

НАПІВПРОВІДНИКОВІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ

УДК 621.314

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2021.60.058>**ПРИНЦИПИ УДОСКОНАЛЕННЯ БАГАТОРІВНЕВИХ АВТОНОМНИХ ІНВЕРТОРІВ НАПРУГИ****І.В. Волков***, чл.-кор. НАН України, **В.В. Голубєв****, канд. техн. наук,**В.І. Зозульов*****, канд. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна,

e-mail: dep8ied@ied.org.ua

У статті розглянуті властивості найбільш часто використовуваних дво- та багаторівневих інверторних топологій, що застосовуються в системах перетворення електроенергії декількох первинних джерел живлення в необхідну вихідну напругу підвищеної якості для низьковольтних мереж і високовольтних споживачів. Однак загальним недоліком більшості відомих багаторівневих перетворювачів є зростання складності силових структур, збільшення кількості первинних джерел живлення, силових елементів і вартості пристроїв у міру збільшення числа їхніх рівнів напруги. Запропоновано дві схеми альтернативних трирівневих автономних інверторів напруги з високочастотним автотрансформатором із середньою точкою та приклад побудови їхньої цифрової системи керування. Проведено аналіз їхньої роботи на PSpice-моделях в системі проєктування OrCAD. Показано можливість отримання шести підрівнів напруги з меншою кількістю силових елементів і збільшеною якістю вихідної напруги порівняно з відповідними каскадними багаторівневими інверторами. Наведено переваги та галузі застосування автотрансформаторних мостових інверторів напруги за енергетичними й функціональними можливостями порівняно з відовими багаторівневими інверторами. Бібл. 8, рис. 7.

Ключові слова: багаторівневі автономні інвертори напруги, високочастотний автотрансформатор з середньою точкою, якість електроенергії.

Вступ. У засобах силової перетворювальної техніки та електроніки, автоматики, побутової техніки, а також в агрегатах безперебійного живлення, електроприводі, електротранспорті, енергетиці тощо широко використовуються імпульсні перетворювачі постійної напруги в змінну – автономні інвертори напруги (АІН). Значна різноманітність споживачів викликає необхідність забезпечення відповідних вимог до АІН. Здебільшого в діапазонах середніх і великих потужностей основними вимогами є: високий ККД, надійність, якість вихідної напруги й можливість знижувати чи підвищувати її значення порівняно з напругою джерела живлення. Остання вимога пов'язана з необхідністю стабілізації або імпульсного регулювання параметрів вихідної змінної напруги в необхідних межах, що так само впливає на якість електроенергії, особливо в процесі живленні перетворювачів від нестабільних джерел електроживлення.

Метою цієї статті є поліпшення основних характеристик запропонованих і альтернативних структур силових частин двозонних АІН (ДАІН) з автотрансформатором із середньою точкою та алгоритмів керування ними, порівнюючи з відповідними широко використовуваними АІН відомих типів.

Для підвищення точності формування вихідної синусоїдальної напруги силові схеми АІН мають давати змогу розділяти весь діапазон зміни вихідної напруги на зони модуляції з кількома рівнями вузькодіапазонного регулювання. Отримання необхідної кількості зон формування вихідної напруги досягається через поділення напруги за допомогою конденсаторів, багатообмоткових трансформаторів мережевої та підвищеної частоти або збільшеної кількості первинних джерел живлення постійного струму, акумуляторів, поновлюваних джерел енергії та паливних елементів.

Останнім часом широкого застосування набули багаторівневі інвертори (БР АІН), що забезпечують означені вище вимоги. Вони побудовані на основі каскадних або гібридних з'єднань однофазних Н-мостових одноплечових трирівневих АІН або модулів інших типів [1–3].

Одноплечовий АІН, принципова схема якого показана на рис. 1, містить чотири послідовно включених транзисторно-діодних ключа $S1-S4$, а також два фіксуючі діоди (*Clamped diode*) $CD1$, $CD2$ і конденсаторний подільник напруги, який завдяки наявності середньої точки отримує можливість формувати третій рівень і покращену форму додатної та від'ємної півхвиль синусоїдальної вихідної напруги.

