

УДК 621.31:621.383

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.3.2/44>**Макаренко В.В.**<https://orcid.org/0000-0003-1232-5198>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ЗВ'ЯЗАНИХ КОТУШОК ІНДУКТИВНОСТІ В DC/DC-ПЕРЕТВОРЮВАЧАХ ЕНЕРГІЇ

Широке використання перетворювачів постійної напруги в постійну в промисловості, системах резервування і перетворення енергії і в системах інтернету речей вимагає пошуку шляхів підвищення ефективності таких пристроїв. Одним з таких напрямків при побудові багатофазних та понижувально/підвищувальних DC/DC-перетворювачів є використання зв'язаних котушок індуктивності. Результати наведені в багатьох дослідженнях демонструють високу ефективність запропонованих рішень. Однак відсутні дані які б дозволили порівняти ефективність роботи перетворювачів зі зв'язаними та не зв'язаними котушками індуктивності. В статті наведені моделі DC/DC-перетворювачів створені в середовищі LTSpice. Розглянуті перетворювачі з двома котушками індуктивності: двофазний понижувальний та понижувально/підвищувальні SEPIC та ZETA. Дослідження залежності коефіцієнта корисної дії (ККД) від струму навантаження проведено при використанні зв'язаних та не зв'язаних котушок індуктивності. При використанні зв'язаних котушок отримані результати співпадають з даними наведеними в джерелах інформації. Результат моделювання роботи двофазного DC/DC-перетворювача показав, що ефект підвищення ККД спостерігається при зміні струму навантаження в діапазоні від 0,05 до 0,5 від максимального струму. При інших значеннях струму використанні зв'язаних котушок ефекту не дає. Результати моделювання перетворювачів SEPIC та ZETA в різних режимах показали що зв'язані котушки індуктивності дозволяють підвищити коефіцієнт корисної дії в обмеженому діапазоні струмів навантаження. Для перетворювачів SEPIC та ZETA використання зв'язаних котушок ефективно при роботі зі струмом навантаження до 0,2 від максимального струму навантаження перетворювача та при незначних змінах струму навантаження в процесі роботи. На основі проведених дослідів сформувано висновки та рекомендації по використанню зв'язаних котушок індуктивності в DC/DC-перетворювачах постійної напруги з двома котушками.

**Ключові слова:** DC/DC-перетворювач, зв'язані котушки, ефективність, коефіцієнт корисної дії, модель, моделювання.

**Постановка проблеми.** Проблема підвищення енергоефективності електронних пристроїв стає все більш актуальною на тлі дефіциту електроенергії. Особливо актуальними питання енергоефективності є для автономних систем Інтернету речей, які повинні працювати без заміни джерел живлення на протязі тривалого часу. При використанні DC/DC-перетворювачів для живлення потужних пристроїв це може дати вигоду в коефіцієнті корисної дії (ККД) до 14%, що забезпечує суттєву економію енергії, як показали в своїй

роботі Чон-Піл Лі, Хонньон Ча, Донгсул Шин, Кьонг-Джун Лі, Донг-Вук Ю та Джі-Юн Ю [1].

Джефф Фалін в своїх роботах [2, 3] показав, що для малопотужних і мініатюрних пристроїв до проблеми високої ефективності додається проблема мініатюризації. При використанні DC/DC-перетворювачів з двома котушками індуктивності, а саме двофазних понижувальних та понижувально/підвищувальних, побудованих за топологіями SEPIC та ZETA, можна підвищити їх ефективність використовуючи зв'язані котушки індуктивності [1-3]. Однак оцінити ефект

від використання таких котушок неможливо із-за відсутності в цих роботах даних про ефективність таких перетворювачів при відсутності зв'язку між котушками.

Питання доцільності використання зв'язаних котушок індуктивності, враховуючи їх більш складну конструкцію та більшу вартість, може бути вирішена шляхом порівняння ефективності перетворювачів зі зв'язаними та не зв'язаними котушками.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В своїй роботі Дідар Чіфтчі, Арда Акилдіз, Баті Ерен Ергюн, Мехмет Онур Гюльбахче [4] показали, що використання зв'язаних котушок дозволяє не тільки підвищити ККД перетворювача, а і знизити пульсації струму через котушки і зменшити рівень електромагнітних завад. Однак наведені дані тільки для перетворювача зі зв'язаними котушками. Вільмар Мартінес, Джун Імаока, Юкі Іто, Масайосі Ямамото та Казухіро Уметані [5] запропонували в своїй роботі підвищувальний перетворювач зі зв'язаними котушками, що забезпечує більш високий коефіцієнт перетворення у порівнянні з перетворювачем з котушками без зв'язку. Однак відсутня інформація про ефективність такого перетворювача.

