

ISBN 978-83-68188-08-0

Бойко С.М.,
Касаткіна І.В.,
Городній О.М.,
Жуков О.А.

СИЛОВІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ВІДНОВЛЮВАЛЬНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

Навчальний посібник

 **iScience**
Варшава, Польща - 2024

Бойко С.М., Касаткіна І.В., Городній О.М., Жуков О.А.

СИЛОВІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ВІДНОВЛЮВАЛЬНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

Навчальний посібник

Варшава – 2024

УДК 621.31

Автори:

Бойко С.М., Касаткіна І.В., Городній О.М., Жуков О.А.

Рекомендовано до друку вченою радою Криворізького національного університету 28 травня 2024р. (протокол № 11)

Рецензенти: Денисов Ю.О., д.т.н., професор (Національний університет «Чернігівська політехніка», м. Чернігів)
Котов О.Б., д.т.н., професор (Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя)

Силові перетворювачі відновлювальної енергетики. Навчальний посібник / С.М. Бойко, І.В. Касаткіна, О.М. Городній, О.А. Жуков – Варшава: iScience Sp. z.o.o. – 2024 – 230 с.

Навчальний посібник висвітлює питання впровадження та функціонування силових перетворювачів в структурах систем енергозабезпечення на базі відновлювальної енергетики. Особливу увагу акцентовано на силові перетворювачі в структурах систем сонячних та вітрових електростанцій. Навчальний посібник є продовженням науково-методичних праць авторського колективу.

Навчальний посібник, буде корисним для студентів, аспірантів спеціальностей 141 – «Енергетика, електротехніка та електромеханіка», 171 – «Електроніка», 173 – «Авіоніка», 275 – «Транспортні технології», 272 – «Авіаційний транспорт» та науковцям.

ISBN 978-83-68188-08-0
УДК 621.31

© Бойко С.М., Касаткіна І.В.,
Городній О.М., Жуков О.А., 2024.
© iScience Sp. z o. o.

Слово до читача...

Навчальний посібник «Силові перетворювачі відновлювальної енергетики» висвітлює питання впровадження та функціонування силових перетворювачів в структурах систем енергозабезпечення на базі відновлювальної енергетики. Особливу увагу акцентовано на силові перетворювачі в структурах систем сонячних та вітрових електростанцій. Навчальний посібник є продовженням науково-методичних праць авторського колективу.

Слід зазначити, що на сьогоднішній день актуальним залишається питання енергетичної безпеки, що особливо важливо для транспортної інфраструктури з метою забезпечення безпеки експлуатації транспортних засобів та безпеки перевезення пасажирів. У навчальному посібнику висвітлені питання впровадження та експлуатації силових перетворювачів в системах електропостачання на базі відновлювальних джерел електричної енергії, котрі використовуються у тому числі і в транспортній галузі. Також слід звернути увагу на аналіз міжнародний досвід щодо впровадження відновлювальних джерел електричної енергії в структури систем електропостачання, у тому числі в умовах транспортної галузі, з використанням сучасних зразків силових перетворювачів.

*Особлива подяка рецензентам **Денисову Ю.О.**, д.т.н., проф. (Національний університет «Чернігівська політехніка», м. Чернігів) та **Котову О.Б.**, д.т.н., проф. (Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя).*

Автори

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ЩОДО ВІДНОВЛЮВАЛЬНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ	8
1.1 Поняття та класифікація відновлювальних джерел енергії	8
1.2 Потенційні світові запаси відновлювальної енергії у світі.....	12
1.3 Енергетичний потенціал відновлювальних джерел енергії на Україні.....	18
1.4 Загальна характеристика використання правових та наукових засад для розвитку нетрадиційних джерел енергії	22
1.5 Застосування нетрадиційних та відновлювальних джерел енергії у світі	23
1.6 Геліоенергетика.....	24
1.7 Біоенергетика.....	33
1.8 Вітроенергетика.....	40
1.9 Мала гідроенергетика	49
Контрольні питання до розділу 1	65
РОЗДІЛ 2. КОМПЛЕКСНЕ ВИКОРИСТАННЯ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ І АКУМУЛЯТОРІВ ЕНЕРГІЇ	66
2.1 Загальні відомості, основні поняття, визначення	66
2.2 Класифікація комбінованих джерел і акумуляторів енергії, основні характеристики	67
2.3 Комбінація нетрадиційних джерел з традиційними джерелами енергії.....	68
2.4 Комбінація нетрадиційних джерел з акумуляторами енергії	72
2.5 Комбінація одночасного використання декількох нетрадиційних джерел енергії.....	72
2.6 Комплексне використання відновлюваних джерел і акумуляторів ...	74
2.7 Принципи комбінування різних відновлювальних джерел енергії....	76
Контрольні питання до розділу 2.....	79
РОЗДІЛ 3. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ЕЛЕМЕНТНУ БАЗУ СИЛОВОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ	81
3.1 Склад силових схем вентиляльних перетворювачів. Силові діоди	81
3.2 Характеристики, призначення і класифікація тиристорів	88
3.3 Характеристика, призначення та класифікація транзисторних ключів.....	96
Контрольні питання до розділу 3.....	110
РОЗДІЛ 4. ІМПУЛЬСНІ РЕГУЛЯТОРИ ПОСТІЙНОЇ НАПРУГИ	111
4.1 Принципи імпульсного регулювання постійної напруги.....	111
4.2 Варіанти схем силового кола імпульсних регуляторів	115
4.3 Реверсивні імпульсні регулятори постійної напруги	120
4.5 Особливості імпульсних регуляторів постійної напруги на тиристорах	127
Контрольні питання до розділу 4.....	142

РОЗДІЛ 5. ІНВЕРТОРИ	144
5.1 Загальні відомості	144
5.2 Однофазні залежні інвертори.....	144
5.3 Двопівперіодний залежний інвертор зі середньою точкою.....	147
5.4 Паралельні інвертори.....	149
5.5 Послідовні інвертори струму	154
5.6 Послідовно – паралельні інвертори струму	155
5.7 Резонансні інвертори	156
5.8 Інвертори напруги	159
Контрольні питання до розділу 5.....	165
РОЗДІЛ 6. СПОСОБИ РЕГУЛЮВАННЯ ТА ПОЛПШЕННЯ ЯКОСТІ ВИХІДНОЇ НАПРУГИ ІНВЕРТОРІВ	166
6.1 Способи регулювання напруги перетворювачів зі змінною вихідною напругою	166
6.2 Широтно-імпульсне регулювання	172
6.3 Регулювання шляхом підсумовування напруг декількох інверторів.....	176
6.4 Спосіб підсилення	179
6.5 Покращення форми вихідної напруги способом фільтрації.....	180
6.6 Формування квазісинусоїдальної напруги способом амплітудно- імпульсної модуляції	183
6.7 Формування квазісинусоїдальної напруги методом ШПМ та АШПМ	187
Контрольні питання до розділу 6.....	190
РОЗДІЛ 7. ЕЛЕМЕНТИ ТА ЗАГАЛЬНІ СХЕМИ СОНЯЧНОЇ ТА ВІТРОВОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ	192
7.1 Елементи сонячної батареї та загальні схеми сонячної електростанції.....	192
7.2 Акумулятори електростанції.....	195
7.3 Контролери заряду акумуляторів.....	197
7.4 Інвертори.....	198
7.5 Варіанти виконання вітроустановок.....	214
Контрольні питання до розділу 7.....	222
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ТА РЕКОМЕНДОВАНОЇ ДЛЯ КОРИСТУВАННЯ ЛІТЕРАТУРИ	223

ВСТУП

В даний час, у всьому світі спостерігається підвищений інтерес до використання в різних галузях економіки відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). Це пов'язано із змінами, які відбуваються в енергетичній політиці світових держав, в яких визначального значення набуває перехід на енерго- і ресурсозберігаючі технології.

Організаціями системи ООН, а також іншими міжнародними організаціями акцентується значна увага проблемі застосування ВДЕ в народногосподарському комплексі світової економіки. На заходи по впровадженню ВДЕ виділяються значні кошти з фондів ЄС та міжнародних інституцій. Збільшується чисельність міжнародних симпозиумів, конференцій і зустрічей, присвячених аналізу стану і перспектив розвитку цього напрямку енергетики.

Практичне використання нетрадиційних джерел енергії забезпечило сьогодні інтенсивний розвиток енергетики у багатьох країнах світу.

Під відновлюваними джерелами енергії (ВДЕ) розуміють джерела енергії, безперервно відновлювані, за рахунок постійного протікаючих природних процесів, таких, як: енергія сонячного випромінювання, енергія вітру, гідродинамічна енергія води; геотермальна енергія: тепло ґрунту, енергія ґрунтових вод, річок і водойм, а також антропогенні джерела первинних енергоресурсів: біомаса, біогаз і інше паливо з органічних відходів, яке використовувалось для виробництва електричної або теплової енергії та інших видів енергії.

Використання ВДЕ стало однією з найбільш інтенсивно розвиваючих областей економіки. У провідних країнах Євросоюзу (ЄС), за оцінками Міжнародного енергетичного агентства (МЕА), виробництво енергії з ВДЕ щорічно зростає на 10-20% [1].

Згідно даних Евростата, якщо в 2004 році в ЄС 7,9 % електроенергії було одержано за рахунок ВДЕ, то в 2021 році цей показник склав вже 17 % [1].

За прогнозами Європейської ради з відновлюваної енергетики, до 2040 року відновлювані джерела зможуть забезпечити 50 % виробництва енергії в світі. Відповідно до рішення Європарламенту частка ВДЕ в енергобалансі ЄС в 2020 році повинна скласти 20 %, у 2040 році – 40 % [1].

Лідерами у використанні ВДЕ в ЄС є Норвегія (64,7 %), Швеція (46,8 %), Латвія (33,1 %) і Фінляндія (31,8 %) [1].

Одну з провідних позицій по рівню розвитку практично всіх видів ВДЕ займає Німеччина. У 2004 році в Німеччині був прийнятий спеціальний закон («EGG»), який передбачає розширення частки ВДЕ в електроенергетиці до 2020 року до 35%, 2030 року – до 50 %. У 2021 році цей показник склав 20% [1].

Загальна потужність геліоустановок на планеті перевищила рубіж 100 ГВт, свідчать дані Європейської асоціації фотоелектричної промисловості (EPIA). У 2022 році загальна потужність геліоенергетичних установок зросла на 31 ГВт, в ЄС вона досягла 70 ГВт. У Італії сонячні батареї вже забезпечують приблизно 7 % споживаної електроенергії, в Німеччині – 6 %, а в Болгарії, Чехії, Бельгії і Іспанії – по 3 %. За 2012 рік в Євросоюзі були встановлені нові фотоелектричні перетворювачі потужністю 17 ГВт. Близько половини цього приросту (8 ГВт) забезпечила Німеччина. Для порівняння, сумарна потужність європейської вітрової енергетики за цей же період збільшилася на 12 ГВт, а газових електростанцій – на 5 ГВт [1].

У США на даний час на ВДЕ припадає 6 % енерговиробництва, а до 2030 року цей показник повинен зрости до 10 % [2].

Активно розвивають відновлювану енергетику Бразилія і Мексика. Частка ВДЕ (навіть без ГЕС) у виробництві електроенергії в цих країнах вже зараз перевищує 4%.

Керуючись цілями розвитку альтернативної енергетики, в Україні введено регулюючий «зелений» тариф на ВДЕ, такі як вітер, сонце, біомаса та електроенергію яка виробляється малими ГЕС. «Зелений» тариф (тариф на підключення) є економічним і політичним механізмом, метою якого є залучення інвестицій в технології використання відновлюваних джерел енергії.

РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ЩОДО ВІДНОВЛЮВАЛЬНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

1.1 Поняття та класифікація відновлювальних джерел енергії

Енергетика має свою систему термінів і понять.

Велика енергетика – напрямок енергетики, пов'язаний з отриманням мереж тепла і електрики. Характерною рисою установок у великій енергетиці є великі розміри генераторних блоків і залежність від користувача [2].

Мала енергетика – напрямок енергетики, пов'язаний з отриманням незалежних від централізованих мереж тепла і електрики. Характерною ознакою установок в малій енергетиці є компактні розміри генераторних блоків і, як правило, мобільність конструкцій.

Загальноприйнятого терміна «мала енергетика» в даний час немає. В електроенергетиці найбільш часто до малих електростанцій прийнято відносити електростанції потужністю до 50 МВт з агрегатами одиничною потужністю до 25 МВт. Зазвичай такі електростанції поділяють на три підкласи [3]:

- мікроелектростанції потужністю до 100 кВт;
- мініелектростанції потужністю від 100 кВт до 1 МВт;
- малі електростанції потужністю більше 1 МВт.

Автономні джерела енергії – джерела електричної енергії, необхідні для роботи систем і пристроїв, не пов'язаних з лініями електропередачі.

Традиційні невідновлювані джерела енергії – це природні запаси речовин і матеріалів, які можуть бути використані людиною для виробництва енергії. Прикладом можуть служити ядерне паливо, вугілля, нафта, газ. Енергія невідновлюваних джерел на відміну від відновлюваних знаходиться в природі в зв'язаному стані і вивільняється в результаті цілеспрямованих дій людини [4].

Нетрадиційні відновлювані джерела енергії – це джерела на основі постійних існуючих або періодично виникаючих в навколишньому середовищі потоків енергії. Відновлювана енергія не є наслідком цілеспрямованої діяльності людини, і це є її визначальною ознакою [5].

Усі енергетичні ресурси на Землі, що є продуктами безперервної діяльності Сонця, можуть бути поділені на дві основні групи: на акумульовані природою й у більшості випадків непоновлювані та на неакумульовані, але постійно відновлювані (табл.1.1). До першої групи

належать запаси паливних корисних копалин: нафта, кам'яне та буре вугілля, торф і підземні гази, а також уранові руди та інші хімічні елементи або їх сполуки, які застосовують при термоядерних і ядерних реакціях. До другої групи належать сонячне випромінювання, вітер, потоки рік, морські хвилі та припливи, внутрішнє тепло Землі, тощо.

Таблиця 1.1 – Потенціальні запаси джерел енергії на Землі

Види енергії	Запаси енергії
Невідновлювані (кВт · год)	
1. Термоядерна енергія	$1\ 000\ 000\ 000 \cdot 10^{12}$
2. Ядерна енергія	$574\ 000 \cdot 10^{12}$
3. Енергія паливних копалин	$553\ 64 \cdot 10^{12}$
Відновлювані (кВт · год/рік)	
1. Енергія сонячних променів	$667\ 800 \cdot 10^{12}$
2. Енергія морів і океанів	$70\ 000 \cdot 10^{12}$
3. Енергія вітру	$17\ 369 \cdot 10^{12}$
4. Енергія внутрішнього тепла Землі	$134 \cdot 10^{12}$
5. Енергія річок	$18 \cdot 10^{12}$

Згідно з класифікацією Міжнародного енергетичного агентства до відновлюваних джерел енергії належать такі категорії:

– відновлювальні джерела енергії (ВДЕ), які спалюються, і відходи біомаси;

– тверда біомаса і тваринні продукти: це біологічна маса, у тому числі будь-які матеріали рослинного походження, що використовуються безпосередньо як паливо або перетворюються на інші форми перед спалюванням (деревина, рослинні відходи і відходи тваринного походження; деревне вугілля, яке одержують з твердої біомаси);

– газ чи рідина з біомаси (біогаз, отриманий у процесі анаеробної ферментації біомаси і твердих відходів, який спалюється для виробництва електрики і тепла);

– муніципальні відходи: це матеріали, що спалюються для виробництва теплової та електричної енергії (відходи житлового, комерційного і громадського секторів), які утилізуються муніципальною владою з метою централізованого знищення;

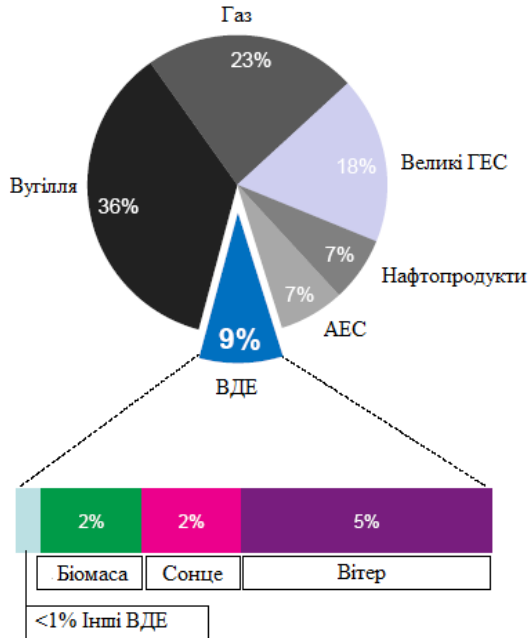


Рисунок 1.1 – Встановлена потужність у світі по видам джерел енергії

– промислові відходи: тверді й рідкі матеріали, що спалюються безпосередньо, зазвичай на спеціалізованих підприємствах, для виробництва теплової й електричної енергії та поліпшення екології;

– гідроенергія: це потенціальна або кінетична енергія води, перетворена на електричну енергію за допомогою устаткування та обладнання гідроелектростанцій, як великих, так і малих;

– геотермальна енергія: це тепла енергія, що надходить із земних надр, зазвичай у вигляді гарячої води або пари. Використовується для виробництва або безпосередньо як джерело тепла для систем тепlopостачання, потреб сільського господарства тощо;

– сонячна енергія: це енергія потоку фотонів, що випромінюються Сонцем, які рухаються в напрямку Землі, яка використовується для одержання гарячої води та електричної енергії;

– енергія вітру: це кінетична енергія повітряного потоку природного чи штучного, що застосовується для виробництва електроенергії у вітрових електроагрегатах, за допомогою вітрових турбін;

– енергія приливів, морських хвиль і океану: це механічна енергія припливних потоків, або хвиль, що використовується для виробництва електричної енергії.

Класифікацію відновлюваних джерел енергії наведено на рис. 1.2. Результатами прямої сонячної діяльності є тепловий ефект і фотоефект, внаслідок чого Земля отримує теплову енергію та світло. Результатом побічної діяльності Сонця є відповідні ефекти в атмосфері, гідросфері та геосфері, що викликають виникнення вітру, хвиль, зумовлюють течію річок, створюють умови для збереження внутрішнього тепла Землі.

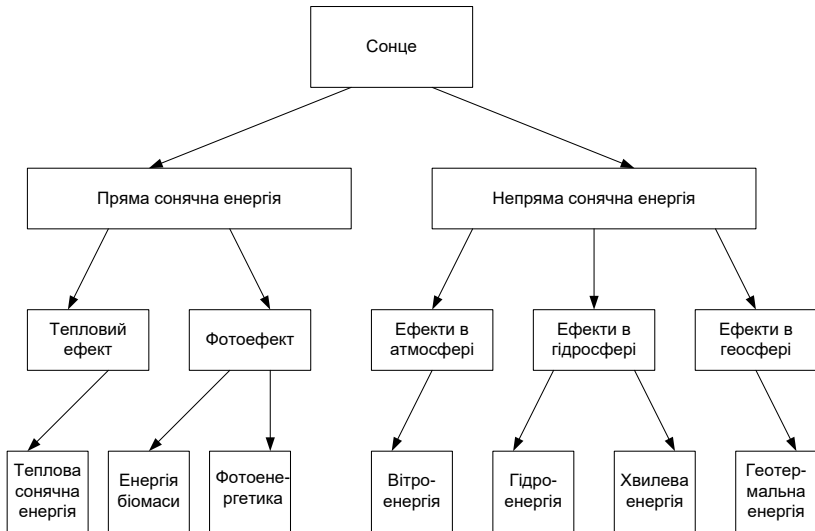


Рисунок 1.2 – Класифікація відновлюваних джерел енергії

Сонячна діяльність характеризується приблизними показниками, наведеними на рис. 1.2, які загалом утворюють схему теплового балансу Землі [6].

Автономна енергоустановка з НВДЕ повинна мати або акумулятори енергії, або установку-дублера, що працює на традиційному паливі. Якщо установка з НВДЕ приєднана до мережі, то мережа повинна взяти на себе компенсацію нерівномірності постачання енергії, для чого вона повинна мати достатню ємність і маневреність.

1.2 Потенційні світові запаси відновлювальної енергії у світі

Необхідність широкого використання ВДЕ визначається швидким зростанням потреби в електричній енергії, яка за прогнозами має збільшитися у 2 рази до 2030 р. і в 4 рази до 2050 р. у порівнянні з 2000 р.; та значним зменшенням у недалекому майбутньому розвіданих запасів органічного палива; кризовим станом довкілля в зв'язку із забрудненням оксидами азоту і сірки, вуглекислим газом, пилоподібними частинками від згорання палива, радіоактивним і тепловим забрудненням тощо [7].

Відновлювальні джерела енергії мають принципові відмінності, тому їх ефективне використання стає можливим на основі науково розроблених принципів перетворення ВДЕ у різні сособи використання, необхідні споживачам. У навколишньому середовищі завжди існують потоки відновлювальної енергії, тому в процесі розвитку відновлювальної енергетики необхідно орієнтуватись на місцеві енергоресурси, вибираючи з них найефективніші. Використання ВДЕ має бути багатоваріантним й комплексним, що дозволяє прискорити економічний розвиток регіонів. Наприклад, досить ефективною базою для використання ВДЕ можуть бути агропромислові комплекси, де відходи тваринництва й рослинництва вже використовуються, як сировина для одержання біогазу, а також рідкого й твердого палива, виробництва добрив, але не в повному обсязі.

Для ефективного планування енергетики на відновлювальних енергоресурсах необхідно: по-перше, систематичне дослідження навколишнього середовища, аналогічне дослідження геологічного характеру при пошуку нафти або газу, по-друге, вивчення потреб конкретного регіону в енергії для промислового, сільськогосподарського виробництва й побутових потреб. Зокрема, щоб вибрати найекономічніше джерело енергії, необхідно знати структуру споживачів енергії.

Однією з найважливіших характеристик відновлювальних джерел енергії є їх енергетичний потенціал – показник, який визначає кількість енергії, властиву відповідному виду ВДЕ.

У таблиці 1.2 наведено енергетичний потенціал відновлювальних джерел енергії у світі.

Таблиця 1.2 – Енергетичний потенціал відновлювальних джерел енергії

Відновлювальні енергоресурси	Показники, млрд. т у.п./рік	
	Технічний	Економічний
Променева енергія Сонця	5	1
Теплова енергія морів і океанів	1	0,1
Енергія вітру	5	1
Гідроенергія, в тому числі:		
енергія водяних потоків	4,5	2,6
енергія хвиль	0,05	0,01
енергія припливів	0,7	–
Енергія біомаси (за винятком дров)	2,55	2,0
Геотермальна енергія	0,4	0,2

Для оцінки енергетичних ресурсів відновлювальних джерел енергії, можливих для використання, розрізняють наступні види енергетичного потенціалу ВДЕ [8]:

- 1) теоретичний, що характеризує загальну кількість енергії;
- 2) технічний – частина теоретичного потенціалу, яку принципово можливо використати за допомогою сучасних пристроїв;
- 3) економічно ефективний – частина технічного потенціалу, яку в теперішній час доцільно використовувати, виходячи з економічних, соціальних, екологічних та інших факторів.

Потенціал енергії Сонця в світі

Останнім часом інтерес до проблеми використання сонячної енергії значно збільшився [8].

Потенціальні можливості використання безпосередньо сонячної енергії дуже великі. Якщо ми зможемо використовувати 0,0125% всієї цієї енергії, то людство було б повністю забезпечене енергією на даний час, а використання 0,5% повністю б покрило всі потреби людства назавжди в майбутньому (якщо вважати, що населення Землі не перевищить 20 млрд.)

Зрозуміло, що існують різні фактори, що обмежують потужності сонячної енергетики. Окрім ціни та ресурсоемкості ще існує проблема площі. Наприклад, якщо у 2100 році людство повністю забезпечуватиме свої енергетичні потреби за рахунок Сонця, то площа колекторів повинна буде сягати 1...3 млн. км². Також безпосереднє використання сонячного випромінювання потребує великої кількості трудових ресурсів, матеріалів та коштів: для виготовлення 1 МВт·рік знадобиться

від 10 до 40 тис. людино-годин. В той же час у традиційній енергетиці цей показник менший у 50...80 разів.

Потенціал енергії вітру у світі

Енергія повітряних мас, що постійно рухаються, у сотні разів перевищує запаси гідроенергії усіх річок планети. Всюди і постійно на землі дмуть вітри: від легкого вітерця до могутніх ураганів. Ці вітри могли б повністю задовольнити потреби людства. Але частка вітряних електростанцій становить лише 0,1%. Чому ж тоді такий доступний та екологічно чистий спосіб вироблення енергії так мало використовується?

