

УДК 621.314.26:629.331-83

ДВОНАПРЯМЛЕНІ DC-DC ПЕРЕТВОРЮВАЧІ: ОСОБЛИВОСТІ ТА ПЕРСПЕКТИВИ

Ярута Віктор Олексійович, канд. техн. наук, доцент каф. АЕ,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет,
e-mail: victor_yaruta@ukr.net, ORCID ID 0000-0002-4410-2792

Розвиток електротранспорту є надзвичайно важливим для зниження викидів парникових газів та переходу до екологічно чистої енергетики. Нині з цією метою активно створюються електромобілі таких основних типів [1]: гібридні (оснащені двигуном внутрішнього згорання та електродвигуном), акумуляторні (мають лише електродвигун, що живиться від акумулятора через інвертор) та на паливних елементах (найчастіше – водневих). Водночас у сучасних електромобілях для забезпечення високої щільності енергії та потужності в усіх режимах роботи силової установки дедалі частіше застосовуються гібридні системи накопичення енергії [1], що поєднують акумуляторні батареї, суперконденсатори та паливні елементи. Для узгодження різних рівнів напруги та забезпечення ефективного розподілу енергії в таких системах використовуються двонапрямлені DC-DC перетворювачі.

З метою виявлення перспективних напрямків вдосконалення проаналізуємо їх основні схемні рішення.

Традиційно DC-DC перетворювачі поділяються на дві групи: неізолювані та ізолювані. При цьому еволюція та розмаїття існуючих топологій зумовлені необхідністю подолання технічних недосконалостей, що природно впливають з їхніх базових схемних рішень.

Так, неізолювані перетворювачі [2] не забезпечують гальванічної розв'язки, проте відрізняються компактністю, меншою масою та простотою конструкції через відсутність трансформатора. До цієї групи належать: знижувальні (Buck) та підвищувальні (Boost) топології, які створюють розривний вхідний струм; знижувально-підвищувальні (Buck-Boost) і топології Чука (Cuk), що генерують інвертовану напругу, причому останні мають більшу кількість компонентів порівняно з базовими схемами; SEPIC / Zeta, які мають складну конструкцію та меншу ефективність; багатофазні (Interleaved), що вимагають більшої кількості компонентів та складніших алгоритмів керування; трирівневі (Three-Level), які забезпечують ККД на рівні 89–94 %, проте мають складну схему балансування напруг; каскадні (Cascaded) зі збільшеними габаритами та зниженим загальним ККД; й топології на комутованих конденсаторах (Switched-Capacitor), що створюють високе навантаження на ключі, мають обмежену здатність до масштабування та потребують складного керування заряджанням.

Ізолювані перетворювачі [3] забезпечують гальванічну розв'язку та безпеку завдяки використанню високочастотного трансформатора, що також

дає змогу досягти великого діапазону перетворення напруги. До них належать перетворювачі: зворотного ходу (Flyback), які створюють значні сплески напруги та велике навантаження на ключі, тому придатні лише для перетворення малих потужностей; двотактні (Push-Pull), що потребують точного керування ключами для запобігання можливому насиченню осердя трансформатора; прямоходові (Forward), які мають обмежений робочий цикл та потребують встановлення схем розмагнічування; подвійного активного мосту (Dual Active Bridge, DAB), що можуть працювати в режимі перемикання за нульової напруги (Zero Voltage Switching, ZVS) при високих навантаженнях, але мають складну систему керування вісьмома ключами та виходять з режиму ZVS на малих навантаженнях; подвійного напівмоста (Dual Half-Bridge, DHB), які створюють високе навантаження на ключі та потребують габаритних і дорогих вхідних конденсаторів; резонансні (Resonant) з високим ККД, яким, однак, притаманні асиметрія характеристик, складність розроблення магнітних компонентів і резонансного контуру, а також складне частотне керування.