Скьявон Г. Л., Агостіні Е. – молодший, Насіменто К. Б. [6] в своїй роботі запропонували перетворювач з великим коефіцієнтом перетворення зі зв'язаними котушками індуктивності. Однак ефективність перетворювача не вказана. У роботі Цзявей Ляна, Лян Вана, Мінфань Фу, Джунруй Ляна і Хаюю Вана [7] показано, що використання зв'язаних котушок у потужних перетворювачах може призвести до зниження максимальної щільності потужності, хоча і призводить до збільшення коефіцієнта перетворення напруги при високій ефективності перетворювача. Даних про ефективність перетворювача не наведені.

У роботі Буая Д.О. та Колар Дж.В. [8] показано, що при використанні зв'язаних котушок індуктивності у перетворювачах потужністю 10 кВт можуть бути зменшені габарити вихідного фільтру, але відсутні інформація про ефективність такого перетворювача.

Робота Венькан Хуана [9] присвячена питанням проектування зв'язаних котушок індуктивності і особливостям вимірювання їх параметрів і тому питання ефективності перетворювачів не розглядалися. В роботі Мохаммад Гаффарпура, Реза Ебрагімі, Хоссейн Мададі Коджабаді, Лючен Чанга та Хосеп М. Герреро [10] запропоновано модифікований DC/DC-перетворювач зі

зв'язаними котушками, який має високий коефіцієнт перетворення напруги при малих значеннях тривалості робочого циклу. Показано, що максимальний ККД такого перетворювача досягає значення 95,8%, однак відсутнє порівняння з випадком використання не зв'язаних котушок.

В дисертації Ван П. [11] наведені результати випробування двофазного перетворювача зі зв'язаними котушками для дата центрів. Наведені залежності ККД перетворювача при різній потужності у навантаженні при різних значеннях вхідної напруги. Показано, що максимальний ККД сягає 96,5%, однак аналогічних результатів при використанні окремих котушок не наведено.

Підвищувальний перетворювач для роботи з сонячними панелями, запропонований Скьявон Г. Л., Агостіні Е. – молодшим та Насіменто К. Б. [12], забезпечує при використанні зв'язаних котушок максимальний ККД 96,9%. Але відсутні порівняння з аналогічним перетворювачем без використання зв'язаних котушок.

Перетворювач, запропонований в роботі Лян Ченя, Дешенг Ронга та Сюаньцзін Суня [13], при використанні трьох зв'язаних котушок забезпечує максимальний ККД 96,2% при вихідній потужності 90 Вт. Дослідження такого перетворювача без зв'язаних котушок відсутнє.

Але у згаданих вище роботах не проводився порівняльний аналіз ефективності DC/DC-перетворювачів зі зв'язаними та не зв'язаними котушками індуктивності. Актуальною задачею є визначення чи завжди використання більш складних і більш дорогих зв'язаних котушок індуктивності виправдано і наскільки більшим стає ККД перетворювачів при їх використанні.

**Постановка завдання.** Метою статті є порівняння ефективності DC/DC-перетворювачів при використанні зв'язаних та не зв'язаних котушок індуктивності шляхом імітаційного моделювання.

Для досягнення мети необхідно вирішити наступні завдання:

1. На основі експериментальних даних, отриманих при дослідженні DC/DC-перетворювачів у [1-3] побудувати моделі DC/DC-перетворювачів реалізованих за різними топологіями.

2. Дослідити ефективність DC/DC-перетворювачів при зміні струму навантаження.

3. Дослідити діапазон зміни вхідної напруги при використанні зв'язаних та не зв'язаних котушок індуктивності.

4. Зробити висновки про доцільність використання зв'язаних котушок при різних умовах експлуатації DC/DC-перетворювачів.

