

Огляд основних топологій багаторівневих каскадних інверторів напруги

Терещенко Т. О., д.т.н. проф., ORCID [0000-0003-4009-2854](https://orcid.org/0000-0003-4009-2854)

e-mail tereshchenko50.t.a@gmail.com

Ямненко Ю. С., д.т.н. проф., ORCID [0000-0002-9796-6420](https://orcid.org/0000-0002-9796-6420)

e-mail petergerya@yahoo.com

Федін І. С., ORCID [0000-0003-0264-5067](https://orcid.org/0000-0003-0264-5067)

e-mail igorfedin2@gmail.com

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» kpi.ua

Київ, Україна

Реферат—Проведено огляд основних топологій багаторівневих каскадних інверторів напруги, визначені їх основні переваги та недоліки. Запропоновано класифікацію схем за ознаками типу модуляції, структури силової частини та керування. У результаті проведеного огляду визначено два основних методи керування багаторівневими каскадними інверторами, за допомогою ШІМ та АШІМ, три основних типи схем, дві структури модулів та три варіанти додавання напруги в навантаженні, відповідно до яких створено класифікацію каскадних багаторівневих інверторів напруги. Більш докладно розглянуті принципи побудови та функціонування схем побудованих за топологіями на базі з'єднання Н-модулів з однаковими коефіцієнтами трансформації, з'єднання Н-модулів з напругами джерел, що визначаються ступенями m , з'єднання Н-модулів з коефіцієнтами трансформації (напругами джерел), що визначаються розкладанням ступінчастої функції в ортогональні ряди та багаторівневого інвертора на базі з'єднання модулів В-Н типу з фазосувним трансформатором у вхідному колі. У результаті проведеного огляду були визначені переваги та недоліки кожної зі схем, що визначають області їх застосування.

Підсумовуючи проведений огляд визначено, що на сучасному етапі тривають дослідження в напрямку пошуку ефективних схемотехнічних рішень для багаторівневих інверторів каскадного (модульного) типу, та оптимізації алгоритмів та систем керування для підвищення коефіцієнту використання вентилів, зменшення коефіцієнту нелінійних спотворень, навантаження на вентилі та досягнення максимально можливої вихідної потужності.

Бібл. 31, рис.5

Ключові слова — багаторівневий інвертор напруги; каскадна схема; ізольовані джерела напруги; вихідні трансформатори; вхідний фазосувний трансформатор.

I. ВСТУП

З розвитком силової електроніки та появою нових топологій електронних схем з'явилась можливість роботи з напругами, рівні яких суттєво перевищують типові для напівпровідникових схем. Схеми багаторівневих інверторів (БІ) забезпечують достатньо високий рівень вихідної напруги за рахунок послідовного з'єднання інверторних модулів [1-9]. На сьогоднішній день схеми багаторівневих інверторів успішно застосовуються в якості високовольтних перетворювачів електричної енергії.

Велика кількість та різноманітність схемних рішень та систем керування, галузей застосування вимагає проведення аналізу топологій схем багаторівневих інверторів, класифікації, а також виявлення їх переваг та недоліків.

II. ПЕРЕВАГИ КАСКАДНИХ БАГАТОРІВНЕВИХ ІНВЕРТОРІВ

Питанням аналізу схем інверторів присвячені роботи [1,15,17-20, 27-31].

Таблиця 1

Застосування	Переваги каскадних БІ
Статичні компенсатори реактивної енергії, складовими яких є трифазні інвертори	Більш широкі межі регулювання коефіцієнту потужності в лініях електропередачі порівняно з традиційними схемами [3,10]
Перетворювачі частоти для електроприводу	Можливість зміни частоти вхідної напруги у заданих межах [9,11-13]
Системи живлення з відновлювальними джерелами електроенергії та забезпеченням споживачів змінною напругою 220 В, 50 Гц	Зміна напруги в широкому діапазоні; менші значення коефіцієнтів нелінійних спотворень (КНС) [14,15,20]

Серед існуючих топологій багаторівневих інверторів особливо перспективним для використання у високовольтних системах є каскадні багаторівневі інвертори, топологія яких базується на послідовному з'єднанні декількох однофазних інверторів (інверторних модулів) [1-9,16-17]. Перевагами модульної побудови є однотипність використовуваних модулів



уніфікованого ряду та простота будови кожного модуля; висока надійність за рахунок можливості резервування; міжмодульний розподіл вхідної напруги, струму, потужності для забезпечення рівномірного навантаження силових ключів перетворювача. Все це визначає

модульність як один з найбільш перспективних напрямків розвитку топологій багаторівневих інверторів.

В табл. 1 наведено переваги каскадних багаторівневих інверторів для різних застосувань.

Метою даної статті є проведення огляду основних топологій багаторівневих каскадних інверторів напруги, їх порівняння та створення класифікації з метою виявлення перспективних шляхів розвитку.

III. КЛАСИФІКАЦІЯ ТА ОГЛЯД ОСНОВНИХ СХЕМ БАГАТОРІВНЕВИХ ІНВЕРТОРІВ

На базі огляду каскадних БРІ напруги пропонується наступна їх класифікація наведена на рис. 1.

За типом схеми модулів можна виділити три основні варіанти виконання: з окремими ізольованими джерелами сталої напруги [17], одним джерелом та

вихідними трансформаторами [16] та з використанням вхідного фазозсувного трансформатора, кількість вторинних обмоток якого для трифазної системи визначається кількістю інверторних модулів однієї фази, помноженою на 3 [1,22,23].

