

НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Автор: Федін Ігор Сергійович

Керівник: Терещенко Тетяна Олександрівна, д.т.н., професор кафедри  
промислової електроніки

## **Перетворювачі напруги для роботи з відновлюваними джерелами електроенергії**

Науковий напрям: «Електронні пристрої та системи»

Наукова робота

на Всеукраїнський конкурс студентських наукових робіт з природничих,  
технічних та гуманітарних наук у 2018/2019 навчальному році

Шифр: «Multi-level Inverter»

Київ 2018

## ЗМІСТ

<b>Вступ.....</b>	<b>3</b>
<b>1. Класифікація схем багаторівневих інверторів.....</b>	<b>4</b>
<b>2. Короткий огляд існуючих топологій.....</b>	<b>6</b>
2.1 Каскадний багаторівневий інвертор з ізольованими джерелами сталої напруги що визначаються ступенями числа $m$ .....	6
2.2 Каскадний багаторівневий інвертор з вихідними трансформаторами, коефіцієнт трансформації яких визначаються ступенями числа $m$ .....	11
2.3 Каскадний багаторівневий інвертор з вхідним фазосувним трансформатором .....	12
2.4 Некаскадні багаторівневі інвертори.....	14
2.5 Інвертор напруги $z$ -типу.....	19
<b>3. Аналіз результатів та визначення оптимальної схеми.....</b>	<b>24</b>
<b>Висновки.....</b>	<b>26</b>

## Вступ

Актуальність теми. Першочерговою метою побудови багаторівневого інвертора було досягнення можливості роботи з напругами вищими за стандартні напруги для напівпровідникових пристроїв без значного збільшення масогабаритних показників. Одночасно, використання багаторівневої структури дозволило значно покращити якість вихідної напруги зменшивши коефіцієнт нелінійності вихідної напруги до значень 10-20 % та підвищити коефіцієнт використання вентилів. Означені переваги призвели до подальшого розвитку даних топологій та їх широкого застосування у схемах статичних компенсаторів, перетворювачів частоти для електромагнітних двигунів та перетворювачів енергії для відновлюваних джерел електроенергії. У результаті швидкого розвитку та розповсюдження технологій смарт грид значно зріс попит на ринку перетворювальних пристроїв, що здатні перетворити сталу напругу від відновлюваного джерела енергії у змінну напругу побутової мережі з мінімальними втратами енергії та максимально ефективним використанням силових вентилів для зменшення масогабаритних показників створеного пристрою.

Дана робота присвячена огляду основних існуючих топологій багаторівневих інверторів та систем керування що були використані при побудові пристроїв, що представлені на сучасному ринку перетворювальних пристроїв, визначення, шляхом моделювання силової частини, однієї з основних характеристик що враховуються при побудові багаторівневих інверторів, а саме коефіцієнту нелінійних спотворень вихідної напруги, для схеми каскадного багаторівневого інвертора напруги з відокремленими джерелами постійної напруги та схеми зі спільною нейтраллю, порівняння отриманих результатів з результатами симуляцій наведеними у літературних джерелах для інших схем. Проведений аналіз дозволить визначити схему, що є переважнішою при побудові інвертора для перетворювача, що працює з відновлюваними джерелами енергії.

## **1. Класифікація основних схем багаторівневих інверторів напруги**

Широка необхідність у перетворенні електричної енергії викликає постійну розробку та удосконалення схем багаторівневих інверторів, що призводить до неперервного розширення класифікації

Основним критерієм поділу інверторів виступає загальний принцип побудови, за яким інвертори напруги можна поділити на класичні дворівневі схеми, що генерують два рівні вихідної напруги  $+U_d$  та  $-U_d$ , та багаторівневі, що мають більшу кількість рівнів вихідної напруги.

Загальна будова кожного багаторівневого перетворювача включає в себе: джерело напруги, інверторні модулі, які у необхідній послідовності підключаються до навантаження системою керування за допомогою драйверів. Принцип роботи усіх багаторівневих каскадних перетворювачів заснований на додаванні вихідних напруг окремих однотипних модулів (комірок) у вихідному колі (навантаженні). Підключаючи модулі у необхідній послідовності отримується напруга необхідної форми та амплітуди.

На даний момент розроблено значну кількість схем каскадних багаторівневих інверторів напруги основною метою розробки яких є оптимізація схем під певний вид навантаження, зменшення коефіцієнту нелінійності вихідної напруги, кращого використання вентилів та зменшення втрат на елементах схеми, оптимізація масогабаритних показників розроблених приладів. Основними напрямками внесення змін є зміни структури силової частини приладу, зміна кількості та амплітуди напруги джерел живлення інверторних комірок, методів розрахунку необхідної кількості комірок для отримання сигналу заданої форми і якості, зміна і оптимізація систем керування (використання різних типів модуляції, вибір оптимальної частоти перемикування ключів).

Серед некаскадних схем багаторівневих інверторів можна виділити схеми з фіксованою нейтральною точкою та з «плаваючими» конденсаторами. Фактично, остання є зміненою версією схеми з фіксованою нейтраллю, що покликана усунути недолік пов'язаний з контролем балансу напруги на конденсаторах на шині постійного струму при передачі активної потужності [1].

У топологіях каскадного типу за типом схеми модулів можна виділити три основні варіанти виконання: з окремими ізольованими джерелами сталої напруги [2], одним джерелом та вихідними трансформаторами [3] та з використанням вхідного фазозсувного трансформатора, кількість вторинних обмоток якого для трифазної системи визначається кількістю інверторних модулів однієї фази, помноженою на 3 [4, 5, 6].

За схемотехнікою силової частини окремого модуля розрізняють модулі, побудовані за мостовою схемою (модулі Н типу) [4, 7], модулі В+Н типу, що містять послідовно з'єднані випрямляч та мостовий інвертор [4, 5, 6]. Відомий також підхід використання напівмостової схеми замість мостової [8].

За типом схеми додавання напруг модулів в 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) [4,8]; 2) з коефіцієнтами трансформації (напругами джерел), що визначаються ступенями деякого заданого простого числа  $m$  (наприклад,  $m=3$ ) [9].

