

УДК 621.3

Ідентифікація зміни ємності DC-DC перетворювача за допомогою вейвлетів

Телега^f В. В., ORCID [0000-0001-5865-6027](https://orcid.org/0000-0001-5865-6027)Лисюк^f І. Р., ORCID [0000-0001-9645-1583](https://orcid.org/0000-0001-9645-1583)Хижняк^s Т. А., к.т.н. доц., ORCID [0000-0002-5540-274X](https://orcid.org/0000-0002-5540-274X)

Кафедра промислової електроніки

Факультет електроніки

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» kpi.ua

Київ, Україна

DOI: [10.20535/2523-4455.2019.24.3.173424](https://doi.org/10.20535/2523-4455.2019.24.3.173424)

Анотація—У даній статті представлено результати аналізу часових діаграм струму понижуючого DC-DC перетворювача за допомогою вейвлет-перетворення Хаара. За допомогою моделі перетворювача, створеної в середовищі MATLAB® Simulink®, було досліджено вплив зміни ємності вихідного електролітичного конденсатора на вхідний струм перетворювача. Результати дослідження показали, що діапазон між максимальними та мінімальними значеннями вейвлет-коефіцієнтів на одному рівні розкладання може розглядатись як один з діагностичних показників, оскільки при відхиленні ємності від номінальної величини цей діапазон суттєво змінюється.

Бібл. 14, рис. 5, табл. 1.

Ключові слова — діагностика; перетворювачі; вейвлети Хаара.

I. ВСТУП

Підвищення вимог до продуктивності та експлуатаційних характеристик силових перетворювальних систем веде до зростання вимог до систем контролю їх стану. Системи контролю, які базуються на використанні зворотних зв'язків в підконтрольному об'єкті, здатні відпрацювати незначні відхилення параметрів від номінальних значень, але не завжди враховують аномальну поведінку, спровоковану несправністю компонентів. У такому випадку система може повністю вийти з ладу.

Виявлення несправностей активно здійснюється з використанням експертних систем, що базуються на знаннях про несправності, які виникали в об'єкті діагностування раніше, та способах їх виявлення і реагування на них.

Для ідентифікації несправностей напівпровідникового перетворювача можуть використовуватись часові діаграми струмів та напруг, зняті в контрольних точках схеми, оскільки їх форма зазнає суттєвих змін при виникненні аварійних ситуацій [1]–[5].

З метою зменшення обсягу даних, що застосовуються при діагностиці, та для очищення сигналу від шумових складових здійснюється попередня їх обробка, зокрема, з використанням спектральних перетворень [6]–[11]. Крім того, будь-які несправності перетворювачів, що впливають на форми струмів та напруг, впливають і на значення спектральних коефіцієнтів [12].

Для прискорення процесу діагностики реального перетворювача необхідно сформувати множину часових діаграм та вейвлет-спектрів для різних станів його елементів, передаварійних та аварійних режимів. З цією метою доцільно створити модель перетворювача з параметрами, максимально наближеними до реальних.

II. АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ І ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМ

Статистика відмов елементів силової електроніки показує, що на пасивні компоненти припадає більша частина несправностей, лівова частка яких обумовлена несправностями конденсаторів.

Робота [3] присвячена дослідженню впливу конденсатора на струми та напруги у понижуючому імпульсному регуляторі напруги. Дослідження починаються зі створення моделі перетворювача та отримання множини діаграм струму при зміні ємності конденсатора. Алгоритм ідентифікації відхилення значення ємності конденсатора від встановленого значення передбачає застосування до діаграм дискретного вейвлет-перетворення Добеші для виділення коефіцієнтів деталізації. До множини отриманих коефіцієнтів додатково застосовується низькочастотний фільтр для виділення корисної складової і придушення високочастотних складових, обумовлених широтно-імпульсним керуванням перетворювача. Результати показали, що різні зміни ємності краще ідентифікуються на різних рівнях розкладання; наприклад, швидкі зміни ємності краще відслідковувати за коефіцієнтами на третьому рівні.



