести узагальнений аналіз процесу чи системи;
- чисельне рішення рівнянь із суттєво вираженою нелінійністю вимагає великої кількості ітерацій, що супроводжується значними витратами часу;
- точність розрахунку істотно залежить від коректно обраних початкових наближень і конфігурації схеми, а також від методу й кроку інтегрування.

На відміну від чисельних, аналітичні методи мають суттєву перевагу. Вони дозволяють виділити узагальнений алгоритм аналізу нелінійних електричних кіл, провести якісний аналіз і дати адекватну оцінку процесам у нелінійних електричних колах, оцінити вплив усіх факторів при роботі системи, їх внесок і значущість [11–14].

З урахуванням вищезазначеного, для досягнення достатньої точності аналізу електричних кіл із напівпровідниковими елементами необхідний ефективний і простий з практичної точки зору аналітичний метод, який забезпечить достатню точність розрахунків, буде добре адаптованим для автоматизації чисельних і аналітичних розрахунків, а також дозволить провести аналіз механізмів формування складових струму та потужності.

У роботі [15] розглянуто методи аналізу електричних кіл із напівпровідниковими перетворювачами, згідно з якими розрахунок струмів та напруг в електричному колі здійснюється із завданням вхідної напруги перетворювача, комутаційної функції [16] та виду навантаження. Використання властивостей комутаційних функцій дає змогу суттєво спростити процедуру досліджуваних систем із напівпровідниковими перетворювачами в аналітичному вигляді [15]. Використання такого підходу при ліній-

ному навантаженні дозволяє звести аналіз фактично нелінійного кола з напівпровідниковими елементами до розв'язання лінійної задачі аналізу лінійних кіл при полігармонійній напрузі живлення. Для задач проектування силових перетворювачів електричної енергії, як, наприклад, регулятори й стабілізатори напруги та струму, джерела живлення, випрямлячі та ін., отримання зазвичай миттєвих значень струмів та напруг недостатньо, здебільше важливішим є визначення потужностей на елементах та енергетичних характеристик.

У роботах [15, 17] аналіз здійснюється шляхом розкладання відомих функцій у ряд Фур'є з подальшим їх перемноженням. Перемноження функцій косинуса та синуса різних частот, які є складовими сигналів струму та напруги, потребує громіздких і складних тригонометричних перетворень та значних витрат часу. При великій кількості гармонійних складових зазначені тригонометричні перетворення можуть призвести до непрогнозованого або навіть невірною результату. Також дані розрахунки погано адаптовані для автоматизації.

З урахуванням вищезазначеного, для подолання низки труднощів запропоновано реалізувати підхід із використанням методу автоматизованого формування складових електричних величин у частотній області [18], який базується на алгоритмі дискретної згортки [19]. Це дасть можливість отримання прогнозованого результату. При цьому аналітичні розрахунки, що реалізуються з використанням операції дискретної згортки, добре адаптовані для автоматизації обчислень.

Метою роботи є вдосконалення процесу аналізу енергетичних характеристик електричних кіл з напівпровідниковими перетворювачами в аналітичному вигляді із застосуванням одиначної комутаційної функції шляхом реалізації в частотній області за рахунок використання алгоритму дискретної згортки.

**МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.** Для перевірки запропонованого методу аналітичного дослідження розглянемо електричну схему з керованим ключовим регулятором напруги та активно-індуктивним навантаженням (рис. 1) [15].

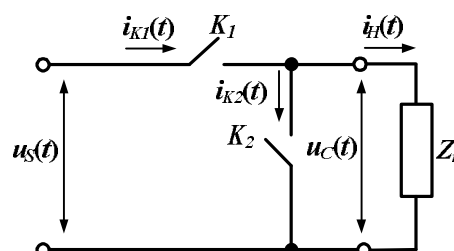


Рисунок 1 – Досліджувана електрична схема з керованим ключовим регулятором напруги

Зазначимо, що силовий ключ у розглянутій схемі (рис. 1) реалізований на базі силового транзистора із зворотнім діодом (рис. 2).