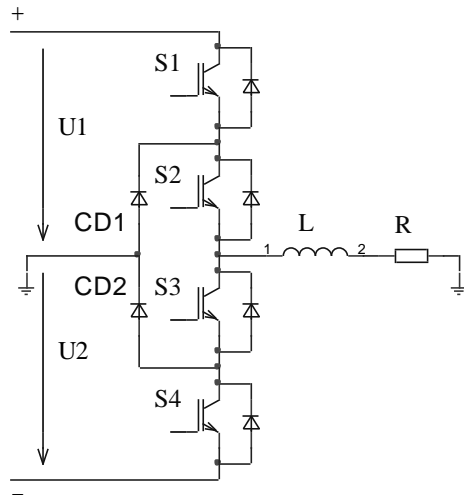


Рис. 1

Перетворювачі з каскадним з'єднанням цих модулів живляться від окремих ізольованих джерел з фіксованою нульовою точкою або «летючими» конденсаторами (*flying capacitors*) і фіксуючими діодами [3]. Звідси виникають недоліки БР АІН такого типу: утруднення керування зарядом і розрядом конденсаторів та контролю рівнів напруги на них; підвищені амплітуди зворотних напруг на фіксуючих діодах, необхідна кількість яких квадратично пов'язана з кількістю рівнів напруги; неможливість двосторонньої передачі енергії. Загальним недоліком усіх багаторівневих перетворювачів є ускладнення силових схем, зростання кількості елементів і вартості пристроїв у міру збільшення кількості рівнів їхньої напруги.

збільшення кількості рівнів їхньої напруги.

Більш привабливими для промисловості та енергетики вважаються топології БР АІН на основі двох і більше з'єднаних послідовно однофазних Н-мостових комірок АІН. Вперше каскадні БР АІН такого типу описано в патенті [4] ще в 1975 році. На рис. 2 показано один із варіантів принципової схеми силової частини двозонного (трирівневого) каскадного АІН (рис. 2 а) такого типу та діаграми напруг на виході комірок (рис. 2 б).

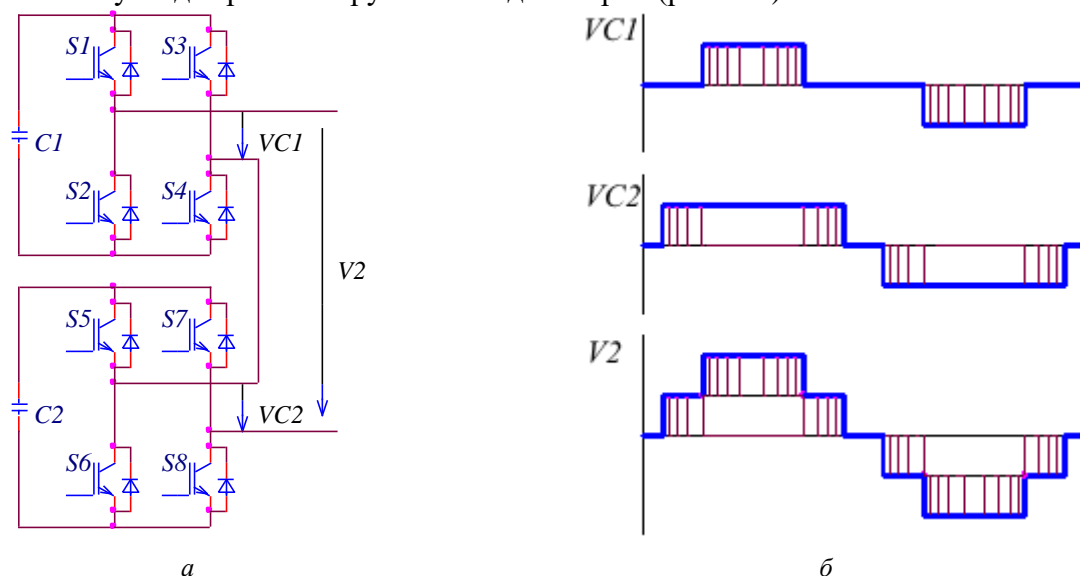


Рис. 2

Недоліком вищеповисаних топологій є також необхідність наявності кількох незалежних джерел живлення, що обмежує сферу їхнього застосування.