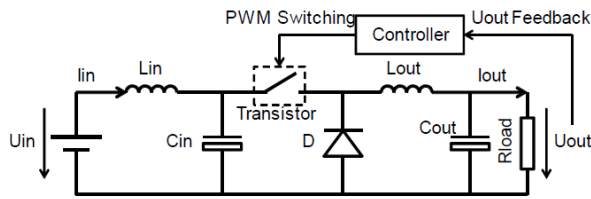


Рис. 1. Понижуючий DC-DC перетворювач.

Схожий підхід застосовано в роботі [4] — дворівневе дискретне вейвлет-перетворення застосовується для аналізу діаграми вихідної напруги багаторівневого інвертора. Знову застосовується вейвлет-перетворення Добеші, і про появу несправності судять за зміною в значеннях коефіцієнтів деталізації.

Вейвлет Добеші застосовується також в [13] як інструмент виявлення несправностей трифазного напівмостового інвертора.

В [2] як математичний базис застосовано вейвлет-перетворення з використанням функцій симетричного перетворення на кінцевих інтервалах [14], які мають інтервал визначення, не кратний 2, та дозволяють отримувати більше інформації про високочастотні складові сигналу.

Перетворення Уолша [5] також застосовується в задачах діагностики і завдяки своїй простоті дозволяє спростити перехід із часової в спектральну область, де зміни сигналів є більш виразними.

Виходячи з виконаного огляду, є доцільним розглянути застосування ще одного вейвлет-перетворення на базі функції Хаара [8], [10] як математичного апарату для аналізу діаграм струмів та напруг перетворювача та дослідити його можливості у виявленні змін, обумовлених певними несправностями в перетворювачі.

III. МЕТА І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою даної роботи є дослідження можливості ідентифікації зміни параметрів елементів понижуючого DC-DC перетворювача (рис. 1), розглянутого

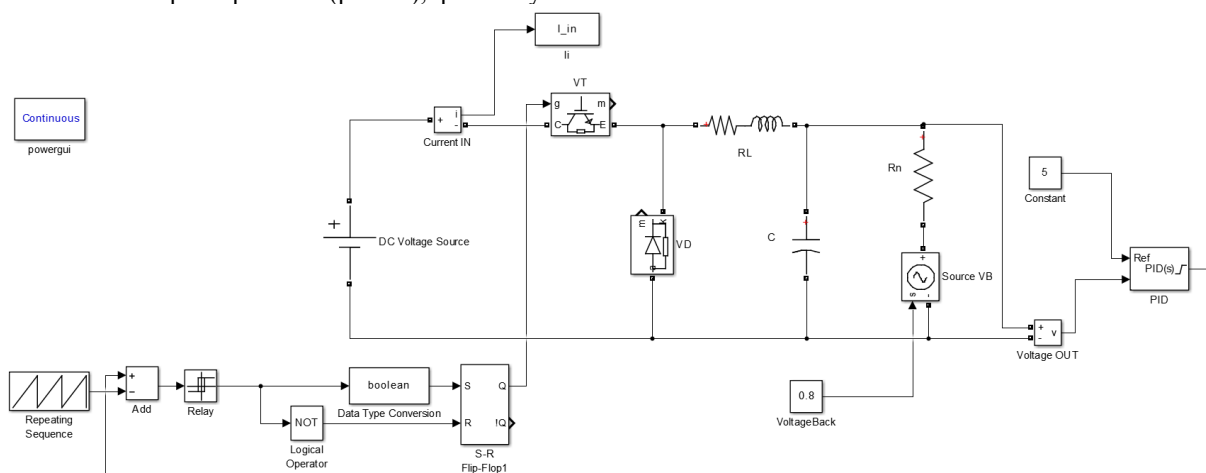


Рис. 2. Модель понижуючого DC-DC перетворювача.

в [3], за вейвлет-коефіцієнтами діаграм його вхідного струму.