Людство використовує енергію вітру більш ніж 5 тис. років. Спочатку вітер використовувався для того, щоб приводити у рух човни, потім – щоб молоти зерно та підіймати воду. Зараз вітер використовується для видобутку електроенергії. На даний час ціна 1 кВт·год виробленої з енергії вітру порівняно невисока – 4 центи – але всі проекти по будівництву нових вітряків зазвичай дуже повільно окупують себе. Найбільш вдалим можна вважати проект будівництва вітряків на Гавайському острові Охіо: гігантські вітряки, з діаметром ротору 122 м зараз виробляють понад 6200 кВт кожен, при швидкості вітру 47 км/год. Скоріш за все постійне зростання цін на паливні ресурси в майбутньому створять умови, що зробить такі проекти ще більш рентабельними, що забезпечить зростання частки “вітрової” електроенергії у світі.

Потенціал енергії річок

Багато тисячоліть вірно служить людині енергія, що міститься в текучій воді. Запаси цієї енергії величезні. Люди навчились використовувати цю енергію раніше за всі інші. Коли настала доба електрики, водяне колесо заново відродилося, але тепер вже у вигляді водяної турбіни. Можна сказати, що ще у 1891 р. почалася доба гідроенергетики.

Гідроелектростанції мають багато переваг: постійно відновлювальний запас енергії, простота в користуванні, відносна відсутність забруднення оточуючого середовища. Але побудувати велику плотину набагато складніше, ніж водяне колесо. Для того, щоб змусити потужні турбіни обертатися, потрібно накопичити величезні запаси енергії за плотиною. Для цього потрібно затопити певні регіони, а це в свою чергу може призвести до непоправних наслідків. Тож будівництво плотин вимагає від інженерів дуже точних розрахунків, а будь-яка помилка може призвести до екологічної катастрофи в даному регіоні. Навіть при точних розрахунках будівництво плотини може привести до значних змін в екосистемах на великих площах. Ніщо не

береться із нічого: плотина зменшує швидкість течії, забираючи у неї енергію, а це може викликати заболочування та “цвітіння” води у заплавах. Дизбаланс може викликати самі непередбачувані наслідки.

Отже повний перехід на вироблення енергії лише з річкових потоків може бути не менш небезпечним, ніж використання паливних ресурсів. Зараз ми можемо стверджувати лише про часткове енергокористування річками у тих місцях, де постійні розливи річок стають справжніми стихійними лихами. У таких регіонах небезпечні розливи річок перетворюються за допомогою гребель на корисні джерела енергії. Як приклад можна навести каскад плотин корпорації “TVA” на річці Теннесі, США. 51 плотина захищає орні землі. На 38-ти з них працюють гідроелектростанції. До будівництва цих плотин ведення сільськогосподарської діяльності було майже неможливим [6].

Потенціал енергії Землі

Геотермальна енергія – це енергія внутрішніх областей Землі. Виверження вулканів наочно свідчить про величезний жар усередині планети. Вчені оцінюють температуру ядра Землі в тисячі градусів Цельсія. Ця температура поступово знижується від гарячого внутрішнього ядра, де, як вважають, метали та породи можуть існувати тільки в розплавленому стані, до поверхні Землі [4].

Геотермальні ресурси величезні. Витоки їх освоєння йдуть ще в глибоку давнину. Тепло Землі вже зараз вносить вклад в сучасну енергетику, але він не відповідає ні економічній та екологічній ефективностям, ні ресурсам, достатнім для освоєння наявними технічними засобами. Залишається сподіватися, що повсюдне запровадження нової інтенсивної циркуляційної технології для виробництва геотермальної енергії призведе до більш широкого її використання.

Геотермальна енергія може бути використана двома основними способами – для вироблення електроенергії і для обігріву будинків, установ і промислових підприємстві .

Іноді вода виривається з-під землі у вигляді чистої “сухої пари” – пара без домішків водяних крапельок. Ця суха пара може бути безпосередньо використана для обертання турбіни і вироблення електроенергії, а конденсаційну воду можна повертати в землю і при її достатньо хорошій якості – скидати в ближні водойми.

В інших місцях, де є суміш води з паром (волога пара), цей пар відокремлюють від води і потім використовують для обертання турбін; оскільки краплі води пошкодили б турбіну. Нарешті, в більшості родовищ є тільки гаряча вода, і енергію тут можна виробляти, користуючись цією водою для переробки ізобутану в пароподібний

стан, з тим щоб цей ізобутановий «пар» обертав турбіни. Такий процес називають системою з бінарним циклом. Гарячою водою можна безпосередньо обігрівати оселі, громадські будівлі та підприємства (централізоване тепlopостачання).

У районах, що відрізняються газотермальною активністю для опалення використовуються парогеотермальні джерела. Застосування цього способу опалення лімітується наявністю в світі відповідних районів. Проте є потенційна можливість його розширення шляхом прокачування геотермальних вод через гарячі підземні породи, де вони знаходяться на помірній глибині.

Застосування геотермальних вод не може розглядатися як екологічно чисте тому, що пара часто супроводжується газоподібними викидами, включаючи сірководень і радон-два, які вважаються небезпечними. На геотермальних станціях пара, що обертає турбіну, повинна бути сконденсованою, що потребує джерела охолоджувальної води, точно так само як цього вимагають електростанції на вугіллі або ядерному паливі. В результаті скидання як охолоджуючої, так і конденсаційної гарячої води можливе теплове забруднення середовища. Крім того, там, де суміш води і пари виходить із землі для електростанцій, що працюють на вологому парі, і там, де гаряча вода виходить на поверхню для станцій з бінарним циклом, воду необхідно видаляти. Ця вода може бути досить солоня (до 20% солі), і тоді буде потрібно перекачування її в океан або нагнітання в землю. Скидання такої води в річки або озера може знищити в них прісноводні форми життя. У геотермальних водах нерідко містяться також значні кількості сірководню, який має неприємний запах, що є небезпечним у великих його концентраціях. Незважаючи на те, що людство ще не знає способу безпосереднього використання вулканічної енергії, але можна навести чудовий приклад раціонального використання енергії земних надр в Ісландії. Ця маленька європейська країна повністю забезпечує себе теплом, яке отримується з гарячих фонтанів гейзерів, які працюють з точністю хронометра.

На сьогодні поблизу м. Сан-Франциско працює геотермальна електростанція потужністю 500 КВт [9].

Але не скрізь з землі б'ють джерела гарячої води. Незважаючи на те, що гейзери чудові джерела енергії, але характерна їм локальність на земній поверхні заперечує будь-які розмови щодо широкого використання останніх.

Потенціал енергії Світового океану

Відомо, що запаси енергії у Світовому океані колосальні. Відомо, що теплова енергія, що відповідає перегріву поверхневих вод,

порівняно з донними, на 20 °С, становить приблизно 10^{26} Дж. А кінетична енергія океанських течій оцінюється у 10^{18} Дж. На даний час люди вміють використовувати лише дуже малі частки цих енергій, причому ціною великих інвестицій, що повільно окупувають себе. До останнього часу використання енергії океану здавалося нерентабельним.

Найбільш доцільним є вироблення енергії з енергії припливів та відпливів. З 1967 р. у дельті р. Ранс (Франція) працює приливна електростанція (ПЕС) потужністю 240 МВт. Тут приливи досягають висоти 13 м [5].

Іншою можливістю стало вирощування гігантських швидкоростучих океанських водоростей келп, що легко перероблюються на метан. До того ж, кількість оксиду вуглецю, вивільненого при спалюванні отриманого газу, можна легко повернути у океан, якщо у екваторіальних районах розчиняти у воді чисте залізо. Залізо забезпечує бурхливий ріст планктону і його кількість збільшується у декілька десятків разів, а потім планктон використовує розчинений у воді диоксид вуглецю. Взагалі, в океані зосереджується більша частина вивільненого диоксиду вуглецю, тому зараз проводяться дослідження, щодо зниження температури планети за допомогою розчинення у воді чистого заліза.

У ХХ столітті велику увагу вчені звертають “океанотермічній енергоконверсії” (ОТЕК), тобто отриманню енергії за рахунок різниць температур води на різних глибинах.

Ще однією можливістю є використання океанських течій: швидкість течії Голфстрім біля берегів Флориди сягає 5 миль/год. Ідея встановлення тут гігантських турбін під водою є досить привабливою.

Вже зараз багато маяків, що встановлені на воді біля берегів Японії та США, живляться виключно за рахунок океанських хвиль. Розроблено проекти електростанцій, що використовують океанські хвилі для вироблення енергії, але ці станції повинні мати гігантські розміри, і тому такі проекти зараз не сприймаються серйозно.

Взагалі, Світовий океан є найбільш перспективним і найбільш вигідним енергоносієм у майбутньому. Він ніби гігантський акумулятор вбирає в себе випромінювання сонця, енергію вітрів та енергію, що з'являється в результаті змін гравітаційних полів Землі та Місяця.

1.3 Енергетичний потенціал відновлювальних джерел енергії на Україні

На даний час Україна відноситься до країн з економікою, що розвивається. Для такого роду країн необхідно контролювати витрати в різних сферах, у тому числі й енергоспоживання, тому що цей показник характеризує рівень життя населення країни.

Вважається, чим більше енергоспоживання, тим вище рівень життя.

Враховуючи, що основне завдання енергетики полягає в необхідності достатнього енергозабезпечення, можна зробити висновок, що необхідний рівень енергозабезпечення досягається не тільки валовою кількістю виробництва енергії, але і шляхом енергоресурсозбереження. Цей же висновок стосується України. Досягти високого рівня життя можна як величезним збільшенням виробництва енергії (це дуже тривалий шлях), так і використовуючи принципи енергоресурсозбереження, майже не збільшуючи виробництво енергії. У цьому полягає надзвичайно тісний зв'язок між виробництвом енергії, споживанням енергії і енергоресурсозбереженням. Необхідність і можливість розвитку енергетики України на базі відновлюваних джерел зумовлені такими причинами:

- дефіцитом традиційних для України паливно-енергетичних ресурсів;

- дисбалансом у розвитку енергетичного комплексу України, орієнтованого на значне виробництво електроенергії на атомних електростанціях (до 25...30%) за фактичної відсутності виробництв і отримання ядерного палива, утилізації та переробки відходів, а також виробництв з модернізації обладнання діючих АЕС (ядерних реакторів, котельного обладнання тощо);

- сприятливими клімато-метеорологічними умовами для використання основних видів відновлюваних джерел енергії;

- наявністю промислової бази, придатної для виробництва, практично, всіх видів обладнання для поновлюваної енергетики.

Потенціал вітрової енергії на території України

Україна має досить високий кліматичний потенціал вітрової енергії, який забезпечує продуктивну роботу не лише автономних вузлів живлення, але й потужних вітроелектростанцій. Зростає необхідність у виявленні найперспективніших місць використання вітрової енергії, базуючись на її кліматичному потенціалі та показниках його можливої утилізації.

Районування території України за потенціалом вітрової енергії проводилось на основі кліматичного узагальнення цих показників. Вибір здійснювався за принципом їх показовості як характеристик багаторічного режиму вітрової енергії та її просторово-часової структури. Для районування території застосовано комплекс показників:

- середня річна швидкість вітру (дає загальне уявлення про кліматичний вітроенергетичний потенціал будь-якого району) та її мінливість;

- питома потужність та сумарні потенційні вітроенергоресурси і утилізована вітрова енергія;

- тривалість енергоактивної швидкості вітру та енергетичного штилю;

- безперервна тривалість робочої швидкості (як критерій стабільності функціонування вітроагрегатів).

Отже, комплекс показників вітрової енергії дозволяє оцінити енергетичні можливості кожного району та розробити рекомендації щодо її раціонального використання.

Найвищим вітроенергетичним потенціалом відзначаються узбережжя Чорного та Азовського морів, Південний берег Криму, вершини Українських Карпат, Кримських гір, також область Донбасу.

Умови вітровикористання оптимальні протягом усього року. Будівництво вітроелектростанцій треба розгорнути у цих регіонах, враховуючи значний дефіцит власних генеруючих потужностей. Можливе ефективне розміщення як потужних вітроелектростанцій, так і автономних вітроенергоустановок. Слід надавати перевагу будівництву вітроелектростанцій на прилеглих водних акваторіях, що мають особливо високий вітроенергетичний потенціал.

Високий потенціал вітрової енергії властивий району Донецької височини, Приазовської та Причорноморської низовин. Тут протягом року сприятливі умови для вітровикористання та ефективної роботи потужних вітроелектростанцій та автономних вітроенергоустанов.

Достатнім вітроенергетичним потенціалом відзначаються також Подільська та Придніпровська височини. Умови вітровикористання досить сприятливі, особливо у холодний період року.

Поліська та Придніпровська низовини характеризуються невисоким вітровим потенціалом та нерівномірним його розподілом протягом року. Умови вітровикористання менш сприятливі, рекомендується розміщення тихохідних вітроенергоустановок, рентабельність яких підвищуватиметься у холодний період року.

Передкарпаття, Закарпаття та вузькі захищені долини Українських Карпат та Кримських гір відзначаються низьким вітровим потенціалом. Умови вітровикористання несприятливі, за винятком окремих місць, які значно домінують над навколишньою місцевістю.

Потенціал сонячної енергії в Україні

В результаті обробки статистичних метеорологічних даних по надходженню сонячної радіації визначено питомі енергетичні показники з надходження сонячної енергії та розподіл енергетичного потенціалу сонячного випромінювання для кожної з областей України.

Середньорічна кількість сумарної сонячної радіації, що поступає на 1 м^2 поверхні, на території України знаходиться в межах: від $1070 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$ в північній частині України до $1400 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$ і вище в Криму [3].

Потенціал сонячної енергії в Україні є достатньо високим для широкого впровадження як теплоенергетичного, так і фотоенергетичного обладнання, практично, в усіх областях. Термін ефективної експлуатації геліоенергетичного обладнання в південних областях України – 7 місяців (з квітня по жовтень), в північних областях 5 місяців (з травня по вересень). Фотоенергетичне обладнання може достатньо ефективно експлуатуватися протягом всього року.

В кліматометеорологічних умовах України для сонячного теплопостачання ефективним є застосування плоских сонячних колекторів, які використовують як пряму, так і розсіяну сонячну радіацію. Концентруючі сонячні колектори можуть бути достатньо ефективними тільки в південних регіонах України.

Енергетичний потенціал малих рік України

Україна має потужні ресурси гідроенергії малих рік – загальний гідроенергетичний потенціал малих рік України становить біля 12,5 млрд. кВт·год, що складає біля 28% загального гідро потенціалу всіх рік України.

Створено базу даних по розподілу енергетичного потенціалу малих рік за областями України. Коливання осереднених даних по загальному потенціалу в Україні досить незначні, тоді як дані по технічному та доцільно-економічному потенціалу малих рік потребують уточнення – в звичайних ситуаціях не менше одного разу в 5 років, а в виняткових випадках – щорічно [4].

Головною перевагою малої гідроенергетики є дешевизна електроенергії, генерованої на гідроелектростанціях; відсутність паливної складової в процесі отримання електроенергії при впровадженні малих гідроелектростанцій дає позитивний економічний та екологічний ефект.

Первинним джерелом енергії для малої гідроенергетики є гідропотенціал малих річок; верхня межа потужності гідроенергетичного обладнання становить 30 МВт. Згідно міжнародної класифікації за нормативом ООН, до малих гідроелектростанцій (МГЕС) відносять гідроелектростанції потужністю від 1 до 30 МВт, до мініГЕС – від 100 до 1000 кВт, до мікроГЕС – не більше 100 кВт.

Для вирішення проблем розвитку малої гідроенергетики Україна має достатній науково-технічний потенціал і значний досвід в галузі проектування і розробки конструкцій гідротурбінного обладнання, дослідження гідроенергетичного потенціалу малих річок, вирішення водогосподарських та екологічних проблем при будівництві гідроелектростанцій. Українські підприємства мають необхідний виробничий потенціал для створення вітчизняного обладнання малих ГЕС.

Енергетичний потенціал біомаси в Україні

Енергетична ефективність біоенергетики достатньо висока для того, щоб виділити її в окремий напрям енергетичного господарства. В Україні існує достатній енергетичний потенціал практично всіх видів біомаси і необхідна науково-технічна та промислова база для розвитку даної галузі енергетики.

Показники енергетичного потенціалу біомаси відрізняються від потенціалу інших відновлюваних джерел енергії тим, що, окрім кліматометеорологічних умов, енергетичний потенціал біомаси в країні в значній мірі залежить від багатьох інших факторів, в першу чергу від рівня господарської діяльності.

Енергетичний потенціал біомаси представлено такими її складовими – енергетичним потенціалом тваринницької сільськогосподарської і рослинної сільськогосподарської біомаси та енергетичним потенціалом відходів лісу.

Основними технологіями переробки біомаси, які можна рекомендувати до широкого впровадження в даний час є: пряме спалювання, піроліз, газифікація, анаеробна ферментація з утворенням біогазу, виробництво спиртів та масел для одержання моторного палива.

При обґрунтуванні впровадження біоенергетичних технологій забезпечення охорони оточуючого середовища знезараженням відходів біомаси часто посідає перше місце: в процесі переробки тваринницьких відходів та міських стічних вод, окрім знешкодження небезпечної мікрофлори, гельмінтів та насіння бур'янів, які попадають в ґрунт, в поверхневі та підземні води, усувається забруднення повітря в зонах їх накопичення.

Економічна ефективність біоенергетичного обладнання в більшості випадків забезпечується правильним вибором технології переробки біомаси та розташуванням обладнання в місцях постійного її накопичення; важливим є також ефективне і, по можливості, комплексне використання всіх отриманих в процесі переробки продуктів.

1.4 Загальна характеристика використання правових та наукових засад для розвитку нетрадиційних джерел енергії

Характерною прикметою сучасної енергетики України є рух в напрямку розвитку екологічно чистої енергетики на основі нетрадиційних та відновлюваних джерел енергії.

Нетрадиційна енергетика отримала визнання з боку державних органів влади, в результаті чого підготовлено та прийнято ряд державних програм і поправок до законів про енергетику, що створює сприятливі умови як для впровадження і експлуатації вже розробленого обладнання нетрадиційної енергетики, так і розвитку нових енерготехнологій та устаткування.

Першочерговим завданням для успішної реалізації завдань основної програми розвитку НВДЕ – Програми державної підтримки розвитку нетрадиційних та відновлюваних джерел енергії та малої гідро- і теплоенергетики України – по широкомасштабному використанню енергії НВДЕ є встановлення енергетичного потенціалу кожного з видів НВДЕ по всій території України, для чого створюється єдина Інформаційно-аналітична система з розширеними функціями, що дозволяє оперативно вирішувати питання ефективності впровадження енергетичного обладнання в конкретній місцевості.

Досить швидким темпам її розвитку сприяє науковий та практичний доробок в цій галузі, набутий протягом останніх 20 років в Національному університеті України «Київський політехнічний інститут», Вінницькому національному технічному університеті, Інституті електродинаміки НАН України та інших наукових закладах. Значний вклад в розвиток нетрадиційної енергетики внесли Інститут загальної енергетики та Інститут теплофізики НАН України, МНТЦ вітроенергетики, ДНДІ нетрадиційної енергетики Міненерго України.

Використання створеної на даний час інформаційно-аналітичної системи оцінки енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України дозволяє проводити щорічне відсліджування та уточнення кількісних параметрів енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії по всій території України, отримуючи

результати у вигляді картографічної інформації з візуалізацією результатів у вигляді картографічної та атрибутивної бази даних. Відсліджування і аналіз поточної та багаторічної інформації має за мету також видачу рекомендацій для застосування як вже освоєних, так і нових відновлюваних джерел енергії по всій території України.

1.5 Застосування нетрадиційних та відновлювальних джерел енергії у світі

Значним та реально досяжним є потенціал використання НВДЕ у сільському господарстві. По-перше, об'єкти – споживачі електричної енергії цієї галузі нерідко значно віддалені від великих електростанцій; адже добре відомі нам сьогодні ГЕС, ГРЕС, ТЕС не можуть орієнтуватися на споживача в своєму розміщенні. Біля 70% собівартості вітчизняної продукції сільського господарства становлять енергозатрати. По-друге, сільськогосподарські виробництва взагалі дуже енергоємні, якщо мова йде про електроенергію. А із застосуванням енергії з нетрадиційних джерел, ці витрати знижуються майже в 3 рази. Для приводу водопідійомників і насосів найдоцільніший спосіб отримання енергії, заснований на анаеробному (у присутності каталізатора) зброджуванні відходів.

На підприємствах переробної галузі також ефективно застосовувати енергію з нетрадиційних джерел для отримання, наприклад, ультразвуку, струмів високої частоти, тощо; на нагрів води та отримання пари для стерилізації теж економічно вигідно використовувати в якості парогенераторів і дублерів парогенераторів вітроагрегати. Області застосування НВДЕ численні: в побуті їх зручно застосовувати для нагріву води, теплопостачання, а також можна згадати геліодуші.

Енергію з біомаси широко отримують в Бразилії, США.

У Греції, Ізраїлі, Кіпрі, Туреччині успішно використовуються генератори сонячної енергії. У Данії, Індії, Китаї, Каліфорнії – вітроагрегати. ПЕС експлуатуються у Франції, Канаді, Індії, Китаї [6].

Говорячи про водневу енергетику, відзначимо, що крім методів виробництва водню і його використання в паливних елементах необхідно як і раніше приділяти увагу і способам прямого спалювання водню в енергетичних установках і двигунах. Так, новий підхід, щодо використання водню в енергетиці, полягає в допалюванні водню разом з парою. В результаті досягаються більш високі параметри пари і, відповідно, більш високий ККД турбіни – до 55%.

Надзвичайно перспективний напрямок – застосування як парових, так і газових турбін в малій енергетиці. В Україні є велика кількість котелень, які призначені для теплопостачання, але в той же час виробляють пар з високими параметрами (тиск до 39 атмосфер і більше). Таку пару можна використовувати для вироблення електроенергії в парових протivotискових турбінах. Оцінюваний потенціал становить 25 тис. МВт. Причому, витрата палива на генерацію електроенергії виявляється в 2 рази нижче, ніж у великих державних чи приватних монополістів. Наразі існують проекти з реалізацією установки протivotискової турбіни потужністю до 6 МВт.

Виділяючи квінтесенцію з матеріалу, викладеного в даному розділі підкреслимо наступне.

Застосування відновлюваних джерел енергії дозволяє зменшити витрати на нагрів гарячої води, витрати на опалення.

Уся територія України придатна для застосування відновлюваних джерел енергії.

Територія України, незважаючи на те, що є не досить сприятлива для використання геліоенергетики, вітроенергетики та інших відновлюваних джерел енергії та має свої кліматичні особливості використання, є придатною для використання НВДЕ.

1.6 Геліоенергетика

Сонячна (геліо) енергетика – використання сонячної енергії для отримання енергії в будь-якому зручному для її використання вигляді. Сонячна енергетика використовує відновлюване джерело енергії і в перспективі може стати екологічно чистою, тобто такою, що не виробляє шкідливих відходів.

На сьогодні сонячна енергетика широко застосовується у випадках, коли малодоступність інших джерел енергії в сукупності з достатньою кількістю сонячного випромінювання виправдовує її економічно.

Потік сонячного випромінювання, що проходить через площу в 1 м^2 , розташовану перпендикулярно потоку випромінювання на відстані однієї астрономічної одиниці від центру Сонця (тобто зовні атмосфери Землі), рівний 1367 Вт/м^2 (сонячна постійна) [10].

При проходженні через атмосферу потужність сонячної радіації зменшується за рахунок поглинання і розсіяння пилом, аерозолями і молекулами газів. Частина падаючої енергії відбивається в космос. Частка відображеного тепла залежить від того, на яку поверхню потрапляє випромінювання. Так, для сухого чорнозему ця частка рівна

0,14, зораного поля 0,26...0,38, сніги 0,6...0,9, водній поверхні 0,2...0,78 залежно від кута падіння сонячних променів. Отже щільність теплопритоку неоднакова на різних широтах Землі, в різні пори року і періоди доби.

Перспективи сонячної енергетики також зменшуються внаслідок глобального затемнення – антропогенного зменшення сонячного випромінювання, що доходить до поверхні Землі.

Переваги сонячної енергетики:

- загальнодоступність і невичерпність джерела;
- теоретично, повна безпека для навколишнього середовища (проте в даний час у виробництві фотоелементів і в них самих використовуються шкідливі речовини).

Недоліки сонячної енергетики:

1. Фундаментальні проблеми.