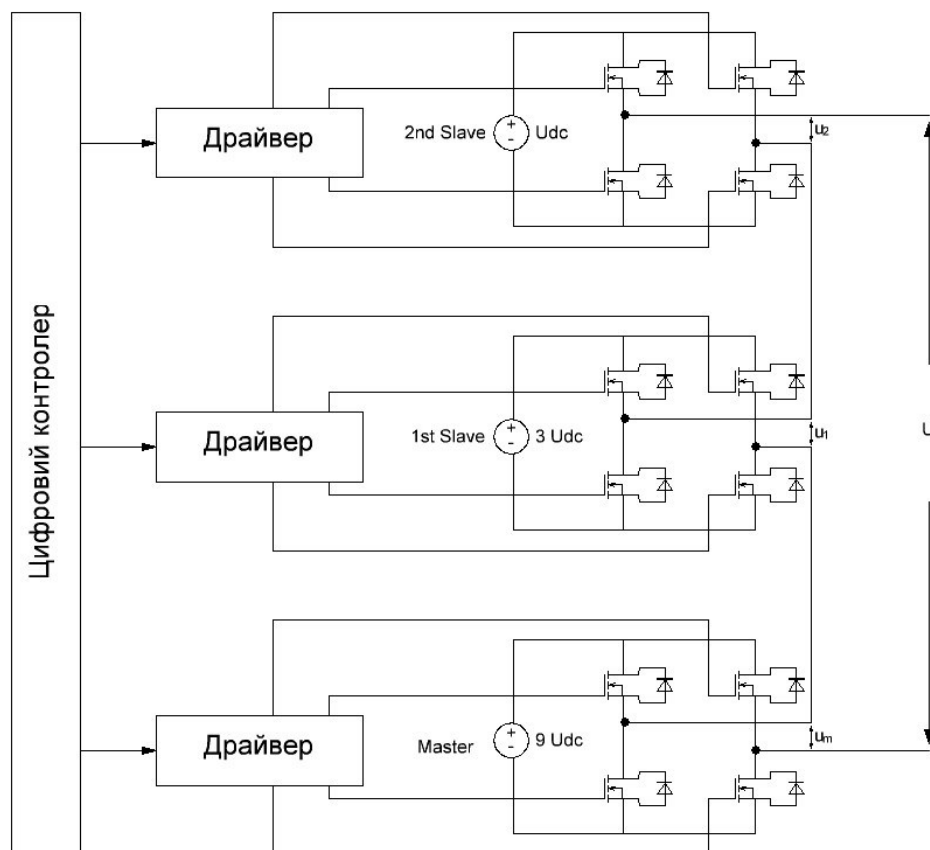
У даній роботі буде розглянуто роботу та порівняні характеристики схем не каскадних багаторівневих інверторів та каскадних топологій з відокремленими джерелами сталої напруги та з вихідними трансформаторами амплітуда (коефіцієнт трансформації) яких визначається

ступенем числа  $m$ , багаторівневий інвертор з фазосувним трансформатором у вхідному колі та інвертор напруги z-типу як тих, що широко застосовуються для побудови перетворювачів, що працюють від відновлюваних джерел енергії, або потребують мінімальних змін для застосування в даній сфері.

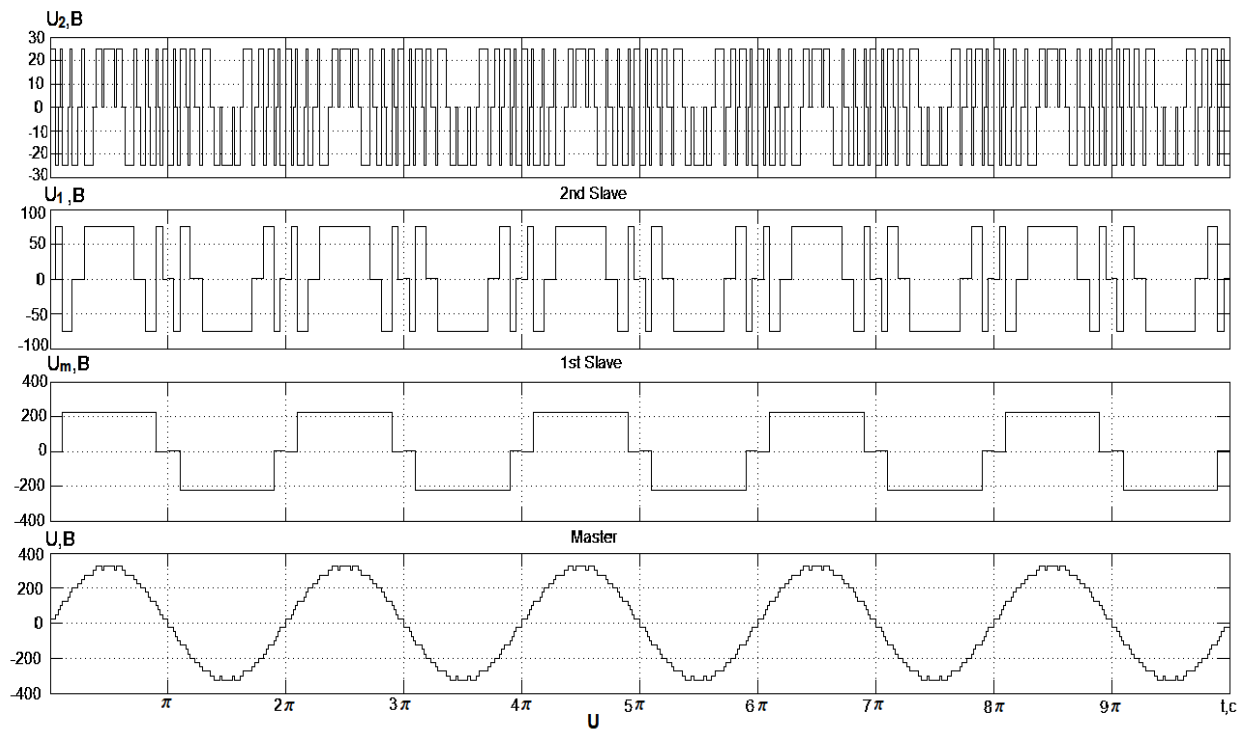
## 2. Короткий огляд існуючих топологій

### 2.1 Каскадний багаторівневий інвертор з ізольованими джерелами сталої напруги що визначаються ступенями числа $m$

Схему БРІ з окремими ізольованими джерелами напруги, що визначаються ступенями числа  $m=3$ , зображено на рис.4,а, а діаграми її роботи - на рис.4,б [9].



а



б

Рис.4 Схема БПІ з окремими ізольованими джерелами напруги, що визначаються ступенями числа  $m=3$  та діаграми її роботи

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 сходинку вихідної напруги і має низьке значення КНС.

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 [8], проте за високих вхідних напруг їх використання унеможлиблюється або ускладнюється.

Багаторівневі інвертори з амплітудою напруги вхідних джерел що визначаються ступенем числа  $m$  широко застосовуються при побудові систем електроживлення двигунів залізничних електровозів та електропоїздів метро, оскільки застосування даного методу дозволяє не лише здешевити вартість розроблюваного пристрою, але і зменшити необхідну площу системи охолодження що призводить до зменшення масогабаритних показників які є особливо критичними для пристроїв що встановлюються на рухомий склад. У якості прикладу таких пристроїв можна навести багаторівневий інвертор напруги створений фірмою АВВ за замовленням німецької залізниці.

Для визначення коефіцієнту нелінійних спотворень модель схеми за даною топологією була створена у середовищі Simulink що наведена на рис. 5.