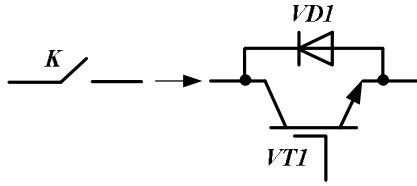


Рисунок 2 – Електрична схема силового ключа

Напряга живлення  $u_S(t)$  досліджуваного кола задана синусною складовою першої гармоніки:

$$u_S(t) = U_m \sin(\omega t), \quad (1)$$

де  $U_m$  – амплітуда напруги живлення,  $\omega$  – кутова частота.

Робота запропонованої схеми (рис. 1) описується одиничною комутаційною функцією  $\Phi(t)$ , яка надається у вигляді ряду Фур'є з відповідними коефіцієнтами [15]:

$$\begin{cases} a_0 = \frac{\alpha}{\pi}; \\ a_n = \frac{1 + (-1)^n}{\pi n} \sin(n\alpha); \\ b_n = \frac{1 + (-1)^n}{\pi n} (1 - \cos(n\alpha)), \end{cases} \quad (2)$$

де  $\alpha$  – кут керування;  $n$  – номер гармоніки.

Відповідно до (2) отримаємо:

$$\Phi(t) = a_{k0} + \sum_n a_{kn} \cos(n\omega t) + b_{kn} \sin(n\omega t). \quad (3)$$

Відповідно до виразу (3), масиви косинусної та синусної складових комутаційної функції в частотній області будуть мати вигляд:

$$\Phi_{an} = \begin{pmatrix} \frac{2\alpha}{\pi} \\ 0 \\ \frac{\sin(2\alpha)}{\pi} \\ 0 \\ \frac{\sin(4\alpha)}{2\pi} \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \frac{\sin(16\alpha)}{8\pi} \\ 0 \end{pmatrix}; \quad \Phi_{bn} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{(1 - \cos(2\alpha))}{\pi} \\ 0 \\ \frac{(1 - \cos(4\alpha))}{2\pi} \\ \vdots \\ \frac{(1 - \cos(14\alpha))}{7\pi} \\ 0 \\ \frac{(1 - \cos(16\alpha))}{8\pi} \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Для побудови графіка комутаційної функції (рис. 3) кут керування  $\alpha$  був прийнятий 110 ел. град., кількість досліджуваних гармонік  $n = 17$ .

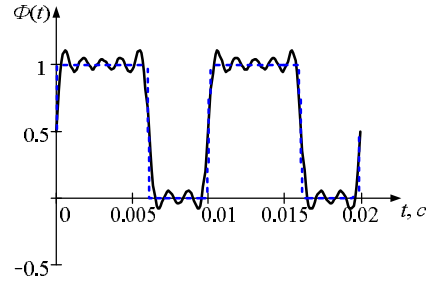


Рисунок 3 – Криві комутаційної функції, де (---) – вихідна комутаційна функція; (—) – комутаційна функція, отримана за оберненим перетворенням Фур'є результатів операцій над нею у частотній області

Наступним етапом є визначення напруги на навантаженні  $u_C(t)$ , яка розраховується як добуток комутаційної функції  $\Phi(t)$ , розкладеної в ряд Фур'є (3), та напруги живлення  $u_S(t)$ :

$$u_C(t) = \Phi(t)u_S(t). \quad (5)$$

Для реалізації (5) у частотній області використовується алгоритм формування складових електричних величин на базі дискретної згортки. Це дозволяє спростити процес аналітичного визначення косинусних та синусних складових напруги на навантаженні за рахунок заміни тригонометричних перетворень на операцію дискретної згортки.

Вираз (5) у частотній області записується наступним чином:

$$U_C = \Phi * U_S, \quad (6)$$

де \* – операція дискретної згортки.