Для низьковольтних мереж як альтернативні пропонуються схеми з високочастотними імпульсними автотрансформаторами (АТ) із середньою точкою, що спроможні підвищити їхню вихідну напругу, покращити її гармонічний склад та знизити габарити, масу та

кількість транзисторно-діодних ключів перетворювачів завдяки використанню підвищеної робочої частоти автотрансформатора та сучасних магнітних матеріалів [5].

На рис. 3 показана силова схема пропонованого трирівневого АІН-1, що містить трифазний міст на шести діодно-транзисторних ключах $S1-S6$, високочастотний АТ із середньою точкою та вихідний LC -фільтр нижніх частот.

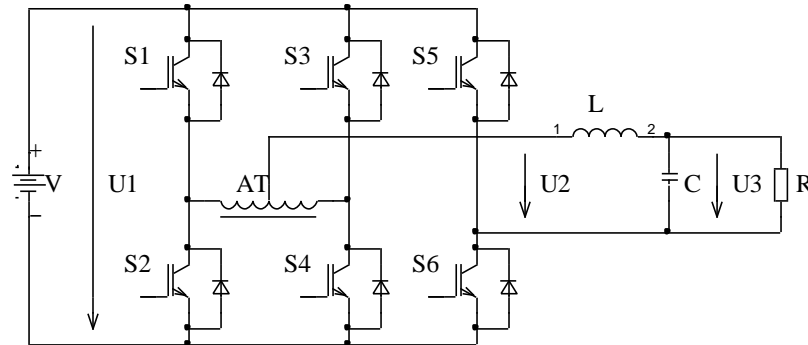


Рис. 3

Силовa схема та система керування АІН-1 досліджувалися на PSpice-моделях у системі проектування OrCAD.

На рис. 4 показано результати моделювання: епюри імпульсів керування анодної (верхньої) групи ключів $S1$ і $S3$, (нижні ключі $S2$ і $S4$ працюють в протитакті з верхніми) в схемі рис. 3 і вихідної напруги $U3$ після LC -фільтра. Ключі $S5$ і $S6$ працюють в протитакті з частотою вихідної напруги. Результати моделювання отримано для параметрів схеми: $U1=300$ В, $L1=500$ мкГ, $C1=5$ мкФ, $R=10$ Ом.