Через відносно невелику величину сонячної постійної для сонячної енергетики потрібне використання великих площ землі під електростанції. Проте, фотоелектричні елементи на великих сонячних електростанціях встановлюються на висоті 1,8...2,5 метра, що дозволяє використовувати землі під електростанцією для сільськогосподарських потреб, наприклад, для випасу худоби.

Проблема знаходження великих площ землі під сонячними електростанціями вирішується у разі застосування сонячних аеростатних електростанцій, придатних як для наземного, так і для морського і для висотного базування.

Потік сонячної енергії на поверхні Землі сильно залежить від широти і клімату. У різних місцевостях середня кількість сонячних днів протягом року може дуже сильно відрізнятися.

2. Технічні проблеми.

Сонячна електростанція не працює вночі і недостатньо ефективно працює у ранкових і вечірніх сутінках. При цьому пік електроспоживання припадає саме на вечірні години. Крім того, потужність електростанції може стрімко і непередбачувано коливатися через зміни погоди. Для подолання цих недоліків потрібно або використовувати ефективні електричні акумулятори (на сьогоднішній день це не достатньо вирішена проблема), або будувати гідроакумуляуючі станції, які теж займають велику територію, або використовувати концепцію водневої енергетики, яка також поки що далека від економічної ефективності.

Проблема залежності потужності сонячної електростанції від часу доби і погодних умов вирішується у разі сонячних аеростатних електростанцій.

Висока ціна сонячних фотоелементів. Ймовірно, з розвитком технології цей недолік у майбутньому подолають.

Недостатній ККД сонячних елементів.

Поверхню фотопанелей потрібно очищати від пилу і інших забруднень. При їх площі в декілька квадратних кілометрів, це може викликати деякі труднощі.

Ефективність фотоелектричних елементів помітно падає при їх нагріванні, тому виникає необхідність в установці систем охолодження, зазвичай водяних.

Через 30 років експлуатації ефективність фотоелектричних елементів починає знижуватися.

3. Екологічні проблеми.

Не дивлячись на екологічну чистоту отримуваної енергії, самі фотоелементи містять отруйні речовини, наприклад: свинець, кадмій, галій, миш'як і т. д., а під час їхнього виробництва, використовує значну кількість інших небезпечних речовин. Сучасні фотоелементи мають обмежений термін служби (30...50 років), а масове їх застосування поставить в найближчий час складне питання про їх утилізацію.

Способи отримання електричної і теплової енергії з сонячного випромінювання [11]:

1. Отримання електроенергії за допомогою фотоелементів.

2. Геліотермальна енергетика – нагрівання поверхні, що поглинає сонячні промені з подальшим розподілом і використання тепла (фокусування сонячного випромінювання на посудині з водою для подальшого використання нагрітої води в опалюванні приміщень і споруд або в парових електрогенераторах).

3. «Сонячне вітрило» може в безповітряному просторі перетворювати сонячні промені в кінетичну енергію.

4. Термоповітряні електростанції – перетворення сонячної енергії в енергію повітряного потоку, що направляється на турбогенератор.

5. Сонячні аеростатні електростанції – генерація водяної пари всередині балона аеростата за рахунок нагрівання сонячним випромінюванням поверхні аеростата, покритої селективно-поглинаючим покриттям. Перевага – запасу пари в балоні достатньо для роботи електростанції в темний час доби і хмарну погоду.

6. Інші види використання сонячної енергії.

Великий і недостатньо використовуваний потенціал використання сонячної енергії є в сільському господарстві і промисловості. Перерахуємо деякі з можливих застосувань:

– сонячний підігрів води для гарячого водопостачання тваринницьких ферм і інших об'єктів;

– сушка зерна, фруктів, овочів, сіна, тютюну і іншої сільськогосподарської продукції;

– тепличне рослинництво;

– опріснення води в південних посушливих районах;

сонячний підігрів залізобетонних конструкцій в процесі виробництва на залізобетонному комбінаті.

Останнім часом через швидкий розвиток космічної техніки у світі зросла цікавість до установок, які безпосередньо перетворюють сонячну радіацію на електричну енергію за допомогою напівпровідникових фотоелектроперетворювачів (ФЕП). Вартість електроенергії, що виробляється фотоелектричними установками (ФЕУ) на сьогодні в декілька разів вища, ніж на електричних станціях з тепловим циклом. Незважаючи на це, ФЕУ активно впроваджуються як у розвинутих країнах, так і в країнах, що розвиваються. При цьому можна дослідити дві протилежні тенденції.

У країнах, що розвиваються, мова йде про застосування порівняно невеликих установок для електропостачання індивідуальних будинків у віддалених селах, для оснащення культурних центрів, де завдяки ФЕУ можна користуватися телевізором тощо. В цих випадках на перший план виступає не вартість електроенергії, а соціальний ефект. Програми впровадження ФЕУ в країнах, що розвиваються, активно підтримуються міжнародними організаціями, в їх фінансуванні бере участь Світовий банк на основі висунутої ними "Сонячної ініціативи".

У промислово розвинених країнах активне впровадження ФЕУ пояснюється кількома факторами. По-перше, ФЕУ розглядаються як екологічно чисті джерела, що здатні зменшити забруднення довкілля. По-друге, використання ФЕУ у приватних будинках підвищує енергетичну автономію. По-третє, вартість прокладання ліній електроживлення у важкодоступній місцевості становить 5...15 тис. дол./км. По-четверте, велике значення має динаміка зміни показників ФЕУ за останні два десятиліття, на основі якої на найближчий час прогнозується досягнення конкурентоспроможності ФЕУ для широкого використання.

Вперше явище фотоелектру спостерігав французький фізик Беккерель в 1839 році, отримавши потік електронів при освітленні сонячним світлом пластини оксиду міді. Винахід був широко впроваджений у життя після відкриття напівпровідників. Фотоелект – це виривання електронів з молекул речовини під дією світла. Як світлочутлива зона фотоелементів використовується селен (Se), кристалічний кремній (Si), аморфний кремній (SiGe) тощо. Фотоелект утворюється, коли фотон (світловий промінь) падає на елемент із двох матеріалів з різним типом електричної провідності (діркова або електронна). Потрапивши в такий матеріал, фотон вибиває електрон з його комірки, утворюючи вільний від'ємний заряд і "дірку". В результаті рівновага так званого р-п переходу порушується, і в колі виникає електричний струм. Будову кремнієвого фотоелемента показано на рисунку 1.3. Найближчими "родичами" сонячних фотоелементів є транзистори, світлодіоди та інші електронні пристрої.

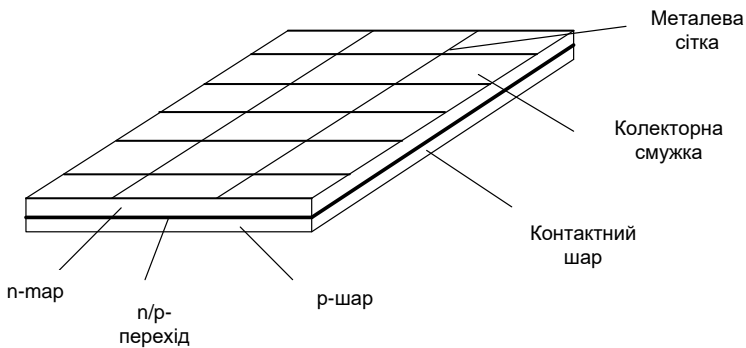


Рисунок 1.3 – Схема кремнієвого елемента

Чутливість фотоелемента залежить від довжини хвилі світла та прозорості верхнього шару елемента. В ясну погоду кремнієві елементи виробляють електричний струм приблизно 0,5 В і 25 мА на 1 см^2 або $12 \dots 13 \text{ мкВт/см}^2$. Найбільш поширені кремнієві фотоелементи. Вони бувають монокристалічні та полікристалічні. Різниця між цими матеріалами полягає в специфіці отримання початкових кремнієвих заготовок при їх вирощуванні з розплавів. Монокристалічна заготовка більш однорідна але дорожча. Полікристалічна – менш однорідна, має нижчу вартість, що може бути вирішальним фактором, коли йдеться про виготовлення фотоелементів. Теоретична ефективність кремнієвих елементів становить приблизно 28%, а практична – від 14% до 16% [22].

Незважаючи на поширену хибну думку, насправді фотоелементи виробляють більше енергії при низьких температурах. Це пояснюється тим, що фотоелементи – це електронні пристрої й виробляють енергію від світла, а не від тепла, тобто працюють ефективніше в холоді, ніж при високих температурах. А взимку вони виробляють менше енергії лише за рахунок скорочення світлового дня, а також тому що кут падіння сонячного світла у цей період менший, а хмарність більша.

За допомогою послідовно-паралельних електричних сполучень сонячні елементи складають у сонячну (фотоелектричну) батарею в герметичному корпусі. Потужність сонячних батарей, що серійно випускаються промисловістю, становить від 5 до 200 Вт. На сонячних фотоелектричних станціях сонячні батареї використовуються для складання фотоелектричних генераторів. На рисунку 1.4 представлена блок-схема сонячної фотоелектричної станції. Термін служби такої станції становить 20...30 років, експлуатаційні витрати мінімальні.

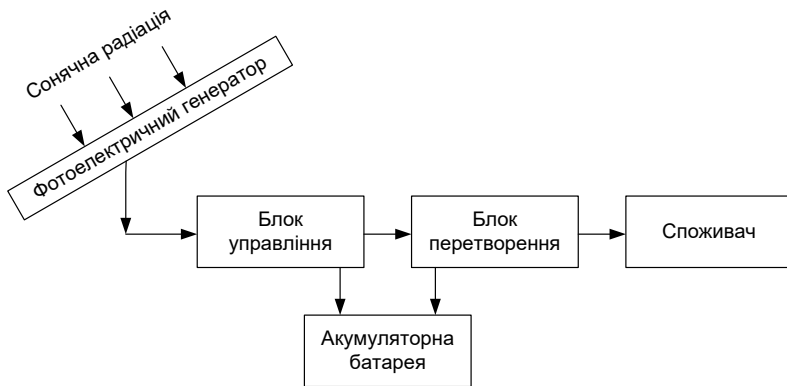


Рисунок 1.4 – Схема сонячної фотоелектричної установки

Сонячні фотоелектричні станції використовуються для живлення водопідйомних насосів, телекомунікаційних систем, катодного захисту трубопроводів, в приватних господарствах тощо.

Основною перешкодою на шляху розвитку фотоенергетики є велика вартість встановленої потужності та, відповідно, генерованої електроенергії. Станом на 1997 рік середня вартість встановленої потужності сонячних батарей становила приблизно 8 грн/кВт·год, а вартість генерованої електроенергії 0,3...0,4 грн/кВт·год.

Сонячний модуль – це батарея взаємозв'язаних сонячних елементів, змонтованих під скляною кришкою. Фотоелектричну систему можна довести до будь-якого розміру. Власник такої системи може збільшити або зменшити її, якщо зміниться його потреба в електроенергії. По мірі зростання енергоспоживання і фінансових можливостей, власник може додавати модулі. Чим інтенсивніше світло, падаюче на фотоелементи і чим більше їх площа, тим більше виробляється електрики і тим більша сила струму. Модулі класифікуються по піковій потужності у ватах (Вт). Ват – одиниця вимірювання потужності. Один піковий ват – технічна характеристика, яка вказує на значення потужності установки в певних умовах, тобто коли сонячне випромінювання в 1 кВт/м^2 падає на елемент при температурі $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Така інтенсивність досягається при хороших погодних умовах і знаходження Сонця в zenіті. Щоб виробити один піковий ват, потрібен один елемент розміром $10 \times 10 \text{ см}$. Більші модулі, площею $100 \times 40 \text{ см}$, виробляють близько $40 \dots 50 \text{ Вт}$. Проте сонячна освітленість рідко досягає величини 1 кВт/м^2 . Більш того, на сонці модуль нагрівається значно вище за номінальну температуру. Обидва ці чинники знижують продуктивність модуля.

Незважаючи на те, що якість продукції не завжди однакова, більшість міжнародних компаній виробляє достатньо надійні фотоелектричні модулі з терміном експлуатації до 20 років. На сьогоднішній день виробники модулів гарантують вказану потужність на період до 10 років.

Сонячне випромінювання – екологічно чисте і відновлюване джерело енергії. Запаси сонячної енергії величезні. До початку ХХІ століття людство розробило і освоїло ряд принципів перетворення теплової енергії в електричну. Їх можна умовно розділити на машинні і безмашинні методи. Останні часто називають методами прямого перетворення енергії, оскільки в них відсутня стадія перетворення теплової енергії в механічну роботу.

Принципова схема замкнутої газотурбінної установки виглядає так. Сонячна радіація, зібрана концентратором на поверхні сонячного котла, нагріває робоче тіло – інертний газ до температур порядку $1200 \dots 1500 \text{ }^\circ\text{K}$ і під тиском, створюваним компресором, подає гарячий газ на лопатки газової турбіни, яка приводить в дію електрогенератор змінного струму. Відпрацювавши у турбіні газ надходить спочатку в регенератор, де підігріває робочий газ після компресора. Тим самим він полегшує роботу основного нагрівача – сонячного котла. Потім газ охолоджується в холодильнику-випромінювачі.

В енергоустановки з паротурбінним перетворювачем зібрана концентратором сонячна енергія нагріває в сонячному котлі робочу рідину, що переходить в насичений стан, а потім і в перегріту пару, що розширюється в турбіні, з'єднаній з електрогенератором. Після конденсації в холодильнику-випромінювачі відпрацьована в турбіні пара і її конденсат, стиснута насосом, знов потрапляє в котел. Оскільки підвід і відвід тепла в цій установці здійснюються ізотермічно, середні температури підведення та відведення виявляються вищими ніж у газотурбінної установки, а питомі площі випромінювача і концентратора можуть виявитися меншими. У подібної установки, що працює на органічному робочому тілі, коефіцієнт корисної дії становить 15...20 % при порівняно невисоких температурах підведеного тепла – всього 600...650°K.

Від багатьох недоліків, властивих машинним перетворювачам, вільні енергоустановки з так званими безмашинними перетворювачами: термоелектричні, термоемісійні та фотоелектричні, безпосередньо перетворюють енергію сонячного випромінювання в електричний струм.

В принцип дії термоелектрогенераторів покладено термоелектричний ефект, відкритий в 1821 році німецьким фізиком Т. І. Зеебеком, що являє собою виникнення на кінцях двох різнорідних провідників термо-е.р.с., якщо кінці цих провідників знаходяться при різній температурі. Відкритий термоелектричний ефект спочатку використовувався в термометрії для вимірювання температур. На той час енергетичний ККД таких пристроїв – термопар, який чисельно рівний відношенню електричної потужності, що виділяється на навантаженні, до підведеного тепла, становив лише долі одного процента. Тільки після того, як академік А. Ф. Йоффе запропонував використовувати для виготовлення термоелементів замість металів напівпровідники, стало можливим енергетичне використання термоелектричного ефекту, і в 1940-1941 роках в Ленінградському фізико-технічному інституті був створений перший у світі напівпровідниковий термоелектрогенератор. Працями науковців і його школами в 40-50-ті роки була розроблена і теорія термоелектричного ефекту в напівпровідниках, а також синтезовані досить ефективні (до даного часу) термоелектричні матеріали.

Сполучаючи між собою окремі термоелементи, можна створювати досить потужні термобатареї. Електростанція потужністю 10 ГВт може важити до 200 тисяч тонн. Зниження ваги енергоустановки прямо пов'язане з підвищенням коефіцієнта корисної дії перетворення сонячної енергії в електрику.

Цього можна досягти двома шляхами: збільшенням термічного коефіцієнта корисної дії перетворювача і зниженням незворотних втрат енергії у всіх елементах енергоустановки.

У першому випадку концентроване випромінювання дозволяє одержувати дуже високі температури. Але одночасно при цьому значно зростають вимоги до точності систем спостереження за Сонцем, що для величезних за розмірами концентруючих систем мало ймовірно. Тому зусилля дослідників постійно були спрямовані на зниження незворотних втрат. Вони спробували зменшити перетікання тепла з гарячих спаїв на холодні теплопровідністю. Для вирішення цього завдання потрібно домогтися збільшення добротності напівпровідникових матеріалів.

Але після багаторічних спроб синтезувати напівпровідникові матеріали з високою добротністю стало зрозуміло, що досягнута величина є граничною. Тоді виникла ідея розділити гарячий і холодний спай повітряним проміжком, аналогічно будови двоелектродної лампи – діод. Якщо в такій лампі розігрівати один електрод – катод і при цьому охолоджувати другий електрод – анод, то в зовнішньому електричному колі виникне постійний струм. Вперше це явище спостерігав у 1883 році Томас Едісон.

Головні складові незворотних втрат у ТЕП пов'язані з неізотермічним характером підведення та відведення тепла на катоді і аноді, перетіканням тепла з катода на анод за елементами конструкції ТЕП, а також з омичними втратами в елементах послідовного з'єднання окремих модулів.

Для досягнення високого ККД циклу Карно сучасні ТЕП створюють на робочі температури катодів в межах 1700...1900 °К, що при температурах охолоджуваних анодів порядку 700 °С дозволяє отримувати ККД близько 10 %. Таким чином, завдяки зниженню незворотних втрат в самому перетворювачі і при одночасному підвищенні температури підведення тепла ККД ТЕП виявляється вдвічі вищою, ніж у описаного вище ТЕГ, але при істотно більш високих температурах підведення тепла [1, 25, 33].

Тепер розглянемо фотоелектричний метод перетворення енергії. У сонячних батареях використовується явище зовнішнього фотоэффекту, що проявляється на р-п перехід в напівпровіднику при освітленні його світлом. Створюють р-п (або п-р) перехід шляхом введення в монокристалічний напівпровідниковий матеріал-базу домішки з протилежним знаком провідності. При попаданні на р-п перехід сонячного випромінювання відбувається збудження електронів

валентної зони і утворюється електричний струм у зовнішньому колі. Коефіцієнт корисної дії сучасних сонячних батарей досягає 13...15 %.

У сонячних електростанцій є одна, але досить істотна проблема. Отримувати і використовувати "чисту" сонячну енергію на поверхні Землі заважає атмосфера. А що, якщо розмістити сонячні електростанції в космосі, на навколосезній орбіті. Там не буде атмосферних перешкод, невагомість дозволить створювати багатокілометрові конструкції, які необхідні для "збору" енергії Сонця. У таких станцій є велика перевага. Перетворення одного виду енергії в інший неминуче супроводжується виділенням тепла, і скидання його в космос дозволить запобігти небезпечне перегрівання Земної атмосфери.

Як насправді будуть виглядати сонячні космічні електростанції, сьогодні точно сказати не можна. Відомо, що до проектування подібних електростанцій конструктори приступили ще в кінці 1960-х років. Будь-який варіант проекту сонячної космічної електростанції припускає, що це колосальна споруда. Навіть найменша космічна електростанція повинна важити десятки тисяч тонн. І цю гігантську масу необхідно буде запустити на віддалену від Землі орбіту.

Сучасні засоби виведення можуть доставити на низьку – опорну – орбіту необхідну кількість блоків, вузлів і панелей сонячних батарей. Щоб зменшити масу величезних дзеркал, які концентрують сонячне світло, можна робити їх з найтоншої дзеркальної плівки, наприклад, у вигляді надувних конструкцій. Зібрані фрагменти сонячної космічної електричної станції потрібно доставити на високу орбіту і зістикувати там. А долетіти до "місця роботи" секція сонячної електростанції зможе своїм ходом, досить лише встановити на ній електроракетні двигуни малої тяги.

Але це в майбутньому. На даний час сонячні батареї з успіхом живлять космічні станції.

1.7 Біоенергетика

До біомаси відносять усю рослинну і вироблену тваринами субстанцію. При використанні біомаси в енергетичних цілях для виробництва тепла, електроенергії і палива, розрізняють енергетичні рослини і органічні відходи.

Енергетичними рослинами вважаються [3, 4, 8]:

– швидко зростаючі сорти дерев і спеціальні однорічні рослини з високим вмістом сухої маси, що використовується як тверде паливо;

– цукро- та крохмалевмісні польові культури для переробки в етанол, а також маслянисті культури для виробництва біопалива, яке застосовується як рідке паливо;

– польові культури, придатні для силірування і використовуються у виробництві біогазу.

До органічних відходів відносяться відходи, що виникають в сільському, лісовому, домашньому господарстві і промисловості: відходи деревообробки, солома, трава, листя, гній, органічні відходи домашнього господарства і т. д.

До біогенного твердого палива відносяться усі не викопні види палива органічного походження, які до моменту їх використання знаходяться в твердому стані, як наприклад: деревина усіх видів і у будь-якій формі, солома, макуха, зерно, кукурудза, злаки, цукровий буряк, рапс, рослинні олії, біологічні відходи, екскрименти, водорості і т. д.

Виробництво електроенергії і тепла з твердої біомаси на сьогодні здійснюється, в основному, шляхом спалювання в твердопаливних котлах, з отриманням пари високого тиску (рис. 3.1). Цей процес здійснюється за допомогою біомасових енергетичних установок. Розрізняють відповідно:

– біомасові котельні – установки що виробляють тільки теплову енергію;

– біомасові теплоелектроцентралі (Біо-ТЕЦ) – виробляють разом з тепловою ще і електричну енергію.

Щорічно приріст біомаси у світі оцінюється в 200 млрд. т (в перерахунку на суху речовину), що енергетично еквівалентно 80 млрд. т нафти. Одним із джерел біомаси є ліси. При переробці робочої деревини 3...4 млрд. т складають відходи, енергетичний еквівалент яких становить 1,1...1,2 млрд. т нафти. Світова потреба в енергії (11 млрд. т у.п.) становить тільки 12% енергії щорічного світового приросту біомаси. Частка і кількість біомаси, використовуваної для одержання енергії, постійно знижується, що можна пояснити порівняно низькою теплоотою згоряння біомаси, унаслідок високого вмісту в ній води [13-19].

Під вторинними енергетичними ресурсами (ВЕР) слід розуміти енергію і паливо різних видів і параметрів, що отримуються як відхід або побічний продукт технологічного процесу.

ВЕР сільськогосподарського виробництва ділять на три основні групи:

1) горючі матеріали, що отримуються в результаті технологічних процесів. Це в основному залишки продуктів рослинництва і тваринництва, зношені дерев'яні конструкції, горючі побутові відходи;

2) теплові викиди, фізична теплота газів котельних, що виходять в атмосферу, теплота сільськогосподарської продукції, теплота продуктів харчування тварин і людей, тепло системи кондиціонування, вентиляції і т. п., теплота, що відходить через поверхні споруд і стінки судин;

3) високий наднормальний тиск, наприклад тиск пари в котлах, тиск води в системі магістраль водопостачання, тиск повітря створений вентиляторами в даному об'ємі простору і т. п.

ВЕР першої групи або переробляють в необхідний вигляд палива (рідкий, газоподібний, твердий), або просто спалюють для виробництва теплової енергії. Переробку ВЕР в різні види палива здійснюють на основі як біотехнології, так і хімічних перетворень. Основні відходи рослинництва – солома, відходи бавовни і інші рослинні залишки. З них можна отримувати синтетичні спирти і різні горючі гази, що є ефективними видами палива для двигунів внутрішнього згорання. Основні відходи тваринництва – гній, що переробляється в органічне добриво. Супутній продукт – метан.

Біомаса являє собою найдавніше джерело енергії, однак її використання донедавна зводилося до прямого спалювання або у відкритих вогнищах, або в печах і топках, але також з досить низьким ККД. Останнім часом увага до ефективного енергетичного використання біомаси істотно підвищилася, причому на користь цього з'явилися й нові аргументи [20]:

– використання рослинної біомаси за умови її безперервного відновлення (наприклад, нові лісові посадки після вирубки лісу) не приводить до збільшення концентрації CO_2 в атмосфері;

– у промислово розвинених країнах в останні роки з'явилися надлишки оброблюваної землі, що доцільно використовувати під енергетичні плантації;

– енергетичне використання відходів (сільськогосподарських, промислових і побутових) вирішує також екологічні проблеми;

– новітні технології дозволяють використовувати біомасу значно більш ефективно.

Біомаса по своєму складу може бути вуглецемісткою (рослинний матеріал, деревна тріска, тирса, морські водорослі, зерно, папір, пакувальна тара) або цукромісткою (цукровий буряк, цукровий очерет, сорго).

Біогаз є продуктом розпаду речовин під дією бактерій, що утворюється внаслідок розкладання ними органічного субстрату.

Перший великомасштабний завод з виробництва біогазу був побудований в 1911 році в англійському місті Бірмінгем й використовувався для знезаражування осаду стічних вод цього міста. Вироблюваний біогаз використовувався для виробництва електроенергії. Таким чином, англійські вчені є піонерами практичного застосування нової технології. Уже до 1920 року вони розробили кілька типів установок для переробки стічних вод.

