

# ОГЛЯД І ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТРАНЗИСТОРНИХ РЕГУЛЯТОРІВ ЗМІННОЇ НАПРУГИ

**Голубєв В.В., д.т.н., ст. наук. співробітник**

*Інституту електродинаміки НАН України*

**Грудська В.П., доц.**

*КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедри теоретичної електротехніки*

**Наделяєв К.О., Шевченко А.О., студенти**

*КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедри автоматизації теплоенергетичних процесів*

**Вступ.** На сучасному етапі розвитку перетворювальної техніки розробка і побудова перетворювачів змінної напруги різного функціонального призначення проводиться у двох основних напрямках: перетворювачі з безпосереднім зв'язком мережі та навантаження і перетворювачі з проміжною ланкою постійного струму [1]. Першим притаманна вільна циркуляція реактивної енергії, але в них виникають певні труднощі з комутацією ключів змінного струму, особливо на високій частоті. В других перетворювачах високочастотна комутація перенесена у ланку постійного струму з накопичувальним елементом для відводу реактивного струму навантаження. Однак для повернення реактивної або кінетичної енергії навантаження у мережу потрібні спеціальні заходи. На даний час вибір схем і алгоритмів керування перетворювачів для регулювання (стабілізації) змінної напруги є неоднозначним і потребує певного узагальнення теоретичних і практичних відомостей.

**Мета роботи:** порівняльний аналіз схем і функціональних можливостей транзисторних регуляторів (стабілізаторів) змінної напруги трьох типів: матричних; інверторних; матричних з колами скиду і рекуперації реактивної енергії навантаження у мережу.

**Матеріал досліджень.** У роботі використані розробки імпульсних перетворювачів напруги, надані для досліджень фахівцями в області енергетичної електроніки Інституту електродинаміки НАНУ.

*Імпульсні регулятори (стабілізатори) змінної напруги матричного типу* відносять до перетворювачів з безпосереднім зв'язком мережі та навантаження. Вони характеризуються наявністю двох і більше повністю (двостороннє) керованих ключів змінного струму і багатошаговою комутацією за інформацією про струм або напругу на ключах [1, 2].

Як приклад на рис. 1 подано схему вузькодіапазонного регулятора-стабілізатора, обладнаного для двозонного регулювання (підвищення і пониження) напруги автотрансформатором з двома відводами і відповідним набором поздовжніх ключів  $VS1-VS4$  змінного струму. Поперечний ключ  $VS5$ ,  $VS6$  призначений для пропуску реактивного струму навантаження за вимкнених поздовжніх ключів. Вхідний фільтр  $L_1$ ,  $C_1$  компенсує вплив реактансу мережі та індуктивності розсіювання автотрансформатора і запобігає появі перенапруг на ключах у моменти їхнього вимикання.

