

УДК 621.31

**Терещенко Т.О.**

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Хижняк Т.А.**

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Лайкова Л.Г.**

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Овсієнко М.Ю.**

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Заруба Д.С.**

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ВИЗНАЧЕННЯ НЕСПРАВНОСТЕЙ ЕЛЕМЕНТІВ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

*Забезпечення безаварійної роботи обладнання з напівпровідниковими перетворювачами потребує вирішення задачі вчасної ідентифікації несправностей елементів напівпровідникових перетворювачів. Розглянуто спосіб визначення несправностей DC-DC перетворювача з квазі-імпедансною ланкою, викликаних виходом параметрів елементів за допустимі межі. Ідентифікація типу несправності виконується за критеріями середнього значення на основі даних про випрямлену напругу навантаження в усталеному режимі та часу перехідного процесу, які отримані під час моделювання роботи перетворювача в справному режимі та у разі різних несправностей. Розглянуто питання визначення сфери безаварійної роботи за одночасної зміни декількох параметрів схеми.*

**Ключові слова:** ідентифікація несправностей, діагностика перетворювачів, DC-DC перетворювач з квазі-імпедансною ланкою.

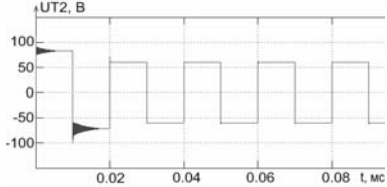
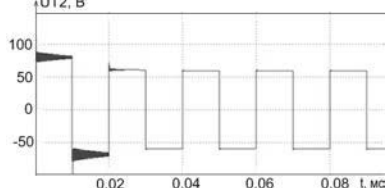
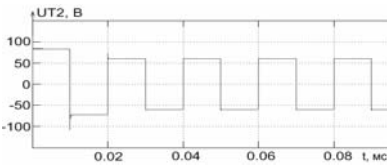
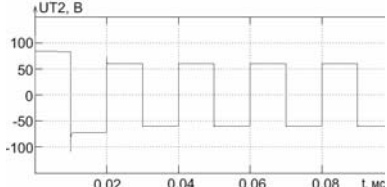
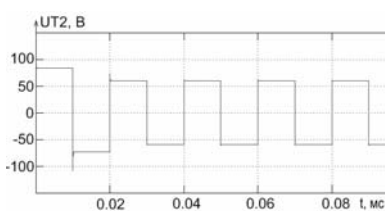
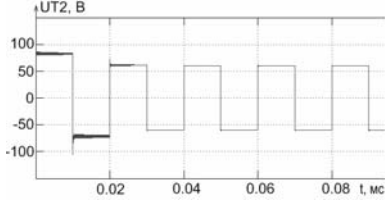
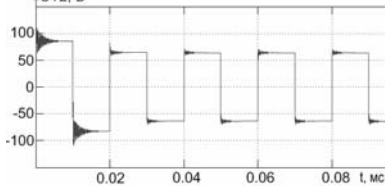
**Постановка проблеми.** На стан напівпровідникового перетворювача впливають такі фактори, як температура навколишнього середовища, частота роботи, робочі струми та напруги, режим роботи, зміна внутрішніх параметрів елементів, що інколи призводить до виникнення аварійних або передаварійних режимів роботи. Одним із методів отримання діагностичної інформації про режим роботи напівпровідникового перетворювача є моделювання процесів у ньому та виділення певних діагностичних показників, які стануть основою для ідентифікації його стану. Особливо гостро проблема діагностики постає в пристроях, вихід з ладу яких може привести до смерті людини або завдати шкоди її здоров'ю (наприклад, у кардіостимуляторах і інших системах життєзабезпечення людини) [1]. В таких випадках необхідний ступінь надійності має забезпечуватися додатко-

вими способами, наприклад, різними схематичними методами, установкою захисних ланцюгів або додатковим резервуванням. Крім того, необхідно підвищити швидкість і точність діагностування стану таких пристроїв.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Як показують дослідження, про появу несправності або зміну параметрів елементів напівпровідникового перетворювача свідчить зміна форм часових діаграм його струмів та напруги [2; 3]. Тому часові залежності струмів та напруги перетворювачів доцільно використовувати як діагностичну інформацію.

Стан напівпровідникового перетворювача визначається станом його активних та пасивних елементів. До останніх належать конденсатори, трансформатори, котушки індуктивності та резистори [3].