Для досягнення поставленої мети в середовищі MATLAB® Simulink® було реалізовано модель понижуючого DC-DC перетворювача (рис. 2) та написане відповідне програмне забезпечення [13]. Вектор дискретних значень вхідного струму передається до блоку обробки даних безпосередньо з моделі.

ТАБЛИЦЯ 1 ЕЛЕКТРИЧНІ ПАРАМЕТРИ ЕЛЕМЕНТІВ МОДЕЛІ

Блоки моделі	Налаштування блоків
Джерело вхідної напруги DC Voltage Source	Амплітуда напруги: 20 В
Сильовий транзисторний ключ VT (IGBT)	Опір у відкритому стані: 0.1 Ом; внутрішня індуктивність: 0 Гн; пряма напруга: 1 В; опір снаберу: 100 кОм; внутрішня ємність: нескінченно велика.
Діод VD (Diode)	Опір у відкритому стані: 0.1 Ом; внутрішня індуктивність: 0 Гн; пряма напруга: 1 В; опір снаберу: 100 кОм; внутрішня ємність: нескінченно велика.
Дросель RL (Serial RLC Branch)	Опір: 0.3 Ом; індуктивність: 47 мГн.
Конденсатор C (Serial RLC Branch)	Номинальна ємність: 220 мкФ; при моделюванні змінюється в межах від 0 до 230 мкФ.
Резистивне навантаження Rn (Serial RLC Branch)	Опір: 100 Ом
Джерело опорної напруги на навантаженні Source VB (Controlled Voltage Source)	Амплітуда напруги: 5 В

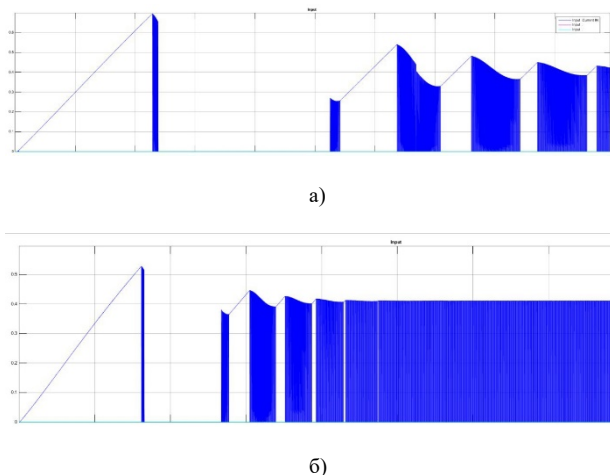


Рис. 3. Діаграми вхідного струму при номінальній ємності 220 мкФ (а) та в аварійному режимі при ємності 40 мкФ (б).

IV. ПОБУДОВА МОДЕЛІ

Основні електричні параметри моделі понижуючого DC-DC перетворювача вказані в табл. 1. Система керування реалізована за допомогою математичних блоків Simulink[®], на базі –пропорційно-інтегрально-диференційного (ПІД) регулятора, у якого диференціальна складова рівна нулю. Налаштування системи визначається бажаною вихідною напругою — в досліджуваній схемі вона задана рівною 5 В (блок “Constant” на рис. 2). Напруга вимірюється вольтметром “Voltage OUT” та передається на один із входів блоку “PID”, в якому власне і реалізовані всі алгоритми керування.

Для схеми рис. 1 використовують систему керування зі зворотним зв'язком, завдяки чому здійснюється компенсація будь-яких відхилень напруги на виході. Тому більш інформативною для відстеження змін буде діаграма струму на вході схеми, яка надалі і розглядається.

Вимірювання струму виконуються за допомогою блоку Current Measurement. Вектор дискретних значень струму отримується з блоку I_in (рис. 2) — кількість цих значень регулюється шляхом зміни таких параметрів як час моделювання (в дослідженнях обрано 0.1с) та децимація (значення встановлено рівним 900, тобто записується значення струму з кроком в дев'ятисот відліків). В результаті після кожного етапу моделювання при зміні ємності отримується вектор із 1112 дискретних значень струму на вході перетворювача.

V. АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ ДАНИХ

Дослідження перетворювача здійснювалось при зміні ємності вхідного конденсатора від 0 до 230 мкФ. Як правило, збільшення ємності не є характерною несправністю для конденсаторів, тому особлива увага приділена моделюванню аварійної ситуації при зменшенні ємності.

Аналіз діаграм вхідного струму DC-DC перетворювача показав, що при зміні ємності зовнішній вигляд діаграм в часовій області змінюється суттєво лише на етапі перехідного процесу, а при виході на усталений режим роботи зміни відстежити складніше (рис. 3). Враховуючи це, доцільним є перехід в спектральну область — це дозволить зменшити кількість значень, за якими буде здійснюватись подільша ідентифікація змін та виявити навіть незначні зміни в значеннях струму. Розрахунок спектрів виконується з використанням вейвлет-перетворення Хаара [8].

Для коректного застосування вейвлет-перетворення Хаара кількість дискретних відліків струму, які піддаються аналізу, має бути рівною 2^m . При цьому значення m буде відповідати кількості рівнів розкладання.

При застосуванні вейвлет-перетворення Хаара на кожному рівні розкладання формуються коефіцієнти двох типів — апроксимації (усереднення) $s_{i,j}$ та деталізації $d_{i,j}$:

$$s_{i,j} = \frac{y_{2i} + y_{2i+1}}{2}, \quad d_{i,j} = \frac{y_{2i} - y_{2i+1}}{2},$$

де i — номер відліку дискретної функції y на j -му рівні розкладання.

Загальна кількість коефіцієнтів кожного виду на рівні розкладання j визначається як $2^{(j-1)}$.

Загалом для m рівнів розкладання отримуємо $(2^m - 1)$ коефіцієнтів кожного виду, і всього $2(2^m - 1)$ коефіцієнтів у вейвлет-спектрі.

Подальші дослідження спрямовані на визначення того, які саме коефіцієнти (деталізації чи апроксимації) та на яких рівнях розкладання найбільше змінюються при зміні ємності.

Для аналізу обрано ті відліки в діаграмах, що відповідають усталеному режиму роботи. Розглядається діапазон в 1024 відліки, що відповідає 10 рівням розкладання.

На кожному рівні розкладання із застосуванням функціоналу середовища MATLAB[®] визначені максимальні та мінімальні значення вейвлет-коефіцієнтів для визначення діапазону, який відповідає певному значенню ємності.

На рис. 4 та рис. 5 показано діапазони зміни вейвлет-коефіцієнтів деталізації для сьомого та восьмого рівнів розкладання при зміні ємності — на цих рівнях зміни є найбільш суттєвими.

Як видно з рисунків, діапазон значень вейвлет-коефіцієнтів суттєво змінюється при відхиленні ємності від номінального значення (на рисунках показано пунктиром рівень вейвлет-коефіцієнтів, які відповідають цьому номінальному значенню), що дозволяє, аналізуючи ці зміни, виявляти факт зміни ємності в схемі.

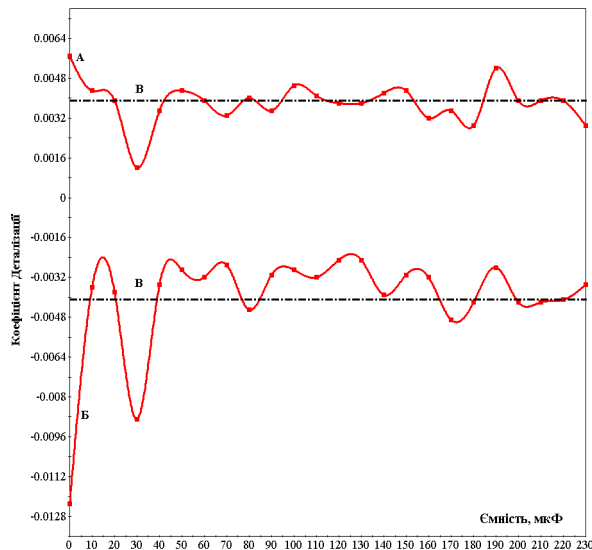


Рис. 4. Коефіцієнти деталізації при різних значеннях ємності на сьомому рівні розкладання. А — максимальні значення; Б — мінімальні значення; В — рівень значень при номінальній ємності.