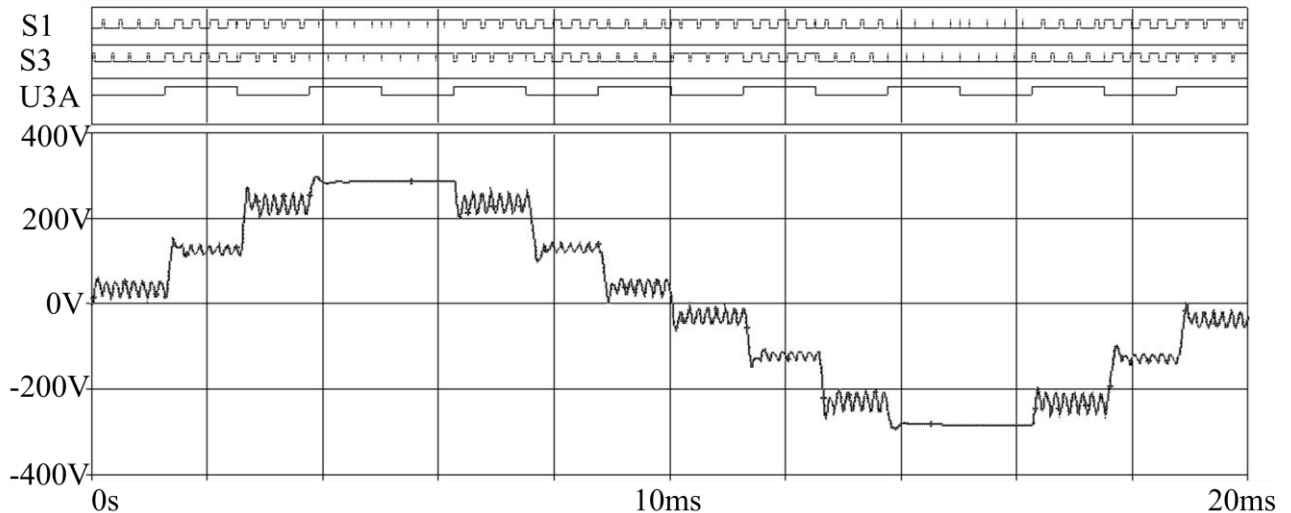


Рис. 4

Згідно з епюрами $S1$ і $S3$ у разі одночасного вмикання відповідних ключів на виході формується верхній рівень вихідної напруги $U2=U3=U1$ (рис. 3), рівний напрузі джерела живлення V . Коли ж ці ключі замикаються по черзі, після фільтра утворюється середній рівень $U3=U1$. І, нарешті, коли ключі $S2$ і $S4$ одночасно замкнуті, на виході отримуємо нижній (нульовий) рівень вихідної напруги $U2=U3=0$.

Отже, автотрансформатор АТ із середньою точкою дає змогу створити додатково третій (середній) рівень, у результаті чого весь діапазон імпульсної модуляції ділиться на дві зони, що водночас дає змогу істотно підвищити точність формування кривої вихідної напруги за аналогією з регуляторами змінної напруги з вольтододавальними трансформаторами. Але, на відміну від них, маємо меншу масу автотрансформатора порівняно з вольтододатком на основній частоті [6], а також меншу вдвічі кількість ключів і відповідно більшу надійність порівняно з вольтододатком на високій частоті [7].

Отримання вихідної напруги U_2 , удвічі вищої (за амплітудою) за напругу живлення U_1 , досягається в АІН-2 за схемою [5], показаною на рис. 5.

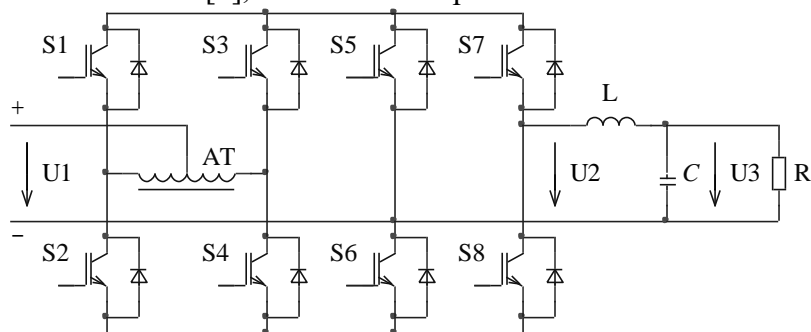


Рис. 5

Перетворювач містить додаткову транзисторно-діодну стійку S_7, S_8 , а середню точку АТ під'єднано до додатного затискача джерела живлення, від'ємний затискач якого під'єднано до навантаження R .

На рис. 6 наведено результати дослідження PSpice-моделі цифрової системи керування АІН-2: епюри сигналів керування верхніми ключами (рис. 5): $S_1(U39)$ $S_3(U41)$ $S_6(U44)$ і $S_7(U45)$ (в дужках указано номери мікросхем на рис. 7, вихідні сигнали котрих подаються на драйвери відповідних транзисторів), сигналу перемикання зон модуляції U_{20} , сигналу молодшого розряду U_{3A} (U_{9A}, U_{16A}, U_{21A}), що перемикає підзони модуляції (про які йтиметься нижче), і епюра вихідної напруги на навантаженні АІН-2. Результати отримано для таких параметрів схеми: $U_1=300$ В, $L=500$ мкГн, $C=5$ мкФ, $R=10$ Ом.