За схемотехнікою силової частини окремого модуля розрізняють модулі, побудовані за мостовою схемою (модулі Н типу) [1,14] та модулі В+Н типу, що містять послідовно з'єднані випрямляч та мостовий інвертор [1,22,23]. Відомий також підхід використання напівмостової схеми замість мостової [24].

За типом схеми додавання напруг модулів у загальному колі. Вага складової окремого модуля у вихідній напрузі БРІ визначається напругами окремих джерел живлення модулів або коефіцієнтами трансформації вихідних трансформаторів. При цьому можливі наступні варіанти: 1) з однаковими коефіцієнтами трансформації (напругами джерел) [1,24]; 2) з коефіцієнтами трансформації (напругами джерел), що визначаються ступенями деякого заданого простого числа m (наприклад, $m=3$) [13]; 3) з коефіцієнтами трансформації (напругами джерел), що визначаються коефіцієнтами розкладання ступінчастої функції заданої вихідної напруги БРІ у ортогональні ряди (Уолша, ОБ, Хартлі, узагальненого ОБ) [25,26,31].

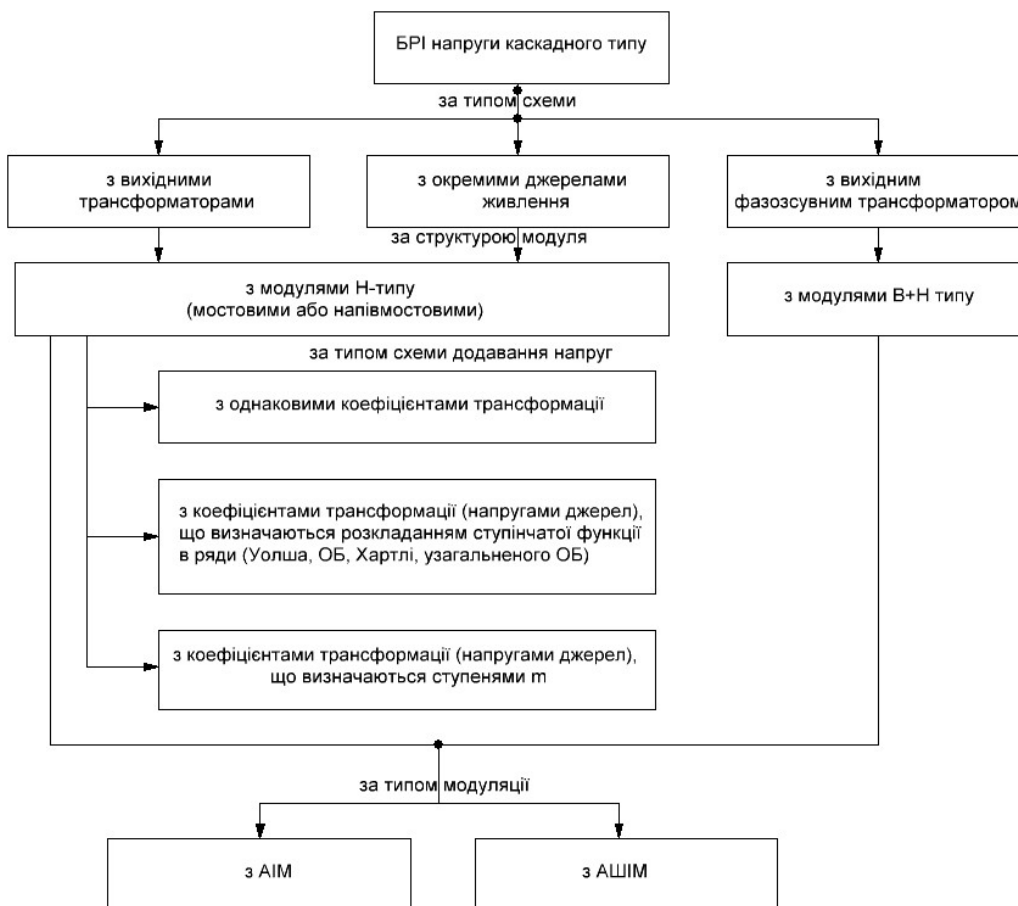


Рис. 1 Класифікація каскадних БРІ напруги

За типом модуляції синусоїдального сигналу БРІ поділяють на інвертори з амплітудно-імпульсною модуляцією (АІМ) [1-3,8-9] та амплітудно-широтно-імпульсною модуляцією (АШІМ) [11,21]. Інвертори з АІМ формують східчасту напругу із сталою або варійованою тривалістю сходинки, інвертори з АШІМ формують ШІМ-сигнал для кожної сходинки. Останні дозволяють розширити діапазон регулювання вихідних параметрів та підвищити ТНД, але характеризуються більш складною структурою системи керування.

Наведена класифікація не претендує на повноту, оскільки може бути доповнена іншими ознаками поділу, як-то галузі застосування, способи керування частотою, тощо, однак вона досить повно охоплює існуючі на сьогодні структури БРІ каскадного типу.

Для перших двох з розглянутих типів схем (з вихідними трансформаторами та з ізольованими джерелами напруги) можлива реалізація усіх трьох розглянутих способів додавання напруг модулів у загальному колі. Для третього типу схем (з фазосувним трансформатором у вхідному колі) застосовується лише перший спосіб додавання напруг (з однаковими коефіцієнтами трансформації (напругами джерел)). Між тим, дослідження в напрямку реалізації інших способів додавання напруг може виявитися перспективним.

Розглянемо схематехніку розглянутих типів БРІ.