**Виклад основного матеріалу.** Оскільки тільки в [1, с. 346] наведені порівняльні результати роботи понижувального двофазного перетворювача в режимі постійної тривалості робочого циклу, то ці результати можна використати для формування моделі перетворювача з еквівалентними параметрами. Це дозволить дослідити DC/DC-перетворювач в режимі з постійною вихідною напругою. В перетворювачі [1] при зміні потужності в навантаженні змінюється в широких межах вихідна напруга, що не характерно для нормального режиму роботи DC/DC-перетворювачів.

На рис. 1 наведена модель двофазного DC/DC-перетворювача, створена в середовищі LTspice. Для перевірки відповідності моделі параметрам перетворювача з роботи [1, с. 346] коефіцієнт зв'язку між котушками задано  $K = 0,927$ , відношення тривалості імпульсу керування до тривалості періоду (Dutycycle)  $D = t_i/T = 0,5$ , індуктивність котушок  $L_1 = L_2 = 2,93$  мГн, частота перемикачів – 20 кГц.

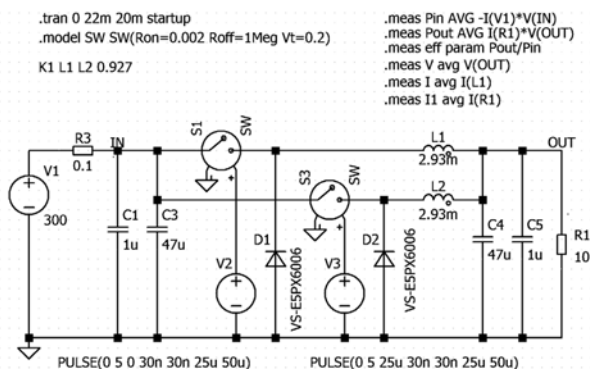


Рис. 1. Модель двофазного перетворювача

Для аналізу коефіцієнта корисної дії (ККД) використані директиви моделювання:

- .meas Pin AVG -I(V1)\*V(IN) – розрахунок споживаної від джерела живлення потужності;
- .meas Pout AVG I(R1)\*V(OUT) – розрахунок вихідної потужності;
- .meas eff param Pout/Pin – розрахунок ККД.

Для виводу результатів вимірювання вихідної напруги та струму використані директиви:

- .meas V avg V(OUT) – вимірювання середнього значення вихідної напруги;
- .meas I1 avg I(L1) – вимірювання середнього значення струму через котушку індуктивності;
- .meas I1 avg I(R1) – вимірювання середнього значення вихідного струму.

В результаті моделювання виміряна і обчислена інформація виводиться в файл SPICE Output Log:

pin: AVG(-I(V1)\*V(IN))=2593.97242847 FROM 0 TO 0.002

pout: AVG(I(R1)\*V(OUT))=2532.60799401 FROM 0 TO 0.002

eff: Pout/Pin=0.976343451542

v: AVG(V(OUT))=159.14164445 FROM 0 TO 0.002

i: AVG(I(L1))=7.95476183847 FROM 0 TO 0.002

i1: AVG(I(R1))=15.9141644385 FROM 0 TO 0.002

Порівнюючи отриманий в результаті моделювання ККД = 97,6% можна зробити висновок про відповідність параметрів моделі результатам отриманих в роботі [1]. Результат моделювання наведений на рис. 2.

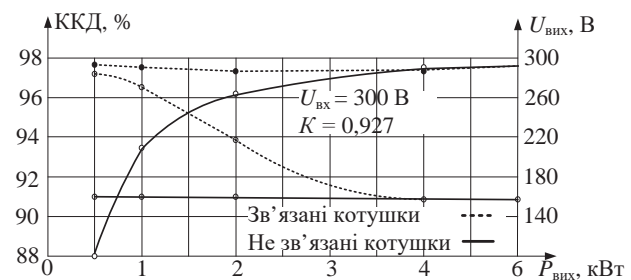


Рис. 2. Залежність ККД і напруги на виході двофазного DC/DC-перетворювача від вихідної потужності

Режим роботи при фіксованому значенні  $D = 0,5$  не характерний для роботи DC/DC-перетворювачів і тому всі експерименти в подальшому проводились при формуванні постійного значення вихідної напруги. Для досягнення такого результату змінювалась тривалість робочого циклу  $D$ .

Для порівняння ефективності DC/DC-перетворювача при використанні не зв'язаних котушок індуктивності коефіцієнт зв'язку в моделі встановлюється рівним нулю – K1 L1 L2 0.