$$U_{Can} = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{1 + \cos\left(\frac{2}{9}\pi\right)}{2\pi} \\ 0 \\ -\left(1 + 2\cos\left(\frac{2}{9}\pi\right) + 2\cos\left(\frac{4}{9}\pi\right)\right) \\ 4\pi \\ 0 \\ \frac{-2 + 3\cos\left(\frac{4}{9}\pi\right)}{12\pi} \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \frac{-1 + \cos\left(\frac{2}{9}\pi\right)}{16\pi} \end{pmatrix}; \quad (7)$$

$$U_{Cbn} = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{11\pi + 9 \sin\left(\frac{2}{9}\pi\right)}{18\pi} \\ 0 \\ -\left(\frac{2 \sin\left(\frac{2}{9}\pi\right) - \sin\left(\frac{4}{9}\pi\right)}{4\pi}\right) \\ 0 \\ \frac{\sqrt{3} + 3 \sin\left(\frac{4}{9}\pi\right)}{12\pi} \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \frac{-1 \sin\left(\frac{2}{9}\pi\right)}{16\pi} \end{pmatrix},$$

де  $U_{Can}$ ,  $U_{Cbn}$  – відповідно косинусні та синусні складові напруги навантаження.

Для підтвердження правильності отриманих аналітичних виразів косинусної та синусної складових напруги на навантаженні було проведено співставлення кривої, отриманої шляхом перемноження рядів Фур’є комутаційної функції  $\Phi(t)$  та напруги живлення  $u_c(t)$ , з кривою, побудованою на базі виразів (7) з переходом із частотної області в область часу шляхом зворотнього перетворення Фур’є (рис. 4).

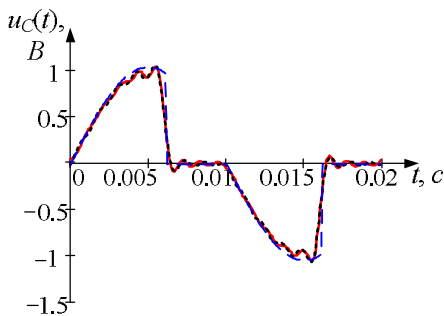


Рисунок 4 – Криві напруги на навантаженні, де (---) – отримана шляхом перемноження вихідної комутаційної функції та напруги живлення; (—) – отримана шляхом перемноження рядів Фур’є комутаційної функції та напруги живлення; (-.-) – побудована на основі виразів (7)

Якщо в досліджуваній електричній схемі повне навантаження  $Z_H$  має активно-індуктивний характер, то його можна записати як

$$Z_{in} = Z_1 \sqrt{\cos^2(\varphi) + n^2 \sin^2(\varphi)}, \quad (8)$$

де

$$Z_1 = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}. \quad (9)$$

У виразах (8), (9)  $Z_1$  – повний опір основної гармоніки;  $\varphi$  – кут зсуву опору навантаження;  $R$  – активний опір;  $L$  – індуктивність.

З урахуванням (8), струм навантаження в частотній області визначається як

$$i(t) = \frac{a_1}{Z_1} \cos(\omega t + \varphi_1) + \frac{b_1}{Z_1} \cos(\omega t + \varphi_1) + \sum_n \left[ \frac{a_n}{Z_{in}} \cos(n\omega t + \varphi_n) + \frac{b_n}{Z_{in}} \sin(n\omega t + \varphi_n) \right]. \quad (10)$$

Відповідно до (10) можна записати вирази визначення косинусних  $I_{an}$  та синусних  $I_{bn}$  складових струму навантаження в частотній області:

$$I_{an} = \frac{U_{Can} \sqrt{R^2 + (n\omega L)^2}}{R^2 + (n\omega L)^2} \cos(\varphi_n) + \frac{U_{Cbn} \sqrt{R^2 + (n\omega L)^2}}{R^2 + (n\omega L)^2} \sin(\varphi_n); \quad (11)$$

$$I_{bn} = \frac{U_{Cbn} \sqrt{R^2 + (n\omega L)^2}}{R^2 + (n\omega L)^2} \cos(\varphi_n) - \frac{U_{Can} \sqrt{R^2 + (n\omega L)^2}}{R^2 + (n\omega L)^2} \sin(\varphi_n).$$

Відповідно до (11) були отримані аналітичні вирази косинусних та синусних складових струму навантаження (12) досліджуваної електричної схеми.

Правильність отриманих аналітичних виразів (12) підтверджувалась зіставленням кривих струму, зображених на рис. 5.