БРІ на базі з'єднання модулів з однаковими коефіцієнтами трансформації (напругами джерел). На рис.2,а зображено схему каскадного з'єднання Н-модулів мостового типу у складі БРІ з джерелами

живлення однакової постійної напруги [1]. Кожне джерело живлення є відокремленим і приєднується до окремої мостової структури. На виході кожного інвертора формуються три рівні вихідної напруги ($+U_{dc}$, 0 , $-U_{dc}$) навантаженні при різних комбінаціях замикання ключів (наприклад, S_{11} , S_{12} , S_{13} , S_{14} для першого модуля). Для отримання рівня $+U_{dc}$ ключі S_{11} і S_{14} мають бути замкненими; отримати рівень $-U_{dc}$ можна замиканням ключів S_{12} і S_{13} . Вмиканням S_{11} і S_{12} або S_{13} і S_{14} отримується вихідна напруга нульового рівня.

Вихідна змінна напруга U визначається сумою напруг окремих інверторних модулів. Кількість можливих вихідних рівнів k для каскадного інвертора знаходиться як $k=2s+1$, де s – кількість окремих джерел живлення [1]. На рис.2,б наведено діаграми роботи 11-рівневого інвертора з $s=5$ відокремленими джерелами живленнями і 5 Н-модулями, на виходах яких формуються рівні напруги u_1, \dots, u_5 .

Перевагою схеми є те, що кількість можливих вихідних значень напруги більш ніж вдвічі перевищує кількість відокремлених джерел живлення ($k=2s+1$). Н-модулі на базі мостових схем є відносно простими і економічними. Кількість транзисторів може бути зменшена в схемах з напівмостами [24]. Недоліком БРІ цього типу є необхідність окремих джерел постійного струму для кожного з Н-модулів.

БРІ на базі з'єднання Н-модулів з напругами джерел, що визначаються ступенями m (коефіцієнтами трансформації). Розрізняють такі структури: з окремими джерелами живлення модулів та з одним спільним джерелом.

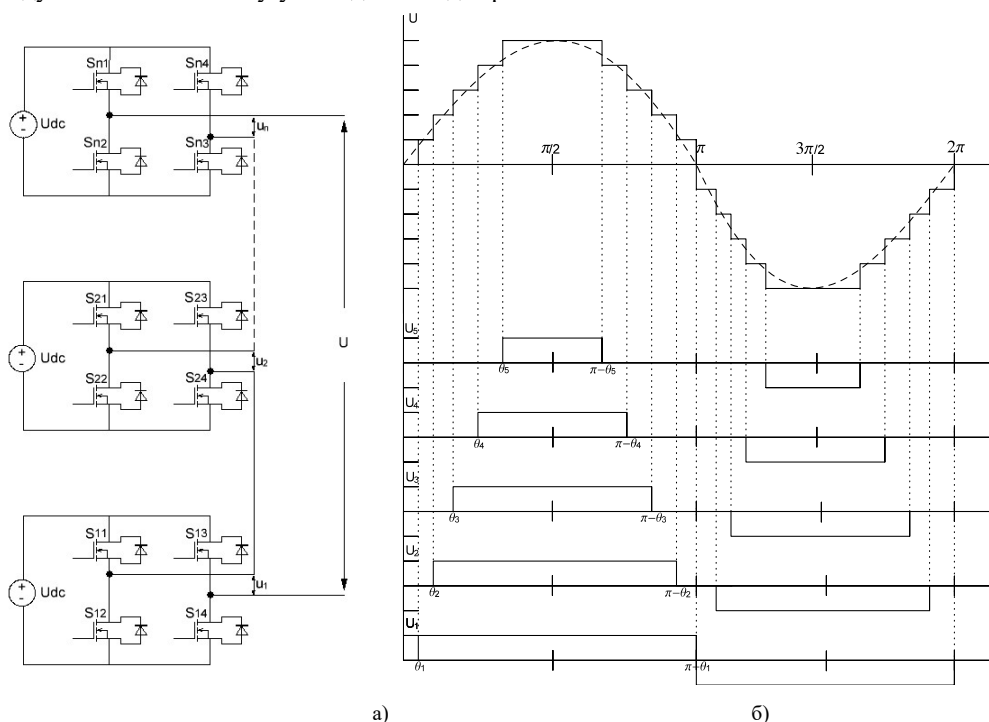


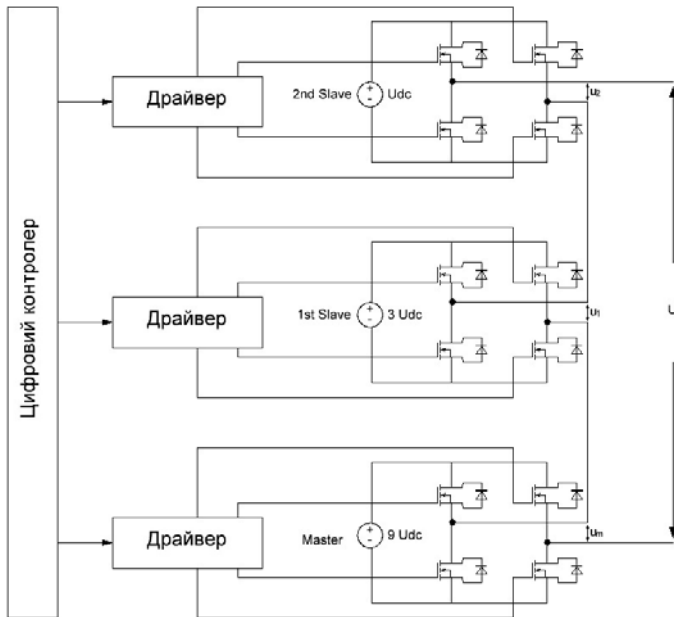
Рис. 2. а - схема каскадного з'єднання Н-модулів; б - вихідна напруга 11-рівневого інвертора з 5 відокремленими джерелами живлення

Схему БПІ з окремими ізольованими джерелами напруги, що визначаються ступенями числа $m=3$, зображено на рис.3,а, а діаграми її роботи - на рис.3,б [13].