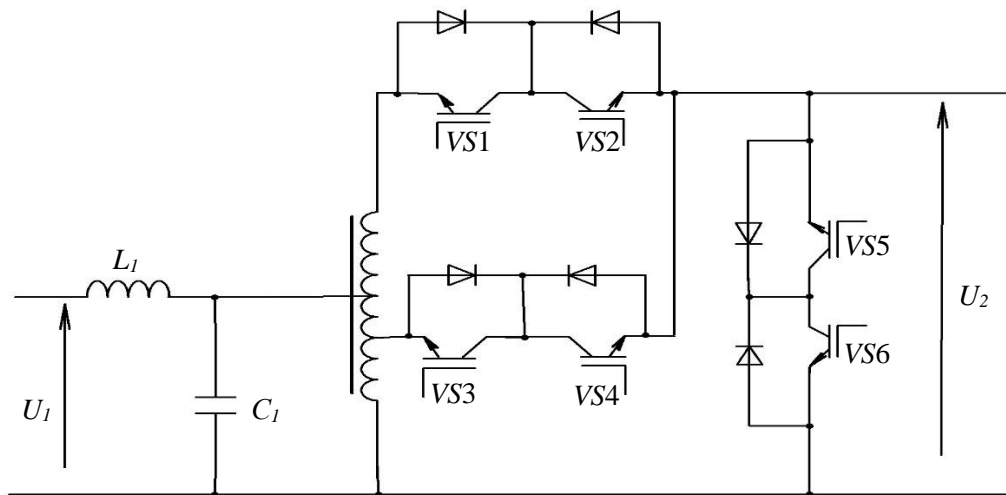


Рисунок 1 – Вузькодіапазонний матричний регулятор напруги

Поздовжні ключі  $VS1-VS4$  працюють на підвищеній частоті комутації у режимі широтно-імпульсного керування. Для забезпечення надійного переключення вентилів використовують спосіб комутації за інформацією про полярність напруги, прикладеної до пари послідовно з'єднаних комутуючих ключів (voltage based commutation). З метою підвищення достовірності інформації про напругу доводиться “загрублювати” синхронізацію системи керування з мережею. А саме в околі переходу вхідної напруги через нуль утворюють зону нечутливості. Це призводить до виникнення асиметрії у вихідній напрузі перетворювача.

Спосіб комутації на підставі інформації про струм ключа в такому перетворювачі є недоцільним, оскільки вимірюваний датчиком струм залежить від алгоритму роботи ключів і характеру навантаження. Це означає, що струм має несприятливу для вимірювання форму кривої, а його значення може у будь-який момент часу перейти у зону нечутливості датчика струму і перетворювач стане некерованим.

*Регулятори інверторного типу* складаються з реверсивного (двоквадрантного) випрямляча, однієї або кількох пар напівкерованих транзисторно - діодних ключів, що утворюють напівміст, і проміжної ланки (media link) у вигляді буферного конденсатора з пульсуючою напругою. Реверсивний випрямляч здійснює безпосередній зв'язок проміжної ланки з мережею; напівмостові ключі, працюючи за певним алгоритмом у режимі інвертора напруги, разом з вихідним фільтром формують задану вихідну напругу; функції буферного конденсатора можуть дещо змінюватися в залежності від схеми. Слід відмітити, що в схемах з трифазним вихідним інвертором конденсатор використовують як накопичувач енергії для підвищення напруги мережі, а випрямляч формує криву вхідного струму, коректуючи вхідний коефіцієнт потужності [4].

На рис. 2 показано схему широкодіапазонного регулятора-стабілізатора змінної напруги з проміжною ланкою пульсуючої напруги (ЛПН).