Біогазова установка, як правило, являє собою герметично закриту ємність, у якій при певній температурі відбувається зброджування органічної маси відходів, стічних вод і т.п. з утворенням біогазу.

Принцип роботи всіх біогазових установок однаковий: після збору й підготовки сировини, що полягає в доведенні його до потрібної вологості в спеціальній ємності, воно подається в реактор, де створюються умови для оптимізації процесу переробки сировини.

Сам процес одержання біогазу й біодобрив із сировини називають ферментацією, або зброджуванням. Зброджування сировини відбувається за рахунок життєдіяльності особливих бактерій. Під час зброджування на поверхні сировини з'являється плівка, яку потрібно руйнувати, перемішуючи сировину. Перемішування здійснюється вручну або за допомогою спеціальних пристроїв усередині реактора й сприяє вивільненню біогазу, що утворився, із сировини.

Отриманий біогаз після очищення збирається й зберігається до часу використання в газгольдері. Від газгольдера до місця використання в побутових або інших приладах біогаз проводять по газових трубах.

Перероблена в реакторі біогазової установки сировина, що перетворилася в біодобрива, вивантажується через вивантажувальний отвір і вноситься в ґрунт або використовується як кормова добавка для тварин.

Існує багато різних конструкцій біогазових установок. Їх розрізняють за методом завантаження сировини, зовнішнім виглядом, за складовими частинами конструкції й матеріалів, з яких вони споруджуються.

За методом завантаження сировини виділяють установки порціонного й безперервного завантаження, які відрізняються часом зброджування й регулярністю завантаження сировини. Найбільш ефективними з погляду вироблення біогазу й одержання біодобрив є установки безперервного завантаження.

Біогаз утворюється за допомогою бактерій у процесі розпадання органічного матеріалу при анаеробних (без доступу повітря) умовах і являє собою суміш метану й інших газів.

Використання в господарствах біоенергетичних установок дозволить одночасно вирішити п'ять найважливіших проблем [45]:

- екологічну (повна утилізація гною),
- енергетичну (одержання й утилізація біогазу),
- агрохімічну (одержання добрив),
- соціальну (поліпшення умов праці і створення нових робочих місць),
- економічну (зниження платежів і одержання прибутку від реалізації добрив).

Газифікація біомаси є одним з найбільш дешевих і екологічно безпечних способів отримання електричної і теплової енергії. Існує два прямих способу отримання газу з біомаси – мікробіологічний і термічний (піролітичний). Деревина містить мало води і досить повільно піддається біорозпаданню. Тому для неї і більшості відходів, що містять целюлозу та лігнін, найбільш простим і ефективним способом газифікації є термічна (піролітична).

Газифікація – це термохімічний процес, при якому багата вуглецем сировина, така як біомаса і різні види вугілля перетворюються на горючий газ. Утворюване в результаті газоподібне з'єднання називається генераторний або синтез-газ.

Відомо, що при згоранні оригінального палива виділяються різні компоненти, при газифікації виділяються тільки горючий газ і інертні гази. Це означає, що вихлопні гази процесу газифікації біомаси складаються тільки з тих же елементів, які будуть одержані, якщо спалювати природне паливо. Проведена в належних умовах газифікація є ефективним процесом вироблення енергії, який може принести подвійну вигоду, при використанні теплової і електричної систем в режимі когенерації.

Залежно від характеру контакту частинок біомаси з газовою фазою методи газифікації можуть бути класифіковані на систему з нерухомим шаром (одна або декілька ступенів), систему з псевдозрідженим шаром і інші системи (наприклад, система з проштовхуванням сировини або з рідким теплоносієм).

Вибір найбільш відповідного методу газифікації часто визначається типом і умовами підведення сировини, вимогами до змісту вологи і зольних елементів (наприклад, високий або низький вміст кремнію, високий або низький вміст лужних металів).

ВЕР першої групи можна спалювати в побутових печах і в спеціальних утилізаційних котельнях.

ВЕР другої групи досягають значної величини. В даний час ККД палива в більшості низькотемпературних процесів складає 15...25 %. Решта теплоти нагрівальних пристроїв, а також теплота, що виділяється тваринами, йде з вентиляцією в атмосферу. В цілому по сільському господарству це складає близько 20 млрд. кВт·год на рік. Утилізувавши хоч би частину вказаних відходів, можна заощадити значну кількість палива. Для використання ВЕР цієї групи промисловістю створені утилізатори теплоти: рекуператори, регенератори і теплові насоси.

Рекуператор – це теплообмінник, в якому теплота речовини, що видаляється, передається такою, що поступає через роздільну теплопровідну стінку. Їх конструкції бувають прямої дії і з проміжним теплоносієм.

У сільському господарстві застосовують велику кількість невеликих котельних і нагрівальних печей, фізичну теплоту газів яких, що відходять, також можна утилізувати. Температура димових газів, що викидаються в атмосферу, досягає 100...300°C. Теплоту цих газів можна використовувати двома способами: нагрівати повітря, воду і паливо, що поступають в топку і котли; нагрівати теплоносії, використовувані зовні котельною, наприклад в теплиці, парнику і т. п. Обидва способи вже застосовують в масовому масштабі.

Промисловість серійно випускає багато типів теплообмінників прямої дії, наприклад, секційні ТСК-3.

Принцип роботи рекуператорів з проміжним теплоносієм розглянутий на прикладі теплової труби. Теплова труба призначена для передачі теплоти з одного (з високою температурою) середовища в інше, яке потрібно підігрівати.

Теплова труба – це герметичний конвеєр, в якому міститься рідина, що легко випаровується. Якщо теплота подається до одного кінця труби, то рідина в цьому кінці випаровується, пара поступає до холодніших зон труби, де конденсується, а прихована теплота конденсації поглинається споживачем вторинних енергоресурсів.

Робота теплової труби залежить від її нахилу, розміру отворів внутрішніх перегородок, поверхневого натягу і теплоємності паротворення робочої рідини. Це не завжди вдається забезпечити відповідно заданим умовам. Тому замість теплової труби можна застосовувати проміжний теплоносій, що не випаровується.

Рекуператори з проміжним теплоносієм доцільно застосовувати у тому випадку, коли не можна використовувати пластинчасті

теплообмінники, наприклад, в системах утилізації теплоти пропарювальних кормів (відбір теплоти після пропарювання).

Регенератори – це теплообмінники, що мають спеціальні пристосування (наприклад, тепломістки насадки), які спочатку потрапляють в середовище, де потрібно відібрати теплоту, акумулюють її, а потім перемищуються в інше середовище, якому віддають цю теплоту. До теплообмінника підведено дві труби, по одній з яких рухається відпрацьований газ, а по іншій – газ, який необхідно нагрівати. У міру обертання регенератора теплота, що абсорбується з потоку гарячого газу, що проходить через нього, передається потоку холодного. Регенератори, що обертаються, можна застосовувати, наприклад, в умовах жаркого клімату для попереднього охолодження повітря, використовованого в системах кондиціонування будівель. Вони також ефективно працюють в тих випадках, коли різниця температур між потоками гарячого і холодного повітря незначна. У багатьох випадках теплота, що скидається ($T=25...30^{\circ}\text{C}$) з теплових насосів може ефективно утилізувати. Тепловий насос – це установка, в якій температура наявного теплоносія підвищується до необхідного рівня за рахунок витрат механічної, сонячної або якої-небудь іншої енергії. Простим тепловим насосом є компресор. Працює насос наступним чином. У випарник поступає відпрацьований потік з низькою температурою, і при випаровуванні циркулюючого робочого тіла теплота поступає в систему теплового насоса. Пара, що потім утворилася, проходить через компресор, в якому тиск і температура його підвищуються, і далі поступає в конденсатор, де віддає теплоту, отриману у випарнику, і теплоту стиснення, отриману в компресорі. Пара конденсується, нагрітий конденсат проходить через дросель. І його температура знижується.

При використанні сонячної енергії (наприклад, для цілей кондиціонування повітря) вигідні теплові насоси адсорбції (адсорбція – поглинання речовин рідиною з суміші газів), які не вимагають підведення механічної енергії. Використовується тільки теплота, підведена до випарника, де кипить хладагент при низькому тиску.

Холодоагент, що випарувався, поглинається рідиною при низькому тиску, яку насосом перекачують в область високого тиску, де хладагент виділяється з рідини, віддаючи теплоту при вищій температурі. Застосування теплонасосних установок для отримання теплоти з низькопотенціальних теплових відходів дозволяє досягти 20...30%-вої економії палива в порівнянні з використанням котельних. Тому теплові насоси починають набувати поширення як індивідуальні

прилади опалювання, особливо в південних районах країни, де в літній час їх використовують для кондиціонування повітря.

ВЕР третьої групи включають надмірний тиск. Ці енергоресурси можна переробляти, використовуючи механічні або електромеханічні установки. Надмірний тиск гідросистем (артезіанські свердловини, водопровідні і каналізаційні мережі) освоюють шляхом установки гідротурбін, що приводять в дію, наприклад, електричні генератори, верстати, транспортери, лінії транспортування виробів і інші машини. Надмірний тиск газів можна освоїти, застосовуючи, наприклад, газові турбіни. Потрібно мати на увазі, що надмірний тиск, що створюється неправильно вибраними установками, не розглядається як вторинні енергоресурси. Цей надмірний тиск слід усувати, замінюючи насосні, компресорні або вентиляційні установки на інші, параметри яких відповідають розрахунковим.

1.8 Вітроенергетика

Сьогодні, енергію вітру використовують для отримання електричного струму. Галузь, що займається перетворенням енергії вітру в електричний струм, називається вітроенергетика.

Найбільш популярним на сьогоднішній день є застосування вітрогенераторів. Вітрогенератори широко застосовуються як у великих масштабах, це величезні електростанції, так і в малих, для приватного користування.

Державні програми по підтримці розвитку нетрадиційних джерел енергії привели до того, що у наш час на всій планеті 2% від всієї електричної енергії виробляється за допомогою вітру і цей відсоток продовжує збільшуватися з року в рік, завдяки зменшенню вартості даної технології [21, 32].

До країн, які найінтенсивніше розвивають технології і ринки НВДЕ, слід віднести: США, країни ЄС (в першу чергу, Швецію, Австрію, Фінляндію, Німеччину, Португалію, Іспанію), Японію, Китай. Останнім часом активізувалися в цьому напрямі Бразилія і Індія. Роста вартість акцій компаній, які займаються НВДЕ. Все це дасть можливість прискорити розвиток технологій і їх впровадження в промислове виробництво.

У вітроенергетичному секторі на даний час працюють близько 70 країн світу. Серед країн з найбільшими потужностями вітроенергетики – Німеччина, США, Іспанія, Індія, Китай, Данія. Роста загальна потужність таких установок (річний приріст в 2007 році - 26,6 %), так і одинична потужність, яка досягнула 1 ГВт, розвивається

вітроенергетичне машинобудування. У країнах ЄС до 2020 року планується довести виробництво вітрової електроенергії до 12 % від загального об'єму електрогенерації.

У США до 2020 року планується досягти 15 % виробництва електроенергії за рахунок вітру, удосконалюються турбіни, розширюється діапазон швидкостей вітру, які можуть бути використані вітроустановками.

На сьогоднішній день Європа стоїть на першому місці по використанню енергії вітру. Особливий розвиток і використання вітроенергетики є в Німеччині, Данії і Іспанії. У Данії 20% використовуваної енергії виробляється за допомогою вітру.

Цікаво, що перша в світі вітроелектростанція потужністю 100 кВт була побудована в Радянському Союзі в 1932 р. в Криму.

Сумарна потужність вітрових електричних установок (ВЕУ) сьогодні в Україні наближається до 30 МВт. За даними, сумарна потужність у кінці 1999 року дорівнювала 11,4 МВт, а в кінці 2000 року вже 24,15 МВт. Таким чином, приріст склав більше 100 %. Україна залишається єдиною країною колишнього Радянського Союзу, в якій активно розвивається вітроенергетика. Тут налагоджено серійне виробництво вітроагрегатів. Поки це ліцензійні ВЕУ USW56-100 потужністю 107,5 кВт [43].

Як відомо, вітер існує скрізь – як на суші, так і на морі. Незважаючи на факт, того, що переміщення повітряних мас пов'язано з нерівномірною зміною температури в атмосфері і обертанням Землі, застосування енергії вітру не відразу знайшло своє технічне і практичне застосування.

Пасати і західний вітер відносять до глобальних вітрів. У результаті нагрівання екваторіальної частини Землі утворюються пасати. При нагріванні, нагріте повітря піднімається вгору, забираючи при цьому з собою північні і південні повітряні маси. В результаті цього явища, з'являється пануючий впродовж року з постійною силою в північній півкулі північно-східний пасат і в південній півкулі – південно-східний пасат. Пасати дмуть в області, так званої, приекваторіальної, яка розташована між 25 і 30° північної і південної широти відповідно. Пасати охоплюють близько 11% поверхні океанів в північній півкулі і близько 20% в південній. Зазвичай сила пассатного вітру не перевищує 2–3 балів.

Уздовж дрейфуючих крижин Антарктиди, приблизно в смузі від 40° до 60° південної широти, із заходу на схід, впродовж року дме західний вітер. Такий вітер є одним із самих сильних постійних вітрів. Його сила може досягати 8-10 балів і практично не буває нижче 5 балів.

В глибині материка немає постійного напрямку вітру. Можна впевнено говорити тільки про сезонні напрямки вітру, тому що різні ділянки суші в різний час року нагріваються по-різному. Крім того, вітер поводитьсь по-різному в залежності від висоти, а для висот 50 метрів панують характерні повітряні потоки.

Ми можемо обчислити потенціал атмосфери, знаючи її масу і швидкість розсіювання енергії. Наприклад, для приземного шару товщиною близько 500 метрів, енергія вітру, перетворюється в тепло, що складає приблизно $8200000000000 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ на рік. Зрозуміло, ми не зможемо використати її повністю, хоча б тому, що щільно поставлені вітряки будуть заважати один одному, затемнюючи інших [37, 39].

Зазвичай, середньорічні швидкості повітряних потоків на стометровій висоті перевищують 7 м/с. При виході на висоту 100 метрів, можна використовувати ефективний вітроагрегат скрізь, використовуючи відповідну природну височину.

Одними з перших вітрів, які були використані нашими предками для мореплавання, були місцеві вітри, тобто бризи. Бризи – це різновид легких вітрів, які обдимають береги материків і великих островів, зумовлюються добовим коливанням температури. Різниця температури на суші і в морі вдень і вночі обумовлює періодичність бризів. Вдень суша нагрівається швидше, ніж море. Внаслідок цього, тепле повітря піднімається над берегом, а його місце прагне зайняти прохолодне повітря з моря. А вночі, як відомо, берег швидше і сильніше охолоджується, ніж море. Тому вночі відбувається зворотна картина: тепле повітря піднімається над морем, а його замінює холодне повітря з суші – береговий бриз. Іншими постійними вітрами є мусони. Такі вітри дмуть в Індійському океані і перш за все пов'язані з різними змінами температури материка і океану. Влітку суша під впливом сонячних променів, нагрівається сильніше. Внаслідок цього вітер дме з моря на сушу. А взимку мусон дме з берега на море. Але в результаті обертання Землі навколо своєї вісі з'являється, так звана, сила Коріоліса, яка впливає на мусони і відхиляє їх праворуч. Ось чому влітку дмуть південно-західні мусони, а зимою північно-східний. Мусони можуть досягати дуже великої сили і викликати в Індійському океані поверхневі течії, які відповідають місцевим вітрам.

Однією з перших машин для отримання і використання енергії вітру було вітрило. У вітродвигуна і вітрила один і той же принцип роботи, також як і одне джерело енергії. Ю.С. Крючков, досліджуючи вітрило, показав, що його можна представити як вітродвигун з нескінченним діаметром колеса. Вітрило – свого роду найбільш

досконала лопатева машина, з найвищим коефіцієнтом корисної дії, яка використовує енергію вітру безпосередньо для руху.

У вітроенергетиці використовуються вітроколеса і вітрокаруселі. Подібні комерційні установки вже побудовані і успішно експлуатуються в США. Частина фінансування подібних проєктів надходить з бюджету держави, а інша частина інвестується майбутніми споживачами екологічно чистої енергії.

На початку ХХ століття, на хвилі загальної ідеї використовувати вітер скрізь, де це можливо, інтерес до повітряних гвинтів та вітроколеса не був відокремлений від загальних тенденцій часу. Найперше поширення вітроустановки одержали в сільському господарстві. Повітряний гвинт широко використовувався в якості приводу судових механізмів. Вітроустановка також була встановлена на дослідному судні "Фрам", на якому відомий мандрівник Ф. Нансен досліджував Арктику. Вітроустановка на цьому судні обертала динамо машину. На вітрильниках вітряки теж відігравали велику роль: вони приводили в рух насоси і якірні механізми.

Одним з головним недоліків вітряної енергії залишається її мінливість в часі, проте і це можна компенсувати за рахунок розташування вітроустановок. Якщо об'єднати кілька десятків великих вітроагрегатів, то їх середня потужність буде залишатися постійною. Також існує можливість доповнення вітрогенератором існуючих джерел енергії. Але найголовніше, що саме від вітродвигуна можна отримувати безпосередньо механічну енергію.

У першому випадку вісь обертання вітроколеса паралельна повітряному потоку, установка буде горизонтально-осьовою, у другому – зазвичай вертикальноосьовою.

Установки, що використовують силу опору (драг-машини), як правило, обертаються з лінійною швидкістю, меншою швидкості вітру, а установки, що використовують підйомну силу (ліфт-машини), мають лінійну швидкість кінців лопатей, суттєво більшу швидкості вітру.

Для більшості установок геометричне заповнення визначається числом лопастей. ВЕУ з великим геометричним заповненням вітроколеса розвивають значну потужність при відносно слабкому вітрі і максимум потужності досягається при невеликих обертах колеса. ВЕУ з малим заповненням досягають максимальної потужності при великих обертах і довше виходять на цей режим. Тому перші установки використовуються, наприклад, в якості водяних насосів і навіть при слабкому вітрі зберігають працездатність, другі – як електрогенератори, де потрібна висока частота обертання.

Установки для безпосереднього виконання механічної роботи часто називають вітряком чи турбіною, установки для виробництва електроенергії, тобто сукупність турбіни і електрогенератора, називають вітроелектрогенераторами, аерогенераторами, а також установками з перетворення енергії.

У аерогенераторів, підключених безпосередньо до потужної енергосистеми, частота обертання постійна внаслідок ефекту автосинхронізації, але такі установки менш ефективно використовують енергію вітру, ніж установки зі змінною частоти обертання.

Наявність буфера зменшує наслідки флуктуації частоти обертання вітроколеса, дозволяє більш ефективно використовувати енергію вітру і потужність електрогенератора. Таким чином, нежорстке з'єднання поряд з інерцією вітроколеса зменшують вплив флуктуації швидкості вітру на вихідні параметри електричної енергії. Зменшити цей вплив дозволяє також пружне з'єднання лопатей з вісью вітроколеса, наприклад за допомогою підпружинених шарнірів.

Вітрогенератори використовуються як засоби альтернативної енергетики. Їх застосування можна рекомендувати в районах, що не мають традиційного енергопостачання, а також в місцях, де спостерігаються часті перебої з подачею електроенергії.

ВЕУ умовно можна розділити на чотири групи [22]:

- ВЕУ з потужністю до 1 кВт;
- ВЕУ з потужністю до 10 кВт;
- ВЕУ з потужністю до 30 кВт;
- ВЕУ з потужністю до 100 кВт і вище.

ВЕУ першої групи володіють невеликими розмірами і вагою. Їх можна рекомендувати для використання в геологорозвідувальних групах, для туристів в походах і подорожах, для живлення радіостанцій і заряджання акумуляторів автомобіля або яхти, а також для безпосереднього живлення електричних приладів. Крім того, ці ВЕУ відрізняє відносно невисока ціна.

Наступні групи можна віднести до стаціонарних ВЕУ. Ці вітроелектростанції можуть повністю забезпечувати електроживленням житловий будинок або виробничий об'єкт, постійно накопичувати в акумуляторних батареях великий ресурс електроенергії для використання в безвітряні періоди.

Стаціонарні вітроелектрогенератори використовуються також для живлення автономно функціонуючих систем: опалювальні і освітлювальні комплекси, насосні станції, метеостанції, охоронні і моніторингові системи.

Група ВЕУ з потужністю до 10 кВт можна використовувати як систему автономного енергопостачання для невеликих господарств, приватних будинків, котеджів. Ці ВЕУ володіють великою вагою і великими розмірами. Для їх установки потрібний спеціально підготовлений майданчик (залівка фундаменту). У комплект входить генератор і ротор. Генератор, як правило, виробляє постійну напругу 12В, 24В або 48В.

Слід зазначити, що в цій групі на ринку представлені вітчизняні, українські ВЕУ. Вартість таких генераторів нижча, ніж аналогічних імпортованих.

Треба мати на увазі, що для можливості використання ВЕУ з будь-яким побутовим або промисловим устаткуванням, необхідно використовувати інвертори. Ці пристрої перетворюють постійну напругу генератора в змінну напругу 220В або 380 В. Для накопичення електроенергії, в періоди відсутності вітру, рекомендуються акумуляторні батареї.

Третю групу складають ВЕУ потужністю до 30 кВт. Їх призначення схоже з призначенням ВЕУ другої групи. Відмінність складають більша вага – до 500 кг і великі розміри. Відрізняються вони і більшою ціною.

Четверту групу ВЕУ можна віднести до професійного промислового устаткування. Цей тип можна порекомендувати для установки на промислових підприємствах і для створення вітроенергетичних електростанцій. Для їх монтажу також потрібна залівка фундаменту. Вартість таких ВЕУ починається від 150 000 євро.

Крім того, з метою економії засобів, споживачеві можуть бути запропоновані вітрогенератори, що були в експлуатації. Всі вони пройшли технічне обслуговування і готові до роботи.

ВЕУ потужністю 2...3 МВт потребує ділянки 20x20 м. Оскільки такі ВЕУ не потребують об'єднання в систему, то ділянку можна підібрати будь-де. Розміщення ВЕУ наближує джерело електроенергії до споживача.

ВЕУ класифікують за такими ознаками [23]:

- за видом виробленої енергії;
- за потужністю;
- за сферами застосування;
- за призначенням;
- за ознакою роботи з постійною або змінною частотою обертання вітроколеса (ВК);
- за способами керування;

– за структурою системи генерації енергії.

ВЕУ, залежно від виду виробленої енергії, поділяють на дві групи: механічні та електричні. Електричні ВЕУ, у свою чергу, поділяють на ВЕУ постійного і змінного струму.

Залежно від сфери застосування механічні ВЕУ підрозділяють на дві підгрупи: вітронасосні та вітросилові згідно рисунку 1.5.

Вітроустановки при роботі використовують ефект виникнення підйомної сили, що діє на лопаті вітротурбіни, яка в свою чергу обертає генератор, що виробляє електроенергію. Через змінний характер вітру, частота і напруга на виході генератора також нестабільна, тому неможливо організувати живлення споживачів безпосередньо від ВЕУ.

У аеродинаміці широко застосовується ефект виникнення підйомної сили при дії потоку повітря на жорсткий профіль довільного перерізу. Цей ефект використовують вітроустановки і вітроенергетичні системи. За рахунок спеціальної форми перерізу лопатей і вибору оптимального кута атаки, досягається коефіцієнт використання вітру до 0,48.

Схема роботи вітроустановки



Рисунок 1.5 – Схема роботи вітроустановки

У малих ВЕУ, на відміну від великих, не використовується система зміни кута атаки лопатей, тому їх ефективність змінюється в залежності від швидкості вітру.