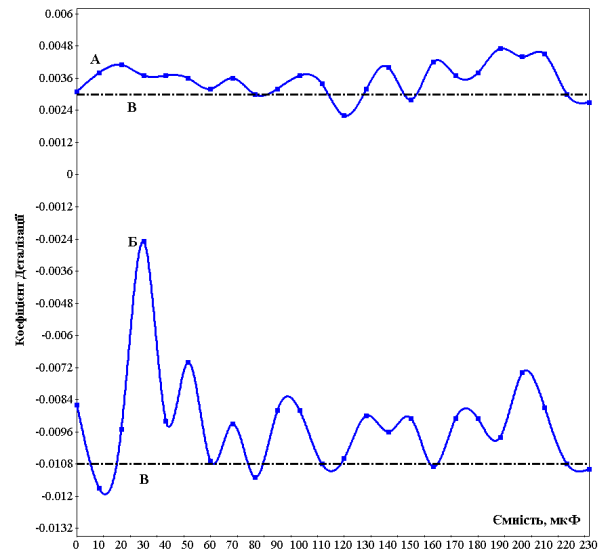


Рис. 5. Коефіцієнти деталізації при різних значеннях ємності на восьмому рівні розкладання. А — максимальні значення; Б — мінімальні значення; В — рівень значень при номінальній ємності.

ВИСНОВКИ

Аналіз існуючих методів ідентифікації несправностей в перетворювачах показав доцільність використання значень коефіцієнтів вейвлет-спектрів струмів та напруг перетворювача як параметрів, за якими виявляються зміни параметрів елементів. Актуальною є задача визначення, за якими саме коефіцієнтами здійснювати таку ідентифікацію.

Для формування бази даних значень вейвлет-коефіцієнтів, які відповідають різним несправностям в перетворювачі, доцільно створити його модель та дослідити, як змінюються значення струмів та напруг при зміні параметрів його елементів.