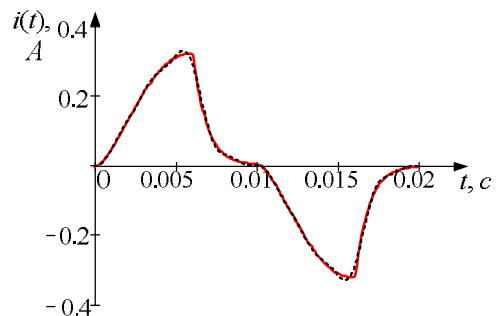


Рисунок 5 – Струм навантаження досліджуваного електричного кола, де (—) – крива, отримана за оберненим перетворенням Фур’є результатів операцій у частотній області; (-.-) – крива, побудована на основі виразів (12)

$$I_{an} = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{9R \left( 1 + \cos\left(\frac{2}{9}\pi\right) \right) - 9\omega L \sin\left(\frac{2}{9}\pi\right) - 11\omega L \pi}{18\pi R \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2} \sqrt{\frac{R^2 + \omega^2 L^2}{R^2}}} \\ 0 \\ \frac{R \left( 1 + 2 \cos\left(\frac{2}{9}\pi\right) + \cos\left(\frac{4}{9}\pi\right) \right) - 3\omega L \left( 2\omega L \sin\left(\frac{2}{9}\pi\right) + \sin\left(\frac{4}{9}\pi\right) \right)}{4\pi R \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2} \sqrt{\frac{R^2 + \omega^2 L^2}{R^2}}} \\ 0 \\ \frac{R \left( -2 + 3 \cos\left(\frac{4}{9}\pi\right) \right) - 5\omega L \left( 3 \sin\left(\frac{4}{9}\pi\right) + \sqrt{3} \right)}{12\pi R \sqrt{R^2 + 9\omega^2 L^2} \sqrt{\frac{R^2 + 9\omega^2 L^2}{R^2}}} \\ \vdots \\ \frac{R \left( 1 + 8 \cos\left(\frac{4}{9}\pi\right) + 7 \cos\left(\frac{2}{9}\pi\right) \right) + \omega L \left( 120 \sin\left(\frac{4}{9}\pi\right) + 105 \sin\left(\frac{2}{9}\pi\right) \right)}{112\pi R \sqrt{R^2 + 225\omega^2 L^2} \sqrt{\frac{R^2 + 225\omega^2 L^2}{R^2}}} \\ 0 \\ \frac{R \left( -1 + \cos\left(\frac{2}{9}\pi\right) \right) + 17\omega L \sin\left(\frac{2}{9}\pi\right)}{16\pi R \sqrt{R^2 + 289\omega^2 L^2} \sqrt{\frac{R^2 + 289\omega^2 L^2}{R^2}}} \end{pmatrix}; I_{bn} = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{\pi R \left( 11 + 9 \sin\left(\frac{2}{9}\pi\right) \right) + 9\omega L \left( \cos\left(\frac{2}{9}\pi\right) + \omega L \right)}{18\pi R \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2} \sqrt{\frac{R^2 + \omega^2 L^2}{R^2}}} \\ 0 \\ \frac{R \left( 2 \sin\left(\frac{2}{9}\pi\right) + \sin\left(\frac{4}{9}\pi\right) \right) + 3\omega L \left( 1 + 2\omega L \cos\left(\frac{2}{9}\pi\right) + \cos\left(\frac{4}{9}\pi\right) \right)}{4\pi R \sqrt{R^2 + 9\omega^2 L^2} \sqrt{\frac{R^2 + 9\omega^2 L^2}{R^2}}} \\ 0 \\ \frac{R \left( \sqrt{3} + 3 \sin\left(\frac{4}{9}\pi\right) \right) - 5\omega L \left( -3 \cos\left(\frac{4}{9}\pi\right) + 2 \right)}{12\pi R \sqrt{R^2 + 25\omega^2 L^2} \sqrt{\frac{R^2 + 25\omega^2 L^2}{R^2}}} \\ \vdots \\ \frac{R \left( 8 \sin\left(\frac{4}{9}\pi\right) + 7 \sin\left(\frac{2}{9}\pi\right) \right) - 15\omega L \left( 1 + 8 \cos\left(\frac{4}{9}\pi\right) + 7 \cos\left(\frac{2}{9}\pi\right) \right)}{112\pi R \sqrt{R^2 + 225\omega^2 L^2} \sqrt{\frac{R^2 + 225\omega^2 L^2}{R^2}}} \\ 0 \\ \frac{R \sin\left(\frac{2}{9}\pi\right) + 17\omega L \left( 1 - \cos\left(\frac{2}{9}\pi\right) \right)}{16\pi R \sqrt{R^2 + 289\omega^2 L^2} \sqrt{\frac{R^2 + 289\omega^2 L^2}{R^2}}} \end{pmatrix} \quad (12)$$