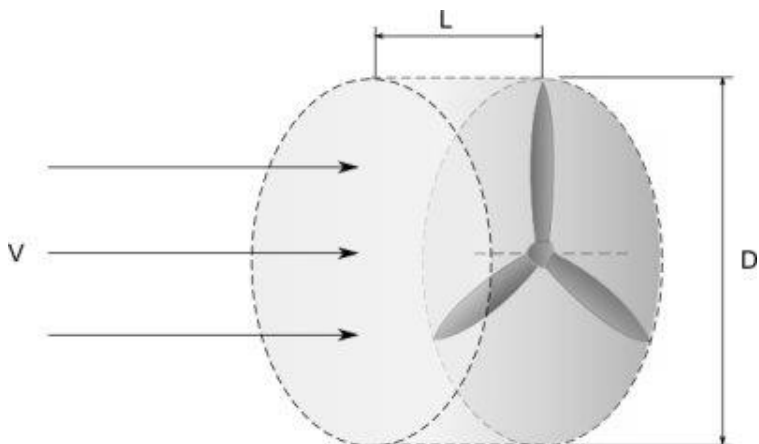


Рисунок 1.6 – Основні параметри вітроколеса

Основними параметрами, які впливають на потужність вітрового потоку є швидкість вітру (в 3-му степені) і діаметр вітроколеса (в квадраті). Тобто, потужність вітрового потоку збільшується в 8 разів при зростанні швидкості вітру в 2 рази. Швидкість вітру розподілена нерівномірно по висоті потоку. Як правило дані про швидкість вітру наведені на висоті флюгера (3 м), а вітроустановки розташовують на вежах висотою 10...12 м. Розподіл швидкостей вітру по висоті визначається співвідношенням: $(h_1/h_2)^m = (V_1/V_2)$, де $m \approx 0.2$ - коефіцієнт зростання швидкості вітру в приземному шарі.

Конструкція вітроустановки:

- 1) вітроколесо;
- 2) лопаті;
- 3) гондола з генератором;
- 4) ротор;
- 5) вежа;
- 6) троси.

Відомо, що потужність вітрового потоку зростає пропорційно кубу швидкості. Тому вибір майданчика з точки зору максимальної швидкості вітру має критичне значення для подальшої ефективної роботи ВЕС. Відомо також, що в Україні найбільш придатні для вітроенергетики Кримський регіон, берегова лінія і мілководні ділянки Азовського і Чорного морів, а також окремі ділянки в Карпатах та інших регіонах.

Однак і в цих, в цілому сприятливих для розвитку вітроенергетики районах, швидкість вітру залежить від різних факторів – навколишнього рельєфу, дрібномасштабної структури поверхні Землі і наявності на поверхні природних і антропогенних об'єктів.

Існують сучасні засоби обліку цього впливу. Це, наприклад, англійська програма WindFarm, розроблена компанією ReSoft і вже згадуваний пакет програмного забезпечення WASP датської лабораторії. І та, і інша програма дозволяють розрахувати параметри вітрового потоку і ефективність роботи ВЕУ для конкретного місця на земній поверхні, скориставшись інформацією про швидкість і напрям вітру в регіоні і даними про місцевий рельєф.

Однак програма WASP в процесі виконання проекту так і не була освоєна з ряду причин, починаючи з відсутності фінансування на вивчення програми і підготовки фахівців, закінчуючи відсутністю необхідних метеоданих і сучасної інформації про рельєф місцевості.

Перші українські ВЕС проектувалися різними організаціями, що мали досвід роботи тільки в традиційній енергетиці. Вибір місця для всіх існуючих в даний момент ВЕС диктувався наявністю загальних, часто недостатніх, метеоданих для регіонів і, в більшості випадків, практичними обставинами.

Величина ВЕС впливає на її економічні показники. Частка інфраструктури в загальній вартості ВЕС, а також складова експлуатаційних витрат у вартості електроенергії зменшуються зі збільшенням розміру ВЕС. Економічний аналіз, проведений міжгалузєвою координаційною радою показав, що будівництво ВЕС, встановлена потужність яких не перевищує 20...30 МВт, недоцільно. Практично всі плановані й проектовані ВЕС мають потужність понад 50 МВт

Однак складність освоєння таких програм, як WindFarm і WASP не є єдиною проблемою. Достовірність результатів роботи програм залежить від повноти та достовірності вхідних даних. Для коректної роботи програм потрібні цифрові великомасштабні карти місцевості, які зараз доводиться готувати практично вручну.

Крім того, для ефективного використання програм WindFarm і WASP необхідна інформація про швидкість і напрям вітрового потоку, зібрана протягом декількох років (бажано не менше п'яти)

Досвід показав, що дані про середньорічну швидкість вітру, отримані метеостанціями України, непридатні для прогнозу виробництва електроенергії за допомогою ВЕС через те, що їх похибка часто складає 40...70% [24].

1.9 Мала гідроенергетика

Мала гідроенергетика, яка є найбільш освоєною з нетрадиційних відновлювальних джерел електроенергії, дозволяє використати значний гідроенергетичний потенціал малих рік і приток, систем водопостачання, іригації з видачею електроенергії в енергосистему, а в багатьох випадках забезпечити локальне електропостачання віддалених районів або населених пунктів, особливо в недостатньо розвинених країнах і в країнах, що розвиваються, з обмеженою системою централізованого електропостачання. До переваг малих ГЕС відносяться порівняно невеликий об'єм інвестицій і короткий термін будівництва, що дозволяє прискорити отримання прибутку, забезпечити мінімальну дію на довкілля, надійність і близькість до споживача. До об'єктів малої гідроенергетики відносяться малі ГЕС згідно міжнародної класифікації потужністю до 30 МВт (в Швейцарії, Україні не більше 10 МВт), міні-ГЕС – від 0,1 до 1,0 МВт, мікро-ГЕС – не більше 0,1 МВт.

У більшості розвинених країн досягнутий високий рівень освоєння ресурсів малої гідроенергетики. Так, потужність малих ГЕС, що експлуатуються (2007 р.), складає: в Австрії – 1,1 млн. кВт, Франції – 2,1 млн. кВт, Німеччині – 1,6 млн. кВт, Норвегії – 1,4 млн. кВт, Іспанії – 1,8 млн. кВт, Швейцарії – 0,8 млн. кВт, Японії – 3,5 млн. кВт, Канаді – 2 млн. кВт [25].

Їх широке освоєння відбувається в країнах, що розвиваються. Світовим лідером у використанні малої гідроенергетики є Китай, де потужність малих ГЕС складає біля 35 млн. кВт з виробленням 110 млрд. кВт·год (2007 р.) і ведеться їх розгорнуте будівництво [26].

В Індії, де потенціал малої гідроенергетики оцінюється в 15 млн. кВт, експлуатуються 420 малих ГЕС сумарною потужністю більше 0,5 млн. кВт і планується будівництво більше 4000 малих ГЕС.

У Бразилії потужність малих ГЕС – більше 1,9 млн. кВт, будуються – потужністю 1,0 млн. кВт і планується будівництво малих ГЕС потужністю 6,9 млн. кВт.

В Україні загальна потужність малих ГЕС, що експлуатуються, складає більше 100 МВт, більше 100 малих і міні-ГЕС вимагають відновлення та реконструкції.

Загальний економічно ефективний потенціал малих ГЕС України оцінюється в більш ніж 3,0 млрд. кВт·год. Більша частина неосвоєного потенціалу знаходиться у Карпатському регіоні, де передбачається будівництво малих ГЕС з водосховищами комплексного призначення. Будується каскад малих ГЕС на р. Тересві потужністю 16 МВт.

Згідно стратегії розвитку малої гідроенергетики планується довести потужність малих ГЕС у 2020 р. до 700 МВт, а в 2030 р. – до 1040 МВт. Прийняті законодавчі акти (закони «Про альтернативні джерела енергії», «Про зелений тариф») створюють сприятливий інвестиційний клімат для будівництва малих ГЕС.

Гідроакмулююча електростанція (ГАЕС) – гідроелектрична станція, принцип дії якої полягає в перетворенні електричної енергії, що отримується від інших електростанцій, в потенційну енергію води, при зворотному перетворенні накопичена енергія віддається в енергосистему головним чином для покриття піків навантаження.

Гідротехнічні споруди ГАЕС складаються з двох басейнів, розташованих на різних рівнях, і сполучних водоводами. Гідроагрегати, встановлені в будівлі ГАЕС в нижній частині водоводу, можуть бути трьохмашинними, такими, що складаються із сполучених на одному валу оборотної електричної машини (двигун-генератор), гідротурбіни і насоса, або двухмашинними – оборотна електромашина і оборотна гідромашина, яка залежно від напрямку обертання може працювати як насос або як турбіна.

Електроенергія, що виробляється недовантаженими електростанціями енергосистеми (в основному вночі), використовується ГАЕС для перекачування насосами води з нижнього водоймища у верхнє. У періоди піків навантаження вода з верхнього басейну по трубопроводу підводиться до гідроагрегатів ГАЕС, включеним на роботу в турбінному режимі, вироблена при цьому електроенергія віддається в мережу енергосистеми, а вода накопичується в нижньому водоймищі. Кількість акумульованої електроенергії визначається ємкістю басейнів і робочим тиском води ГАЕС. Верхній басейн ГАЕС може бути штучним або природним (наприклад озеро), нижнім басейном часто служить водоймище, що утворилося унаслідок перекрытия річки греблею. Однією з переваг ГАЕС є те, що вони не залежать від дії сезонних коливань стоку води. Гідроагрегати ГАЕС, залежно від напору тиску, що діє на лопаті гідротурбіни, обладнуються поворотно-лопатовими, діагональними, радіально-осьовими чи ковшовими гідротурбінами. Час пуску і зміни режимів роботи ГАЕС вимірюється декількома хвилинами, що зумовлює їх високу експлуатаційну маневреність. Регульовальний діапазон ГАЕС, з самого принципу її роботи, близький двократній встановленій потужності, що є однією з основних її переваг.

Здатність ГАЕС покривати піки навантаження і підвищувати споживання електроенергії вночі, робить їх дієвим засобом для вирівнювання режиму роботи енергосистеми. Загальний ккд

(коефіцієнт корисної дії) ГАЕС в оптимальних розрахункових умовах роботи наближається до 0,75, у реальних умовах середнє значення ккд з урахуванням втрат в електричній мережі не перевищує 0,66.

Приплив і відплив – періодичні вертикальні коливання рівня океану або моря, що є результатом зміни положень Місяця і Сонця відносно Землі разом з ефектами обертання Землі навколо своєї вісі та особливостями даного рельєфу місцевості, проявляється в періодичному горизонтальному зсуві водних мас. Припливи і відпливи викликають зміни в висоті рівня моря, а також періодичні течії, відомі як приливні течії, що передбачають прогнозування припливів важливою інформацією для організації функціонування прибережної навігації.

Інтенсивність цих явищ залежить від багатьох факторів, один з найбільш важливим з них, є ступінь зв'язку водоюм зі світовим океаном. Чим більш замкнута водойма, тим менше ступінь прояву приливо-відливних явищ.

Турбіна – ротаційний двигун з безперервним робочим процесом і обертальним рухом робочого органа (ротора), перетворюючий кінетичну енергію і внутрішню енергію робочого тіла (пари, газу, води) в механічну роботу. Струмінь робочого тіла діє на лопатки, закріплені по коловій поверхні ротора, і приводить їх в рух.

Застосовується в якості приводу електричного генератора на теплових, атомних і гідро електростанціях, як складова частина приводів на морському, наземному і повітряному транспорті, а також гідродинамічної передачі, гідронасоси. Моря та океани займають 71% поверхні Землі і мають енергію таких видів [27]:

- енергія хвиль та припливів;
- енергія хімічних зв'язків газів, солей, мінералів тощо;
- прихована енергія течій у різних частинах морів та океанів;
- невичерпна енергія, яку можна виробляти, використовуючи різницю температур води на поверхні та в глибині, а також перетворюючи її на традиційні види.

Енергетичні установки по використанню енергії океана

Приливна електростанція (ПЕС) – особливий вид гідроелектростанції, що використовує енергію припливів, а фактично кінетичну енергію обертання Землі. Приливні електростанції будують на берегах морів, де гравітаційні сили Місяця і Сонця двічі на добу змінюють рівень води. Коливання рівня води біля берега можуть досягати 13 метрів.

Для вироблення електроенергії електростанції такого типу використовують припливну енергію води. Перша така електростанція потужністю 5 МВт була побудована на Камчатці. Для пристрою найпростішої припливної електростанції потрібно басейн – перекритий греблею затоку або гирло річки. У греблі є водопропускні отвори і встановлені гідротурбіни, які обертають генератор. Гідротурбіна – це лопаткова машина, що приводиться в обертання потоком рідини, зазвичай річкової води. За принципом дії гідравлічні турбіни підрозділяють на активні (вільноструйні) і реактивні (напороструйні); за конструкцією – на вертикальні і горизонтальні.

В залежності від розташування осі обертання розрізняють вертикальні і горизонтальні гідрогенератори; за частотою обертання – тихохідні (до 100 об/хв) і швидкохідні (понад 100 об/хв). Потужність гідрогенераторів від декількох десятків до декількох сотень МВт.

Під час припливу вода надходить у басейн. Коли рівні води в басейні і море зрівняються, затвори водопропускних отворів закриваються. З настанням відливу рівень води в морі знижується, і, коли тиск стає достатнім, турбіни та з'єднані з ним електрогенератори починають працювати, а вода з басейну поступово вимиває в море.

Вважається економічно доцільним будівництво припливних електростанцій у районах з приливними коливаннями рівня моря не менше 4 м. Проектна потужність припливної електростанції залежить від характеру припливу в районі будівництва станції, від об'єму і площі приливної басейну, від числа турбін, встановлених в тілі греблі.

Найбільш поширеним способом використання енергії морів та океанів є спорудження припливних електростанцій (ПЕС). З 1967 р. у гирлі річки Ране у Франції працює ПЕС потужністю 240 МВт. На черзі спорудження ПЕС у затоці Фанді в Канаді з рекордним 18-метровим рівнем припливу, у гирлі річки Северен в Англії із 14,5-метровим приливом та в інших регіонах із великими припливами води [66, 70].

Цікавим напрямком океанської енергетики виявилось вирощування із плотів в океані гігантських водоростей – келпів, які швидко ростуть і легко перероблюються на метан. За зарубіжними оцінками, для повного забезпечення енергією кожної людини-споживача достатньо 1 га плантацій келпів.

На велику увагу заслуговує "океанотермічна енергоконверсія", іншими словами отримання електроенергії за допомогою різниці температур між поверхневими та глибинними океанськими водами, що засмоктуються водним насосом, наприклад, при використанні в замкнутому циклі турбіни таких рідин, які легко випаровуються (пропан, фреон чи амоній).

Перша у світі та найбільша на сьогодні ПЕС міститься у Франції на березі Ла-Маншу в гирлі річки Ране. Приплив у цьому місці переміщує 189 тис. м³ води за секунду. Різниця рівнів становить 13 м, а швидкість течії між містами Брестом і Сен-Мало часто досягає 90 км/год. У середині дамби дуже великого накопичувального резервуара містяться 24 турбо-альтернатори-турбогенератори зі зворотними лопатками ротора турбіни. Кожен з них може функціонувати і як турбіна, і як насос, який працює і в бік моря, і в зворотному напрямку. В дамбу вмонтовані навігаційні замки і спускні шлюзи.

До недоліків ПЕС слід віднести труднощі, пов'язані із захистом дамб та устаткування від ударів льодяних торсів, особливо у північних районах. Поблизу дамб морська флора й фауна дуже потерпає внаслідок, хоча й незначного, підвищення температури та зменшення вмісту кисню у воді. Крім того, дамби перешкоджають міграції риб.

"Пірнало" Солтера нагадує поплавок, який, піднімаючись і опускаючись одночасно з хвилями, приводить в дію насос, що подає воду під тиском в турбогенератор.

Пліт Кокерела складається з трьох шарнірно з'єднаних понтонів, які перебувають на плаву і відтворюють коливання хвиль, їхнє підняття й опускання приводить в дію гідравлічні тарани, які з'єднують понтони. Стискання і розтягування таранів передається робочій рідині, яка діє на гідравлічний генератор, що виробляє електричний струм.

Випрямлювач Расела регулює рух води таким чином, що вона надходить у турбіну тільки в одному напрямку.

Колівальна водяна колонка (резервуар) відрізняється від попередніх проєктів. Вона перетворює енергію хвиль на потенціальну енергію стиснутого повітря, яке потім віддає енергію повітряній турбіні.

Ідея колонки належить японському морському офіцеру Масуді, який винайшов плаваючий хвилеріз. Він довів, що коли хвилеріз зробити у вигляді перевернутої камери з отворами у верхній частині, то висота хвиль усередині буде значно меншою, ніж ззовні, оскільки хвиля вирівнюватиметься під дією потоків повітря, що проходять крізь отвори. Інтенсивні повітряні потоки постійно надходять у середину камери і виходять з неї внаслідок піднімання та опускання колони.

За цим принципом сьогодні працюють плавучі установки, які використовуються для буїв різного призначення. Схему такої установки показано на рис. 1.7.

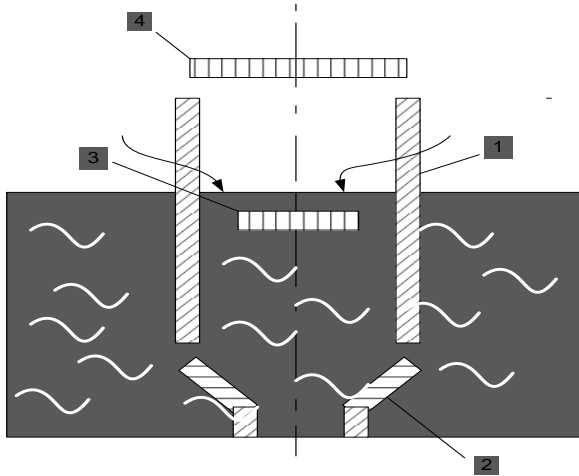


Рисунок 1.7 – Схема плавучої установки

В її камері 1, яка має дискову опору 2, міститься турбіна 3, з'єднана з електрогенератором 4. Коли проходить хвиля, камера намагається піднятися разом із нею. Опора перешкоджає цьому й таким чином забезпечує інтенсивне проникнення води всередину камери. Стовп води витісняє повітря із середини камери крізь сопловий апарат на лопаті турбіни. Після проходження хвилі, вода виходить з камери, а її місце знову займає повітря. Потім цикл повторюється.

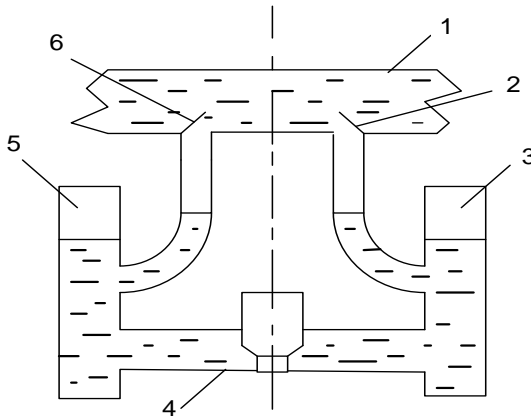


Рисунок 1.8 – Схема установки для використання зміни гідростатичного тиску в товщі води при хвилюванні

Досить оригінальний і простий пристрій запропоновано в Японії для використання змін гідростатичного тиску в товщі води при її хвилюванні. У морі, де ці зміни найбільш помітні, розміщують установку (рис. 1.8), яка складається з трьох камер 1, 3 і 5, з'єднаних між собою через клапани 2, 6 і робочий канал 4. У верхній частині камер 3 і 5 міститься газ, решту простору заповнено струмопровідною рідиною. Якщо канал 4 з'єднати, наприклад, з магнітогідродинамічним генератором, то при зміні тиску навколишнього середовища в каналі почне переміщуватися магнітопровідна рідина, що призведе до появи різниці потенціалів на електродах. Така установка може бути дуже зручною для вимірювання тиску та отримання енергії невеликої потужності [28].

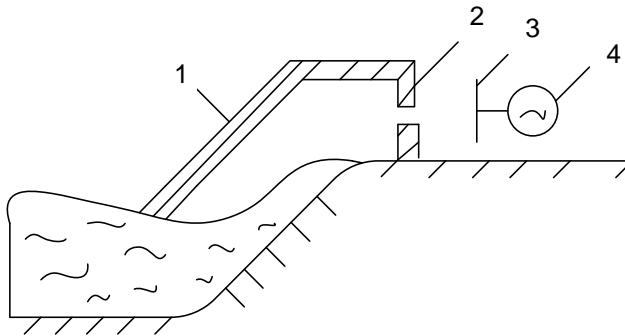


Рисунок 1.9 – Схема прибівної електростанції

На рис. 1.9 показана схема побудованої в Японії прибівної електростанції потужністю 50 кВт. Принцип її роботи приваблює своєю простотою і майже повною відсутністю рухомих частин. Хвиля, яка падає під козирок 1, стискає повітря й жене його крізь сопловий канал 2 до турбіни 3, яка приводить в дію електрогенератор 4.

Усім цим умовам відповідає багатоступінчастий хвильовий насос, схему якого наведено на рис. 1.10. Одна його ступінь вміщує гофрований патрубков 1, вихідний клапан 2, демпфугачий резервуар 3, вихідний клапан 4 і тонкий гнучкий лист 5, який вертикально входить у воду. За допомогою хвильового насоса здійснюється перетворення кінетичної та потенціальної енергії на направлений рух рідини. Подальше перетворення кінетичної енергії рідини, що рухається, на електроенергію відбувається за допомогою гідравлічних турбін, які обертають електрогенератор [29].

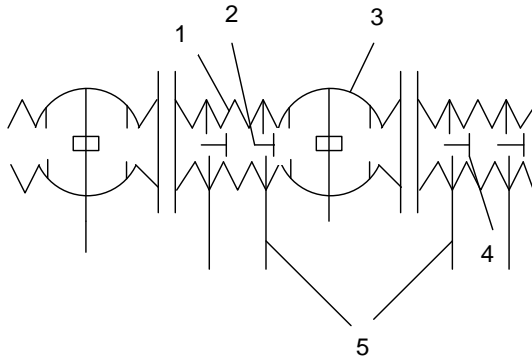


Рисунок 1.10 – Схема багатоступінчатого хвильового насоса

У Данії, Норвегії та Швеції станції розташовано на плотах, з'єднаних з насосом, який починає працювати, коли хвилі діють на пліт. Тут використано великий насос, що міститься на дні моря. Поршень насоса з'єднується з плотом за допомогою еластичного дроту. Коли хвилі підіймають пліт, поршень піднімається, вода проходить крізь заповнений блок генератора турбіни, виробляючи електроенергію. Коли хвиля спадає, поршень опускається, витискаючи своєю вагою воду через клапани.

Енергія хвиль та припливів

Світовий технічний потенціал енергії хвиль оцінюється на рівні 11 400 тераватт-год на рік. Його відновлюваний потенціал на 1700 тераватт-годин на рік становить приблизно 10% світових потреб в електроенергії. Існують різні концепції генерації електрики з енергії хвиль, більшість з яких можуть бути класифіковані в три основні типи.

Принцип «осцилювання водяного стовпа» – дія хвилі змушує воду рухатися вгору і вниз в заповненій повітрям камері. Повітря витісняється через турбіну, яка генерує електрику. Перші пілотні хвильові електростанції такого типу були встановлені нещодавно в Португалії, Шотландії та Японії.

Принцип «коливного тіла» – хвильові електростанції цього типу використовують рух океанських хвиль для генерації електрики. У них використовуються напівзанурені генератори, на яких буйок рухається вгору-вниз або з боку в бік. Інші системи такого типу складаються з рухомих компонентів, що рухаються відносно один одного, створюючи гідравлічний тиск в маслі. Олія, у свою чергу, приводить в рух турбіну. Система 'Pelamis', перша в світі хвильова електростанція, була

встановлена в 2008 році поблизу узбережжя Португалії і з'єднана з електролінією підводним кабелем. Подібні станції плануються до будівництва в Іспанії та Португалії.

Принцип «переливу» – як в дамбі, такі пристрої оснащені резервуаром, який заповнюється набігаючими хвилями до рівня вище рівня моря. Енергія падаючої води назад в океан використовується, щоб приводити в рух турбіну. Прототипи і плавучих, і стоячих систем такого типу вже були встановлені в Данії і Норвегії.

Дещо більшим від ресурсів гідроенергії є Світовий ресурс енергії морських хвиль та припливів.

Електростанції, що працюють на енергії припливу, працюють за схожим принципом з гідроелектростанціями, відмінність в тому, що водяні маси не течуть вниз, але рухаються туди і назад з припливами і відливами. На відміну від інших форм морської енергії, енергія припливу вже використовується в комерційних цілях протягом деякого часу. Електростанція La Rance почала працювати в 1966р. в Сент Мало на Атлантичному узбережжя північної Франції, де річка LaRance впадає в море. При припливі вода спрямовується через великі турбіни електростанції, а при відливів тече назад. Електростанція, розрахована на 240 МВт, має потужність, подібну з газовою електростанцією. За останні 20 років типові станції були встановлені в Канаді, Китаї та у деяких інших країнах, незважаючи на значно менший розмір. У Великобританії планується будівництво великої електростанції на енергії приливу на річці Северн між Англією і Уельсом. Така станція може забезпечити до 7% потреб усієї Великобританії в електроенергії. Проте критики побоюються, що будівництво таких гребель може зруйнувати природні ресурси і середовище існування. Екологічна шкода може бути дуже значною. А тому на свіж рівнях обговорюються альтернативні концепції і райони розміщення [30].