Аналіз отриманих значень вейвлет-коефіцієнтів показав, що коефіцієнти деталізації на рівнях з першого по четвертий практично не змінюються при зміні ємності — спостерігаються лише незначні відмінності, що радше є неточністю при аналізі графіків, аніж корисною інформацією. Натомість, для коефіцієнтів з п'ятого по восьмий рівень розкладання такі зміни більш виражені. Тому доцільно для ідентифікації застосовувати саме ці коефіцієнти.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] I. F. Domnin, O. V. Sevriukov, and M. R. Verzhanovskaia, "Lokalizatsia neispravnopei silovoi skhemy avtonomnoho invertora toka [Localization of power circuit faults autonomous current inverter]," in *Proceeding of Third International Scientific and Technical Conference of Unconventional Electromechanical and Electrical Systems*, 1997, vol. 2, pp. 547–552.
- [2] Y. S. Petergeria and T. A. Khyzhniak, "Doslidzhennia vplyvu parametriv elementiv kvazyrezonansnoho peretvoriuvacha na veivlet-spectr vyhidnoii napruhy [Investigation of the influence of the element parameters on output voltage wavelet-spectrum in quasi-resonant converter]," *Electron. Commun.*, vol. 5 (40), pp. 33–38, 2007.
- [3] J. Gao, Y. Ji, J. Bals, and R. Kennel, "Fault Detection of Power Electronic Circuit using Wavelet Analysis in Modelica," 2012, pp. 513–522, DOI: [10.3384/ecp12076513](https://doi.org/10.3384/ecp12076513).
- [4] V. Vinothkumar and D. C. Muniraj, "Fault Diagnosis in H-Bridge Multilevel Inverter Drive Using Wavelet Transforms," *Int. J. Adv. Res. Electr. Electron. Instrum. Eng.*, vol. 2, no. 4, pp. 1255–1262, 2013, URL: [www.ijareeie.com/upload/april/Fault Diagnosis in H-Bridge Multilevel Inverter Drive Using Wavelet Transforms.html](http://www.ijareeie.com/upload/april/Fault%20Diagnosis%20in%20H-Bridge%20Multilevel%20Inverter%20Drive%20Using%20Wavelet%20Transforms.html).
- [5] T. A. Khyzhniak, T. O. Tereshchenko, M. Y. Ovsienko, and L. H. Laikova, "Diahnostyka DC-DC peretvoriuvacha z kvazi-impedansnoiu lankoiu [Diagnostics of DC-DC Converters with a Quasi-Impedance Link]," *Microsystems, Electron. Acoust.*, vol. 23, no. 2, pp. 42–48, Apr. 2018, DOI: [10.20535/2523-4455.2018.23.2.133300](https://doi.org/10.20535/2523-4455.2018.23.2.133300).
- [6] N. Astaf'eva, "Wavelet analysis: basic theory and some applications," *Uspekhi Fiz. Nauk*, vol. 166(11), p. 1145, 2008, DOI: [10.3367/UFNr.0166.199611a.1145](https://doi.org/10.3367/UFNr.0166.199611a.1145).
- [7] L. A. Zalmanzon, *Preobrazovaniya Fur'e, Uolsha, Khaara i ikh primeneniye v upravlenii, svyazi i drugikh oblastiakh [Fourier, Walsh, and Haar Transforms and Their Applications in Control, Communication, and Other Fields]*, Nauka, Moscow, 1989, ISBN: 5020140945.
- [8] V. P. Dyakonov, *Veyvletyi. Ot teorii k praktike. [Wavelets. From theory to practice]*, SOLON-Pres. Moscow, 2010.
- [9] Y. S. Yamnenko, V. V. Tielieha, and K. S. Niemchinova, "Vikorystannia veivlet-peretvoren Haara ta OB pry analizi syhnaliv [The use of Haar and OB wavelets in the signals analysis]," *Electron. Commun.*, vol. 22, no. 4, pp. 51–58, Aug. 2017, DOI: [10.20535/2312-1807.2017.22.4.105272](https://doi.org/10.20535/2312-1807.2017.22.4.105272).
- [10] I. M. Dremine, O. V. Ivanov, and V. A. Nechitailo, "Veivletyi i ih ispolzovanie [Wavelets and their uses]," *Phys. Usp.*, vol. 171(5), pp. 465–501, 2001, DOI: [10.3367/UFNr.0171.200105a.0465](https://doi.org/10.3367/UFNr.0171.200105a.0465).
- [11] V. Y. Zhuykov and Y. S. Tereshchenko, T.A. Petergeria, *Preobrazovanie diskretnykh signalov na konechnykh intervalakh v orientirovannom bazise [Conversion of discrete signals at finite intervals in an oriented basis]*, Avers. 2004.
- [12] T. Khyzhniak and V. Teleha, "Spectralnie preobrazovaniia na konechnom intervale v zadachah diahnostiki [Spectral transformations on a finite interval in diagnostics]," in *NDT days 2017*, 2017, pp. 105–108, URL: <https://www.ndt.net/search/docs.php3?showForm=off&id=21631>.
- [13] J.-M. Cheon, C.-K. Kim, J.-M. Lee, S.-J. Kim, and S. Kwon, "A New Fault Detector for Three-Phase Half-Wave Converter Using Wavelet Transform," *IFAC Proc. Vol.*, vol. 36, no. 20, pp. 945–950, Sep. 2003, DOI: [10.1016/S1474-6670\(17\)34595-0](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)34595-0).
- [14] V. Y. Zhuykov, T. A. Tereshchenko, and Y. S. Peterheria, *Simetrichnoe preobrazovanie na konechnykh intervalakh [Symmetric transformation at finite intervals]*, Avers. Kyiv, 2000.



Надійшла до редакції 13 травня 2019 р.