Сучасні тенденції розвитку топологій полягають у переході до інтегрованих багатопортових систем [2, 4], що дозволяють підключати різні джерела постійного струму до єдиного магнітного осердя або до єдиної шини через спільні силові ключі. Крім того, спостерігається тренд на впровадження одноступеневого перетворення [4] та використання напівпровідників із широкою забороненою зоною на базі SiC і GaN [5-7], що в сукупності забезпечує мінімізацію масогабаритних показників.

При цьому виділити єдину універсальну топологію неможливо [1], оскільки її вибір диктується техніко-економічними параметрами конкретного класу транспортного засобу. Так, у сегменті мікроелектромобілів [5] та м'яких гібридів [4] визначальним критерієм є собівартість, тому тут домінують базові неізольовані двонапрявлені топології [6], тоді як інші схемні рішення визнано економічно недоцільними.

У сегменті легкових автомобілів преміумкласу, з огляду на перехід до архітектури 800 В та необхідність гарантування безпеки, найбільш виправданим є застосування ізольованих топологій [4, 5, 8], зокрема резонансних та подвійного активного мосту.

Водночас для вантажних автомобілів та автобусів перспективними є багатофазні та багаторівневі архітектури [5, 9], які дозволяють рівномірно розподіляти значні струмові та теплові навантаження, що виникають унаслідок використання ультрашвидких зарядних платформ з напругою 1500 В та систем рекуперації.

Висновки

Отже, вибір топології двонапрявленого DC-DC перетворювача є компромісом між вартістю, масою, габаритами та безпекою. Для бюджетного сегмента з низьковольтним живленням оптимальними залишаються неізольовані схеми, тоді як розвиток високовольтних платформ (800–1500 В) вимагає переходу до ізольованих резонансних, багатофазних та багаторівневих

архітектур на базі сучасних напівпровідників із широкою забороненою зоною на базі SiC та GaN.

Література

1. **Tong Y. et al.** Bidirectional DC-DC Converter Topologies for Hybrid Energy Storage Systems in Electric Vehicles: A Comprehensive Review. *Energies*. 2025. Vol. 18, no. 9. P. 1–29. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/18/9/2312> (дата звернення: 04.03.2026).
2. **Reddy A. N. et al.** State-of-the-art DC–DC converters for electric mobility and renewable integration: trends, challenges, and future directions. *Discover Applied Sciences*. 2026. Vol. 8, no. 2. P. 1–25. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42452-025-08120-9>.
3. **Wang Z. et al.** Overview of Isolated Bidirectional DC–DC Converter Topology and Switching Strategies for Electric Vehicle Applications. *Energies*. 2024. Vol. 17, no. 10. P. 1–32. DOI: <https://doi.org/10.3390/en17102434>.
4. **Kotb R. et al.** Power Electronics Converters for Electric Vehicle Auxiliaries: State of the Art and Future Trends. *Energies*. 2023. Vol. 16, no. 4. P. 1–42. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16041753>.
5. **Naseem H., Seok J.-K.** Recent Advances in Bidirectional Converters and Regenerative Braking Systems in Electric Vehicles. *Actuators*. 2025. Vol. 14, no. 7. P. 1–32. DOI: <https://doi.org/10.3390/act14070347>.
6. **Мрмије Л. Ј., Фрејре Г. Ф.** SiC and GaN Device-Based Power Converters for High-Efficiency Drive Applications. *National Journal of Electric Drives and Control Systems*. 2025. Vol. 1, no. 3. P. 1–9.
7. **Roos G.** APEC 2025 delivers big advances in power devices. *Electronic Products - EDN*. 2025. 21 Mar. URL: <https://www.edn.com/apec-2025-delivers-big-advances-in-power-devices/> (дата звернення: 10.01.2026).
8. **Ni L., Patterson D. J., Hudgins J. L.** High Power Current Sensorless Bidirectional 16-Phase Interleaved DC-DC Converter for Hybrid Vehicle Application. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2012. Vol. 27, no. 3. P. 1141–1151. URL: <https://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1181&context=electricalengineeringfacpub> (дата звернення: 04.03.2026).