Як випливає з рис. 2 при досягненні вихідної потужності  $\geq 4$  кВт вихідна напруга перетворювача зі зв'язаними і не зв'язаними котушками стає однаковою і ККД теж співпадає. Тобто при таких дослідах неможливо порівнювати ефективність перетворювача при використанні зв'язаних і не зв'язаних котушок.

Тому для порівняльного аналізу проведено дослідження залежності ККД від струму навантаження при постійній напрузі на виході перетворювача. Для дослідження використана модель наведена на рис. 1, а постійна напруга на виході підтримувалась зміною тривалості робочого циклу  $D$ . Результати аналізу наведені на рис. 3.

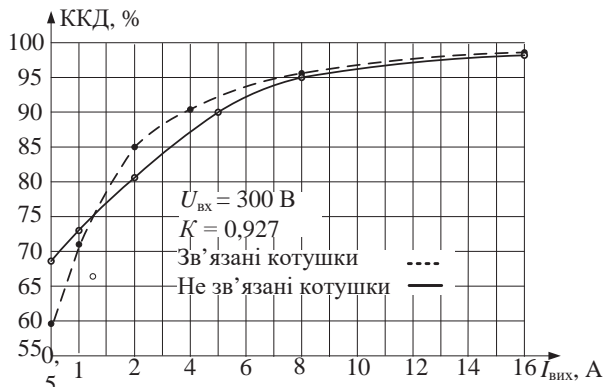


Рис. 3. Залежність ККД двофазного DC/DC-перетворювача від струму навантаження

З рис. 3 випливає, що при малих струмах навантаження (менше 1 А) суттєво більший ККД перетворювача з не зв'язаними котушками, а при струмах більше половини від максимального використання зв'язаних котушок не дає переваг в ККД перетворювача. В діапазоні вихідного струму від 0,1 до 0,5 від максимального ККД перетворювача зі зв'язаними котушками може перевищувати ККД перетворювача з не зв'язаними котушками на величину до 5%.

Дані наведені у [2, с. 23] дозволяють створити модель перетворювача SEPIC з еквівалентними параметрами. Для розрахунку параметрів котушки індуктивності використані еквівалентні [1] параметри вхідної напруги – 9 В в режимі підвищення напруги і 12 В в режимі пониження напруги. Частота комутації як і в [1] обрана рівною 1 МГц. Оскільки в [1] максимальний вихідний струм складав всього 0,3 А, то для аналізу у більш широкому діапазоні вихідних струмів задано значення максимального струму 5 А.

Розрахунок значення індуктивності котушки здійснюється за формулою [14, с. 4]:

$$L = \frac{U_{вх}^2 \cdot (U_{вих} - U_{вх})}{0,4 I_{вих,макс} \cdot U_{вих}^2 \cdot f_k} = \frac{9^2 \cdot (12 - 9)}{0,4 \cdot 5 \cdot 12^2 \cdot 10^6} = 8,43 \text{ мкГн.}$$

де  $U_{вх}$  – вхідна напруга перетворювача,  $U_{вих}$  – вихідна напруга перетворювача,  $I_{вих,макс}$  – максимальний вихідний струм,  $f_k$  – частота комутації силового ключа.

З урахуванням рекомендацій [2, с. 18] значення індуктивності зв'язаних котушок у два рази менше за розраховані для не зв'язаних котушок. Тому для реалізації моделі обрана котушка WE-DD SMT ShieldedCoupledInductor744874004 компанії Würth Elektronik з індуктивністю 4.7 мкГн (найближче до розрахованого значення). Опір постійному струму котушки 0,028 Ом, струм насичення 8 А,

допустима напруга 80 В, частота власного резонансу 20 МГц, коефіцієнт зв'язку 0,995 [15].

Модель перетворювача SEPIC наведена на рис. 4.

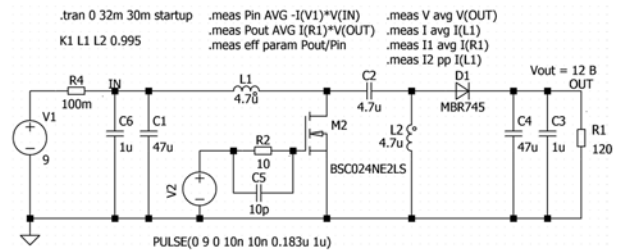


Рис. 4. Модель перетворювача SEPIC зі зв'язаними котушками індуктивності

Результати моделювання роботи перетворювача SEPIC в підвищувально/понижувальному режимах наведені на рис. 5.