Результати моделювання у разі зміни індуктивності  $L_{qz1}$  або  $L_{qz2}$

Відхилення параметрів (в % від ном.)	Часова діаграма напруги вторинної обмотки трансформатора UT2	Середнє значення випрямленої напруги навантаження в усталеному режимі $U_c$ , В	Час перехідного процесу, мс
-75		196,9	17
-50		191,7	24
-10		204,7	10,5
0		205,4	10,5
+10		205,4	13,5
+50		200,8	30,15
+75		200,3	30,17

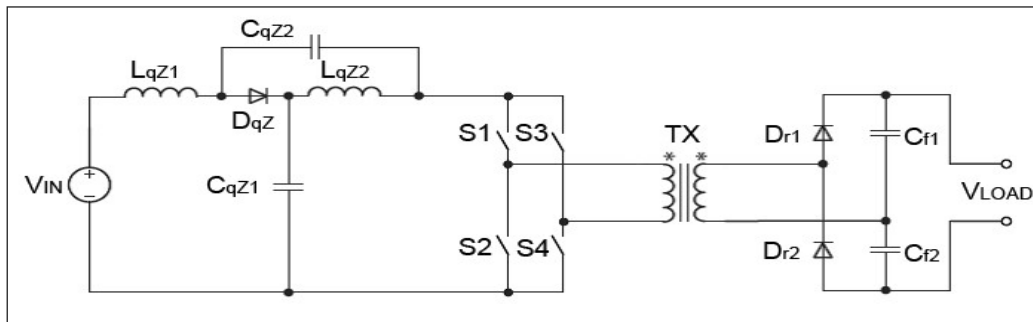


Рис. 1. Схема квазі-імпедансного DC-DC перетворювача

Таблиця 2

## Результати моделювання у разі зміни ємності Cf1 (Cf2)

Відхилення $C_f$ (в % від ном.)	-75	-50	-10	0	+10	+50	+75
$U_c$ , В	198,6	197,9	204,7	205,4	205,9	206,9	207
$t_{\text{imp}}$ , мс	11,3	10,35	10,3	10,5	10,4	10,3	10,3

Таблиця 3

## Результати моделювання у разі зміни опору Ron

Відхилення $R_{on}$ (в % від ном.)	-75	-50	-10	0	+10	+50	+75
$U_c$ , В	214,5	211,4	206,6	205,4	204,2	199,8	197
$t_{\text{imp}}$ , мс	10,3	10,3	10,3	10,5	10,4	10,4	10,4

Для активних елементів, таких як польові, біполярні транзистори та діоди, основними видами несправності є обрив, коротке замикання, втрата керованості [3].

Для резисторів основними видами несправності є обрив та відхилення опору від номіналу, для конденсаторів – пробій, обрив, зміна ємності, збільшення внутрішнього опору. Зміна номінальної ємності відбувається через старіння діелектрика, попадання на нього вологи, перегріву, деформації, підвищення струму витoku через погіршення ізоляції. Дроселі можуть мати такі несправності, як обрив проводу в місцях припайки до контактних пелюсток, внутрішній обрив намотувального дроту, коротке замикання витків, зміна номінального значення індуктивності.

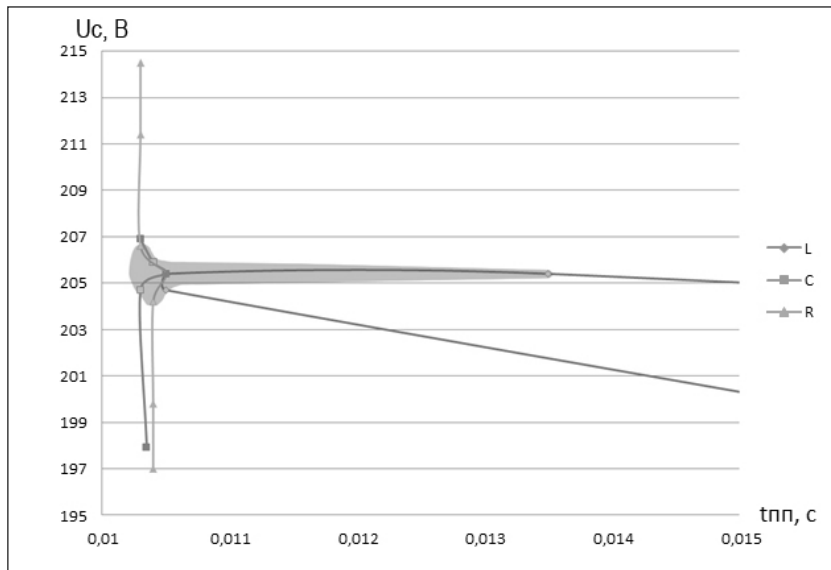
Задача виявлення аварійних станів перетворювача досить успішно вирішується різними способами [4], однак виявлення передаварійного стану внаслідок виходу параметрів його елементів за допустиму межу є складнішою задачею, яка передбачає глибокий аналіз схеми досліджуваного перетворювача в різних режимах роботи та за різних значень параметрів.