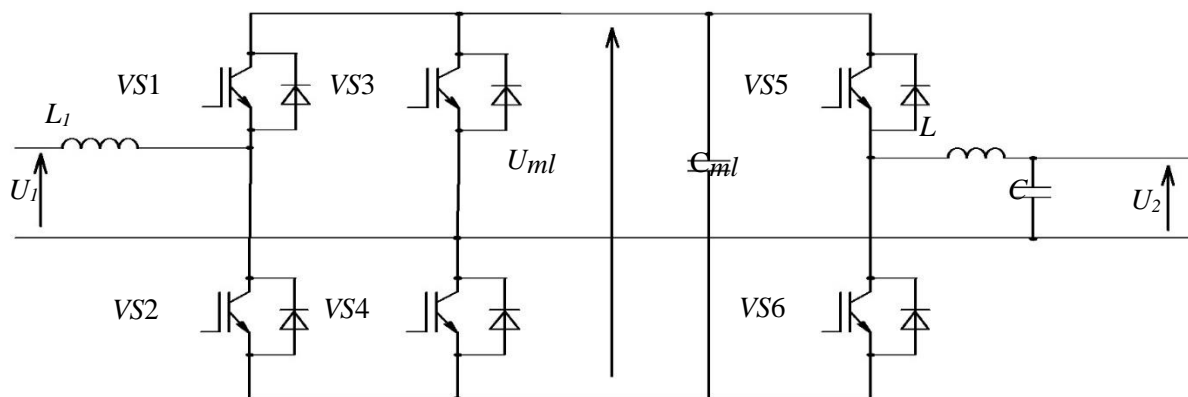


Рисунок 2 – Широкодіапазонний регулятор змінної напруги інверторного типу

Даний регулятор може працювати у двох режимах: пониження і підвищення вихідної напруги  $U_2$  відносно вхідної  $U_1$ . Ключі реверсивного випрямляча  $VS3$  і  $VS4$  працюють по-різному: вмикаються по чергові з частотою мережі в усіх режимах роботи пристрою;  $VS1$  і  $VS2$  переключаються з частотою мережі в понижувальному режимі роботи регулятора і з підвищеною частотою - в режимі підвищення напруги. Ключі напівмосту  $VS5$  і  $VS6$  працюють навпаки: з підвищеною частотою в режимі пониження і з частотою мережі в режимі підвищення напруги. Буферний конденсатор короткочасно приймає на себе реактивну енергію кола  $R-L$  активно-індуктивного навантаження або вхідного дроселя  $L_1$  в залежності від режиму роботи регулятора. Вхідний дросель  $L_1$  потрібний у пусковому і підвищувальному режимах пристрою. В останньому випадку дросель працює на підвищеній частоті, тому має суттєво менші масогабаритні показники порівняно з рівноцінним йому за струмом і діапазоном регулювання автотрансформатором у схемі регулятора матричного типу на рис. 1.

На рис. 3 наведено схему вузькодіапазонного регулятора – стабілізатора з двополярним реверсивним вольтододатком. Встановлена потужність вольтододатного трансформатора  $T1$  розраховується за максимальною різницею між вхідною та вихідною напругами перетворювача. Струм силових ключів пропорційний напрузі вольтододатку і зменшується зі звуженням діапазону регулювання. Отже, в перетворювачі на рис.3 потрібні менш потужні ключі, ніж у попередніх схемах, а вихідна напруга має кращий гармонічний склад порівняно з широкодіапазонним регулятором – стабілізатором за схемою, яку показано на рис. 2.

Недоліком вольтододатних регуляторів – стабілізаторів з транзисторними ключами на первинній стороні трансформатора є складність захисту силових ключів від надструмів і перенапруг, які виникають у разі короткого замикання в навантаженні, а також неможливість швидкого самопоновлення роботи пристрою після аварійного вимикання. Усунути цей недолік і одночасно зменшити встановлену потужність трансформатора можна шляхом використання в регуляторі інверторного типу високочастотного автотрансформатора [5].