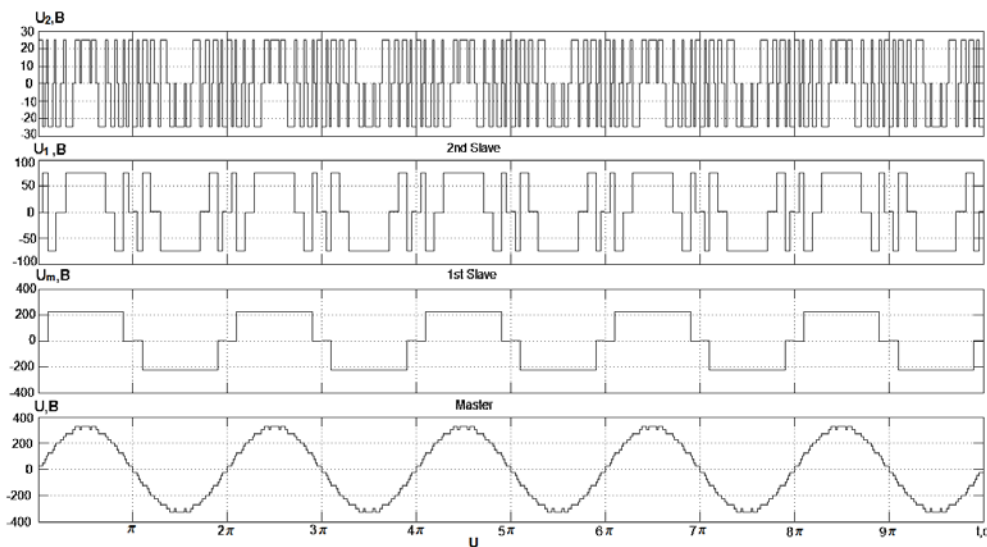
Нижній модуль, до якого прикладається найбільша напруга, називається Master (головний). Інші модулі називаються Slave (залежні). Модуль Master працює на пониженій відносно інших модулів частоті, при цьому передаючи до 80% енергії до навантаження. Кожен наступний залежний модуль передає меншу частку енергії (15%, 4% та 1% для 1-го, 2-го та 3-го модулів відповідно) та працює на пропорційно

вищій частоті. Така особливість дозволяє використовувати низькочастотні силові IGBT-ключі для головного модулю та більш високочастотні MOSFET-ключі для залежних модулів, що зменшує загальну вартість пристрою, побудованого за такою схемою (що і є її основною перевагою).

Важливою перевагою є також можливість формування вихідної напруги з досить великої кількості рівнів при невеликій кількості каскадів. Наприклад, схема з 4 каскадами дозволяє отримати 81 сходинок вихідної напруги і має низьке значення КНС.



а)



б)

Рис.3.Схема БПІ з окремими ізольованими джерелами напруги, що визначаються ступенями числа m . а - схема БПІ з окремими ізольованими джерелами напруги; б - напруги модулів вихідна напруга БПІ з окремими ізольованими джерелами напруги

До недоліків схеми відноситься те, що використовувані модулі не є уніфікованими, а отже - взаємозамінними, що не дозволяє у повній мірі використовувати перевагу модульності, характерну для схем каскадних інверторів. Іншим недоліком схеми є необхідність використання незалежних джерел сталої напруги з чітко визначеною амплітудою, що може бути вирішено за допомогою використання конденсаторів високої ємності та двонапрямлених джерел живлення [24], проте за високих входних напруг їх використання унеможливується або ускладнюється.

В схемі з одним джерелом живлення вихідні трансформатори формують необхідні рівні напруг (рис.4). Перевагою цієї топології є можливість використання одного джерела постійної напруги та виконання принципу модульності, оскільки усі модулі є рівновантаженими. Недоліками є необхідність використання модулів, розрахованих на найбільше навантаження та найбільшу частоту перетворення, а також обмеження частоти вихідної напруги внаслідок застосування трансформаторів.

БРІ з коефіцієнтами трансформації (напругами джерел), що визначаються розкладанням ступінчастої функції в ортогональні ряди (Уолша, ОБ, Хартлі, узагальненого ОБ), відрізняються від традиційних інверторів на базі Н-модулів принципом формування керуючих сигналів модулів та коефіцієнтів трансформації (або рівнів напруг окремих джерел живлення). У даному випадку розглядаються дискретні ортогональні спектральні перетворення в полях Галуа [25], для кожного з яких задано алгоритм прямого перетворення (із часової до спектральної області, або області зображень) та зворотного перетворення (навпаки). При розкладанні заданої ступінчастої функції вихідної напруги БРІ в ортогональний ряд обраного базису (пряме перетворення) коефіцієнти розкладання відповідають коефіцієнтам трансформації або значенням напруг живлення відповідних модулів [25]. Сигнали керування модулів реалізують базисні функції зворотного обраного перетворення.

До переваг БРІ цього типу можна віднести меншу кількість модулів при заданому рівні КНС.