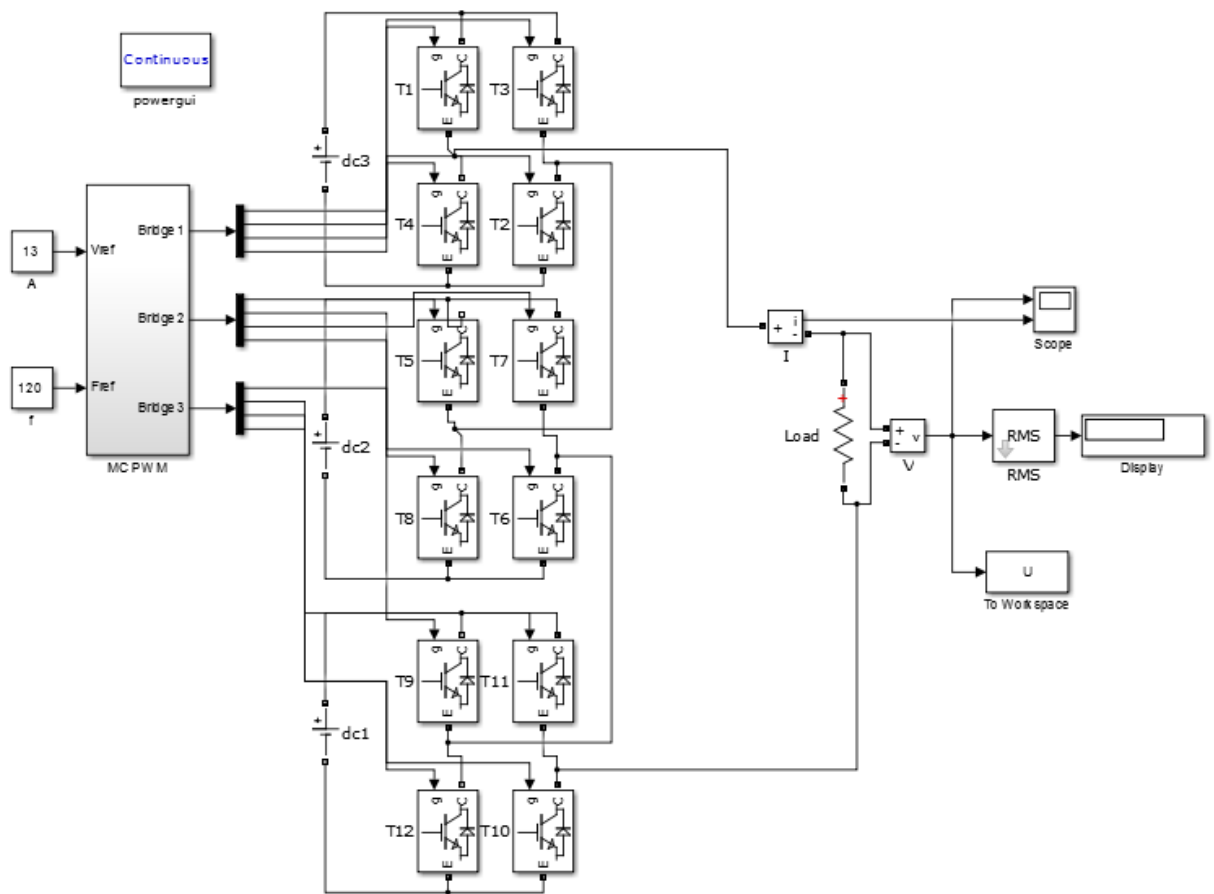


Рис. 5 Модель трьох коміркового каскадного багаторівневого інвертора з відокремленими джерелами постійної напруги з додаванням напруги у колі навантаження за степенем числа  $m$

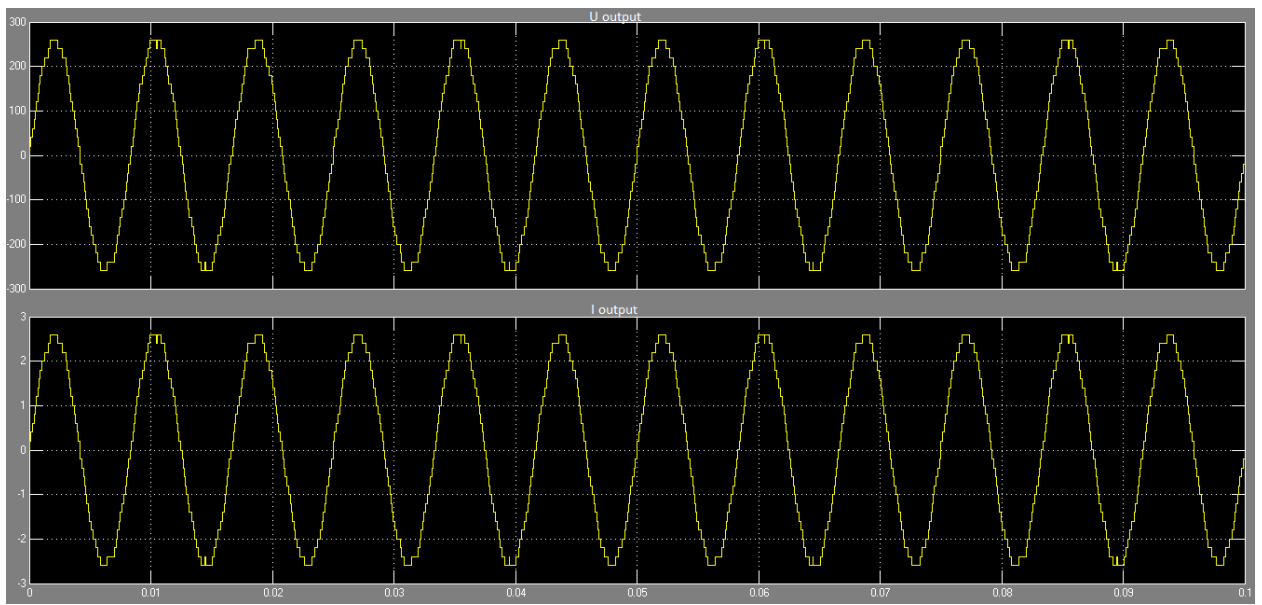
У складі даної моделі можна виділити три основні групи пристроїв:

1. Систему керування на основі широтно-імпульсної модуляції
2. Силу частину, що складається з трьох відокремлених джерел постійної напруги, амплітуда вихідної напруги яких визначається ступенем числа  $m$  (у даній моделі  $m=3$ ) та інверторних комірок створених за мостовою схемою.
3. Активне навантаження та вимірювальні модулі для визначення та відображення миттєвих значень та форми вихідної напруги та струму.

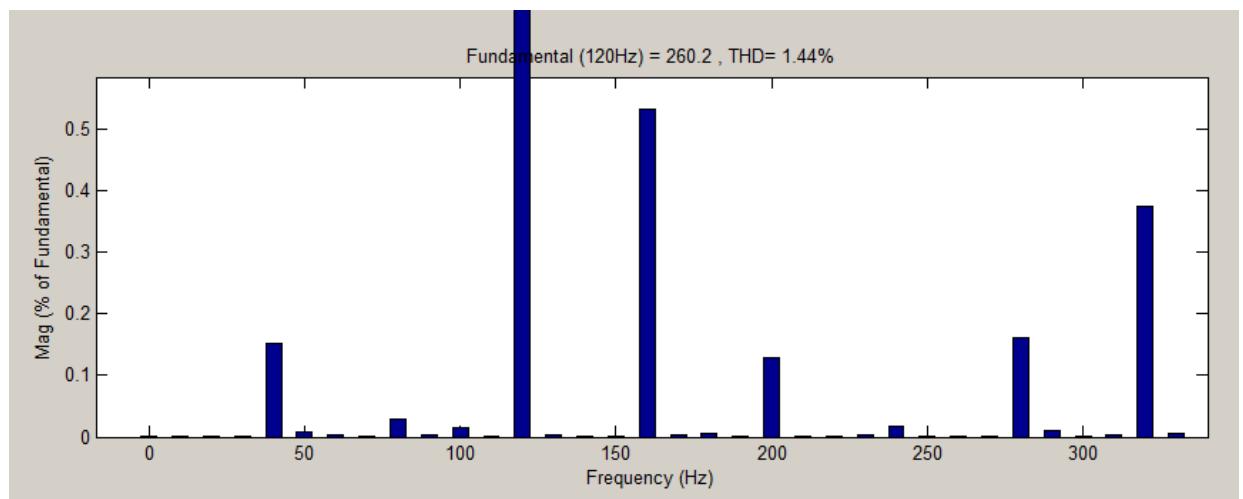
Принцип роботи силової частини моделі повністю повторює теоретичний опис.