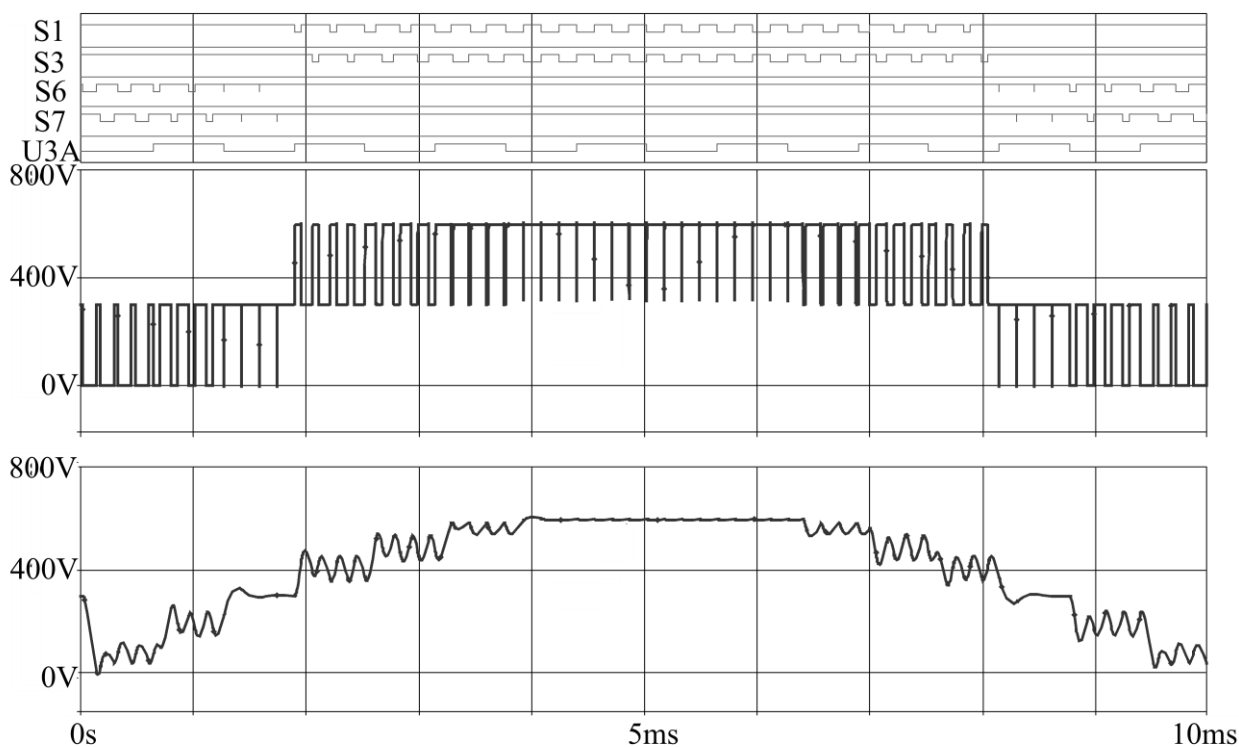


Рис. 6

У пропонованих схемах використовується широтно-імпульсна модуляція (ШІМ), завдяки якій у кожній зоні вихідної напруги створюється не один, а кілька рівнів напруги (див. рис. 4 і 6), що наближають його форму до синусоїдної.

Вихідна напруга АІН-2 (рис. 6) удвічі більша вихідної напруги АІН-1 (рис. 4), отримана за ідентичних вихідних параметрів і незмінного принципу роботи системи керування. Але завдяки збільшенню вдвічі кількості підзон модуляції (задля експерименту)

отримано вдвічі більше ступенів і кращу форму вихідної напруги, за якістю рівноцінну шестирівневу БР АІН.