УДК 621.3

Идентификация изменения емкости DC-DC преобразователя с помощью вейвлетов

Телега^f В. В., ORCID [0000-0001-5865-6027](https://orcid.org/0000-0001-5865-6027)

Лысюк^f И. Р., ORCID [0000-0001-9645-1583](https://orcid.org/0000-0001-9645-1583)

Хижняк^s Т. А., к.т.н. доц., ORCID [0000-0002-5540-274X](https://orcid.org/0000-0002-5540-274X)

Кафедра промышленной электроники

Факультет электроники

Национальный технический университет Украины

«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» kpi.ua

Киев, Украина

Аннотация—В данной статье представлены результаты анализа временных диаграмм тока понижающего DC-DC преобразователя с помощью вейвлет-преобразования Хаара. С помощью модели преобразователя, созданной в среде MATLAB® Simulink®, было исследовано влияние изменения емкости выходного электролитического конденсатора на входной ток преобразователя. Результаты исследования показали, что диапазон между максимальным и минимальным значениями вейвлет-коэффициентов на одном уровне разложения может рассматриваться как один из диагностических показателей, поскольку при отклонении емкости от номинальной величины этот диапазон существенно меняется.

Библ. 14, рис. 5, табл. 1.

Ключевые слова — диагностика; преобразователи; вейвлеты Хаара

UDC 621.3

Identification of the Capacitance Changes in DC-DC Converter Using Wavelets

V. V. Tielieha^f, ORCID [0000-0001-5865-6027](https://orcid.org/0000-0001-5865-6027)

I. R. Lysiuk^f, ORCID [0000-0001-9645-1583](https://orcid.org/0000-0001-9645-1583)

T. A. Khyzhniak^s, PhD Assoc.Prof., ORCID [0000-0002-5540-274X](https://orcid.org/0000-0002-5540-274X)

Power Electronics Department

Faculty of electronics

National technical university of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv polytechnic institute" kpi.ua

Kyiv, Ukraine

Abstract—Diagnostics of semiconductor converters is an important step in controlling their state and ensuring their efficiency. The efficiency of the converter depends on the each of its individual elements — failure of one of them leads to an accident. As show the researching, malfunction of the capacitors is the most common cause of the failure of the converter. So, control of its capacity it is an actual task.

Analysis of literature show then current and voltage in the converter are essentially depended from the parameters of its elements, so they can be used as diagnostics criteria. But character of this dependence is own for each converter. So, there is task of investigation the different type of semiconductor converters in case of parameters changing.

This work oriented to study the buck DC-DC converter in a case when the capacitance of the input capacitor changes in wild range. The model of the converter was created for this purpose in MATLAB® Simulink®. Input capacitance changes from 0 to 230 mkF in this model. As shown the modeling, the input capacitor most influences the input current, since the



changes in the output current and voltage are corrected by the control system (there is a stabilization of them). So, we consider this current as criteria for identification of the capacitance changes.

The set of current diagrams for different values of capacitance was created for analysis how this parameter influences the form of diagrams. This set is the base for the identification of the current state of converter. As show analysis of diagrams, they have big amount of discrete values and there are little differences between them, which very difficult to identify. So, discrete Haar wavelet-transformation was used as the mathematical instrument to reduce the amount of data and obtain information about changes.

There are more differences between wavelet coefficients for different capacitance then for current. Because the wavelet coefficients change according to changing of capacitance, they considered as the base for identification. In general, we considered 1024 discrete values of current for which there are 10 levels decomposition of wavelet transformation. The most amount of coefficients is on 10 level — 512 coefficients of approximation and 512 coefficients of detailing. On each next level the amount of coefficients decreases in 2 time.

The intervals between minimum and maximum coefficients for different capacitances were calculated for each decomposition level. Results show that this interval the most changes on 8 and 7 levels of decomposition. So, wavelet coefficients on these levels can be used for further diagnostics of converters. The fact that interval of coefficients for some time moment is out of bounds of interval for the nominal value of capacitance is the indicator that capacitance changes.

Ref. 14, fig. 5, tabl. 1.

Keywords — diagnostics; semiconductor converters; wavelet Haar