Як було вказано вище, напруга джерел сталої напруги у даній моделі визначається ступенем числа 3, і складе 20, 120 та 180 В для джерел dc3, dc2 та dc1 відповідно. Частота вихідної напруги складає 120 Гц.

Форми вихідної напруги, струму та спектр вихідного сигналу з розрахованим коефіцієнтом гармонічних спотворень наведено на рис.6.



a)



б)

Рис. 6 Форми вихідного сигналу (а) та спектр вихідного сигналу зі значенням коефіцієнту гармонічних спотворень (THD) (б)

## 2.2 Каскадний багаторівневий інвертор з вихідними трансформаторами, коефіцієнт трансформації яких визначаються ступенями числа $m$

В схемі з одним джерелом живлення вихідні трансформатори формують необхідні рівні напруг (рис.7). Перевагою цієї топології є можливість використання одного джерела постійної напруги та виконання принципу модульності, оскільки усі модулі є рівнонавантаженими. Коефіцієнти трансформації окремих модулів можуть змінюватися у відповідності до необхідного рівня вихідної напруги, що визначається технічними вимогами конкретної прикладної задачі.

Недоліками є необхідність використання модулів, розрахованих на найбільше навантаження та найбільшу частоту перетворення, а також обмеження частоти вихідної напруги внаслідок застосування трансформаторів.

Застосування даних схем аналогічне до топології з відокремленими джерелами напруги.

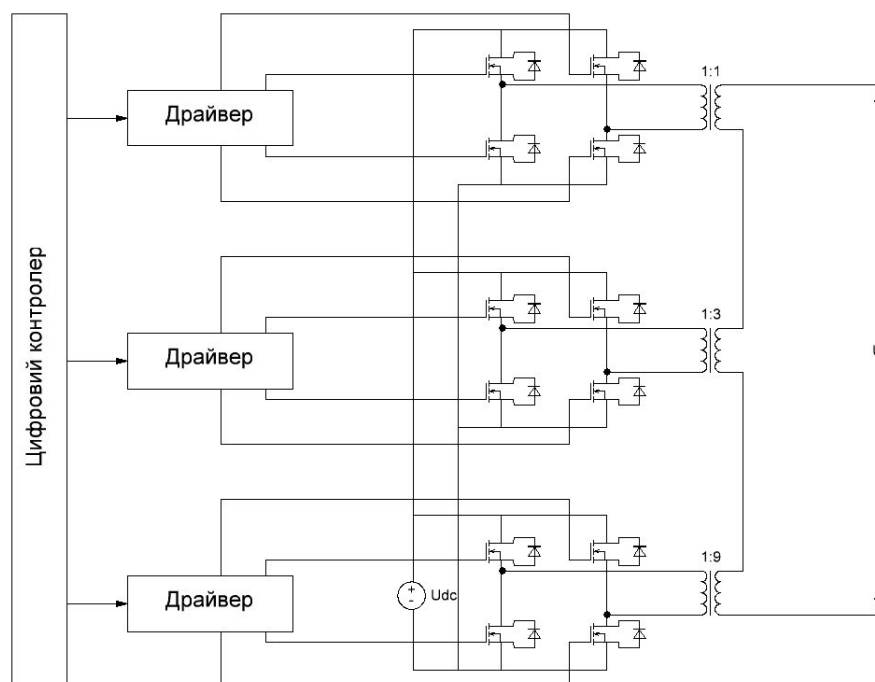


Рис.7 Схема БІ з трансформаторами в вихідному колі комірок

## 2.3 Каскадний багаторівневий інвертор з вхідним фазосувним трансформатором

БПІ на базі з'єднання модулів В-Н типу використовуються у разі необхідності зміни частоти напруги навантаження та одночасної відмови від схеми з ізольованими джерелами сталої напруги. При цьому застосовуються схеми з фазосувним трансформатором у вхідному ланцюзі перетворювача. Приклад такої схеми для формування 13-рівневої напруги зображено на рис. 8.

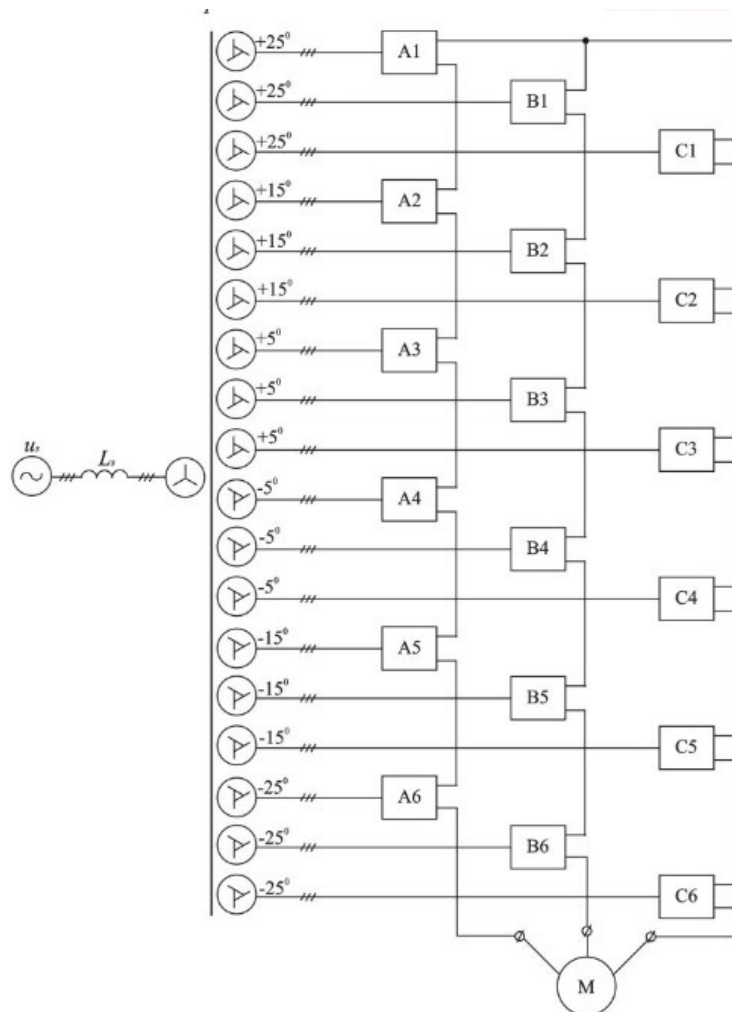


Рис.8 Каскадний перетворювач з фазосувним трансформатором у вхідному колі

Дана топологія знайшла застосування для живлення регульованих високовольтних приводів фіксованої вихідної потужності. [10].

До первинної обмотки вхідного фазозсувного трансформатора надходить напруга трифазної мережі  $u$ . Інверторні модулі

A1-A6, B1-B6, C1-C6 формують багаторівневі напруги відповідних фаз А, В, С. Кожен модуль містить послідовне з'єднання випрямляча В та мостового інвертора [4]. Кількість вторинних обмоток фазозсувного 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.

Зсуви фаз напруг, що надходять до інверторних модулів трифазної системи у схемі багаторівневого інвертора, 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.

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).