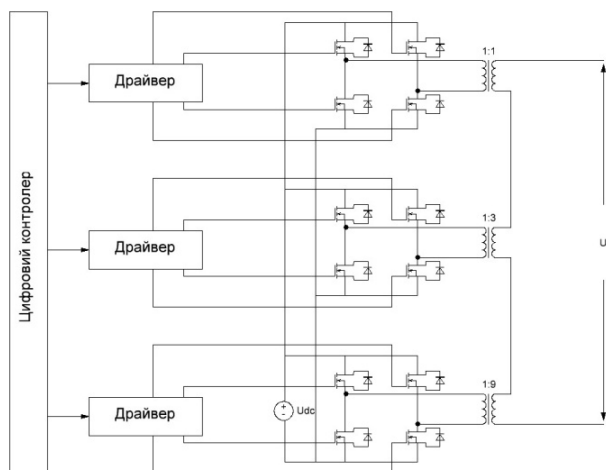


Рис. 4. Багаторівневий каскадний інвертор напруги з вихідними трансформаторами

БРІ на базі з'єднання модулів В-Н типу використовуються у разі необхідності зміни частоти напруги навантаження та одночасної відмови від схеми з ізолюваними джерелами сталої напруги. При цьому застосовуються схеми з фазосувним трансформатором у входному ланцюзі перетворювача. Приклад такої схеми для формування 13-рівневої напруги зображено на рис.5. Дана топологія знайшла застосування для живлення регульованих високовольтних приводів фіксованої вихідної потужності, наприклад, перетворювача частоти Meltrac 500 HVC виробництва Mitsubishi Electric [2].

До первинної обмотки входного фазосувного трансформатора надходить напруга трифазної мережі u . Інверторні модулі $A1-A6$, $B1-B6$, $C1-C6$ формують багаторівневі напруги відповідних фаз A , B , C . Кожен модуль містить послідовне з'єднання випрямляча V та мостового інвертора [1]. Кількість вторинних обмоток фазосувного трансформатора дорівнює кількості інверторних модулів. Первинна обмотка з'єднана за схемою «зірка», з'єднання вторинних обмоток залежить від кількості інверторних модулів: за парної кількості модулів одна половина обмоток з'єднується за схемою «зигзаг», а друга - за схемою «зворотній зигзаг»; за непарної вторинні обмотки мають таке ж з'єднання, проте додається перехідна вентильна обмотка - «центр симетрії» групи вентильних обмоток.

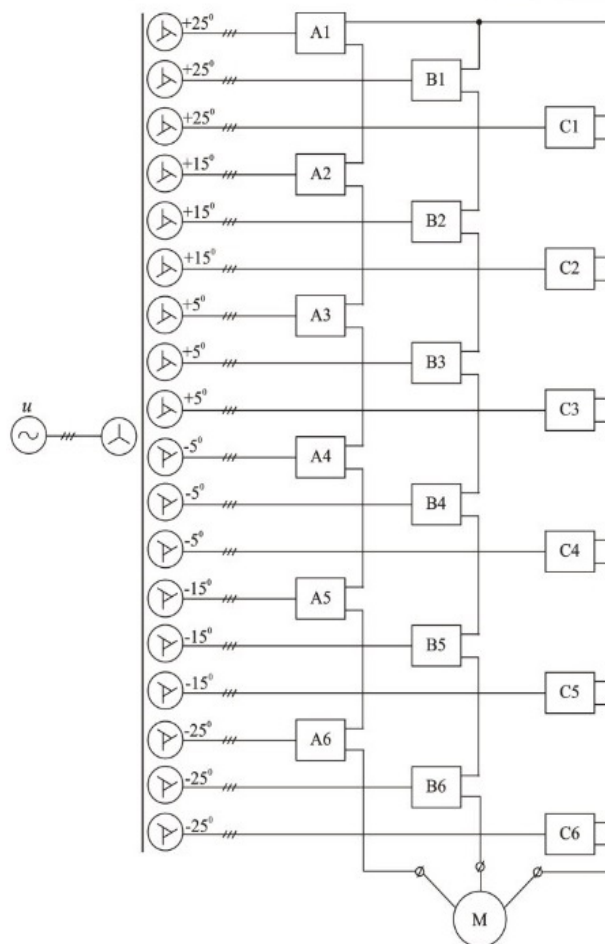


Рис. 5. Каскадний інвертор з фазосувним трансформатором у входному колі

Таблиця 2 Переваги та недоліки основних топологій БРІ

Топологія	Переваги	Недоліки
Інвертор напруги з вихідними трансформаторами	- необхідність лише одного джерела постійної напруги; - однакова потужність модулів	- кожен модуль розрахований на максимальну потужність, але різну частоту комутації ключів; - обмеження частоти вихідної напруги через використання трансформаторів
Інвертор напруги з ізовольованими джерелами напруги	- можливість зміни частоти вихідної напруги	- необхідність декількох джерел постійної напруги заданих рівнів; - модулі не уніфіковані (кожен модуль розрахований на певну потужність і частоту)
Інвертор напруги з фазосувним трансформатором у вхідному ланцюзі перетворювача	- можливість регулювання частоти вихідної напруги без застосування ізовольованих джерел у вхідному колі; - низький коефіцієнт нелінійних спотворень вихідної напруги; - однакова потужність модулів	- складність і висока вартість реалізації та налаштування; - ускладнення будови кожного модуля (додатковий випрямляч у вхідному колі)

Перевагами даної схеми є можливість регулювання частоти вихідної напруги та рівномірне навантаження модулів інвертора, що дозволяє використовувати принцип модульності, а також зменшити пульсації вихідної напруги за рахунок використання фазозсувного трансформатора. Недоліками топології є складність та висока вартість фазозсувного трансформатора, ускладнена будова інверторних модулів (випрямляч – фільтр – мостовий інвертор).

Переваги та недоліки основних топологій БРІ наведені в табл.2.