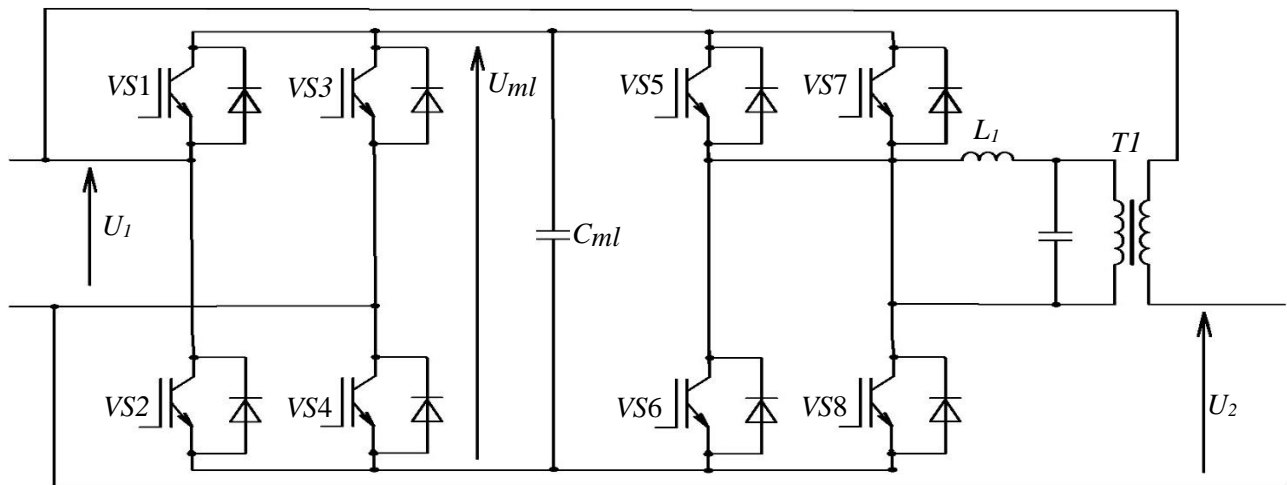


Рисунок 3 – Вузькодіапазонний інверторний регулятор напруги з реверсивним вольтододатком

Матричні регулятори змінної напруги зі скидом реактивної енергії навантаження у мережу мають таку саму кількість силових керованих елементів, як регулятори інверторного типу. На рис.4 зображено схему однофазного широкодіапазонного матричного регулятора зі скидом енергії. До складу такого регулятора входять: реверсивний випрямляч на полукерованих ключах змінного струму  $VS1 - VS4$ ; буферний конденсатор  $C_{ml}$ ; повністю керований силовий ключ  $VS5, VS6$ ; зворотні діоди  $VD1, VD2$  для скидання енергії навантаження в конденсатор і мережу живлення; вхідний дросель  $L_1$  для обмеження струму в буферному конденсаторі при вмиканні регулятора і можливих перепадах напруги мережі. Випрямляч, на відміну від інверторних регуляторів, проводить реактивний струм навантаження в неробочі інтервали (інтервали формування пауз у вихідній напрузі). Поздовжні ключі змінного струму проводять струм навантаження в робочі інтервали часу. Зустрічно-послідовно з'єднані транзистори поздовжніх ключів регулятора мають спільні затискачі і однаковий алгоритм керування, що спрощує систему керування.

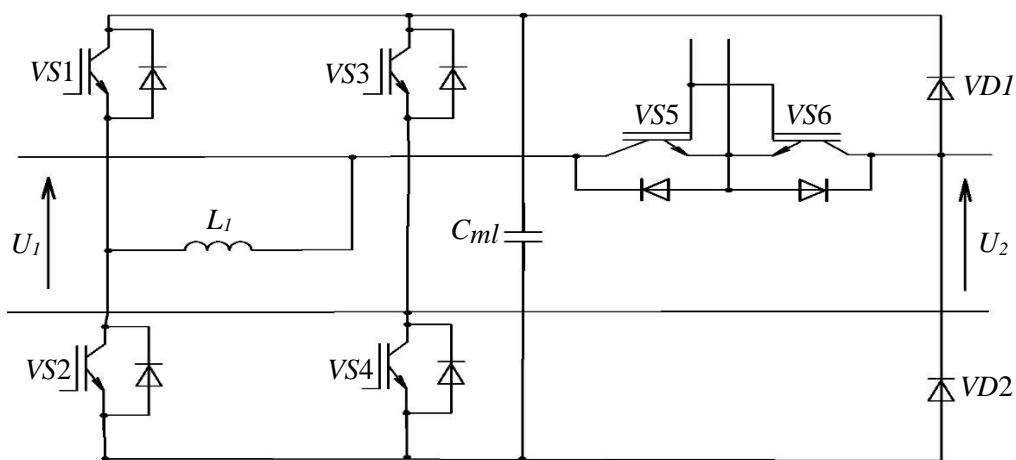


Рисунок 4 – Однофазний широкодіапазонний матричний регулятор напруги зі скидом енергії

У цій схемі забезпечується нерозривність реактивного струму активно-індуктивного навантаження під час міжкомутаційних пауз або інтервалів відключення навантаження без додаткового поперечного ключа, що замикає його накоротко. Таким чином, у схемі немає високочастотних ключів, одночасне вмикання яких могло б спричинити внутрішнє коротке замикання. Ця властивість схеми суттєво підвищує надійність комутації і всього пристрою в цілому.