Дана топологія знайшла застосування для живлення регульованих високовольтних приводів фіксованої вихідної потужності, наприклад, перетворювача частоти Meltrac 500 HVC виробництва Mitsubishi Electric.

## 2.4 Некаскадні багаторівневі інвертори

Серед не каскадних схем багаторівневих інверторів значного розповсюдження знашли схема багаторівневого інвертора з фіксованою нейтральною точкою та схема з «плаваючими» конденсаторами.

Роботу схеми з фіксованою нейтральною точкою (рис. 9) можна пояснити відносно роботи класичного інвертора напруги.

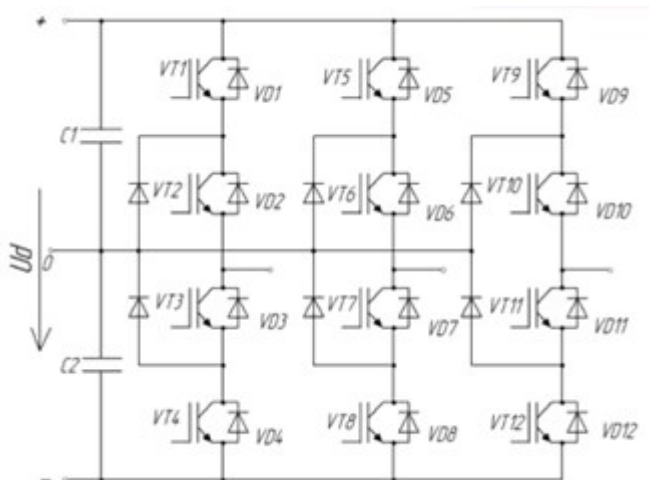


Рис.9 БРІ з фіксованою нейтральною точкою

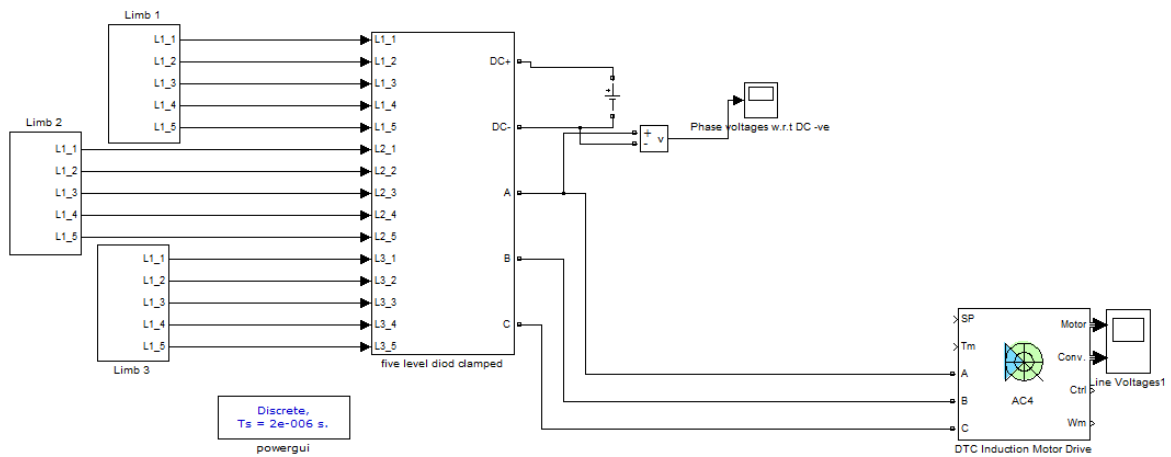
Як відомо на виході дворівневого інвертора може формуватися напруга рівнів  $+U_d$  та  $-U_d$ , де  $U_d$  – рівень постійної вхідної напруги. Спроби покращити якість вихідної напруги такого інвертора призвели до створення нової топології – трьохрівневого інвертора з фіксованою нейтральною точкою у якого на вході присутні три потенціали:  $+U_d$ ,  $-U_d$  та нульовий потенціал (середня точка між послідовно з'єднаними конденсаторами в ланцюгу сталого струму). Різниця потенціалів між нульовим потенціалом та додатнім або від'ємним потенціалом становить  $U_d/2$ . Ця напруга через відсікаючі діоди подається на середні точки плечей інвертора, що створені послідовно з'єднаними транзисторними ключами. За рахунок відповідного підключення системою керування транзисторних ключів на виході інвертора

формується напруга трьох рівнів  $U_d$ ,  $U_d/2$  і  $0$ , та відповідні від'ємні значення напруги. З цих значень, при детермінованій у часі комутації ключів, формується вихідна східчаста напруга, що після фільтрації стає синусоїдальною. Наведена трирівнева схема може бути масштабована на більшу кількість рівнів вихідної напруги що покращить якість вихідного синусоїдального сигналу [11].

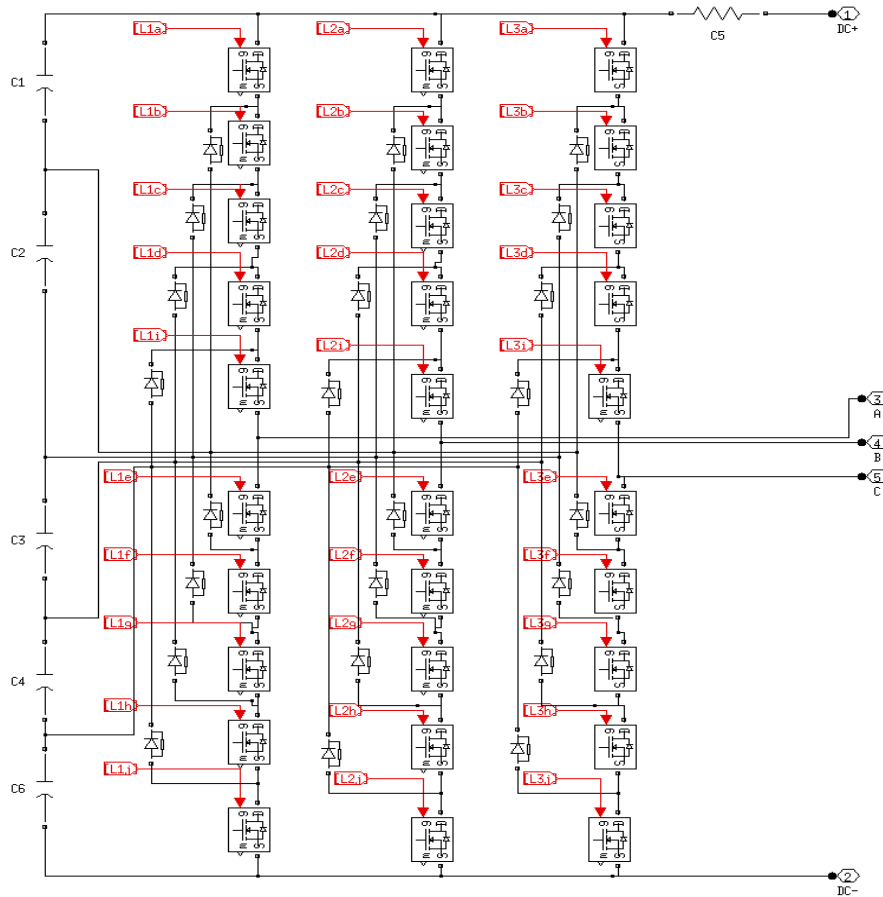
Переваги даної топології аналогічні каскадним багаторівневим інверторам, а саме, кращий коефіцієнт використання ключів, менше навантаження на кожний з транзисторних ключів, більша якість вихідного сигналу. Недоліками схеми є ряд проблем з контролем між конденсаторами на шині постійного струму при передачі активної потужності. На відміну від схеми з «плаваючими конденсаторами», що буде розглянута далі тут немає надлишкових комбінацій переключень силових ключів, і тому балансу напруг на шині постійного струму можна досягти лише за рахунок складного методу ШІМ або іншим ускладненням системи керування.