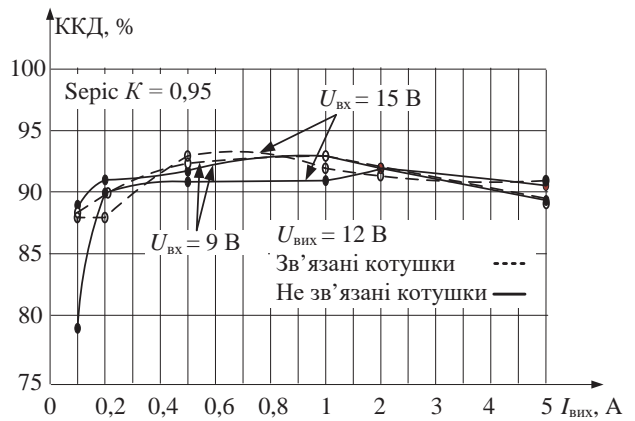


Рис. 5. Залежність ККД DC/DC-перетворювача SEPIC від струму навантаження

Як випливає з рис. 5, отримані результати в діапазоні зміни струму навантаження 0,1...0,4 А (при використанні зв'язаних котушок індуктивності) збігаються з результатами отриманими в [2]. Поза межами цього діапазону при роботі в підвищувальному режимі ККД перетворювача зі зв'язаними та не зв'язаними котушками змінюється однаково. При роботі в понижувальному режимі ККД перетворювача зі зв'язаними котушками перевищує ККД перетворювача з не зв'язаними котушками при зміні струму навантаження від 0,4 до 1,5 А максимум на 3%. При більших значеннях струму навантаження ККД збігається, а при струмі менше 0,2 А ККД перетворювача з не зв'язаними котушками стрімко спадає, в той час як при використанні зв'язаних котушок зменшення ККД набагато менше. Це дозволяє зробити висновок про те, що при роботі

в понижувальному режимі при малих струмах навантаження перетворювач зі зв'язаними котушками має значні переваги, а при максимальних струмах навантаження ці переваги зникають.

Модель понижувально/підвищувального перетворювача ZETA з параметрами еквівалентними параметрам перетворювача наведеного в [3] наведена на рис. 6. Оскільки частота комутації ключа у цьому перетворювачі була встановлена 200 кГц, то для моделі використана котушка індуктивності WE-DD SMT Shielded Coupled Inductor 7448709100 компанії Würth Elektronik з індуктивністю 10 мкГн (найближче доступне значення до розрахованого значення). Опір постійному струму котушки 0,033 Ом, струм насичення 8 А, допустима напруга 80 В, частота власного резонансу 20 МГц, коефіцієнт зв'язку 0,995 [15].

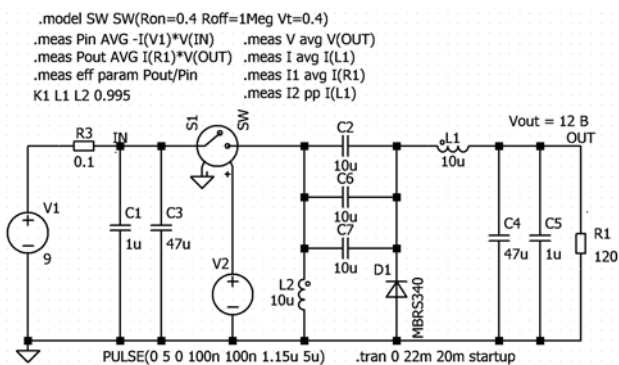


Рис. 6. Модель перетворювача ZETA зі зв'язаними котушками індуктивності

Результати моделювання роботи перетворювача ZETA в понижувально/підвищувальному режимі наведені на рис. 7.