З використанням отриманих аналітичних виразів (7) та (12) можливо визначити косинусні й синусні складові потужності на навантаженні для подальшого дослідження енергетичних характеристик кола, що аналізується.

Потужність в області часу визначається за відомим виразом

$$p(t) = u_C(t) i(t). \quad (13)$$

З використанням операції дискретної згортки вираз (13) може бути записаний у частотній області наступним чином:

$$P = U_C * I. \quad (14)$$

Необхідно зазначити, що аналітичні вирази косинусної та синусної складових потужності для 17 досліджуваних гармонік струму та навантаження дуже громіздкі для подання в тексті даної роботи, але це не є проблемою при автоматизованих розрахунках. Для більшої наочності та для можливості приведення виразів у тексті аналітичні розрахунки здійснювались із використанням трьох гармонійних складових. Отримані аналітичні вирази косинусної та синусної складових потужності наведено у (15).

Для приведених виразів (15) на рис. 6 зображено зіставлення кривих потужності, високе співпадіння яких навіть при невеликій кількості досліджуваних гармонік доводить правильність отриманих виразів потужності досліджуваного кола.

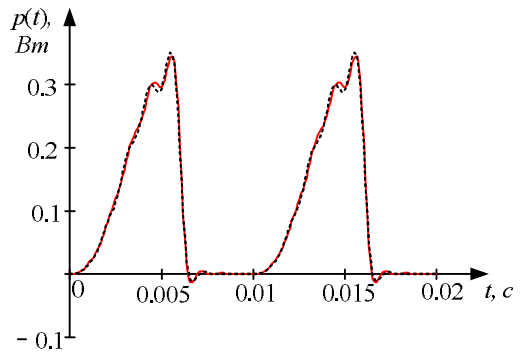


Рисунок 6 – Потужність навантаження досліджуваного електричного кола, де (—) – крива, отримана за оберненим перетворенням Фур’є результатів операцій у частотній області; (- - -) – крива, побудована на основі виразів (15)