Серед не каскадних топологій інверторів дана топологія зазнала найбільш широкого застосування. Так, топологія з фіксованою нейтраллю була використана при створенні перетворювача частоти ACS 1000 фірми ABB і Simovert MV фірми Siemens. Також п'ятирівнева мостова схема виконана на базі трьохрівневого інвертора запроваджена фірмою ABB в серії ACS 5000 [12].

Для визначення коефіцієнту гармонічних спотворень та форми вихідного сигналу схеми БПІ з фіксованою нейтральною точкою була створена модель пристрою побудованого за даною топологією в пакеті для симуляції роботи електронних схем Simulink. Створена модель наведена на рис. 13.



a)



б)

Рис.10 Модель схеми трифазного БПІ з фіксованою нейтральною точкою:

а) – загальний вид;

б) – силова частина

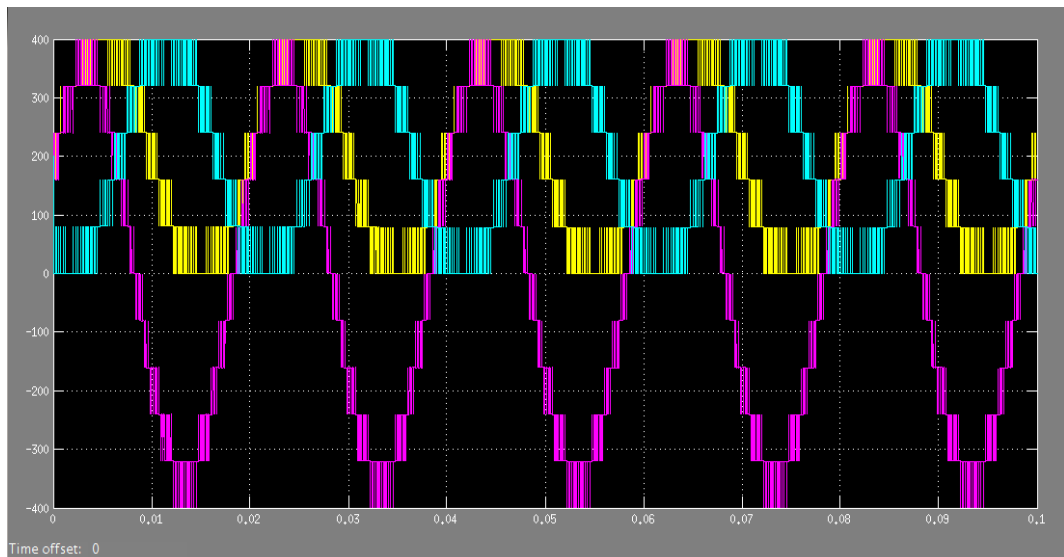


Модель складається з трьох основних модулів, а саме:

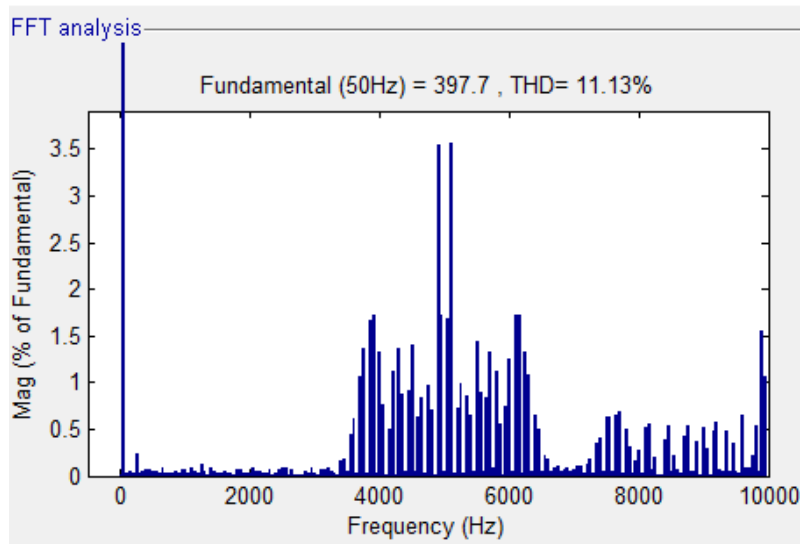
- 1) Трьох систем керування на основі ШІМ, кожна з яких керує плечами відповідної фази;
- 2) Силовій частини, що забезпечує п'ять рівнів вихідної трифазної напруги;
- 3) Навантаження, у якості якого використано частотно-регульований трифазний електродвигун.

Задачею даної схеми є перетворення сталої напруги амплітудою 400 В у змінну напругу амплітудою 380 В та частотою 50 Гц.

Принцип роботи даної схеми повністю повторює наведений у теоретичному описі даної топології. Параметри, що визначаються за допомогою симуляції аналогічні до визначених для каскадної схеми БРІ з відокремленими джерелами сталої напруги. Результати проведеного моделювання наведені на рис.14 .



a)



б)

Рис. 11 Форма (а) та спектр з розрахованим значенням коефіцієнту гармонічних спотворень (THD) моделі схеми трифазного БРІ з фіксованою нейтральною точкою

Схема з «плаваючими» конденсаторами зображена на рис.12.

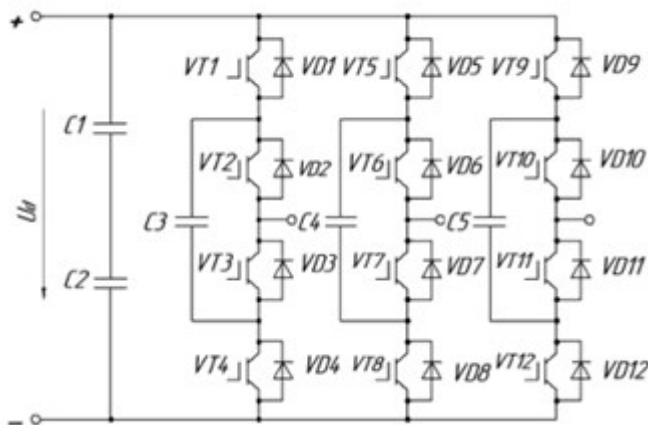


Рис.12 БРІ з «плаваючими» конденсаторами

Дана топологія багато у чому схожа на описану вище. Кількість конденсаторів на шині постійного струму рівна співвідношенню  $2(m-1)$ , де  $m$  – число ступенів в кривій вихідної напруги. Замість діодів що застосовувалися у схем описаній вище у цій топології використовуються

«плаваючі» конденсатори, що здатні, на відміну від діодів, пропускати зворотну напругу. така властивість дозволяє схемі використовувати надлишкову кількість комбінацій, що, в свою чергу, вирішує проблему балансу напруг. В основних станах, коли підключено зовнішній транзистор, що під'єднано до додатного або від'ємного полюса джерела живлення, конденсатор заряджається до напруги  $U_d/2$  (тобто напруга джерела живлення ділиться навпіл між конденсатором і закритим транзистором, з'єднаним з протилежним полюсом джерела). У додаткових станах напруга або безпосередньо подається на вихід фази, або віднімається від напруги джерела живлення. В обох випадках на фазу подається напруга рівна  $U_d/2$ .