Системи керування синусоїдною ШІМ виконуються аналоговим і цифровим, апаратним і програмним методами [2]. На рис. 7 показано цифрову *PSpice*-модель частини системи керування АІН-2, яка реалізується в програмованій логічній інтегральній схемі (ПЛІС).

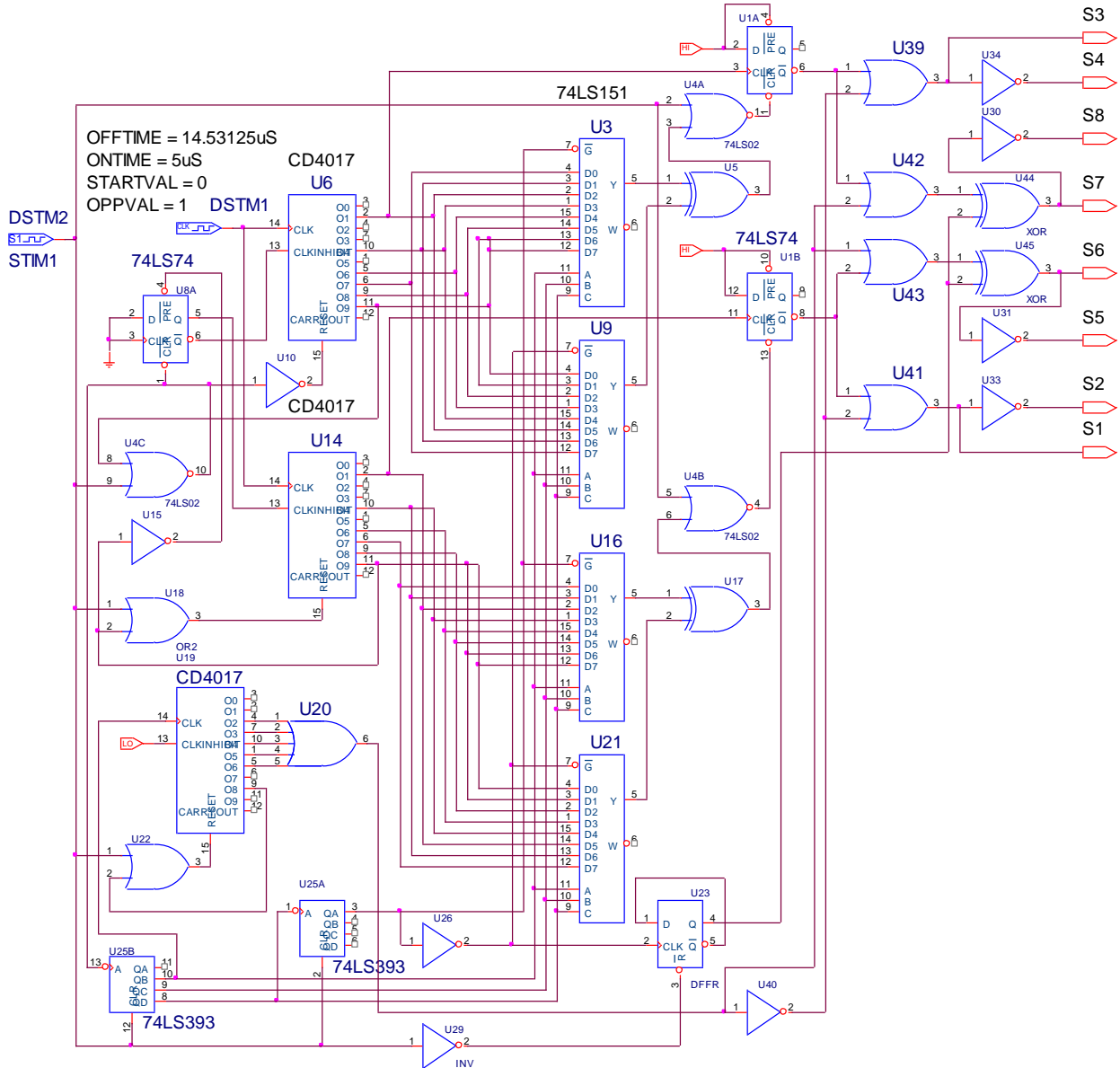


Рис. 7

Основними елементами цієї схеми є мікросхеми *CD4017* (*U6* і *U14*) і *74151* (*U3*, *U9*, *U16* і *U21*). Позначення в дужках є позиціями наведеної схеми. Опишемо коротко її роботу.

Мікросхема *CD4017* – десятковий лічильник з дешифратором, що дає змогу переводити код у двійковій системі в електричний сигнал і виводити останній на один з десяти виходів лічильника. Частина імпульсних сигналів із виходів лічильника в певному порядку розподіляються входами мультиплексора *74151*.

Мультиплексор *74151* містить селектор даних із восьми вхідних сигналів, на входи котрого (*A*, *B*, *C*) подається трирозрядний двійковий код, що виділяє необхідний вхідний сигнал. Виділений сигнал з'являється на двох виходах: прямому – *Y* та інверсному – *W*. Тому впродовж кожного півперіоду сигналу молодшого розряду двійкового лічильника селектора мультиплексора відбувається зміна шпаруватості вихідного сигналу, чим пояснюється

утворення горизонтальних сходинок, що рівносильно збільшенню числа рівнів у вихідній напрузі.

Подальше покращення форми вихідної напруги можливе ускладненням системи керування завдяки збільшенню кількості лічильників і мультиплексорів, що формують додаткові підзони у вихідній напрузі без зміни кількості силових елементів, застосуванням додаткових джерел напруги, відводів автотрансформатора, а також каскадним з'єднанням кількох АІН.