$$\begin{aligned}
 P_{an} = & \left( \begin{array}{c} U_m^2 \left[ \frac{R + R(2\sin^2(\alpha) - 1) - 2\alpha\omega L + \omega L \sin(2\alpha)}{4\pi^2 R \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \sqrt{\frac{R^2 + \omega^2 L^2}{R^2}} + \frac{\sin(2\alpha) - 2\alpha [R + R(2\sin^2(\alpha) - 1) + 5\alpha\omega L \sin(4\alpha)]}{16\pi^2 R \sqrt{R^2 + 25\omega^2 L^2}} \sqrt{\frac{R^2 + 25\omega^2 L^2}{R^2}} \right] \\ 0 \\ U_m^2 \left[ \frac{\sin^2(\alpha) [R + R(2\sin^2(\alpha) - 1) - 2\alpha\omega L + \omega L \sin(2\alpha)]}{4\pi^2 R \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \sqrt{\frac{R^2 + \omega^2 L^2}{R^2}} - \frac{\sin(2\alpha) - 2\alpha [R + R(2\sin^2(\alpha) - 1) + 5\alpha\omega L \sin(4\alpha)]}{16\pi^2 R \sqrt{R^2 + 25\omega^2 L^2}} \sqrt{\frac{R^2 + 25\omega^2 L^2}{R^2}} \right] \\ 0 \\ U_m^2 \left[ \frac{2\sin^2(2\alpha) - 4\sin^2(\alpha) [R + R(2\sin^2(\alpha) - 1) - 2\alpha\omega L + \omega L \sin(2\alpha)]}{16\pi^2 R \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \sqrt{\frac{R^2 + \omega^2 L^2}{R^2}} - \frac{\sin(4\alpha) - 2\sin(2\alpha) [R + R(2\sin^2(\alpha) - 1) + 5\alpha\omega L \sin(4\alpha)]}{32\pi^2 R \sqrt{R^2 + 25\omega^2 L^2}} \sqrt{\frac{R^2 + 25\omega^2 L^2}{R^2}} \right] \end{array} \right) \\
 P_{bn} = & \left( \begin{array}{c} 0 \\ 0 \\ U_m^2 \left[ \frac{\cos(2\alpha) - 1 [R - R \cos(4\alpha) + 5\omega L \sin(4\alpha)]}{16\pi^2 R \sqrt{R^2 + 25\omega^2 L^2}} \sqrt{\frac{R^2 + 25\omega^2 L^2}{R^2}} - \frac{\sin(2\alpha) - 2\alpha [R - R \cos(2\alpha) - 2\alpha\omega L + \omega L \sin(2\alpha)]}{8\pi^2 R \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \sqrt{\frac{R^2 + \omega^2 L^2}{R^2}} \right] \\ 0 \\ U_m^2 \left[ \frac{2\sin^2(2\alpha) - 4\sin^2(\alpha) [R + R(2\sin^2(\alpha) - 1) + 5\omega L \sin(4\alpha)]}{32\pi^2 R \sqrt{R^2 + 25\omega^2 L^2}} \sqrt{\frac{R^2 + 25\omega^2 L^2}{R^2}} - \frac{\sin(4\alpha) - 2\sin(2\alpha) [R + R(2\sin^2(\alpha) - 1) - 2\alpha\omega L + \omega L \sin(2\alpha)]}{32\pi^2 R \sqrt{R^2 + 25\omega^2 L^2}} \sqrt{\frac{R^2 + 25\omega^2 L^2}{R^2}} \right] \end{array} \right) \quad (15)
 \end{aligned}$$

На основі отриманих аналітичних залежностей миттєвої потужності (15) досліджуваного електричного кола (1) можливо визначити енергетичні показники системи за частотними складовими миттєвої потужності.

**ВИСНОВКИ.** Запропоновано метод аналітичного дослідження кіл з напівпровідниковими перетворювачами із застосуванням комутаційної функції у частотній області з використанням методу автоматизованого формування складових електричних величин. Це дозволяє значно скоротити витрати часу на проведення аналізу, а також спростити реалізацію аналітичних розрахунків за допомогою заміни тригонометричних перетворень в області часу на операцію дискретної згортки у частотній області з отриманням прогнозованого результату.

#### ЛІТЕРАТУРА

- Osnach A.M. The different options regarding power components in electric circuits // Proceeding of International Conference of Electrical Power Quality and Utilization (EPQU'11). – 2011. – Portugal: Lisbon. – PP. 1–6.
- Slonim M.A. Limits in application of main power theories for calculation of active and apparent powers in linear and non-linear circuits and systems // Proceedings of International Conference Systems En-

gineering (ICSEng 2011). – 2011. – USA: Las Vegas, –PP. 326–328.

- Czarnecki L.S. Physical interpretation of the reactive power in terms of the CPC power theory // Electrical power quality and utilization journal. – 2007. – Iss. 13 (1). – PP. 87–93.

- Zagirnyak M., Kalinov A., Maliakova M. Analysis of instantaneous power components of electric circuit with a semiconductor element // Archive of Electrical Engineering. – 2013. – Iss. 62 (3). – PP. 473–486.

- Калінов А.П., Малякова М.С. Розрахунок електричного кола з діодом методом миттєвої потужності // Вісник Кременчуцького державного університету імені Михайла Остроградського: наукові праці КДУ. – Вип. 4/2010 (63), част. 3. – Кременчук: КДУ, 2010. – С. 31–35.

- Luchetta A., Manetti Reatti S. SAPWIN – a symbolic simulator as a support in electrical engineering education // IEEE Transactions on education. – 2001. – Iss. 44 (2). – PP. 9–15.

- Huelsman L.P. SAPWIN, Symbolic analysis program for Windows – PC programs for engineers // IEEE Circuits and Devices Magazine. – Iss. 6/1996 (2). – PP. 4–6.