**Постановка завдання.** Метою цієї статті є дослідження та визначення несправностей, що викликані відхиленням параметрів елементів

DC-DC перетворювача з квазі-імпедансною ланкою за допустимі межі, для вчасного виявлення передаварійних режимів роботи перетворювача.

**Виклад основного матеріалу.** Перетворювачі з квазі-імпедансною (КІ) ланкою знаходять застосування в системах з альтернативними джерелами енергії для перетворення вихідної напруги цих джерел у постійну напругу із заданими параметрами. Вони характеризуються широким діапазоном регулювання вхідної напруги, відсутністю стрибків вхідного струму, високою завадостійкістю [5]. Перетворювач (рис. 1) містить джерело постійної напруги ( $V_{IN}$ ), мостовий гальванічно-ізолюваний DC-DC перетворювач, на вході якого знаходиться квазі-імпедансна ланка (qZS) з двох конденсаторів  $C_{qZ1}$  та  $C_{qZ2}$ , двох індукторів  $L_{qZ1}$  та  $L_{qZ2}$  і діода  $D_{qZ}$ , інвертор, побудований на чотирьох МОН-транзисторах S1-S4, ізоляційний трансформатор TX та подвоювач напруги з двох діодів  $Dr1$  та  $Dr2$  і двох конденсаторів  $C_{f1}$  та  $C_{f2}$ .

Модель квазі-імпедансного DC-DC перетворювача реалізована в пакеті розгалуження математичної системи MATLAB R2014a – Simulink R2014a. Як діагностичну інформацію про стан перетворювача пропонується використовувати діаграми напруги вторинної обмотки трансформатора.



**Рис. 2.** Зміна напруги  $U_c$  та часу  $t_{пп}$  у разі зміни параметрів перетворювача (заштрихована зона відповідає сфері безаварійної роботи за одночасної зміни параметрів на  $\pm 10\%$ )

Часові діаграми напруги вторинної обмотки трансформатора ТХ наведено в табл.1.

У табл. 1–3 наведено обчислені за діаграмами середні значення випрямленої напруги навантаження в усталеному режимі та час перехідного процесу за різних параметрів індуктивності  $L_{qz}$  (табл. 1), ємності  $C_f$  (табл. 2) та опору  $R_{on}$  транзисторів (табл. 3). Діаграма для справної роботи перетворювача (відхилення від номінальних значень параметрів відсутнє) отримана за таких параметрів моделі  $V_{IN}=15$  В;  $L_{qZ1}=L_{qZ2}=0,5$  мкГн,  $C_{qZ1}=C_{qZ2}=26,4$  мкФ;  $C_{f1}=C_{f2}=2,2$  мкФ.

**Аналіз результатів.** На рис. 2 наведено криві зміни напруги  $U_c$  та часу  $t_{пп}$  у разі зміни параметрів перетворювача  $L_{qz1}$  ( $L_{qz2}$ ),  $C_{f1}$  ( $C_{f2}$ ),  $R_{on}$  згідно з табл. 1–3 та відмічені точки, що відповідають межі безаварійної роботи (у цьому разі прийнято  $\pm 10\%$  від номінального значення). Як видно з рис. 2, ці два параметри однозначно характеризують тип несправності.

У табл. 4 наведено графіки залежності середнього значення випрямленої напруги та часу перехідного процесу від значення параметрів  $L_{qz1}$  ( $L_{qz2}$ ),  $C_{f1}$  ( $C_{f2}$ ),  $R_{on}$ .

Припустимо, що одночасно змінюється лише один з трьох параметрів схеми перетворювача. Тоді за результатами моделювання та за вимірними значеннями напруги  $U_c$  та часу  $t_{пп}$  можна знайти поточне значення цього параметра і визначити, чи наближається він до заданої допустимої межі.