На рис. 5 показано схему трифазного матричного перетворювача напруги зі скиданням енергії, яка набула поширення в асинхронному електроприводі. Транзистори реверсивного випрямляча  $VS1-VS6$  включаються циклічно по одному в анодний і в катодний групах мосту, як зазвичай. У неробочих інтервалах (інтервалах пауз у вихідній напрузі) за вимкнених транзисторів поздовжніх ключів відбувається скидання енергії навантаження у буферний конденсатор через відсікаючі діоди  $VD1, VD2$  і діоди мостового ключа  $VS10$ . Процес триває доти, поки струм дроселя не досягне значення струму навантаження, потім накопичена в конденсаторі енергія скидається у мережу через відкриті транзистори випрямляча. Ємність конденсатора вибирають у відповідності до коефіцієнта потужності навантаження мінімально необхідною, щоб у моменти вимкнення силового ключа напруги на конденсаторі і на відключеному навантаженні не перевищували допустимого значення.

Між моментами вимкнення поздовжніх ключів і вмикання поперечного ключа (і навпаки) формується пауза, під час якої повністю поновлюються запірні властивості діодів і транзисторів, що проводили струм.

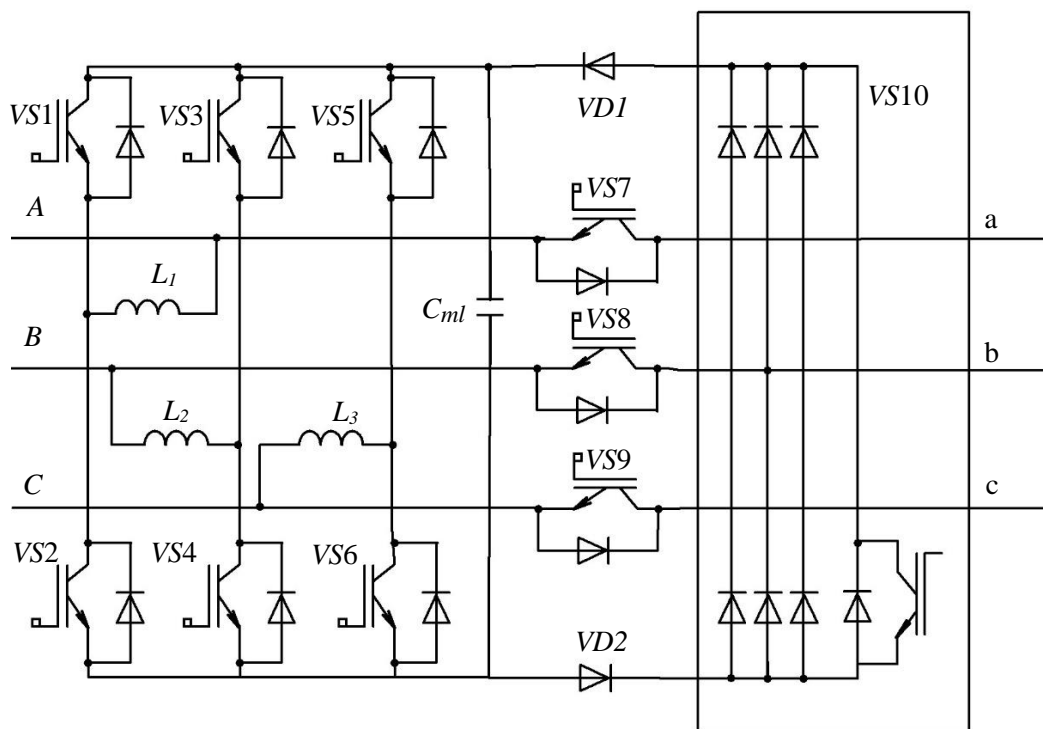


Рисунок 5 – Матричний регулятор напруги зі скиданням енергії для систем асинхронного електроприводу

**Висновки.** Варіанти побудови регуляторів змінної напруги чисельні і різноманітні. Навіть у наведених схемах окремі силові функціональні вузли (субблоки) можуть бути реалізовані по-різному і на різній елементній базі. Наприклад, у перетворювачах інверторного типу реверсивні випрямлячі можуть бути замінені тиристорними інверторами зі штучною комутацією. Дотримуючись вихідного поділу регуляторів на три основні типи (матричні, інверторні, матричні зі скиданням енергії), можна зробити наступні узагальнення.