- Moura L., Darwazeh I. Introduction to linear circuit analysis and modelling from DC to RF, MatLAB and SPICE. – Burlington, 2005. – 177 p.

9. Raju A.B., Karnik S.R. SEQUEL: a free circuit simulation software as an aid in teaching the principles of power electronics to undergraduate students // *Proceedings of 2nd International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology*. – India: Nagpur, Maharashtra, 2009. – PP. 681–686.
10. Fernao P.V., Fernando J., Silva A. Teaching nonlinear modeling, simulation, and control of electronic power converters using MATLAB/Simulink // *IEEE Transactions on Education*. – 2002. – Iss. 45 (3). – PP. 253–261.
11. Wai-Kai Chen Feedback, nonlinear, and distributed circuits, The circuits and filters handbook. – New York: CRC Press, 2009. – 454 p.
12. Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В. Теоретические основы электротехники. – СПб.: Питер-Пресс, 2009. – 432 с.
13. Nastov Ognen J. Spectral methods for circuit analysis // *Proceedings of Massachusetts Institute of Technology*. – 1999. – PP. 27–31.
14. Maas S. Nonlinear microwave and RF circuits. – London: Artech House, 2009. – 582 p.
15. Жарский Б.К., Новський В.О., Голубев В.В. Перетворення параметрів електромагнітної енергії вентиляними комутаторами. – К.: Інститут електродинаміки НАН України, 2013. – 323 с.
16. Такеути Т.Д. Теория и применение вентиляных цепей для регулирования двигателей. – Л.: Энергия, 1973. – 279 с.
17. Михальський В.М. Засоби підвищення якості електричної енергії на вході і виході перетворювачів частоти та напруги з широтно-імпульсною модуляцією. – К.: Інститут електродинаміки НАН України, 2013. – 340 с.
18. Zagirnyak M., Kalinov A., Maliakova M. An algorithm for electric circuits calculation based on instantaneous power component balance // *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)*. – Iss. 87/2011 (12b). – PP. 212–215.
19. Сидоренко В.М., Мамчур Д.Г., Родькін Д.Й., Чорний О.П. Визначення складових миттєвої потужності електричних сигналів // *Електроінформ*. – 2005. – Вип. 1. – С. 12–14.

#### OPERATION MODE ANALYSIS OF SEMICONDUCTOR CONVERTERS IN THE FREQUENCY DOMAIN

**A. Kalinov, M. Maliakova, V. Melnikov**

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: mariia.maliakova@gmail.com, andrii.kalinov@gmail.com

The paper presents a method of improving the analysis in analytical form of energy characteristics of electrical circuits with semiconductor converters using the unit switching function through implementation in the frequency domain by using discrete convolution algorithm. Verification of the proposed method was carried out on the example of the electrical circuit with controlled key regulator voltage sinusoidal voltage and active-inductive load. Within the framework of the present method to be able to determine the energy characteristics of the studied electrical circuit switching function was represented in the frequency domain in the form of cosine and sine array components. The next step was to load voltage as discrete convolution in the frequency domain harmonic components of switching functions and supply voltage. Based on arrays of harmonic components specified load voltage and expressions for the impedance load by harmonic current components. Discrete convolution array current and load voltage allowed to determine the frequency components of instantaneous power at the load, the receipt of which will determine the energy characteristics of the electrical circuit. Validation defined in the frequency domain analytical expressions switching functions, voltage, current and power load carried by comparing curves, based on the analytical expression of the curves constructed by inverse Fourier transform of the results of operations of the electrical signals in the frequency domain. It is shown that the method of analysis of electrical circuits of semiconductor devices using switching functions implemented in the frequency domain using discrete convolution algorithm can significantly reduce the time required to analyze, simplify the implementation of analytical calculations and achieve their automation and obtain the predicted outcome.