У перетворювачі за схемою рис.4 коефіцієнти трансформації окремих модулів можуть змінюватися у відповідності до необхідного рівня вихідної напруги, що визначається технічними вимогами конкретної прикладної задачі.

Зсуви фаз напруг, що надходять до інверторних модулів трифазної системи у схемі багаторівневого інвертора напруги з топологією згідно рис.5, відбувається з кратністю 10^0 в позитивному та негативному напрямках ($\pm 5^0$, $\pm 15^0$, $\pm 25^0$). За необхідності цей підхід може бути використаний для отримання більшої кількості рівнів вихідної напруги.

Висновки

Проведений огляду та класифікація основних топологій схем багаторівневих інверторів напруги за типом схеми з'єднання модулів, за схемотехнікою силової частини окремого модуля, за типом схеми додавання напруг модулів та за типом модуляції синусоїдального сигналу виявили шляхи розвитку існуючих структур багаторівневих інверторів. Серед

цих шляхів – вдосконалення способів та систем керування на базі спектральних перетворень в полях Гауа. Перспективними напрямками подальших досліджень є також підвищення коефіцієнту використання вентилів, зменшення коефіцієнту нелінійних спотворень, навантаження на вентилі, досягнення максимально можливої вихідної потужності.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] M.N.Makarov, R.G.Haybrakhanmanov, "Mnogourovnevie inventory napryazhenia. Obzor topologiy i preminenie [Multilevel voltage inverters. Topology overview and application]," *Vestnik tehnologicheskogo universiteta*, vol. 19, no. 22, pp. 134-138, 2016,
URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27441520>
- [2] J. Lai, F. Peng, "Multilevel converters - a new breed of power converters," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 32, no. 3, pp. 509-517, May/Jun.1996,
DOI: [10.1109/28.502161](https://doi.org/10.1109/28.502161)
- [3] C. Hochgraf, R. Lasseter, D. Divan, T. A. Lipo., "Comparison of multilevel inverters for static VAR compensation," *IEEE Ind. Appl. Soc. Annu. Meeting*, pp. 921-928, 1994,**DOI:** [10.1109/IAS.1994.377528](https://doi.org/10.1109/IAS.1994.377528)
- [4] J. Rodriguez, L.G. Franquelo, S. Kouro, J.I. Leon, R. Portillo, M.A.M. Prats, M.A. Perez, "Multilevel Converters: An Enabling Technology for High-Power Applications", *Proc. of IEEE*, vol. 97, no.11, pp. 1786-1817, Nov. 2009, **DOI:** [10.1109/JPROC.2009.2030235](https://doi.org/10.1109/JPROC.2009.2030235)
- [5] L.G. Franquelo, J. Rodriguez, J.I. Leon, S. Kouro, R. Portillo, M.A.M. Prats, "The age of multilevel converters arrives," *IEEE Ind. Electron. Mag.*, vol.2, no. 2, pp. 28-39, Jun. 2008, **DOI:** [10.1109/MIE.2008.923519](https://doi.org/10.1109/MIE.2008.923519)
- [6] R.D. Klug, N. Klaassen, "High power medium voltage drives – innovations, portfolio, trends", *Proc. Eur. Conf. Power Electron. Appl.*, Dresden, pp. 1-10,2005,
DOI: [10.1109/EPE.2005.219669](https://doi.org/10.1109/EPE.2005.219669)
- [7] S. Kouro, M. Malinowski, K. Gopakumar, J. Pou., L.G. Franquelo, B. Wu, J. Rodriguez, M.A. Perez, J.I. Leon, "Recent Advances and Industrial Applications of Multilevel Converters", *IEEE Trans.Ind.Electron.*, vol. 57, no.8, pp. 2553-2580, Aug. 2010,
DOI: [10.1109/TIE.2010.2049719](https://doi.org/10.1109/TIE.2010.2049719)
- [8] M. Glinka and R. Marquardt, "A new ac/ac multilevel converter family," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 52, no. 3, pp. 662-669, Jun. 2005,
DOI: [10.1109/TIE.2005.843973](https://doi.org/10.1109/TIE.2005.843973)
- [9] J. Rodriguez, S. Bernet, B. Wu, J. O. Ponu, S. Kouro, "Multilevel voltage-source-converter topologies for industrial medium-voltage drives," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 54, no. 6, pp. 2930-2945, Dec. 2007,
DOI: [10.1109/TIE.2007.907044](https://doi.org/10.1109/TIE.2007.907044)
- [10] D.V. Tugay, "Umenshenie poter i ulutshenie kachestva electroenergii v sistemah komunalnogo electrosnabzheniya [Reducing losses and improving the quality of electricity in public utility systems]," *Tehnichna electrodinamika*, vol. 2, pp. 80-87, Kyiv, Ukraine, 2008,
URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/umenshenie-poter-energii-v-kommunalnyh-smart-grid-setyah-zaschet-perehoda-ot-odnofaznyh-k-trehfaznym-sistemam-elektrosnabzheniya>
- [11] P. W. Hammond, "Medium Voltage PWM Drive and Method," US565545, 1977,
URL: <https://patents.google.com/patent/US5625545A/en>
- [12] N. Donskoy, A. Ivanov, V. Matison, I. Ushakov, "Mnogourovnevie avtonomnie inventory dlya electropriyvoda i electroenergetyky [Multi-level autonomous inverters for electric drive and electric power industry]," *Power electronics*, no.1, pp. 43-46, 2008,
URL: http://www.power-e.ru/pdf/2008_1_43.pdf