1. Перевагами регуляторів матричного типу є мінімальна кількість силових напівпровідникових елементів і лінійна регулювальна характеристика по першій гармоніці при роботі на лінійне та нелінійне навантаження з будь-яким коефіцієнтом потужності. До спільних недоліків слід віднести: складний алгоритм керування; залежність алгоритму і системи керування в цілому від якості напруги живлення, а у разі сумірних з мережею потужностей – і від роботи самого перетворювача; існування передумов для виникнення асиметрії у вихідній напрузі.

Матрична схема найбільш доцільна для регуляторів-стабілізаторів з вузько діапазонним двозонним (підвищення і пониження) регулюванням напруги. Трифазні регулятори даного типу можуть будуватися з трьох однофазних у схемі з нульовим проводом та з двох однофазних у схемі без нульового проводу.

2. Усі перетворювачі інверторного типу дозволяють розширити зону нечутливості датчиків напруги, завдяки чому їхні системи керування стають не критичними до якості вхідної напруги. Однак у них зберігається можливість появи асиметрії в керуванні ключами полумостів через нечітку визначеність у часі меж напівперіодів напруги мережі.

Інверторні схеми є найбільш ефективними для побудови однофазних широкодіапазонних регуляторів і стабілізаторів змінної напруги, а також агрегатів безперебійного живлення і універсальних джерел широкого призначення. Побудова трифазних перетворювачів інверторного типу безпосередньо з однофазних є невиправданою через складність схеми, а використання трифазного реверсивного випрямляча призводить до втрати головної переваги таких перетворювачів – синусної обвідної на всіх етапах перетворення.

3. У матричних регуляторах зі скидом реактивної енергії навантаження у мережу алгоритм керування поздовжніми ключами не потребує синхронізації з мережею, завдяки чому в них не виникає асиметрії вихідної напруги з вини системи керування.

За цим принципом доцільно будувати одно-і трифазні широкодіапазонні регулятори напруги, пристрої для обмеження змінного струму (напруги) на середні і малі потужності, а також перетворювачі частоти. Слід окремо виділити, що трифазні регулятори напруги такого типу допускають з'єднання навантажень як за схемою “зірка”, так і за схемою “трикутник”, тому їх широко використовують у системах асинхронного електроприводу.

### Перелік посилань

1. Голубев В.В. Импульсное преобразование переменного напряжения. – К.: Наукова думка, 2016. – 245с.
2. Новський В.А., Голубев В.В., Попов А.В. Оптимальне імпульсне регулювання змінної напруги.//Техн. електродинаміка. Темат. вип. “Проблеми сучасної електротехніки”- 2002 - Ч.6. – С.45 – 47.
3. Голубев В.В. Принципи комутації змінного струму та їхнє використання.//Техн. електродинаміка. Темат. вип. “Проблеми сучасної електротехніки”. – 2000. – Ч. 2. – С. 60-63.
4. А.С. 1264264 СССР Устройство для регулирования и симметрирования напряжения в трехфазных сетях. / А.К. Шидловский и др. // Б.И. – 1990. – №38.
5. А.С. 1594662 СССР. Способ регулирования переменного напряжения / В.В. Голубев , К.А. Липковський и др. // Б.И. – 1990. – №35.
6. Голубев В.В. Двухзонні імпульсні перетворювачі змінної напруги з високочастотним автотрансформатором. // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – Київ: ІЕД НАНУ, 2007. – №2 (17). – С.94 – 100.