Регулювання ж вихідної напруги можливе лише каскадним з'єднанням інверторних модулів або за допомогою підвищувальних DC/DC конверторів. Запропоновані й досліджені інвертори АІН-1 та АІН-2 є більш перспективними порівняно з класичними Н-мостовими інверторними модулями для побудови каскадних багаторівневих АІН середніх і великих потужностей, оскільки вимагають меншого числа незалежних джерел електроенергії, менше силових елементів, мають підвищену надійність і універсальність, тобто за відповідної зміни алгоритму керування силовими ключами вони можуть виконувати роль безпосередніх перетворювачів змінної напруги з вільною циркуляцією реактивної енергії [5].

Висновки. Розглянуто принципи побудови та зроблено оцінювання властивостей відомих багаторівневих автономних інверторів напруги.

Аналіз роботи запропонованих інверторів на PSpice-моделях показав можливість отримання шести й більше підрівнів із меншою кількістю силових елементів і поліпшеною якістю вихідної напруги, аналогічно відповідним каскадним багаторівневим інверторам.

Представлені автотрансформаторні мостові інвертори за відповідного керування дають змогу не тільки підвищувати вихідну напругу (АІН-2) та покращувати її якість, але, як порівняти з відомими БР АІН, також виконувати інші функції: регулювати та стабілізувати змінну напругу; працювати в режимі синхронного випрямляча; працювати в реверсному режимі, передаючи енергію у зворотному напрямку.