- [13] Juan W. Dixon, "Multilevel Inverter, based on multi-stage connection of three-level converters, scaled in power of three." URL: <http://hrudnick.sitios.ing.uc.cl/paperspdf/dixon/54a.pdf>
- [14] T.V. Anisimova, A.V. Danilina, V.V. Kryuchkov, "Sposoby povisheniya kachestva vihodnogo napryazheniya inverterov so stupenchatim vihodnim napryazheniem [Methods of improvement of the quality of the output voltage of inverters with stepped output voltage]," *Vestnik MAI*, vol. 17, no.1, pp. 103-112, 2010, URL: <http://vestnikmai.ru/publications.php?ID=13363>
- [15] S. Khomfoi, L.M. Tolbert, "Multilevel power converters. Power electronics handbook," *Eslevier*, pp. 451-482, 2007, URL: <https://www.elsevier.com/books/power-electronics-handbook/rashid/978-0-12-811407-0>
- [16] S. G. Song, F. S. Kang, S. J. Park, "Cascaded multilevel inverter employing three-phase transformers and single dc input," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 6, pp. 2005-2014, Jun.2009, DOI: [10.1109/TIE.2009.2013846](https://doi.org/10.1109/TIE.2009.2013846)
- [17] F. Z. Peng, J. S. Lai, "Multilevel Cascade Voltage-source Inverter with Separate DC source," US 5642275, June 24, 1997, URL: <https://patents.google.com/patent/US5642275>
- [18] B. Lin, H. Lu, "New multilevel rectifier based on series connection of H-bridge cell," *Proc. Inst. Elect. Eng.—Electron. Power Appl.*, vol. 147, no. 4, pp. 304-312, Jul. 2000, DOI: [10.1049/ip-epa:20000421](https://doi.org/10.1049/ip-epa:20000421)
- [19] J. Huang, K. A. Corzine, "Extended operation of flying capacitor multilevel inverters," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 21, no.1, pp. 140-147, Jan. 2006, DOI: [10.1109/TPEL.2005.861108](https://doi.org/10.1109/TPEL.2005.861108)
- [20] S. B. Monge, J. Rocabert, P. Rodriguez, S. Alepuz, and J. Bordonau, "Multilevel diode-clamped converter for photovoltaic generators with independent voltage control of each solar array," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no.7, pp.2713-2723, Jul. 2008, DOI: [10.1109/TIE.2008.924011](https://doi.org/10.1109/TIE.2008.924011)
- [21] T.A. Tereshchenko, "Bagatorivnevyy inverter naprugy z amplitudnoyu shirotno-impulsnoyu modulyatsiyeyu [Multilevel voltage inverter with amplitude pulse modulation]," *Technicheskaya elektrodynamika*, no.4, pp.81-83, 2014, URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/TED_2014_4_29
- [22] L.A. Dobrusin, "Tendetsii primeneniya fazopovorotnykh transformatorov v elektroenergetike [Trends in the application of phase-turn transformers in the electric power industry]," *Power electronics*, no.4, pp.60-61, 2012, URL: <https://readera.ru/read/144114948>
- [23] R. Teodorescu, F. Blaabjerg, J. K. Pedersen, E. Cengcelci, S. U. Sulistijo, B. O. Woo, P. Enjeti, "Multilevel converters – a survey," *Proceedings of EPE'1999*, vol. 2, no.1, 1999, URL: <https://www.researchgate.net/publication/272793035>
- [24] G. Yerri Babu, B. A.Loveswara Rao, "Novel Cascaded Multilevel Inverter with Half Bridge and Full Bridge Cells in Series," *International Journal of Science and Advanced Technology*, vol. 2,no 1, pp.71-76, 2012, URL: https://www.researchgate.net/publication/304024237_A_Novel_Cascaded_Multilevel_Inverter_with_Half_Bridge_and_Full_Bridge_Cells_in_Series
- [25] A.I. Solodovnik "Analiz i sintez staticheskikh preobrazovatelych chasty s ispolzovaniem ortogonalnykh bazisov [Analysis and synthesis of static frequency converters using orthogonal basis]," *Dissertation of the candidate of science*, pp.375-390, Kyiv, 1979 URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01009394406>
- [26] T.A. Tereshchenko, V.A. Bezhenar, "Formirovanie vihodnogo napryazheniya mnogourovnevnogo invertora na baze ortogonalnykh preobrazovaniy [Forming the output voltage of a multilevel inverter based on orthogonal transformations]," *Technicheskaya elektrodynamika*, no.2, pp. 51-52, URL: http://techned.org.ua/2012_2/st23.pdf
- [27] A. A. Shavelkin, "Gibridniy mnogourovnevnyy preobrazovatel' chasty na baze trehurovnevnogo invertora s "reaktivnoy yacheykoy" na vihode [Hybrid multilevel frequency converter based on three-level inverter with an output reactive module]," *Naukovi pratsi Donetskogo natsional'nogo tehnicnogo universitetu*, pp.242-249, URL: <http://ea.donntu.edu.ua/bitstream/123456789/5281/1/%D0%A8%D0%B0%D0%B2%D0%B5%D0%BB%D0%BA%D0%B8%D0%BD.pdf>
- [28] A. A. Shavelkin, "Gibridniy mnogourovnevnyy preobrazovatel' chasty na baze chetir'ohurovnevnogo invertora napryazheniya" [Hybrid multilevel frequency converter based on four-level voltage inverter]," *Electrotehnika i elektroenergetika*, pp. 43-49, URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/gibridnyy-mnogourovnevnyy-preobrazovatel-chasty-na-baze-chetyrehurovnevnogo-invertora-napryazheniya>
- [29] M. Veenestra, A Rufer, "Control of a Hybrid Asymmetric Multilevel Inverter for Competitive Medium-Voltage Industrial Drives," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 41, no. 2, pp. 665-664, Mar.-Apr. 2005, DOI: [10.1109/TIA.2005.844382](https://doi.org/10.1109/TIA.2005.844382)
- [30] X. Yuan "Derivation of multilevel voltage source converter topologies", *IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Florence, pp. 3323-3330, 2016, DOI: [10.1109/IECON.2016.7794020](https://doi.org/10.1109/IECON.2016.7794020)
- [31] V.Ya. Zhuykov, L.M. Lukyanenko, D.A.Mykolaets, K.S. Osypenko, A.O. Stelyuk, T.A. Tereshchenko, Yu.S. Yamnenko "Pidvysshennya efektyvnosti system z vidnovlyuvanyymi dzherelamy energii. Monografia [Increasing efficiency of the systems with renewable energy sources. Monograph]," Kyiv, Ukraine: Kafedra, 2018, ISBN: 978-617-7301-48-5