Для України промислове використання цих ресурсів є проблематичним через замерзання Азовського і Чорного морів і відсутність територій для побудови ГЕС. А стосовно припливів – через вкрай низький потенціал: припливна хвиля на Чорному морі не перевищує 10 см, а необхідна висота становить, як мінімум, 5 м.

Найбільша частка загальної енергії, що надходить у берегову зону, пов'язана з вітровими поверхневими хвилями. Енергія хвилі складається із двох видів – кінетичної (гідродинамічної) і потенціальної (гідростатичної). Кінетична (гідростатична) енергія хвиль складається з енергії частинок, що рухаються по орбітах (по колу). Потенціальна (гідростатична) – енергія маси води, піднятої над рівнем моря (океану), що залежить від перевищення гребеня хвилі над середнім рівнем моря.

Теорія засвідчує, що ці два види енергії рівні, а разом пропорційні квадрату висоти і довжини хвилі, тобто приблизно кубу її лінійних розмірів. Формула складається із числового коефіцієнта, питомої ваги води і прискорення сили тяжіння.

Хвиля висотою 3 м переносить приблизно 100 кВт енергії на 1 м лінії гребеня. Розрахунки загального потоку хвильової енергії до берегів Світового океану, виконані В.П. Зенковичем (1980), засвідчують, що мінімальна його величина становить близько 3,1109 кВт. За обчисленнями Г.О. Саф'янова (1996) ця величина становить 4,7109 кВт. Другим за значенням джерелом енергії для гідродинамічних процесів, а також для переміщення наносів є припливні хвилі. Розсіювання їхньої енергії відбувається здебільшого в межах мілководдя. Розрахунки потоків припливної енергії біля океанічних берегів дають величину 2,7109 кВт. Постійні океанічні течії розсіюють на мілководді близько 0,2...109 кВт енергії. Інші джерела енергії виконують порівняно незначну роль у прибережних водах. Навіть найефективніші хвилі цунами малозначимі, оскільки потужні цунами з енергією в 51015 Дж трапляються 5 разів упродовж століття. Значно очевиднішою останніми роками стала роль краєвих та інфрагравітаційних хвиль, хоча можливість їхньої оцінки відсутня. Загальна оцінка розсіювання механічної енергії на мілководдя океану, на думку Г.О. Саф'янова (1996), становить 6109 кВт. Наведені наближені цифри яскраво засвідчують великі енергетичні ресурси берегової зони, яку сьогодні майже не використовують [31].

Перша у світі припливна турбіна комерційного масштабу SeaGen потужністю 1,2 МВт, що належить компанії Marine Current Turbines, розташована у Північній Ірландії. Припливна електростанція SeaGen нещодавно перетнула рубіж 2 мільйонів кВт·год електроенергії, які вона виробила та поставила до енергомережі Великобританії.

Припливна електростанція генерує стільки ж електроенергії як і морська вітрова турбіна із вдвічі більшою потужністю, однак виробництво електроенергії припливною електростанцією можна в повній мірі передбачити.

Енергія хімічних зв'язків газів, солей, мінералів тощо

У океані існує чудове середовище для підтримки життя, до складу якого входять живильні речовини, солі і інші мінерали. У цьому середовищі розчинений у воді кисень живить всіх морських тварин від самих маленьких до найбільших, від амеби до акули. Розчинений вуглекислий газ так само підтримує життя всіх морських рослин від одноклітинних діатомових водоростей до тих, що досягають висоти 200...300 футів (60...90 метрів) бурих водоростей. Морському біологу

потрібно зробити лише крок вперед, щоб перейти від сприйняття океану як природної системи підтримки життя до спроби почати на науковій основі одержувати з цієї системи енергію.

За підтримкою військово-морського флоту США у середині 70-х років група фахівців у області дослідження океану, морських інженерів і водолазів створила першу в світі океанську енергетичну ферму на глибині 40 футів (12 метрів) під залитою сонцем поверхнею Тихого океану поблизу міста Сан-Клемент. Ферма була невелика. По суті своїй, все це було лише експериментом. На фермі вирощувалися гігантські каліфорнійські бурі водорості.

На думку директора проекту доктора Говарда А. Уїлкокса, співробітника Центру дослідження морських і океанських систем в Сан-Дієго (Каліфорнія), до 50 % енергії цих водоростей може бути перетворено на паливо – в природний газ метан. Океанські ферми майбутнього, що вирощують бурі водорості на площі приблизно 100000 акрів (40000 га), зможуть давати енергію, якої вистачить, щоб повністю задовольнити потреби американського міста з населенням в 50000 чоловік [32].

В океані розчинено величезну кількість солей. Чи може солоність бути використана, як джерело енергії? Може. Велика концентрація солі в океані націлило ряд дослідників Ськріппського океанографічного інституту в Ла-Колла (Каліфорнія) і інших центрів на думку про створення таких установок.

Вони вважають, що для отримання великої кількості енергії є можливість сконструювати батареї, в яких відбувалися б реакції між солюною і несолуною водою.

Літаки і легкові автомобілі, автобуси і вантажівки можуть приводитися в рух газом, який можна добувати з води. Цей газ – водень, і він може використовуватися як пальне. Водень – один з найбільш поширених елементів у Всесвіті. У океані він міститься в кожній краплі води. Формула води означає, що молекула води складається з двох атомів водню і одного атома кисню. Одержаний з води водень можна спалювати як паливо і використовувати не тільки для того, щоб приводити в рух різні транспортні засоби, але і для отримання електроенергії.

Все більше число хіміків і інженерів з ентузіазмом відноситься до "водневої енергетики" майбутнього, оскільки одержаний водень достатньо зручно зберігати: у вигляді стиснутого газу в танкерах або в зрідженому вигляді в криогенних контейнерах при температурі – 423 °F (-252,8 °C).

Його можна зберігати і в твердому вигляді після з'єднання з залізо-титановим сплавом або з магнієм для утворення металевих гідридів.

Після цього їх можна легко транспортувати і використовувати в міру необхідності.

Ще в 1847 році французький письменник Жюль Верн, що випередив свій час, передбачав виникнення такої водневої економіки. У своїй книзі "Таємничий острів" він передбачав, що в майбутньому люди будуть використовувати воду як джерело для отримання палива. "Вода, – писав він, – забезпечить нескінченні запаси тепла і світла".

У 60-і роки фахівцям США з НАСА вдалося так успішно здійснити процес електролізу води і забезпечити ефективне збирання та зберігання водню, що вивільняється, а потім одержаний таким чином водень успішно використовувався під час польотів за програмою "Аполон".

Осмотична електростанція – зовсім новий вид генерації енергії. В ній використовується осмотичний тиск, який виникає між солоною і прісною водою, при його зростанні, в подвійній камері, яка розділяється спеціальною напівпроникною мембраною. Технологія застосування осмотичних електростанцій все ще перебуває на самому початку свого розвитку. У 2009р. члени норвезького синдикату побудували першу в світі осмотичну електростанцію в Осло. Завод був спроектований і побудований спеціально, щоб розвивати цю технологію, в даний час він генерує всього декілька кіловат електроенергії. Але значний потенціал світового виробництва електроенергії з осмотичного процесу в майбутньому може забезпечити вироблення до 2000 терават-годин в рік електричної енергії.

Прихована енергія течій у різних частинах морів та океанів

Величезні кількості енергії можна отримати від морських хвиль. Ідея отримання електроенергії від морських хвиль була викладена ще в 1935 р. радянським ученим К.Е. Цюлковським. В основі роботи хвильових енергетичних станцій лежить вплив хвиль на робочі органи, виконані у вигляді поплавків, маятників, лопаток, оболонки і т.п. Механічна енергія забезпечить переміщення робочих органів хвильової електростанції, яке приведе в рух електрогенератор за його допомогою перетворюється механічна енергія на електричну.

У цьому класі перетворювачів енергії зупинимося, в першу чергу, на розробці професора Единбурзького університету Стефана Солтер, названої на честь творця, "качки Солтер". Технічна назва такого перетворювача – нестійке крило. Форма перетворювача забезпечує максимальне вилучення потужності.

Хвилі, що надходять зліва, змушують "качку Солтера" коливатися. Циліндрична форма протилежної поверхні забезпечує відсутність поширення хвилі направо при коливаннях "качки Солтер" навколо осі. Потужність може бути знята з осі коливальної системи з таким розрахунком, щоб забезпечити мінімум відтворення енергії. Відтворюючи і пропускаючи лише незначну частину енергії хвиль (приблизно 5%), цей пристрій має досить високу ефективність перетворення в широкому діапазоні частот збуджувальних коливань.

Інший варіант хвильового перетворювача з хитним елементом – контурний пліт Коккерелла. Його модель також в 1/10 величини випробовувалася в тому ж, що і "качка Солтер", в протоці Солент поблизу м. Саутгемптона. Контурний пліт – це багатоланкова система з шарнірно з'єднаних секцій. Як і "качка", він встановлюється перпендикулярно до фронту хвилі і відстежує її профіль. Детальні лабораторні випробування моделі плоту в масштабі 1/100 показали, що його ефективність становить близько 45%. Це нижче, ніж у "качки Солтера" (але пліт має іншу перевагу: близькість конструкції плота до традиційних суднобудівних конструкцій). Виготовлення таких плотів не передбачає створення нових промислових підприємств але дозволить збільшити зайнятість населення в суднобудівній промисловості [33].

Крім того, існують перетворювачі, що використовують енергію коливного водяного стовпа. При набіганні хвилі на частково занурену порожнину, відкриту під водою, стовп рідини в порожнині коливається, викликаючи зміни тиску в газі над рідиною. Порожнина може бути пов'язана з атмосферою через турбіну. Потік може регулюватися так, щоб проходити через турбіну в одному напрямку, або може бути використана турбіна Уеллса. Вже відомі, принаймні, два приклади комерційного використання пристроїв на цьому принципі – сигнальні буї, впроваджені в Японії в порті Масуд і у Великобританії співробітниками Королівського університету Белфаста. Більш великий і вперше включений в електромережу пристрій побудований в Тофтестоллені (Норвегія) фірмою Kvaerner Brug A / S. Головна перевага пристроїв на принципі водяного коливного стовпа полягає в тому, що швидкість повітря перед турбіною може бути значно збільшена за рахунок зменшення прохідного перерізу каналу. Це дозволяє поєднувати повільний хвильовий рух з високочастотним обертанням турбіни. Крім того, тут створюється можливість видалити генеруючий пристрій із зони безпосереднього впливу солоної морської води. Переваги підводних пристроїв полягають у тому, що ці пристрої дозволяють уникнути штормового впливу на перетворювачі.

В даний час хвильові установки використовуються для енергоживлення автономних буїв, маяків, наукових приладів. Попутно великі хвильові станції можуть бути використані для хвилезахистних морських бурових платформ, відкритих рейдів, морекультурних господарств. Почалося промислове використання хвильової енергії. У світі вже близько 400 маяків і навігаційних буїв отримують живлення від хвильових установок. В Індії від хвильової енергії працює плавучий маяк порту Мадрас. У Норвегії з 1985 р. діє перша у світі промислова хвильова станція потужністю 850 кВт. Датська компанія Wave Star Energy змонтувала експериментальну установку в Північному морі біля мису Ханстхольм на північному заході країни. Клімат тут суворий, сильні вітри і високі хвилі – явище цілорічне і, практично, постійне. Сама установка являє собою довгасту металеву конструкцію на чотирьох опорах, з одного боку платформи виступають два важелі, до кінців яких прикріплені величезні округлі поплавці діаметром 5 метрів. Поплавці виготовлені зі скловолокна. У робочому положенні вони опущені на воду і розгойдуються хвилями, що змушує важелі переміщатися вгору-вниз. Кожен з важелів з'єднаний з гідравлічним циліндром, і через гідроциліндри рух поплавців передається, в кінцевому рахунку, на вал електрогенератора. Кожен з поплавців здатний виробляти від 25 до 50 кВт електроенергії – в залежності від висоти хвиль. Створення хвильових електростанцій визначається оптимальним вибором акваторії океану зі стійким запасом хвильової енергії, ефективною конструкцією станції, в яку вбудовані пристрої згладжування нерівномірного режиму хвилювання води. Вважається, що ефективно хвильові станції можуть працювати при використанні потужності близько 80 кВт/м. Досвід експлуатації існуючих установок показав, що електроенергія, яка виробляється, поки що в 2-3 рази дорожче традиційної, але в майбутньому очікується значне зниження її вартості [34].

Невичерпні запаси кінетичної енергії морських течій, накопичені в океанах і морях, можна перетворювати на механічну і електричну енергію за допомогою турбін, занурених у воду (подібно вітрякам, "зануреним" в атмосферу). Важливою перевагою океанських течій в якості джерел енергії, в порівнянні з вітровими потоками, є відсутність різних змін швидкості (порівняйте зі змінами швидкості при поривах вітру, при ураганах і т.п.). При достатньому заглибленні в товщу води турбіни ОГЕС надійно захищені від хвиль і штормів на поверхні. Сучасний рівень техніки дозволяє одержувати енергію течій при швидкості потоку більше 1 м / с. При цьому потужність від 1 кв. м поперечного перерізу потоку становить близько 1 кВт.

Для ефективного використання течій в енергетиці необхідно, щоб вони мали певні характеристики. Зокрема, потрібні досить високі швидкості потоків, стійкість по швидкості і напрямку, зручна для будівництва та обслуговування географія дна і узбережжя. Відстань від узбережжя впливає на подорожчання транспортування енергії та обслуговування цих станцій, як, втім, і будь-яких інших. Великі глибини вимагають збільшення витрат на спорудження та обслуговування якірних систем, які можуть створювати перешкоди судноплавству. Саме географічні чинники не дозволяють зараз говорити про будівництво ОГЕС у відкритому океані, де несуть свої води найбільш потужні течії. При середніх і малих глибинах, особливо в місцях утворення припливних течій, важливу роль відіграє топографія дна.

Як недоліки перетворювачів енергії океанських течій можна назвати слідуєчі: 1) необхідність створювати і обслуговувати гігантські конструкції в морській воді, 2) схильність цих конструкцій обростанню і корозії, 3) труднощі в передачі енергії на материк.

Перспективним може бути використання таких потужних течій, як Гольфстрім і Куросіо, що несуть відповідно 83 і 55 млн. куб. м/с води зі швидкістю до 2 м/с, і Флоридської течії (30 млн. куб. м/с, швидкість до 1,8 м/с). Значний науковий інтерес направлений на вивчення течії в протоках Гібралтарській, Ла-Манш, Курильських островах. В даний час у ряді країн, в першу чергу в Англії, ведуться інтенсивні роботи по використанню енергії морських хвиль. Британські острови мають дуже довгу берегову лінію, у багатьох місцях море залишається бурхливим протягом тривалого часу. За оцінками вчених, за рахунок енергії морських хвиль в англійських територіальних водах можна було б отримати потужність до 120 ГВт, що удвічі перевищує потужність усіх електростанцій, що належать Британському Центральному електроенергетичному управлінню. Один з проєктів використання морських хвиль заснований на принципі коливного водяного стовпа. У гігантських "коробках" без дна і з отворами вгорі під впливом хвиль рівень води то піднімається, то опускається. Стовп води діє на зразок поршня: засмоктує повітря і нагнітає його в лопатки турбін. Головну складність тут викликає узгодження інерції робочих коліс турбін з кількістю повітря в коробках, так щоб за рахунок інерції зберігалася постійною швидкість обертання турбінних валів в широкому діапазоні умов на поверхні моря. Але створення океанських електростанцій на енергії течій пов'язано поки з рядом технічних труднощів, насамперед із створенням енергетичних установок великих розмірів, що становлять загрозу судноплавству [35].

Як джерело енергії, розглядаються і підводні океанічні течії, однак їх занадто низька швидкість не дозволяла будувати турбінні станції, які виробляли б достатню кількість енергії. Але якщо відійти від ідеї стандартної обертової турбіни, з'являється новий цікавий спосіб використовувати енергію течій, а саме, замінити енергію обертання на енергію коливань. Ідея прийшла в голову професору Майклу Бернітасу, під час досліджень можливості зменшення енергії течій, коливання від якої жодна зруйнувати мости, пошкодити корабельні доки, розгойдувати нафтовидобувні платформи. Концепція VIVACE дозволяє використовувати будь-які, навіть самі повільні течії. Швидкість, необхідна звичайним станціям для ефективного вироблення енергії, дорівнює 9 км/год, VIVACE ж достатньо 3 км/год або 2 морських вузла, а це швидкість більшості підводних течій нашої планети. Якщо помістити в потік навіть слабкої течії циліндричний предмет, вода, обтікаючи його, буде утворювати вихори. Через незначні нерівномірності потоку, вихори з різних сторін не будуть однакові а це змусить предмет коливатися. За аналогічним принципом плаває більшість існуючих риб. Вони згинають своє тіло так, щоб утворювалися вихрові потоки по обидві сторони, щоб вони не врівноважували один одного, а різницю утвореного тиску використовують для руху вперед. Неможливо було б добитися такої швидкості руху, якби вони використовували лише силу своїх м'язів. Робоча частина приладу являє собою циліндр, приєднаний до пружини. Під дією течії води (мінімальна швидкість, на якій відбуваються коливання – 2,7 км / год) циліндр відхиляється то в одну сторону, то в іншу, і ці механічні коливання перетворюються в електрику. З таких циліндрів може бути складена сукупність циліндрів, регулюючи розміри яких можна регулювати кількість виробленої енергії. У наступній версії планується максимально скористатися тим, що вже дала природа, і зробити прилад більш схожим на рибу – він буде мати щось на зразок хвоста і потовщену в середині основну його частину. Це дозволить йому створювати більш часті коливання і, як наслідок, виробляти більше енергії.

Перспективи електростанції VIVACE досить перспективні. Бернітас підрахував, що вартість виробленої за допомогою його станції електрики не перевищить 0,05 цента за кВт·год (для порівняння: вартість енергії, яку отримують з вітряків – 0,069 кВт·год, а з сонячних батарей – від 0,16 кВт·год до 0,48 кВт·год, в залежності від їх розташування). Така станція повністю розташована під водою, тому не займає корисну площу на суші. Вона абсолютно екологічна, оскільки не

виробляє викидів у воду, а через порівняно низьку швидкість коливань не зможе заподіяти шкоди ні риbam, ні навіть плавцям [36].

Контрольні питання до розділу 1

1. Що являють собою відновлювані джерела енергії?
2. Як класифікуються нетрадиційні відновлювані джерела енергії?
3. Які потенційні світові запаси нетрадиційної та відновлюваної енергетики?
4. Який енергетичний потенціал нетрадиційних та відновлюваних джерел енергії на Україні?
5. Що являє собою потенціал науково-промислового комплексу України?
6. Які є приклади застосування нетрадиційних та відновлюваних джерел енергії в Україні?
7. Яке застосування нетрадиційних та відновлюваних джерел енергії вам відоме у світі?
8. З якою метою використовується акумулювання енергії?
9. Які є проблеми альтернативної енергетики?
10. Які є перспективи розвитку використання нетрадиційних та відновлюваних джерел енергії в Україні?

РОЗДІЛ 2. КОМПЛЕКСНЕ ВИКОРИСТАННЯ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ І АКУМУЛЯТОРІВ ЕНЕРГІЇ

2.1 Загальні відомості, основні поняття, визначення

Альтернативна енергія від різних джерел, енергії Сонця, вітру, морської хвилі, припливів і відпливів, енергії річок та інших джерел, може бути об'єднана за допомогою гібридних систем альтернативної енергетики і працювати на загальне навантаження.

Ідея додавання, полягає в тому, що енергія від різних джерел, перетвориться в енергію стисненого повітря. Після чого, стиснене повітря, отримане від різних установок, надходить в загальну магістраль. На виході магістралі стиснутого повітря устанавлюються пневмодвигуни, які перетворюють енергію стисненого повітря в механічну енергію.

На виході пневмодвигунів можна буде отримати як зворотно-поступальний, так і обертальний рух. Використання гібридних систем, дозволить значно скоротити собівартість виробленої енергії, а також скоротити вартість самих установок.

Одержувана таким способом механічна енергія, може бути використана, наприклад, для отримання тепла за допомогою гідродинамічних тепло генераторів, для роботи холодильних компресорів, з метою отримання холоду, для роботи електрогенераторів і для багатьох інших цілей [37].

Само по собі стиснене повітря, може бути використане для роботи верстатів та інструментів, для роботи гідронасосів, а також для роботи різних агрегатів.

Припустимо, нам потрібна установка, яка зможе об'єднувати енергію вітру і енергію морської хвилі, після чого цю сумарну енергію потрібно буде перетворити в електричну.

Для вирішення цього завдання, слід зібрати гібридну установку, до складу якої увійдуть вітрокомпресор (компресор, на валу якого встановлено вітроколесо) і пневмонасоси, які приводяться в рух за рахунок коливач морської хвилі.

Стиснуте повітря від вітрокомпресора і від пневмонасосів, через відповідні клапани подаватиметься в загальну магістраль, на виході якої встановлений пневмодвигун і електрогенератор.

При відсутності вітру, така установка буде працювати на енергії морської хвилі, а за відсутності морської хвилі установка працюватиме на енергії вітру.

Наведена в якості прикладу установка, крім енергії вітру і морської хвилі, може отримувати і об'єднувати енергію і від інших джерел. Наприклад, від енергії Сонця, енергії річки, геотермальної та інших видів енергії.

Тобто джерел енергії може бути багато, а установка всього одна. Основна ідея створення гібридних систем альтернативної енергетики і полягає якраз у тому, щоб сконцентрувати в собі якнайбільше різних джерел енергії.

Зрозуміло, дешевше зробити один агрегат на всі види енергії, ніж створювати на кожен вид енергії окрему установку. Тоді питання про вартість виробленої енергії, стає зайвим.

Для більшої переконливості доцільності використання вищевикладеного розглянемо, наприклад, енергію океану.

Морська хвиля має свою висоту і рухається з деякою швидкістю. Тобто, мається вже два види енергії, потенціальна енергія висоти хвилі і кінетична енергія її швидкості.

Для узбережжя Європи, ця сумарна енергія становить 50...90 кВт на 1 м фронту води, а на півдні Австралії доходить і до 100 кВт. Якщо ж хвилі немає, то є приливи і відливи, а це теж близько 13,5 кВт з кожного квадратного метра [38].

Можна використовувати як джерело енергії і глибоководні морські течії, і різницю температури між верхніми і нижніми шарами морської води. Робити на кожен вид енергії окремий агрегат, звичайно ж можна, тільки питається навіщо?

Тим більше, коли всі ці джерела енергії знаходяться практично в одному місці, чи не простіше всю цю енергію зібрати в одній гібридній установці.

2.2 Класифікація комбінованих джерел і акумуляторів енергії, основні характеристики

На рисунку 2.1 представлена класифікація комбінованих джерел енергії.

Використання одного з видів відновлювальних джерел енергії може бути пов'язане із нерівномірністю постачання енергії, що має природну основу (геліоенергетика, вітроенергетика). В деяких випадках рівень енергії відновлювального джерела недостатній для його прямого використання (вітроенергетика, геотермальна енергетика, фотоенергетика). В таких випадках доцільне комбіноване використання відновлювальних джерел, а також їх робота з акумуляторами енергії.

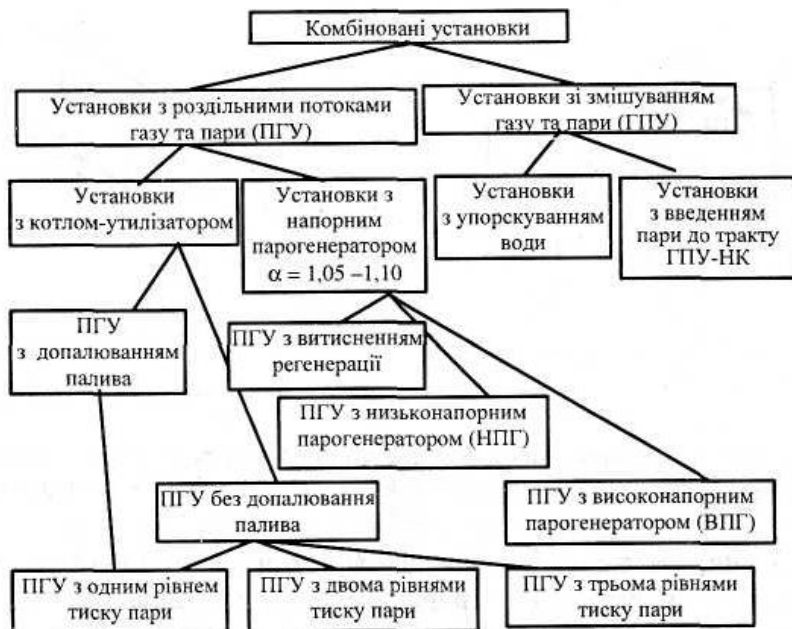


Рисунок 2.1 – Схема комбінованих установок

Таким чином, можливі варіанти комбінованих використань відновлювальних джерел і акумуляторів енергії, які можуть бути такими [39]:

- комбінація відновлювального джерела з традиційним джерелом енергії;
- комбінація відновлювального джерела енергії з акумулятором енергії;
- комбінація одночасного використання двох або трьох відновлювальних джерел енергії;
- комплексне використання відновлювальних джерел енергії декількох видів і різного роду акумуляторів енергії.