Отримані результати моделювання при струмі навантаження до 1 А дуже близькі до результатів наведених в [3]. З рис. 7 випливає, що при роботі в понижувальному режимі, при струмах до 0,2 від максимального значення, ККД перетворювача зі зв'язаними котушками не тільки більше ККД перетворювача без зв'язаних котушок, але і практично не змінюється при зміні струму навантаження. При роботі в підвищувальному режимі, при струмі навантаження до 0,2 від максимального, використання зв'язаних котушок дозволяє

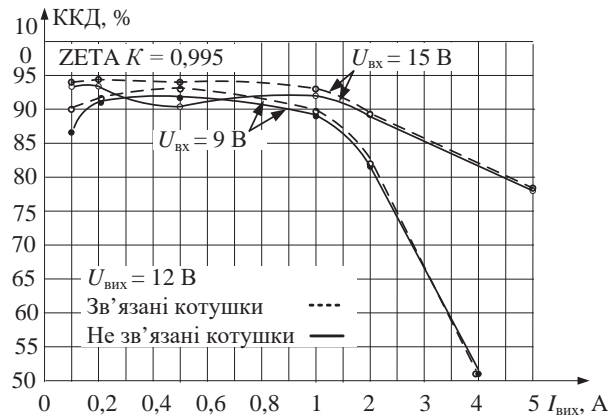


Рис. 7. Залежність ККД DC/DC-перетворювача ZETA від струму навантаження

збільшити ККД не більше ніж на 1%. При струмі більше ніж 0,2 від максимального, ККД перетворювачів зі зв'язаними та не зв'язаними котушками практично співпадають.

**Висновки.** З отриманих при моделюванні результатів випливає, що ефект підвищення ККД при використанні зв'язаних котушок індуктивності в DC/DC-перетворювачах з двома котушками індуктивності проявляється у досить вузькому діапазоні зміни струму навантаження. Якщо перетворювач працює в широкому діапазоні зміни струму навантаження, то використання зв'язаних котушок може бути недоцільним. При роботі зі сталим навантаженням підвищення ККД перетворювача зі зв'язаними котушками може бути суттєво більшим у порівнянні з використанням не зв'язаних котушок. При побудові малопотужних перетворювачів в межах 100...200 Вт можна використати зв'язані котушки що випускаються провідними виробниками. А при більших значеннях вихідної потужності необхідно конструювати котушки, що призводить до збільшення витрат та часу на проектування. Тому доцільно при виборі конструкції котушок індуктивності провести моделювання потрібного перетворювача перш ніж здійснювати вибір.

Додатковою перевагою використання зв'язаних котушок є збільшення коефіцієнта перетворення напруги. Однак для кожного типу перетворювача ці значення суттєво відрізняються.

#### Список літератури:

1. Jong-Pil Lee, Honnyong Cha, Dongsul Shin, Kyoung-Jun Lee, Dong-Wook Yoo, and Ji-Yoon Yoo. Analysis and Design of Coupled Inductors for Two-Phase Interleaved DC-DC Converters. *Journal of Power Electronics*, 2013, V. 13, № 3. P. 339-347.
2. Jeff Falin. Designing DC/DC converters based on SEPIC topology. *Analog Applications Journal*. 2008, № 4. P. 18-23.
3. Jeff Falin. Designing DC/DC converters based on ZETA topology. *Analog Applications Journal*. 2010, № 2. P. 16-21.