Надійшла до редакції 02 квітня 2018 р.

УДК 621.314.58

Обзор основных топологий многоуровневых каскадных инверторов напряжения



Терещенко Т. А., д.т.н. проф., ORCID [0000-0003-4009-2854](https://orcid.org/0000-0003-4009-2854)

e-mail tereshchenko50.t.a@gmail.com

Ямненко Ю. С., д.т.н. проф., ORCID [0000-0002-9796-6420](https://orcid.org/0000-0002-9796-6420)

e-mail petergerya@yahoo.com

Федин И. С., ORCID [0000-0003-0264-5067](https://orcid.org/0000-0003-0264-5067)

e-mail igorfedin2@gmail.com

Национальный технический университет Украины

«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» kpi.ua

Киев, Украина

Реферат—Проведен обзор основных топологий многоуровневых каскадных инверторов напряжения, определены их основные преимущества и недостатки. Предложена классификация схем по признакам типа модуляции, структуры силовой части и управления. В результате проведенного обзора определены два основных метода управления многоуровневыми каскадными инверторами, с помощью ШИМ и АШИМ, три основных типа схем, две структуры модулей и три варианта суммирования напряжения в нагрузке, в соответствии с которыми создана классификация каскадных многоуровневых инверторов напряжения. Более подробно рассмотрены принципы построения и функционирования схем, построенных по топологии на базе соединения H-модулей с одинаковыми коэффициентами трансформации, соединения H-модулей с напряжениями источников, определяющимися степенями m , соединения H-модулей с коэффициентами трансформации (напряжениями источников), которые определяются разложением ступенчатой функции в ортогональные ряды и многоуровневого инвертора на базе соединения модулей В-Н типа с фазосдвигающим трансформатором во входной цепи. В результате проведенного обзора были определены преимущества и недостатки каждой из схем, которые определяют области их применения.

Подытоживая проведенный обзор, определено, что на современном этапе продолжают исследования в направлении поиска эффективных схемотехнических решений для многоуровневых инверторов каскадного (модульного) типа, и оптимизации алгоритмов и систем управления для повышения коэффициента использования вентиля, уменьшение коэффициента нелинейных искажений, нагрузки на вентили и достижения максимально возможной выходной мощности.

Библ. 31, рис.5

Ключевые слова – многоуровневый инвертор напряжения, каскадная схема, изолированные источники напряжения, выходные трансформаторы, входной фазосдвигающий трансформатор

UDC 621.314.58

Main Topologies of Multilevel Cascade Voltage Inverters Overview

T. A. Tereshenko, Dr.Sc.(Eng.) Prof., ORCID [0000-0003-4009-2854](https://orcid.org/0000-0003-4009-2854)

e-mail tereshchenko50.t.a@gmail.com

Yu. S. Yamnenko, Dr.Sc.(Eng.) Prof., ORCID [0000-0002-9796-6420](https://orcid.org/0000-0002-9796-6420)

e-mail petergerya@yahoo.com

I. S. Fedin, ORCID [0000-0003-0264-5067](https://orcid.org/0000-0003-0264-5067)

e-mail igorfedin2@gmail.com

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

Kyiv, Ukraine

Abstract—An overview of the main topologies of multi-level cascade voltage inverters was given, their main advantages and disadvantages was determined. Classification based on the type of modulation, structure of the power unit and control system was proposed. As a result of this review were identified two main control methods of the cascaded multilevel inverters, based on PWM and PWAM signal processing, three main types of topology, two types of modules structure and three methods of formation of the output load voltage waveform. Based on these data, was made a classification of the cascade multilevel voltage inverters. In more details were considered principles of construction and the operation of schemes built on topologies based on the connection of the H-modules with the same transformation coefficients, the connection of the H-modules with the voltage sources which amplitude is determined by the steps of m , the connection of the H-modules with coefficients of transformation (voltage sources), determined by the expansion of the stepfunctions in orthogonal rows and a multi-level inverter based on the connection of the B-H type modules that has a phase transformer in the input circle. As



a result of the review, the advantages and disadvantages of each of the topology and field of their application were determined.

Summing up the results of the review it can be defined that the process of finding the effective circuit solution for multilevel cascade (modular) type inverters continues. This process consists of optimization of the algorithms of the control systems improvement of the utilization rate of the valves, reducing the THD rate, solving the problem of the excessive load of the valves and achievement of the maximum output power rate.

Ref. 31, fig. 5

Keywords - multilevel voltage inverter, cascade circuitry, isolated voltage sources, output transformers, input phase-shifting transformer.