Наприклад, якщо змінюється лише індуктивність, результати вимірювання такі:  $U_c=200$ В,

$t_{пп}=30$  мс. За графіками табл. 4 (перший рядок) визначається значення  $L_{qz}=0,8$  мкГн. Якщо допустима межа відхилення становить  $10\%$  від номінального значення, тобто критичне значення індуктивності є рівним  $L_{qz}=0,55$  мкГн, то обчислене значення  $0,8$  мкГн вказує на несправність дроселя.

Зазначимо, що вимірювання одного показника (напруги  $U_c$  або часу  $t_{пп}$ ) є недостатнім. У наведеному прикладі вимірюваному значенню  $U_c=200$  В відповідають дві точки на графіку табл. 4 (перший рядок) –  $L_{qz}=0,4$  мкГн та  $L_{qz}=0,8$  мкГн, і тільки значення показника  $t_{пп}=30$  мс дає змогу однозначно визначити, що  $L_{qz}=0,8$  мкГн.

Більш складним варіантом є одночасна зміна декількох параметрів, наприклад,  $L_{qz1}$  ( $L_{qz2}$ ),  $C_{f1}$  ( $C_{f2}$ ),  $R_{on}$  у межах  $\pm 10\%$ .

Для опису функції трьох змінних доцільно застосовувати метод Брендона [6], заснований на обробці експериментальних даних. Згідно з алгоритмом Брендона функція кількох змінних визначається як:

$$\hat{y}(x_1, x_2, \dots, x_n) = b_0 \prod_{i=1}^n f_i(x_i), \quad (1)$$

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_u y_u, \quad (2)$$

де  $f_i(x_i)$  – емпіричні функції регресії,  $N$  – об'єм вибірки.

Значення  $b_0$  розраховується як середнє значення напруги  $U_c$  у діапазоні  $\pm 10\%$  зміни кожного параметра (див. табл. 5):

$$b_0 = \frac{1}{27} \sum_{j=1}^{27} y_j = 205,11.$$

У табл. 5 позначено  $x_1$  – опір  $R_{on}$  MOSFET,  $x_2$  – ємність  $C_{f1}$ ,  $x_3$  – індуктивність  $L_{qz1}$ .

Експериментальні дані показують, що залежності  $U_c$  від значення параметрів  $x_1$ - $x_3$  на ділянці  $\pm 10\%$  є лінійними і можуть бути описані рівнянням типу:

$$U_c(x_i) = ax_i + b.$$

Використовуючи метод найменших квадратів, знаходимо коефіцієнти  $a$  та  $b$  для кожного з параметрів [7].

Для опору  $R_{on}$ :  $a=-0,00625$  та  $b=1,056$ . Похибка дорівнює  $0,0005$  для значень опору  $7,92$  мОм та  $0,0001$  для  $9,68$  мОм.

## Результати моделювання

Параметр	Середнє значення випрямленої напруги навантаження в усталеному режимі	Час перехідного процесу
Lqz		
Cf		
Rop		

Таблиця 5

Експериментальні значення  $U_c$  (В) за різних сполучень параметрів

$x_1$	$x_2$	0,45 мкГн			0,5 мкГн			0,55 мкГн		
		1,98 мкФ	2,2 мкФ	2,42 мкФ	1,98 мкФ	2,2 мкФ	2,42 мкФ	1,98 мкФ	2,2 мкФ	2,42 мкФ
7,92 МОм		205	206	206,4	205,9	206,56	207	205,9	206,75	207
8,8 МОм		204,1	204,75	205,2	204,8	205,4	205,8	204,8	205,4	205,8
9,68 МОм		203,1	203,57	204	203,7	204,24	204,6	203,7	204,26	204,65

Для ємності  $Cf1$ :  $a=0,0114$  та  $b=0,976$ . Похибка в межах досліджуваних даних не була встановлена.

Для індуктивності  $Lqz1$ :  $a=0,03$  та  $b=0,985$ . Похибка актуальна для значень індуктивності

0,45 мкГн, 0,5 мкГн та 0,55 мкГн. Вона дорівнює 0,0005, 0,001 та 0,0005 відповідно.

Відповідно до методу Брендона залежність вихідної напруги від таких параметрів, як опір

$R_{op}$ , індуктивність  $L_{qz1}$  та ємність  $C_{f1}$ , математично записується таким чином:

$$U_c = 205,11 \cdot (1,056 - 0,00625R_{on}) \cdot (0,0114C_{f1} + 0,976) \cdot (0,03L_{qz1} + 0,985). \quad (3)$$

Максимальна похибка визначення  $U_c$  становить 0,35%.