4. Didar Ciftci, Arda Akyildiz, Bati Eren Ergun, Mehmet Onur Gulbahce. A Comparative Study for Interleaved Boost Converter with Coupled/Uncoupled Inductors. *2023 14th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*. 2023. Bursa, Turkiye. DOI: 10.1109/ELECO60389.2023.10415927.
5. Wilmar Martinez, Jun Imaoka, Yuki Itoh, Masayoshi Yamamoto and Kazuhiro Umetani. Analysis of Coupled-Inductor Configuration for an Interleaved High Step-Up Converter. *9th International Conference on Power Electronics - ECCE Asia: "Green World with Power Electronics", ICPE 2015-ECCE Asia*. 2015. P. 2241-2248. DOI: 10.1109/ICPE.2015.7168088.
6. Schiavon, G.L.; Agostini, E., Jr.; Nascimento, C.B. Quasi-Resonant Single-Switch High-Voltage-Gain DC-DC Converter with Coupled Inductor and Voltage Multiplier Cell. *Energies* 2023, 16. P. 59-72. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16093874>.
7. Jiawei Liang, Liang Wang, Minfan Fu, Junrui Liang, and Haoyu Wang. Overview of Voltage Regulator Modules in 48 V Bus-Based Data Center Power Systems. *CPSS transactions on power electronics and applications*. 2022. V. 7, № 3. P. 283-299. DOI: 10.24295/CPSSPEA.2022.00026.
8. Boillat D. O., Kolar J. W. Modeling and Experimental Analysis of a Coupling Inductor Employed in a High Performance AC Power. *Proceedings of the International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA 2012)*, Nagasaki, Japan. P. 1-18. DOI: 10.1109/ICRERA.2012.6477401.
9. Wenkang Huang. High-density multiphase DC-DC converter with integrated coupled inductor. *Dissertation Doctor of Philosophy in the field of Electrical Engineering*. Northeastern University Boston, Massachusetts, 2017. 144 P. URL: <https://repository.library.northeastern.edu/files/neu:cj82q865p/fulltext.pdf> (дата звернення 23.03.2026).
10. Mohammad Ghaffarpour, Reza Ebrahimi, Hossein Madadi Kojabadi, Liuchen Chang, Josep M. Guerrero. Novel high voltage gain DC-DC converter with dynamic analysis. *IET Power Electronics*. 2021. P. 562-583. DOI: 10.1049/pel2.12028
11. Wang P. High-Efficiency and High-Power-Density DC/DC Converters for Data Center Application. Technical University of Denmark. 2024. 197 P. URL: <https://orbit.dtu.dk/en/publications/c02c1591-e676-4b53-a446-76b6b40625c7> (дата звернення 23.03.2026).
12. Schiavon, G.L.; Agostini, E., Jr.; Nascimento, C.B. Quasi-Resonant Single-Switch High-Voltage-Gain DC-DC Converter with Coupled Inductor and Voltage Multiplier Cell. *Energies*. 2023, 16, 3874. P. 1-14. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16093874>.
13. Liang Chen, Desheng Rong, Xuanjin Sun. A Family of High Step-Up Soft-Switching Integrated Sepic Converter With Y-Source Coupled Inductor. *IEEE Access*. 2023. V. 11. P. 111752 – 111764. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3322459.
14. Brigitte Hauke. Basic Calculation of a Boost Converter's Power Stage. URL: [https://www.ti.com/lit/an/slva372d/slva372d.pdf?ts=1748658582286&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F](https://www.ti.com/lit/an/slva372d/slva372d.pdf?ts=1748658582286&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F) (дата звернення 23.03.2026).
15. WE-DD SMT Shielded Coupled Inductor. URL: <https://www.we-online.com/en/components/products/WE-DD#744877220> (дата звернення 23.03.2026).

#### **Makarenko V.V. EFFICIENCY ANALYSIS OF THE USE OF COUPLED INDUCTIVE COILS IN DC/DC POWER CONVERTERS**

*The widespread use of DC-to-DC converters in industry, energy backup and conversion systems, and Internet of Things systems requires finding ways to increase the efficiency of such devices. One of these directions in the construction of multiphase and step-down/step-up DC/DC converters is the use of coupled inductors. The results given in many studies demonstrate the high efficiency of the proposed solutions. However, there is no data that would allow us to compare the efficiency of converters with coupled and uncoupled inductors. The models of DC/DC converters presented in the article were created in the LTSpice environment. Considered converters with two inductors: two-phase buck and buck/boost SEPIC and ZETA. The study of the dependence of the efficiency factor (Efficiency) on the load current was carried out using coupled and uncoupled inductors. When using connected coils, the obtained results coincide with the data given in the sources of information. The result of the simulation of the operation of the two-phase DC/DC converter showed that the effect of increasing the efficiency is observed when the load current changes in the range from 0.05 to 0.5 of the maximum current. At other current values, the use of connected coils has no effect. The simulation results of SEPIC and ZETA converters in different modes showed that connected inductors allow to increase the efficiency in a limited range of load currents. For SEPIC and ZETA converters, the use of coupled coils is effective when operating with a load current up to 0.2 of the maximum load current of the converter and with minor changes in the load current during operation. On the basis of the conducted experiments, conclusions and recommendations on the use of coupled inductance coils in DC/DC converters of constant voltage with two coils were formed.*

**Keywords:** DC/DC converter, coupled coils, efficiency, efficiency factor, model, simulation.

Дата першого надходження статті до видання: 23.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 20.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026