1. Malinowski M. et al. A Survey on Cascaded Multilevel Inverters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2009. Vol. 57. No. 7. Pp. 2197–2206. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2009.2030767>
2. Holmes D. Grahame, Lipo Thomas A.. *Pulse Width Modulation For Power Converters Principles and Practice*. A JOHN WILEY & SONS, INC., PUBLICATION. 2003. DOI: <https://doi.org/10.1109/9780470546284>
3. Rodríguez J, Bernet S., Wu B., Pontt J. O. and Kouro S.. Multilevel Voltage-Source-Converter Topologies for Industrial Medium-Voltage Drives. *IEEE transactions on industrial electronics*. December 2007. Vol. 54. No 6. Pp. 2930–2945. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2007.907044>
4. Baker R. H. and L. Bannister H. Electric Power Converter, U.S. Patent 3 867 643, Feb. 1975.
5. Голубев В.В. Двухзонные импульсные преобразователи переменного напряжения с высокочастотным автотрансформатором. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2007. Вип. 2(17). С. 94–100.
6. Липковский К.А. Трансформаторно-ключевые исполнительные структуры преобразователей переменного напряжения. К.: Наук. думка, 1983. 216 с.
7. Кобзев А.В. Многозональная импульсная модуляция. Теория и применение в системах преобразования параметров электрической энергии. Новосибирск: Наука, 1979. 304 с.
8. Харрис Дэвид М., Харрис Сара Л. Цифровая схемотехника и архитектура компьютера. Дополнение по архитектуре. 1622 с.
https://picloud.pw/media/resources/posts/2018/03/08/Харрис_Цифровая_схемотехника_и_архитектура.pdf

PRINCIPLES OF IMPROVEMENT OF MULTILEVEL AUTONOMOUS VOLTAGE INVERTERS

I.V. Volkov, V.V. Golubev, V.I. Zozulev

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine
e-mail: dep8ied@ied.org.ua

The article considers the properties of the most commonly used two-and multilevel inverter topologies used in systems for converting electricity from several primary power sources into the required high-quality output voltage for low-voltage networks and high-voltage consumers. However, a common disadvantage of most known multilevel converters is the increasing complexity of power structures, an increase in the number of primary power sources, power elements, and the cost of devices as the number of their voltage levels increases. Two schemes of alternative three-level autonomous voltage inverters with a high-frequency autotransformer with a midpoint and an example of constructing their digital control system are proposed. The analysis of their work on PSpice models in the OrCAD design system is

carried out. The possibility of obtaining six voltage sublevels with fewer power elements and increased output voltage quality is shown, compared to the corresponding cascade multilevel inverters. The advantages and applications of autotransformer bridge voltage inverters in terms of energy and functionality compared to well-known multilevel inverters are presented. Ref. 8, fig. 7.

Keywords: multilevel autonomous voltage inverters, high-frequency autotransformer with a midpoint, power quality.

1. Malinowski M. et al. A Survey on Cascaded Multilevel Inverters. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2009. Vol. 57. No 7. Pp. 2197–2206. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2009.2030767>
2. Holmes D. Grahame, Lipo Thomas A.. Pulse Width Modulation For Power Converters Principles and Practice. A JOHN WILEY & SONS, INC., PUBLICATION. 2003. DOI: <https://doi.org/10.1109/9780470546284>
3. Rodríguez J., Bernet S., Wu B., Pontt J. O. and Kouro S.. Multilevel Voltage-Source-Converter Topologies for Industrial Medium-Voltage Drives. IEEE transactions on industrial electronics. December 2007. Vol. 54. No 6. Pp. 2930–2945. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2007.907044>
4. Baker R. H and Bannister L. H. Electric Power Converter, U.S. Patent 3 867 643, Feb. 1975.
5. Golubev V.V. Two-zone pulse converters of alternating voltage with a high-frequency autotransformer. *Pratsi Instytutu elektrodynamiki Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy* . 2007. No 2(17). Pp. 94–100. (Rus)
6. Lipkovsky K.A. Transformer-key executive structures of alternating voltage converters. Kyiv: Nauk. dumka, 1983. 216 p. (Rus)
7. Kobzev A.V. Multi-zone pulse modulation. Theory and application in electrical energy parameter conversion systems. Novosibirsk: Nauka, 1979. 304 p. (Rus)
8. David M. Harris, Sarah L. Harris. Digital circuitry and computer architecture. *Architecture supplement*. 1622 p. https://picloud.pw/media/resources/posts/2018/03/08/Харрис_Цифровая_схемотехника_и_архитектура.pdf (Rus)

Надійшла: 01.11.2021

Received:01.11.2021