2.3 Комбінація нетрадиційних джерел з традиційними джерелами енергії

Існує науково-практичний інтерес сполучення вітрової електростанції з гідроакумулюючою. В даному випадку в години

максимуму навантаження енергосистеми, обидві електричні станції віддають електроенергію в мережу. В інші години доби електрична енергія вітрової електростанції використовується для живлення насосів, що перекачують воду у верхній водозбірник. В останньому випадку забезпечується місцеве вироблення і споживання електричної енергії, що робить мінімальними втрати електричної енергії в мережах живлення. До того ж, вітрову електростанцію можна розташовувати по лінії водоймища, що пов'язано з більш інтенсивними потоками вітру в цьому місці, ніж на рівнинній поверхні.

Вітрові електростанції доцільно сполучати і з гідроелектростанціями, що утворюють штучні водосховища. В кожному водосховищі має місце мілководна частина, в якій доцільно було б розташовувати вітрову електростанцію, не використовуючи ділянки земельних угідь. До плюсів такої комбінації можна віднести можливість використання підвищувальної підстанції гідравлічної електростанції і лінії електричних мереж, що відходять від підстанції. Збільшення потужності існуючої підстанції і пропускної здатності мереж електропостачання значно дешевше, ніж споруда нової підстанції і ліній електропередач.

Оскільки робота ВЕС має ймовірний характер вироблення електроенергії, їх потрібно використовувати паралельно з певним акумулятором енергії або з іншим джерелом електроенергії (ГЕС, ТЕС, дизельна електростанція) для економії палива, що приведе до поліпшення екологічної обстановки.

Спільну роботу вітроенергетичних установок і малих ГЕС можна застосувати як для одночасного вироблення електричної енергії, так і для використання енергії вітроустановки для підйому води у водосховищі. В останньому випадку використання енергії вітру буде нижче за рахунок втрат у насосах і турбінах ГЕС, але в даному випадку буде мати місце регулювання процесом вироблення електричної енергії.

В місцевостях, де відсутнє централізоване електропостачання (окремі фермерські господарства, лісгоспи, мисливські господарства тощо) доцільно використовувати комбінацію ВЕУ з дизель-генераторною установкою.

Для економічних розрахунків береться регіон із середньорічною швидкістю вітру 6 м/с, потужність дизель-генератора – 8 кВт, ВЕУ з установленою потужністю 8 кВт при розрахунковій швидкості вітру – 7,8 м/с. Під час роботи дизеля протягом року при номінальній потужності витрата дизельного палива становить приблизно 23 т, а при сумісній роботі з ВЕУ – 8 т. При вартості зекономленого палива приблизно 4 тис. дол. США і вартості ВЕУ 20...24 тис. дол. США тільки

за рахунок економії палива термін окупності ВЕУ дорівнюватиме 5-6 років [40].

Для більш глибокої економічної оцінки враховуємо всі експлуатаційні витрати за час експлуатації 25 років.

Вартість ВЕУ – приблизно 20 тис. дол. США, річні витрати на обслуговування ВЕУ полягатимуть у заміні масла в мультиплікаторі двічі на рік, при вартості однієї заміни приблизно 10 дол. США з врахуванням вартості масла. До того ж, за 25 років ймовірно доведеться змінити комплект лопатей вітроколеса, що коштує близько 5 тис. дол. США. При врахуванні додаткових витрат у розмірі 3 % вартості ВЕУ повні сумарні витрати по ВЕУ за 25 років становитимуть 26100 дол. США.

Вартість дизель-генераторної установки – 5600 дол. США, кількість робочих годин за 25 років – 150000 тис. год, ресурс дизеля до капітального ремонту – 16000 год. Таким чином, за 25 років треба провести не менше 8 капітальних ремонтів. Умовно вважається, що після капітального ремонту ресурс дизеля повністю відновлюється; вартість капітального ремонту – приблизно 3000 дол. США. Двигуни внутрішнього згоряння витримують не більше 3-4 капітальних ремонтів, тому за 25 років потрібна повна заміна дизель-генератора. При експлуатації через кожні 50 год роботи потрібна зупинка дизеля, заміна масла і змащення вузлів; річне обслуговування становитиме близько 1200 дол. США [41].

Економія коштів при експлуатації ВЕУ сумісно з дизель-генератором досягається за рахунок економії палива і збільшення терміну служби дизеля. Загальний час роботи дизель-генератора становитиме 45 % загального часу роботи, з них тільки 15 % на повній потужності; тому в придбанні другої установки немає потреби.

Таким чином, рентабельність ВЕУ з розрахунковою швидкістю 7,8 м/с і дизель-генераторною установкою вже буде при середньорічній швидкості вітру вище 3,5 м/с. До недоліків цього способу комбінування можна віднести обмеження використання вітрового потенціалу ВЕУ при швидкостях вітру більше 8 м/с. Тому в цьому випадку, можливо, доцільнішою буде комбінація ВЕУ з акумуляторними батареями.

На рис. 2.2 зображено блок-схему автономної вітро-дизельної електричної установки. До складу силових елементів установки входить безредукторний вітроелектричний агрегат із синхронним магнітоелектричним генератором і дизельний агрегат із синхронним двигуном.

Установка працює таким чином. Електрична енергія, що виробляється вітроагрегатом (ВА), потрапляє на комутатор (К) і

випрямляючу установку (ВУ), що забезпечує заряд акумуляторної батареї (АБ) і живлення інвертора (І). Інвертор формує трифазну напругу 230...400 В частотою 50 Гц, яка через блок переключення фідерів (БПФ) надходить на розподільовальний пристрій (РП) і далі до споживачів енергії (П). Якщо вироблення електроенергії від синхронного генератора (СГ) вітроагрегата стане нижче рівня споживання, включається дизельна станція (Д), режим якої регулюється датчиком напруги (ДН) і блоком автоматики (БА).

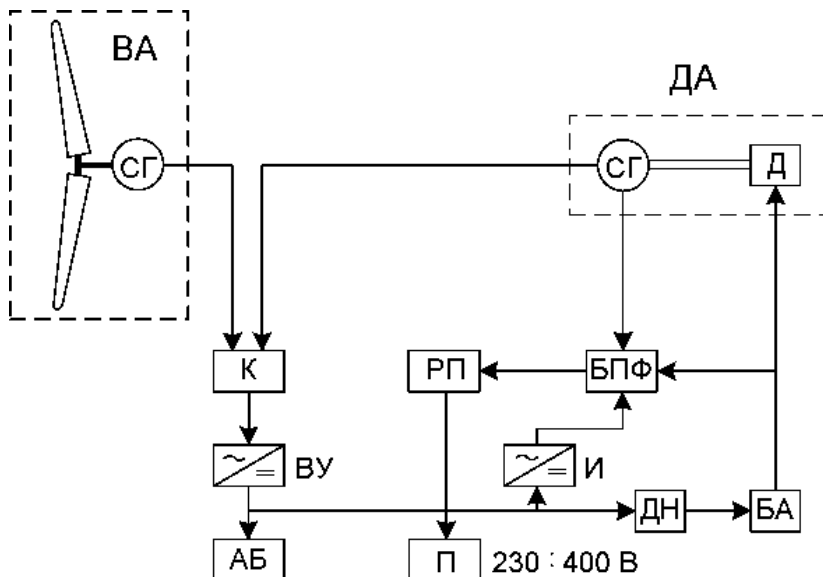


Рисунок 2.2 – Блок-схема автономної вітродизельної установки

Інтерес становлять гібридні фотоелектричні системи, в яких комбінуються фотоелектричні панелі та інші системи виробництва енергії, наприклад, генератор із двигуном внутрішнього згорання або газовою турбіною. Високу ефективність різних способів виробництва енергії у гібридних системах забезпечують більш складні, ніж в автономних системах, схеми керування. Завдяки додатковому джерелу енергії, фотоелектрична панель у гібридній системі може бути меншою, ніж в аналогічній автономній системі. Тому в деяких випадках гібридна система може коштувати менше.

2.4 Комбінація нетрадиційних джерел з акумуляторами енергії

В більшості випадків при використанні локальних відновлювальних джерел енергії для вироблення електричної і теплової енергії вони потребують наявності акумуляторів енергії.

Як сонячні батареї, так і вітрові агрегати мають добові коливання вироблення електричної енергії, тому їх використання для локального вироблення електричної енергії здебільшого використовуються разом з електрохімічними акумуляторами.

Для акумулювання теплоти при використанні сонячних колекторів використовуються акумулятори фізичної теплоти, при цьому можуть використовуватися як добові, так і сезонні акумулятори.

Має великий інтерес вітроводнева станція, основними елементами якої є вітроелектричний агрегат та система акумулювання на основі водню. Система акумулювання має у своєму складі електролізну установку, обладнання для зберігання водню та кисню, а також обладнання для перетворення водню в електричну та теплову енергію. Як перетворювачі енергії водню в електричну енергію можуть використовуватися паливні водне-кисневі елементи та мотор-генератор. Для отримання теплової енергії водень спалюють. При застосуванні теплового акумулятора утилізується теплота електролізного процесу, що значно підвищує ККД системи акумулювання (приблизно на 30 %) [43].

2.5 Комбінація одночасного використання декількох нетрадиційних джерел енергії

Значного поширення набуло одночасне використання вітроенергетичних і сонячних установок, при цьому розрізняються комбінація для вироблення електричної енергії і комбінація для отримання теплової енергії.

Одну із схем одночасного перетворення вітрової і сонячної енергії для отримання електричної енергії показано на рис. 2.3. Для вироблення постійного струму (рис. 2.3, а) вітроагрегат використовує генератор постійного струму з паралельним під'єднанням до фотобатарей. При виробленні змінного струму вітроагрегат має генератор змінного струму, а в колі фотобатарей використовується інвертор (рис. 2.3, б).

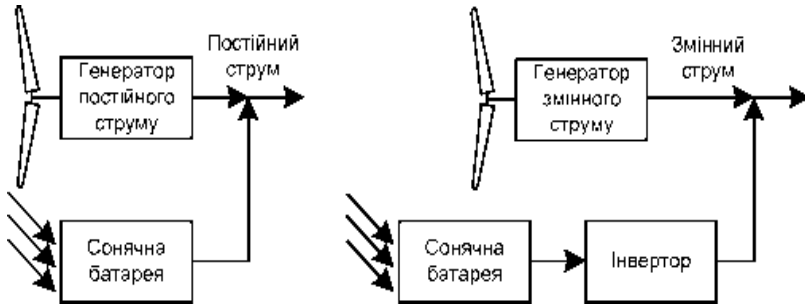


Рисунок 2.3 – Схема комбінованого використання вітроагрегатів і фото батарей для одержання постійного (а) і змінного (б) струму

При комбінованому використанні сонячних колекторів і вітроагрегатів для одержання теплової енергії вітроагрегати виробляють електричну енергію, яка використовується як додаткове джерело енергії для підігрівання води.

При комбінованому використанні вітрової і сонячної енергії для одержання теплової енергії, як джерело сонячної енергії використовуються сонячні колектори. Вітроагрегати використовуються для одержання електричної енергії, яка перетворюється в теплову енергію в додатковому нагрівачі. Одну зі схем такого комбінованого використання відновлювальних джерел для одержання теплової енергії подано на рис. 2.4. На ньому показано схему для опалення приміщень, але цю схему легко пристосувати і для гарячого водопостачання. В даному випадку в теплообмінник (5) треба вмонтувати додатковий трубопровід, по якому за допомогою ще одного насоса холодна вода подається в теплообмінник, нагрівається в ньому і подається на споживання [44].

Існує значний інтерес до електроенергетичної установки, в якій сонячна енергія підсилює потік повітря, що існує в конструкції, за рахунок різного тиску на поверхні землі та верхньої частини конструкції. Цей потік спрямований від землі під кутом 90° вгору. Конструкція електроенергетичної установки має гіперболоїдну форму, і в місці найбільшого звуження встановлено повітряний двигун, який і виробляє електричний струм. Більша частина конструкції виконана прозорою для проникнення сонячної енергії всередину конструкції, частина конструкції, що розташована на північній стороні, є теплопоглинаючою. Повітря, яке потрапляє в конструкцію на рівні землі, теж підігрівається у повітряному колекторі, і швидкість його значно зростає.

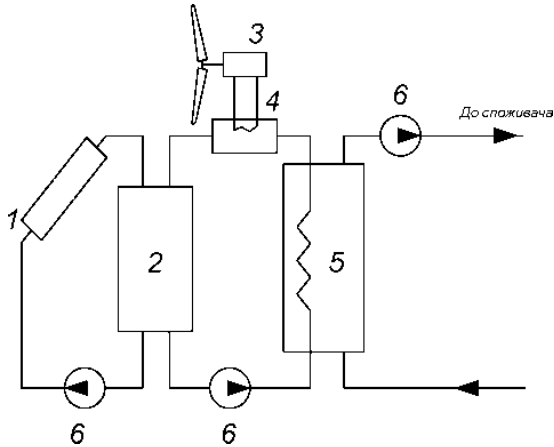


Рисунок 2.4 – Комбіноване використання вітроагрегата і сонячного колектора для отримання теплової енергії: 1 – сонячний колектор; 2 – тепловий акумулятор; 3 – вітровий електрогенератор; 4 – додатковий нагрівач від вітроагрегата; 5 – теплообмінник; 6 – насос

У нічні години, коли відсутня сонячна радіація, для підтримки швидкості вітру можна спалювати в нижній частині установки органічне паливо, яке є в наявності на даній місцевості.

Особливістю установки є те, що вона може використовувати як жорсткі конструкції (стіни житлових багатоповерхових будинків, розташованих із сонячної сторони, водонапірних башт, маяків, мостів, радіо- і телевізійних веж, опор ліній електропередачі).

У зв'язку з тим, що потік вітру в установці створюється за рахунок сонячної енергії та конструктивних особливостей, електроенергетична установка може виробляти енергію в місцях, де відсутній вітер, наприклад, у лісі, пустелі тощо.

2.6 Комплексне використання відновлюваних джерел і акумуляторів

Для стабільного та надійного енергозабезпечення споживачів від відновлюваних джерел енергії запропоновано ряд енергетичних систем із використанням різноманітних комбінацій відновлювальних джерел і комплексним використанням різних типів акумуляторів електричної та теплової енергії. Комплексний підхід до використання відновлювальних джерел та акумуляторів енергії забезпечує найбільш

повне використання ресурсу енергетичних установок в альтернативній енергетиці.

Для надійного та стабільного енергопостачання об'єктів, розташованих у віддалених і важко досяжних районах, розроблено комбіновану автономну систему енергоживлення, яка складається з відновлювального джерела та акумуляторної батареї, сполученої зі споживачем блоком автоматичного контролю зарядки й розрядки акумуляторів.

Система акумуляування на основі електрохімічних акумуляторів призначена для енергопостачання автономних об'єктів (житлових будинків, маяків, буїв, житла пастухів, систем зв'язку тощо), але може бути використана й для роботи в загальних енергосистемах. Розрахунок кількості акумуляторів робиться залежно від параметрів енергоджерел і споживачів. Роль акумуляторів полягає в акумуляуванні, головним чином низькопотенціальної та пікової енергії, що виробляється сонячними і вітроустановками, яку неможливо подати в загальну енергомережу. Автоматична система управління забезпечує оптимальні режими зарядження-розрядження акумуляторів і забезпечує їхню роботу у буферному режимі.

Використання вітроелектричних і сонячних установок для електроживлення автономних віддалених споживачів, дозволяє економити органічне паливо, скоротити транспортні витрати на його доставку, зменшує капітальні витрати на будівництво мереж електропередач, зменшує негативні впливи на довкілля.

Забезпечення автономності енергопостачання від відновлювальних джерел енергії потребує комплексного використання різних типів накопичувачів енергії і надійної системи автоматичного управління режимами роботи джерел енергії, акумуляторів та споживачів енергії.

Автономна енергосистема на основі відновлювальних джерел енергії складається з таких основних вузлів [45]:

- джерел енергії: вітроелектричних установок, сонячних фотоперетворювачів, геліонагрівачів, теплового насоса;
- акумуляторів енергії: теплового бака-акумулятора, котла-акумулятора гарячої води, акумуляторної батареї;
- системи управління: щита ручного управління, приладу автоматичного управління зарядом акумуляторів та автоматизованої системи вимірювання повітряних параметрів.

Вироблювана вітроагрегатами електроенергія надходить через блок управління до споживачів постійного струму чи перетворюється за допомогою теплоелектричних нагрівачів на теплову енергію. Зайва

енергія накопичується в електрохімічних і теплових акумуляторах. У період зменшення швидкості вітру, накоплена енергія забезпечує будинок тепловою й електричною енергією. Крім того, акумуляторна батарея використовується як буфер між вітрогенератором і споживачем для вирівнювання коливань струму, зумовлених змінним характером роботи вітроагрегатів. Заряд накопичувачів енергії може вироблятися як від одного джерела енергії, так і від усіх джерел одночасно.

Зарядження акумуляторних батарей від загальної енергомережі передбачено лише в аварійному режимі, тобто при виході з ладу вітроагрегатів.

Комбінована енергетична система на основі сонячних і вітрових установок із комплексним використанням електрохімічних і теплових акумуляторів розроблена для енергозабезпечення електричною та тепловою енергією споживачів населеного пункту чисельністю 500...600 осіб.

2.7 Принципи комбінування різних відновлювальних джерел енергії

Гібридні сонячні колектори являють собою сонячні колектори, що призначені для одночасного виробництва електрики та гарячої води. Гібридні колектори є новинкою на українському ринку. В них використовується новітнє вирішення проблеми сонячних батарей, а саме зменшення ККД при нагріванні.

Гібридні сонячні колектори в одному корпусі містять: і сонячну батарею для виробництва електроенергії, і сонячний колектор для виробництва теплової енергії. Це новітнє рішення яке дозволяє називати гібридні сонячні колектори майбутнім сонячної енергетики.

У традиційних фотоелектричних модулях при зростанні температури ефективність знижується, а у гібридних колекторах, тепло поглинається і отримується гаряча вода. За рахунок цього виникає постійне охолодження фотоелектричного модуля, його ефективність збільшується, ще й додатково виробляється електроенергії до 50%. Сонячне тепло, що при цьому акумулюється, виробляє теплову енергію.

На сьогоднішній день є доступними такі моделі гібридних колекторів POWER VOLT W175/500 (PV=190W, Thermo=500W) за ціною: 918 Euro, POWER THERM M160/750 (PV=170W, Thermo=750W) за ціною: 986 Euro [46].

Їхня різниця у пріоритетному (більшому) виробництві електричної (POWER VOLT) чи теплової (POWER THERM) енергії.

Принцип дії гібридного PV-T колектора є наступним.

PV-T колектор накопичує сонячну радіацію і виробляє з неї електричну та теплову енергію.

Високоєфективний мідний накопичувач забирає теплову енергію з фронтальної поверхні PV-T колектора та за допомогою теплоносія переносить тепло з колектора в накопичувальний бак (теплоаккумулятор).

Електрична енергія, що генерується у монокристалах, через інвертор прямує на потреби споживача або передається безпосередньо у загальну мережу. Загалом принцип дії електричної частини PV-T колектора, практично, нічим не відрізняється від роботи класичних фотомодулів (сонячних батарей).

Температура регулюється температурним датчиком контролера. Теплоносій за допомогою насоса переносить теплову енергію до теплообмінника, який і нагріває воду в накопичувальному баці. А далі гаряча вода використовується, за потребою споживача, або на опалення, чи для гарячого водопостачання (ГВП).

PV-T колектори є універсальними. Вони спроектовані так, щоб ефективно працювати з існуючим на ринку обладнанням.

Встановлення гібридного колектора обходиться значно дешевше, ніж встановлення фотоелектричної системи у комплексі з геліосистемою.

Розміщення гібридної системи потребує набагато менше місця, ніж фотоелектрична система з геліосистемою. Досить часто ця перевага є найвагомішою при виборі системи для споруджуваного об'єкта.

Гібридні системи швидше окупуються.

Термін дії фотоелементів гібридної системи більший, ніж у традиційних сонячних батарей.

Досить часто, вітрогенератор доповнюють сонячними панелями і в результаті одержують гібридну вітро-сонячну систему. Це робиться для зниження залежності від одного джерела енергії та погодних умов, тому що бувають періоди відсутності вітру при яскравому сонячному світлі і, навпаки, в похмуру погоду дме сильний вітер.

Виникає цілком закономірне питання, що ж робити в ситуації коли немає ні вітру ні досить яскравого сонячного світла?

На початковому етапі в проєкт майбутньої вітро-сонячної установки закладається потужність, на 20...30% більше заявленої замовником. Це дозволяє "накопичувати" електроенергію навіть під час споживання.

Ємність акумуляторної батареї проєктується з запасом і розраховується виходячи з необхідного часу роботи в періоди безвітря і похмурої погоди. У системі використовуються герметичні

необслуговувані АГМ акумулятори, які не потребують періодичного доливання електроліту і не виділяють шкідливих газів. Термін служби батарей даного типу становить від 3-х до 5-ти років, в залежності від режиму експлуатації.

Інвертор (перетворювач напруги) видає на виході системи необхідну напругу – 220 В (1 фаза) або 380 В (3 фази). Потужність інвертора підбирається виходячи з типу підключеного навантаження – активного або реактивного. При наявності реактивного навантаження, потужність інвертора розраховується з урахуванням п'ятикратного перевантаження. Це робиться через високий пусковий струм електричних двигунів [47].

Варто так само відзначити, що іноді більш доцільно будувати вітро-сонячну систему з використанням декількох менш потужних вітрогенераторів, ніж на основі одного з великою потужністю. У результаті спрощується процес монтажу електростанції і підвищується її надійність, оскільки при виході з ладу одного вузла, інші частини системи продовжують функціонувати.

Гібридна енергосистема передбачає використання ВЕУ спільно з іншими джерелами енергії (дизель-генератор, сонячні модулі, мікроГЕС і т.п.). Ці джерела енергії доповнюють ВЕУ з метою забезпечення безперебійного електропостачання споживача в безвітряну погоду.

Вітро-дизельна система складається з ВЕУ і дизель-електричної системи (ДЕС), з оптимально підібраними потужностями. Зазвичай, дизель-генератор використовується в поєднанні з ВЕУ у випадку, коли метою використання останньої є економія дизельного палива, вартість якого з урахуванням витрат на доставку, може бути досить високою. Співвідношення потужності компонентів системи залежить від схеми генерування навантаження й ресурсів вітру.

Режим одночасної паралельної роботи ВЕУ і ДЕС оцінюється як недостатньо ефективний спосіб використання ВЕУ, так як частка участі вітроагрегата в системі за потужністю не повинна перевищувати 15...20% від потужності дизель-генератора. Такі режими можна використовувати для економії палива в гібридних установках великої потужності.

Використання режиму роздільної роботи ВЕУ і ДЕС дозволяє підняти частку участі вітроустановки до 50...60% і більше. Але, в цьому випадку неминуче ускладнення системи за рахунок необхідності введення системи управління, інверторного устаткування і АБ, які акумулюють енергію, вироблювану вітроагрегатом при робочих швидкостях вітру для живлення навантаження в безвітряну погоду або

при невеликих швидкостях вітру. Кожного разу, коли це можливо, енергія генерується ВЕУ, а АБ безперервно заряджається. У періоди вітрового затишшя, коли заряд АБ падає нижче певного рівня, для забезпечення споживачів енергією автоматично (або вручну) запускається дизель-генератор. Такий режим значно знижує кількість запусків дизель-генератора і, отже, веде до скорочення витрат на обслуговування і паливо [48].

Гібридні вітро-дизельні системи потужністю від 2 до 500 кВт різних конструкцій і призначення в даний час випробовуються, розробляються або плануються до реалізації. Як правило, ці гібридні системи призначені для надійного електропостачання автономних споживачів з одночасною економією рідкого палива. Великі гібридні електростанції повинні працювати на локальну мережу північних селищ.