Істотним недоліком топології є те, що при зростанні кількості рівнів вихідної напруги кількість конденсаторів зростає в квадратичному масштабі, що ускладнює, а часто, унеможлиблює масштабування схеми під велику кількість рівнів вихідної напруги [13].

## 2.5 Інвертор напруги z-типу

При побудові перетворювача для роботи з сонячними панелями у якості джерела сталої напруги особливої уваги заслуговують пристрої з імпедансним ланцюгом у вхідному колі (z-інвертори) (рис. 13) [14].

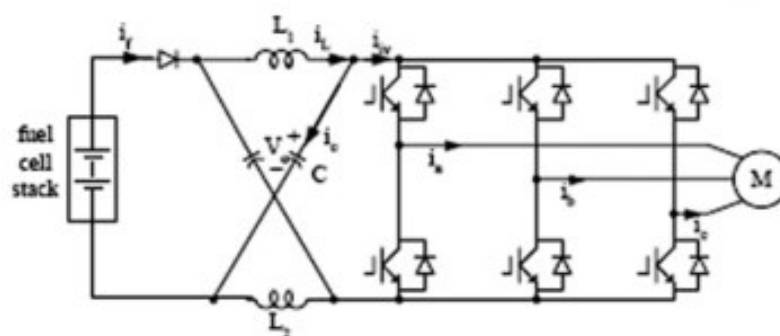


Рис. 13 Трифазна інверторна комірка з імпедансним ланцюгом у вхідному колі(z-інвертор)

Внесення імпедансного ланцюга у вхідне коло перетворювача дозволяє використовувати інверторну комірку у режимі «пробою», за якого відкритими є обидва ключі одного з пліч інверторної комірки, що дозволяє збільшити струм та напругу, що відбирається від джерела сталої напруги без встановлення додаткових перетворювачів на вхід схеми. Еквівалентна схема z-інвертора під час роботи у режимі «пробою» зображена на рис.14.

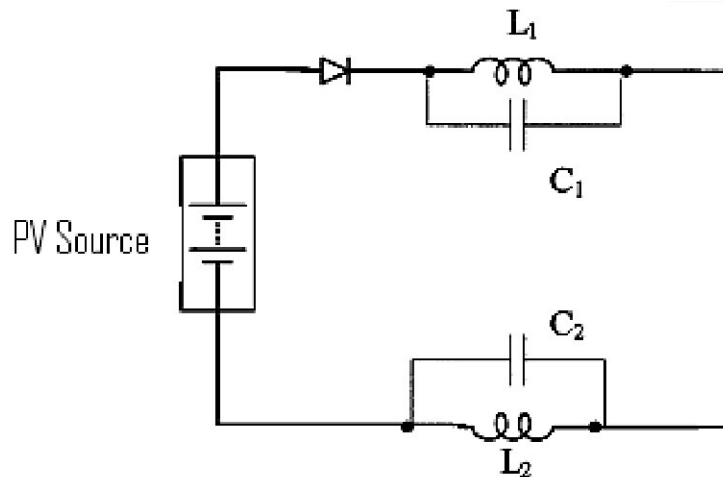


Рис.14 Еквівалентна схема інверторної комірки з імпедансним ланцюгом у вхідному колі(z-інвертор) у режимі «пробою»

Осердя індуктивності заряджається через зростання струму викликане станом «пробою» (фактично коротким замиканням навантаження ланцюгу). Одночасно зростає напруга на конденсаторах, що підключені паралельно до індуктивностей. Накопичена таким чином енергія за наступної комутації, звичайного типу, передається на вихід інвертора.

Використання стану пробою у точці відбору максимальної потужності дозволяє передати максимальну потужність сонячної батареї до навантаження, що в свою чергу дозволяє максимально раціонально використовувати площу сонячної батареї [15].

Недоліком схеми є перевантаження силових ключів у стані «пробою», оскільки струм через них при даному типу комутації може бути удвічі більшим за амплітудні значення допустимі для звичайного режиму комутації.

За результатами симуляції наведеними у літературних джерелах коефіцієнт нелінійних спотворень для схеми z-інвертора без встановлення вихідного фільтра складає 80.81% при роботі на активне навантаження. При встановленні вихідного фільтра дане значення зменшується до 1.836% [15].

Результати всіх проведених досліджень зведено до таблиці 1.

ТАБЛИЦЯ 1

Топологія	Переваги	Недоліки	Сфери застосування	Значення коефіцієнту нелінійних спотворень (THD)
Інвертор напруги з ізолюваними джерелами напруги	-можливість зміни частоти вихідної напруги; -можливість формування вихідної напруги з досить великої кількості рівнів при невеликій кількості каскадів; - можливість використання низькочастотних IGBT ключів для найбільш навантаженої комірки та високочастот	- необхідність декількох джерел постійної напруги заданих рівнів; - модулі не уніфіковані (кожен модуль розрахований на певну потужність і частоту що збільшує вартість розроблюваного пристрою)	- інвертори для рухомих складів залізничного транспорту	1.44 %

	них MOSFET ключів для інших комірок що дозволяє зменшити вартість та масогабаритні показники розроблюваного пристрою			
Інвертор напруги з вихідними трансформаторами	- необхідність лише одного джерела постійної напруги; - однакова потужність модулів що розширює можливості уніфікації модулів, що зменшує вартість розроблюваного пристрою	- кожний модуль розрахований на максимальну потужність, але різну частоту комутації ключів; - обмеження частоти вихідної напруги через використання трансформаторів	- інвертори для рухомих складів залізничного транспорту	-
Інвертор напруги з фазосувним трансформатором у вхідному ланцюзі перетворювача	- можливість регулювання частоти вихідної напруги без застосування ізольованих джерел у вхідному колі; - однакова потужність модулів	- складність і висока вартість реалізації та налаштування; - ускладнення будови кожного модуля (додатковий випрямляч у вхідному колі)	- високопотужні перетворювачі частоти для асинхронних двигунів	-
Інвертор	- регулюва	- ряд проблем	- перетворю	11.13%

напруги з фіксованою нейтральною точкою	ння вихідної напруги в широких межах	з контролем між конденсаторами на шині постійного струму при передачі активної потужності - складність масштабування схеми	вачі частоти - інвертори напруги широкого застосування	
Інвертор напруги з «плаваючими конденсаторами»	- регулювання вихідної напруги в широких межах	- складність масштабування схеми - складність створення систем керування	- не знайшла застосування	-
Інвертор напруги z-типу	- можливість використання «пробивного» стану, що дозволяє оптимізувати передачу потужності від сонячних батарей	- перевантаження ключів схеми за використання «пробивного» стану	-	80.81% без використання фільтру 1.836% з фільтрацією вихідного сигналу

### 3. Аналіз результатів та визначення оптимальної схеми

Оскільки метою роботи є визначення найбільш оптимальної топології інвертора для роботи від відновлюваного джерела енергії важливими перевагами можна назвати можливість роботи від одного джерела сталої напруги, можливості для масштабування топології виходячи з можливого амплітудного значення вихідної напруги використовуваного відновлюваного джерела та якомога менші значення коефіцієнту нелінійних спотворень вихідної напруги, оскільки навантаженням розроблюваного перетворювача можуть виступати чутливі до форми вихідної напруги прилади (такі як аудіо підсилювачі).