За формулою (3) можна розрахувати вихідну напругу DC-DC перетворювача без залучення програм моделювання.

Визначення аналогічної залежності для часу перехідного процесу є складнішою задачею внаслідок його нелінійної залежності від параметрів елементів схеми. Для приблизної оцінки пропонується визначати час перехідного процесу для кожного сполучення параметрів схеми (табл. 5) як максимальний з множини отриманих.

На площині  $U_c$  і  $t_{mn}$  (рис. 2) обчислені значення визначають сферу безаварійної роботи за одночасної зміни параметрів на  $\pm 10\%$ .

**Висновки.** Запропонований спосіб визначення несправності в DC-DC перетворювачі передбачає оцінку стану перетворювача за двома параметрами – за середнім значенням випрямленої напруги навантаження в усталеному режимі та часом перехідного процесу за різних параметрів елементів. Припущення, що одночасно змінюється лише один з параметрів схеми, дає змогу за значеннями двох зазначених вище діагностичних параметрів визначити поточне відхилення параметра від номінального значення. Для випадку одночасної зміни декількох параметрів формується сфера безаварійної роботи, вихід за межі якої свідчить про появу несправності.

#### Список літератури:

1. Аллюминиевые электролитические конденсаторы. URL: [http://www.platan.ru/docs/library/ALCAP\\_EPCOS.pdf](http://www.platan.ru/docs/library/ALCAP_EPCOS.pdf) (дата звернення: 05.09.2018).
2. Голембиовский Ю.М., Пеньков Б.С. Аварийные режимы преобразовательной сети, построенной на базе инверторов напряжения. *Технічна електродинаміка. Тематичний випуск «Силова електроніка та енергоефективність»*. 2004. Ч. 3. С. 31–34.
3. Клюев В.В., Пархоменко П.П., Абрамчук В.Е. и др. Технические средства диагностирования: справочник / под общ. ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 1989. 672 с.
4. Бондаренко В.М., Редковец С.Н. Методы диагностики электрических цепей. К., 1985. 44 с.
5. Liivik L. Semiconductor Power Loss Reduction and Efficiency Improvement Techniques for the Galvanically Isolated Quasi-Z-Source DC-DC Converters. 2015. URL: <https://digi.lib.ttu.ee/i/?2519> (дата звернення: 05.09.2018).
6. Ивахненко А.Г. Индуктивные методы самоорганизации моделей сложных систем. К.: Наук. думка, 1975. 287 с.
7. Линник Ю.В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений. Изд. 2-е. М., 1962.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕИСПРАВНОСТЕЙ ЭЛЕМЕНТОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

*Обеспечение безаварийной работы оборудования с полупроводниковыми преобразователями требует решения задачи своевременной идентификации неисправностей элементов полупроводниковых преобразователей. Рассмотрен способ определения неисправностей DC-DC преобразователя с квази-импедансным звеном, вызванных выходом параметров элементов за допустимые пределы. Идентификация типа неисправности выполняется по критериям среднего значения на основе данных о выпрямленном напряжении нагрузки в установившемся режиме и времени переходного процесса, полученным при моделировании работы преобразователя в исправном режиме и при различных неисправностях. Рассмотрен вопрос определения области безаварийной работы при одновременном изменении нескольких параметров схемы.*

**Ключевые слова:** идентификация неисправностей, диагностика преобразователей, DC-DC преобразователь с квази-импедансным звеном.

### DEFINING MALFUNCTIONS OF SEMICONDUCTOR CONVERTERS' ELEMENTS

*Providing fault-free equipment with semiconductor converters operation requires solution of timely identification of semiconductor converters' elements malfunctions. The method for defining DC-DC converter's malfunctions with quasi-impedance link, which are caused by elements' parameters deviation out of the allowed limit. The method is based on converter's operation modeling in normal mode and during various malfunctions and further processing of received data. The malfunction type identification is performed on the basis of the average values based on the data on the rectified voltage in the steady state and the time of the transient process, obtained during the simulation of the converter operation in normal state and in case of various malfunction. The problem of defining fault-free operation area during simultaneous change of layout's parameters is reviewed.*

**Key words:** malfunctions identifications, diagnostics of converters, DC-DC converter with quasi-impedance link.