**Key words:** semiconductor converter, analytic analysis, frequency-domain, Fourier transform.

#### REFERENCES

1. Osnach, A.M. (2011), “The different options regarding power components in electric circuits”, *Proceeding of International Conference of Electrical Power Quality and Utilization (EPQU'11)*, Lisbon, Portugal, pp. 1–6.
2. Slonim, M.A. (2011), “Limits in Application of Main Power Theories for Calculation of Active and Apparent Powers in Linear and Non-Linear Circuits and Systems”, *Proceedings of International Conference Systems Engineering (ICSEng 2011)*, Las Vegas, USA, pp. 326–328.
3. Czarnecki, L.S. (2007), “Physical interpretation of the reactive power in terms of the CPC power theory”, *Electrical power quality and utilization journal*, Vol. 13, no. 1, pp. 87–93.
4. Zagirnyak, M., Kalinov, A. and Maliakova, M. (2013), “Analysis of instantaneous power components of electric circuit with a semiconductor element”, *Archive of Electrical Engineering*, Vol. 62, no. 3, pp. 473–486.
5. Kalinov, A. and Maliakova, M. (2010), “The calculation of the electric circuit with a diode with the instantaneous power technique”, *Visnyk Kremenchutskogo derzhavnogo universitetu*, Vol. 4, no. 63, part 3, pp. 31–35. (in Ukrainian)
6. Luchetta, A. and Manetti Reatti, S. (2001),

“SAPWIN – a symbolic simulator as a support in electrical engineering education”, *IEEE Transactions on Education*, Vol. 44, no. 2, pp. 9–15.

7. Huelsman, L.P. (1996), “SAPWIN, Symbolic analysis program for Windows – PC programs for engineers”, *IEEE Circuits and Devices Magazine*, Vol. 6, no. 2, pp. 4–6.

8. Moura, L. and Darwazeh, I. (2005), *Introduction to linear circuit analysis and modelling from DC to RF, MatLAB and SPICE*, Burlington.

9. Raju, A.B. and Karnik, S.R. (2009), “SEQUEL: a free circuit simulation software as an aid in teaching the principles of power electronics to undergraduate students”, *Proceedings of 2nd International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology, Nagpur, Maharashtra, India*, pp. 681–686.

10. Fernao, P.V., Fernando, J. and Silva, A. (2002), “Teaching nonlinear modeling, simulation, and control of electronic power converters using MATLAB/Simulink”, *IEEE Transactions on Education*, Vol. 45, no. 3, pp. 253–261.

11. Wai-Kai, Chen (2009), *Feedback, nonlinear, and distributed circuits, The circuits and filters handbook*, CRC Press, New York, NY.

12. Demirchian, K.S., Neiman, L.R. and Korovkin, N.V. (2009), *Theoretical Fundamentals of Electrotechnics*, Piter, St. Petersburg. (in Russian)

13. Nastov, Ognen J. (1999), *Spectral methods for circuit analysis*, Proceedings of Massachusetts Institute of Technology, pp. 27–31.

14. Maas, S. (2009), *Nonlinear microwave and RF circuits*, Artech House, London.

15. Zharskyi, B.K., Novskyi, V.O. and Golubev, V.V. (2013), *Peretvorenniya parametriv elektromagnitnoyi energii ventilnykh komutatoramy* [The conversion of electromagnetic energy parameters valve switches], Instytut elektrodynamiky NAN Ukrainy, Kyiv. (in Ukrainian)

16. Takeuchi, G. (1973), *Teoriya primeneniya ventilnykh tsepey dlya regulirovaniya* [Theory of gating circuit and application to motor control], Energiya, Leningrad. (in Russian)

17. Mikkalskiy, V.M. (2013), *Zasoby pidvischennya energiyi na vходи i vиходи peretvoryuvachiv chastoty ta napruhy z shirotno-impul'snoy modulyatsiyei* [Means of improving the quality of electric power at the input and output voltage and frequency converters with pulse-width modulation], Instytut elektrodynamiky NAN Ukrainy, Kyiv. (in Ukrainian)

18. Zagirnyak, M., Kalinov, A. and Maliakova, M. (2011), “An algorithm for electric circuits calculation based on instantaneous power component balance”, *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)*, Vol. 87, no. 12b, pp. 212–215.

19. Sidorenko, V.M., Mamchur, D.G., Rodkin, D.Y. and Chornyi, O.P. (2005), “Assessment of instantaneous power constituent of electric signals”, *Elektroinform, Lviv*, Vol. 1, pp. 12–14. (in Ukrainian)

Стаття надійшла 27.02.2015.