Каскадні багаторівневі інвертори здатні забезпечити максимальні можливості з масштабування розроблюваної схеми, фактично обмежені лише масогабаритними показниками, економічною доцільністю та складністю реалізації системи керування. Коефіцієнт нелінійних спотворень для схем створених за даною топологією складає від 12.42% для схем з однаковою амплітудою джерел сталої напруги до 1.44% для схем з амплітудою джерел що визначається ступенем числа  $m$  без фільтрації вихідної напруги [15]. Значення коефіцієнту може також зменшуватися шляхом збільшення кількості комірок, що додає гнучкості створюваного рішення до вимог навантаження.

Недоліком використання каскадних схем є складності в забезпеченні необхідної амплітуди напруги вхідних джерел за застосування одного джерела вхідної сталої напруги (необхідність підвищення вхідної напруги при реалізації схем з амплітудою джерел що визначається ступенем числа  $m$ , або створення вхідних трансформаторів у відповідній топології) що погіршує масогабаритні та економічні показники схеми.

Застосування некаскадних схем багаторівневих перетворювачів ускладнює масштабування схеми унеможливаючи зміну схеми при зміні



вимог навантаження до КНС. Вагомою перевагою застосування даних схем є можливість роботи від одного джерела сталої напруги без модернізації схеми.

Найбільшу кількість переваг для застосування з сонячними панелями має топологія з імпедансним ланцюгом на вході схеми завдяки можливості роботи в режимі «пробою» що дозволяє отримувати максимальну потужність сонячної панелі. Можливим є застосування даної схеми з одним джерелом сталої напруги. Найзначнішим недоліком є високий КНС без встановлення вихідних фільтрів, що складає 80.81%.

Підсумовуючи результати проведеного аналізу можна сказати, що найбільш перспективними топологіями для застосування з сонячними панелями у якості джерел сталої напруги є каскадні багаторівневі топології у разі високих вимог навантаження до величини КНС або інвертори z-типу за необхідності максимізації споживаної від сонячної панелі потужності. Перспективним напрямком досліджень може бути комбінація даних топологій з метою зменшення КНС схем z-інверторів та можливості використання режиму пробою у каскадній багаторівневій схемі, що у певній мірі може нівелювати недоліки z-інверторів, пов'язані з високим значенням КНС без використання вихідних фільтрів, одночасно зберігаючи можливість роботи у режимі «пробою».

Для перетворення енергії від вітрогенераторів перевагу можна надати застосуванню каскадних схем, зважаючи на переваги вказані вище, або некаскадній схемі зі спільною нейтраллю як широко розповсюдженого рішення, що забезпечує середній показник КНС вихідної напруги, проте не потребує доробок для роботи від одного джерела постійної напруги.

## Висновки

В даній роботі проведено порівняння основних топологій інверторів напруги представлених на ринку перетворювальних пристроїв з позиції створення оптимального перетворювача для роботи від відновлюваних джерел електроживлення. Основною властивістю, за якою визначалася схема переважна до реалізації був обраний коефіцієнт нелінійних спотворень (КНС), оскільки навантаження такого перетворювача, яким виступатимуть пристрої побутової електроніки можуть бути вимогливими до даного параметра. При визначенні результатів дослідження у якості додаткових параметрів були враховані також можливість до масштабування створюваної схеми, можливість відбору максимальної потужності джерела та роботи від одного джерела сталої напруги.

За аналізом отриманих результатів симуляції силової частини каскадної схеми багаторівневого інвертора з відокремленими джерелами сталої напруги та некаскадної схеми зі спільною нейтраллю проведеної у середовищі Matlab Simulink та відомих результатів з літературних джерел було визначено схему з найменшим значенням КНС - багаторівневий інвертор з відокремленими джерелами сталої напруги зі значенням КНС у 1.44 %.

Для створення перетворювачів з сонячними батареями у якості джерела вхідної сталої напруги переважними визначено багаторівневі каскадні топології з відокремленими джерелами сталої напруги через низьке значення КНС, широкі можливості до масштабування та уніфікації створюваних схем, та топологію z-інверторів за можливість роботи у режимі «пробою» що надає можливість відбору максимальної потужності сонячної батареї.

Перспективними є дослідження у напрямку створення каскадної топології, що включає z-інвертори у якості інверторних комірок.

Для перетворювачів що працюють з вітрогенераторами у якості джерел сталої напруги переважним є застосування некаскадної топології зі спільною нейтраллю та каскадну багаторівневу топологію з вихідними трансформаторами як схем, що здатні працювати від одного джерела постійної напруги та мають середні значення КНС (для схеми зі спільною нейтраллю) та можливості до масштабування (для каскадної схеми з вихідними трансформаторами).

## Список літератури

1. V.G. Makarov, R.N. Khaybrakhmanov “Mnogourovnevye inventory napryazheniya. Obzor i primenenie. [Multilevel voltage inverters. Review and application],” *Vestnik technologicheskogo universiteta*, vol. 19, no. 22, pp. 134-138, 2016, ISSN: 1998-7072.
2. 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)
3. 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>
4. 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)
5. R. Teodorescu, F. Blaabjerg, J. K. Pedersen, E. Cengelci, 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>
6. 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](https://www.researchgate.net/publication/304024237_A_Novel_Cascaded_Multilevel_Inverter_with_Half_Bridge_and_Full_Bridge_Cells_in_Series)
7. 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>

8. 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)
9. T.V. Anisimova, A.V. Danilina, V.V Kryuchkov, "Sposoby povishenia kachestva vihodnogo napryazhenia 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>
- 10.P. W. Hammond, "MediumVoltage PWM Drive and Method," US565545, 1977, URL: <https://patents.google.com/patent/US5625545A/en>
- 11.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)
- 12.N. Donskoy, A. Ivanov, V. Matison, I. Ushakov, "Mnogourovnievie avtonomnie inventory dlya electropryvoda 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](http://www.power-e.ru/pdf/2008_1_43.pdf)
- 13.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)
- 14.Hanif, M & Basu, Malabika & Gaughan, K. (2011). Understanding the operation of a Z-source inverter for photovoltaic application with a design example. *Power Electronics, IET*. 4. 278 - 287. URL: [https://www.researchgate.net/publication/224234061\\_Understanding\\_the\\_operation\\_of\\_a\\_Z-source\\_inverter\\_for\\_photovoltaic\\_application\\_with\\_a\\_design\\_example](https://www.researchgate.net/publication/224234061_Understanding_the_operation_of_a_Z-source_inverter_for_photovoltaic_application_with_a_design_example)

15. Rajambal, K & Sanjeevikumar, P & Chinnaponnu, A. (2010). Comparison of MLI and Z-Source Inverter for Transformerless Operation of Single-Phase Photovoltaic Systems. *Thammasat International Journal of Science and Technology (TIJSAT)*, Thammasat University Publications, Klongluang, Pathumtani(Thailand). vol.15. 37-47. **URL:** [https://www.researchgate.net/publication/231522437\\_Comparison\\_of\\_MLI\\_and\\_Z-Source\\_Inverter\\_for\\_Transformerless\\_Operation\\_of\\_Single-Phase\\_Photovoltaic\\_Systems](https://www.researchgate.net/publication/231522437_Comparison_of_MLI_and_Z-Source_Inverter_for_Transformerless_Operation_of_Single-Phase_Photovoltaic_Systems)