Використання сучасної вітро-дизельної системи, при належній увазі до проведення поточного обслуговування, може бути економічно дуже ефективним при наявності достатніх вітрових ресурсів у місцевості, де встановлений вітроагрегат.

Електрична енергія може бути одержана за рахунок перетворення сонячного випромінювання фотоелектричними батареями (ФБ). Незважаючи на досить високу, в даний час, вартість ФБ, їхнє використання спільно з ВЕУ в деяких випадках може бути ефективним. Оскільки взимку існує великий потенціал вітру, а влітку в ясні дні максимальний ефект можна отримати, використовуючи ФБ, а отже поєднання цих ресурсів виявляється вигідним для споживача.

ВЕУ можуть використовуватися в комбінації з мікроГЕС, що мають резервуар для води. У таких системах при наявності вітру вітроагрегат живить навантаження, а надлишки енергії використовуються для закачування води з нижнього рівня на верхній. У періоди вітрового затишшя енергія виробляється мікроГЕС. Подібні схеми особливо ефективні при малих ресурсах гідроенергії.

Контрольні питання до розділу 2

1. Що відносять до гібридних енергетичних установок?
2. Які переваги та недоліки є у гібридних енергетичних установок?
3. Що являють собою гібридні енергетичні установки?
4. Яка специфіка гібридних енергетичних установок?
5. Які особливості поєднання гібридних енергетичних установок?
6. Назвіть найбільш розповсюджені поєднання енергетичних

установок у складі гібридних енергетичних установок.

7. Наведіть приклади використання гібридних енергетичних установок в Україні.

8. Наведіть приклади використання гібридних енергетичних установок у світі.

9. Чи є перспективи розвитку гібридних енергетичних установок в Україні?

РОЗДІЛ 3. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ЕЛЕМЕНТНУ БАЗУ СИЛОВОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ

3.1 Склад силових схем вентильних перетворювачів. Силові діоди

В цьому розділі будуть розглянуті в основному елементи, що застосовуються в силових схемах.

До таких елементів відносяться випрямні діоди, тиристори, транзистори, гібридні силові схеми, трансформатори, реактори, конденсатори, резистори і елементи захисту вентильних перетворювачів.

Випрямні діоди, тиристори, транзистори та гібридні силові схеми забезпечують перетворення електричної енергії та управління її параметрами. Трансформатори застосовують для зміни змінного напруги, зміни числа фаз і потенційного поділу частин схеми. Реактори і конденсатори забезпечують накопичення і віддачу енергії, виступають в якості фільтрів, уповільнюють швидкість наростання струму або напруги. У резисторах розсіюється надлишкова енергія в тих випадках, коли її не можна використувати. Елементи захисту вентильних перетворювачів застосовують для обмеження аварійних струмів і перенапруг.

При описі цих елементів основну увагу буде приділено їх схемам заміщення, характеристикам і параметрам, а також перехідним процесам. У тих випадках, коли цьому не приділяється увага в суміжних курсах, буде розглянуто принцип роботи та конструктивні особливості.

Діод – це двухелектродний, некерований напівпровідниковий електро-перетворювальний прилад, який має два виводи (анод з боку р-шару і катод з боку n-шару), що містить один р-n-перехід і володіє односторонньою провідністю струму. Силові діоди застосовуються в силових колах перетворювачів. Їх основне, але не єдине призначення, - це випрямлення змінного струму. Тому їх називають випрямними діодами. Класифікація силових діодів представлена на рис. 3.1. Залежно від напівпровідникового матеріалу, використаного для створення приладів, силові діоди підрозділяються на:

- 1) кремнієві;
- 2) германієві;
- 3) арсенідгалієві;
- 4) карбідкремнієві



Рисунок 3.1 – Класифікація силових напівпровідникових діодів

По внутрішній структурі і, отже, принципу дії силові діоди підрозділяються на:

- діоди на основі р-n-переходу;
- діоди на основі переходу метал-напівпровідник (діоди Шоткі).

Залежно від максимально допустимої частоти вхідної напруги силові діоди підрозділяються на:

- низькочастотні на основі р-n-переходу ($f_{\max} < 10^3$ Гц);
- високочастотні на основі р-n-переходу, але додатково леговані золотом, і діоди Шоткі ($f_{\max} > 10^3$ Гц і досягає десятків кГц).

За граничним напругою силові діоди підрозділяються на:

- діоди низькочастотні загального застосування (на середні напруги) на основі р-n-переходу з допустимими напругами до 1 кВ;
- діоди низькочастотні високовольтні на основі р-n-переходу з допустимими напругами до 10 кВ (і - шар власного напівпровідника);
- діоди високочастотні (швидковідновлювальні) на середні напруги на основі р-n-переходу, але додатково леговані золотом, з допустимими напругами до 1 кВ;
- діоди високочастотні (швидковідновлювальні) низьковольтні, на основі переходу метал-напівпровідник (діоди Шоткі).

Умовні позначення напівпровідників діодів показані на рис. 3.1.

В даний час основне застосування мають кремнієві діоди, германієві через низькі допустимих температур практично не випускаються, а арсенідгалієві і карбідкремнієві можуть працювати при більш високих температурах, ніж кремнієві, але ще не стали широко вживаними.

Статичні характеристики діодів

Випрямні діоди застосовуються в основному для побудови випрямлячів в промислових мережах змінного струму частотою 50 - 60 Гц. Випрямлення засноване на властивості р-n-переходу, добре пропускати струм в одному напрямку і майже не пропускати його в іншому. Таким чином, випрямний діод являє собою електронний ключ, керований докладним щодо нього напругою.

При прямій напрузі ключ замкнутий, при зворотному - розімкнений. Такому електронному ключу відповідає вольтамперна характеристика (ВАХ) ідеального діода (рис. 3.2 а). Однак насправді діод не є ідеальним, тому що у включеному стані на ньому падає пряме напруга близько 1 - 2 В, а в вимкненому стані через діод протікає зворотний струм, який малий. Тому ВАХ реального діода відрізняється від ідеальної (див. рис. 3.2 б).

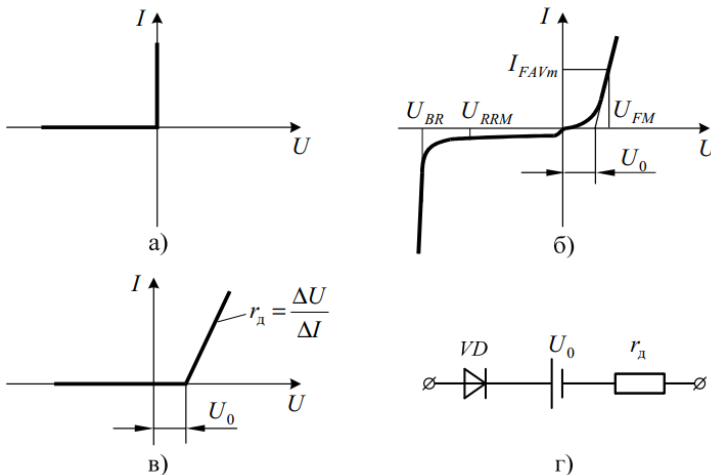


Рисунок 3.2 – Вольтамперні характеристики силового діода: ідеальна (а), реальна (б), ідеалізована (в) і його схема заміщення (г)

При розрахунках ВАХ аппроксимується. Виділяють ідеалізовану ВАХ (див. рис. 3.2 в), яка дозволяє врахувати втрати в

провідному стані, а для закритого стану діод вважається ідеальним (опір одно нескінченності). Згідно ідеалізованої ВАХ модель діода у відкритому стані описується лінійним рівнянням

$$U = U_0 + I \cdot r_d, \quad (3.1)$$

де U_0 – порогове напруга діода; $r_d = \Delta U / \Delta I$ – диференційний опір діода у включеному стані. На рис. 3.2 г наведена схема заміщення діода при низькій частоті, де VD – ідеальний діод.

Динамічні характеристики діодів

Силкові діоди в вентилях перетворювачах застосовуються в якості зворотних діодів, що захищають силкові ключі від зворотної напруги і створюють шлях протікання реактивного струму навантаження при закриванні транзисторів. Ці процеси відбуваються з частотою в одиниці і десятки кГц. Тому високочастотні діоди, що працюють в таких колах, на відміну від випрямних, повинні мати малу тривалість перехідних процесів включення і виключення.

Розглянемо перехідні процеси включення і виключення діодів на прикладі однопівперіодної схеми випрямлення, яка працює на резистивне навантаження R_d і живиться від джерела напруги прямокутної форми (рис. 3.3 а).

Напруга на вході схеми в момент часу t_0 стрибком набуває позитивного значення U_m . Через інерційності дифузійного процесу струм в діоді i_a з'являється не миттєво, а наростає протягом часу t_{on} (див. рис. 3.3 б). Разом з наростанням струму в діоді знижується напруга на діоді u_a , яка після часу встановлення прямого опору t_{on} стає рівна прямій напрузі U_F . У момент часу t_1 в колі встановлюється стаціонарний режим, при якому струм навантаження $I_d \approx U_m / R_d$.

У момент часу t_2 вхідна напруга u змінює свою полярність. Однак до моменту t_4 діод буде перебувати в провідному стані внаслідок накопиченого заряду на границі p - n -переходу, але напрямок струму в діоді i_a змінюється на протилежний. По суті, відбувається розсмоктування зарядів на границі p - n -переходу, тобто розряд еквівалентної ємності. Протягом часу розсмоктування t_s через діод протікає струм I_d , який обмежується опором навантаження R_d (див. рис. 3.3 б).

У момент часу t_3 напруга на діоді u_a починає швидко зростати по модулю, а струм i_a спадати. Відповідний відрізок часу t_f називають часом спаду (див. рис. 3.3 б).

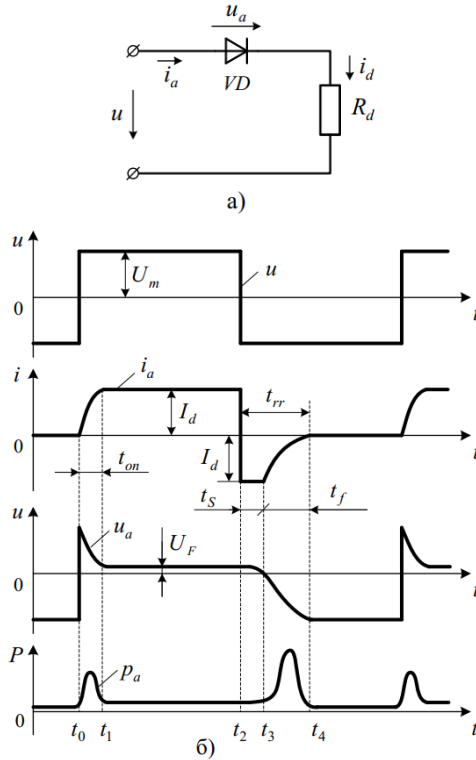


Рисунок 3.3 – Перехідні процеси включення і вимикання високочастотних діодів: схема випробування (а); тимчасові діаграми сигналів (б)

Відрізок часу $t_{rr} = t_s + t_f$ називається часом відновлення зворотного опору. Протягом цього часу діод відновлює свої замикаючі властивості. Час t_{rr} характеризує швидкість діодів.

Слід зазначити, що при $R_d = 0$ (що відповідає роботі діода на смісне навантаження, або при включенні діода в якості зворотного) зворотній струм через діод в момент його запирання може в багато разів перевищувати струм навантаження у стаціонарному режимі.

З перехідного процесу (див. рис. 3.3 б) випливає, що потужність втрат в діод p_a різко зростає при його включенні і особливо при виключенні.

Виробники діодів рекомендують для визначення втрат зворотного відновлення користуватися величиною заряду зворотного

відновлення, так як час відновлення t_{rr} сильно залежить від умов перемикання діода.

Тоді потужність втрат зворотного відновлення

$$P_{rr} = E_{rr} \cdot f = U_m \cdot Q_{rr} \cdot f \quad (3.2)$$

де E_{rr} – енергія зворотного відновлення; f – частота комутації; U_m – амплітудне значення вхідної напруги.

Параметри силових діодів

Параметри – це числові значення величин, що визначають характерні точки ВАХ і допустимі режими.

Параметри силових діодів:

1) повторювана імпульсна зворотня напруга U_{RRM} - максимальна зворотня напруга, яка кожен період може прикладатися до діода (див. рис. 3.2 б), яка приблизно становить 0,7 напруги пробною U_{BR} . В сучасних діодах вона досягає 10 кВ. U_{RRM} в сотнях вольт визначає клас випрямного діода. Наприклад, якщо $U_{RRM} = 5000$ В, то діод 50 класу;

2) максимально допустимий середній прямий струм (граничний струм) I_{FAVm} , який визначається в однофазною однонапівперіодною схемою випрямлення при синусоїдальному струмі частотою 50 Гц, кути провідності 180° і заданій температурі кристала або корпусу

$$I_{FAVm} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{+\pi} \frac{U_m}{R_d} \cdot \sin\omega t \cdot d\omega t = \frac{U_m}{\pi \cdot R_d} = \frac{I_m}{\pi} \quad (3.3)$$

Тут U_m – амплітудне значення напруги мережі; R_d – активний опір навантаження; I_m – амплітудне значення випрямленого струму.

Граничний струм I_{FAVm} визначає тип вентиля, в сучасних випрямних діодах він досягає 8 кА;

3) максимальний зворотний струм I_R (долі мкА – десятки мА);

4) імпульсна пряма напруга U_{FM} – максимальне значення прямої напруги, обумовленої максимально допустимим середнім прямим струмом I_{FAVm} (див. рис. 3.2 б). Вона становить 1...3 В;

5) порогова напруга U_0 (0,5...1,5 В) і диференціальний опір r_d (див. рис. 3.2 б - в).

б) час відновлення зворотного опору t_{rr} (див. рис. 3.3) – інтервал часу, що пройшов з моменту проходження струму через нуль (після зміни полярності прикладеної напруги) до моменту, коли зворотній струм досягне заданого малого значення (долі нс – долі мкс для високочастотних і 25...100 мкс для низькочастотних);

7) заряд зворотнього відновлення Q_{rr} – використовується для визначення потужності втрат зворотнього відновлення (десятки нк – десятки мкК).

Різновиди силових діодів

Діоди низькочастотні загального застосування (на середні напруги) на основі p - n -переходу з допустимими напругами до 1 кВ випускаються на струми до 8 кА. Час зворотнього відновлення діодів зазвичай знаходиться в діапазоні 25...100 мкс, що обмежує їх використання при частоті понад 500 Гц. Їх основне застосування – некеровані випрямлячі при промисловій частоті.

Діоди низькочастотні високовольтні, засновані на процесах в p - i - n структурі з допустимими напругами до 10 кВ (i – шар власного напівпровідника). Шар власного напівпровідника, що має високий опір дозволяє збільшити допустиму напругу.

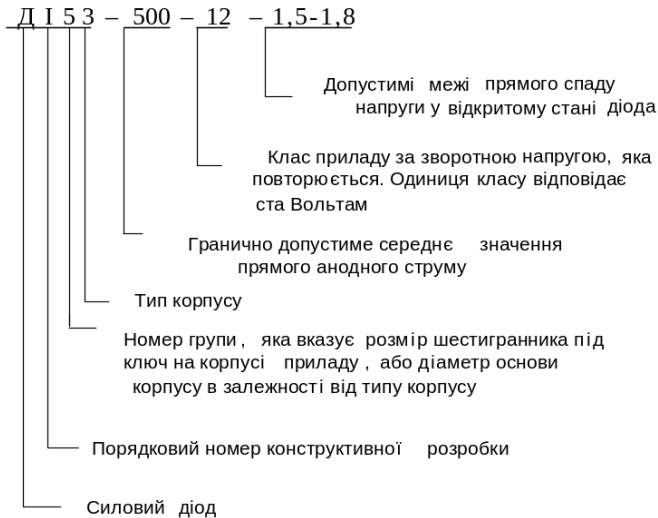
Діоди високочастотні (швидковідновлювальні) на середні напруги на основі p - n -переходу, але додатково леговані золотом методом дифузії. Атоми золота створюють рекомбінаційні центри, які забезпечують прискорення рекомбінації носіїв заряду після проходження струму. Час відновлення зворотного опору t_{rr} в них знижується в межах до 100 нс. Граничний струм цих діодів 1 кА, допустимі напруги досягають 1 кВ, а при деякому збільшенні часу відновлення зворотного опору – 3 кВ. Швидковідновлювальні силові діоди застосовуються в схемах перетворювачів при частотах 2 - 20 кГц для шунтування тиристорів, що запираються і транзисторів і пропускання струму в зворотному напрямку.

Для високовольтних перетворювачів рекомендується використовувати спеціально розроблені ультрашвидкі діоди Hexfred, які мають величину зворотної напруги U_{RRM} до 1200 В, час зворотного відновлення t_{rr} до 100 нс, пряме падіння напруги до 2,0 В, максимально допустимий середній прямий струм I_{FAV_m} до 100 А і вище [1].

Діоди Шоттки - високочастотні низьковольтні діоди на основі переходу метал-напівпровідник. Їх особливістю є те, що прямий струм обумовлений рухом тільки основних носіїв – електронів. Таким чином, діоди Шоттки є уніполярними приладами з одним типом основних носіїв. Відсутність накопичення неосновних носіїв істотно зменшує їх інерційність. Час відновлення t_{rr} становить зазвичай не більше 0,3 мкс, падіння прямої напруги U_{FM} приблизно 0,3 - 0,6 В. Значення зворотних струмів I_R в цих діодах на 2-3 порядки вище, ніж у діодах з p - n -переходом. Діапазон граничних зворотних напруг U_{RRM} зазвичай обмежується 200 В, максимально допустимий середній прямий струм I_{FAV_m} до 100 А. Діоди Шоттки застосовуються в схемах перетворювачів

при частотах 2 - 100 кГц для шунтування польових транзисторів і пропускання струму в зворотньому напрямку.

Приклад маркування силового діода, за діючим на даний час стандартом, наводиться нижче.



Усіх типів корпусів налічується п'ять:

1. Стержневий з гнучким виводом;
2. Стержневий з жорстким виводом;
3. Таблеточний;
4. Під запресовку або автотракторний;
5. Під фланець.

Діоди перших двох типів корпусів закручуються в охолоджувач за допомогою стержня з різьбою. В третьому випадку діод затискається між двома пластинами охолоджувача. В четвертому випадку запресовується в охолоджувальну пластину, яка одночасно є і контактом. П'ятий тип корпусу забезпечує кріплення діода до охолоджувача за допомогою фланця на його корпусі.

3.2 Характеристики, призначення і класифікація тиристорів

Тиристорами називаються напівпровідникові прилади з трьома і більше *p-n*-переходами, призначені для використання в якості

електронних ключів в схемах перемикання електричних струмів. Класифікація тиристорів представлена на рис. 3.4.

За способом управління тиристри можна розділити на дві групи:

а) з неповною керуваністю – включення здійснюється сигналом управління, а вимикання – при спаді струму через прилад до нуля. До цієї групи належать такі різновиди тиристорів: асиметричний тиристор (SCR), симистор, фототиристор і оптоотиристор. Тиристри даної групи знайшли широке застосування в регульованому електроприводі постійного струму, а також в системах плавного пуску асинхронних електродвигунів. На їх основі будуються керувані випрямлячі струму, перетворювачі змінної напруги та ін. види перетворювачів;

б) повністю керувані – вмикання і вимикання здійснюється сигналом управління. До цієї групи належать запираємі тиристри і їх різновиди: запираючий тиристор *GTO*, запираючий тиристор *GCT*, інтегрований запираючий тиристор *IGCT* і польові тиристри *MCT*.

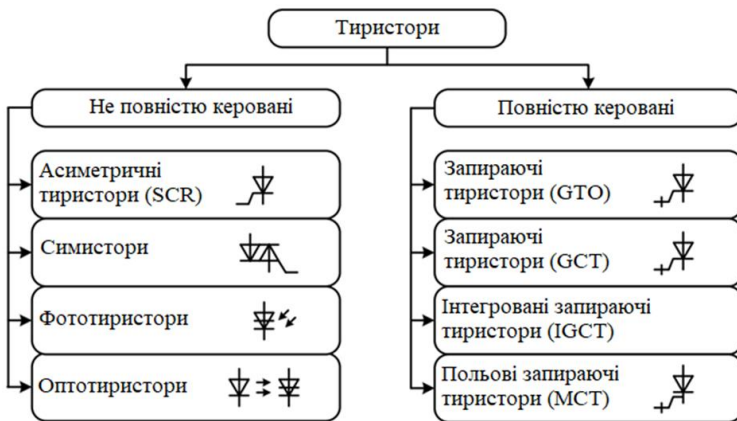


Рисунок 3.4 – Класифікація тиристорів

Абревіатура *GTO* – це скорочення назви *gate turn-off thyristor*. В перекладі це означає тиристор, що включається виключається керуванням. Абревіатура *GCT* – це скорочення назви *gate commutated thyristor*. У перекладі це означає тиристор, комутований керуванням. Абревіатура *IGCT* – це скорочення назви *integrated gate commutated thyristor*. У перекладі це означає інтегрований тиристор, комутований керуванням. Абревіатура *MCT* – це скорочення назви *MOS - control thyristor*. У перекладі це означає тиристор, керований МОП.

Можливість повного управління визначила їх область застосування – це регульований електропривод змінного струму (автономні інвертори напруги для перетворювачів частоти), потужні джерела живлення електричних підстанцій, системи безперебійного живлення, статичні компенсатори і т.д.

Умовні позначення тиристорів показані на рис. 3.4. Надалі при викладі матеріалу асиметричний тиристор будемо називати просто тиристором.

Статичні характеристики тиристорів

Тиристор – це напівпровідниковий прилад, що містить чотири шари з різним типом провідності, здатний під дією керуючого сигналу переходити із закритого у відкритий стан.

Тиристори з чотиришаровою структурою $p-n-p-n$ мають три виводи: анод (А), катод (К) і управляючий електрод (УЕ) (рис. 3.5 а). Якщо напруга на аноді по відношенню до катода позитивна, то переходи П1 і П3 зміщуються в пряму напрямку, а П2 – в зворотному.

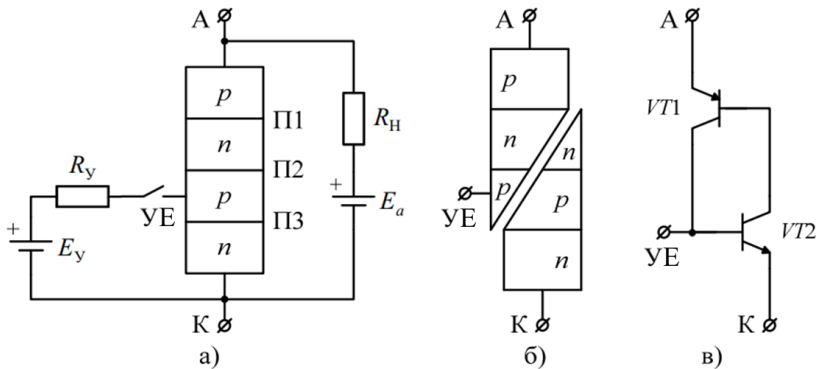


Рисунок 3.5 – Структура звичайного тиристора (а) і його еквівалентна схема (б, в)

Структуру тиристора можна представити у вигляді двох з'єднаних тришарових структур: $p-n-p$ і $n-p-n$ (див. рис. 3.5 б), що еквівалентні біполярним транзисторам $VT1$ і $VT2$ (див. рис. 3.5 в). Включення тиристора відбувається при наявності між анодом і катодом додатньої напруги і подачі на його керуючий електрод імпульсу управління. Завдяки позитивному зворотньому зв'язку між еквівалентними транзисторами $VT1$ і $VT2$ процес включення тиристора починає лавиноподібно розвиватися до стану, коли анодний струм стає рівним значенню, визначеному опором навантаження [49].

Аналізуючи процеси в схемі з еквівалентними транзисторами (див. рис. 3.5 в), можна переконатися в тому, що якщо відбулося включення тиристора (протікає анодний струм), то припинення струму управління не призводить до вимикання схеми. Це пов'язано з наявністю внутрішнього позитивного зворотного зв'язку. Щоб вимкнути тиристор потрібно зменшити струм в колі аноду до малої величини або прикласти до нього зворотню напругу. Таким чином, звичайний тиристор – це прилад з неповною керуваністю.

Ідеальна статична вихідна ВАХ тиристора представлена на рис. 3.6 а з якої видно, що тиристорний ключ може проводити струм лише в одному напрямку, а в закритому стані може витримувати як пряму, так і зворотню напругу.

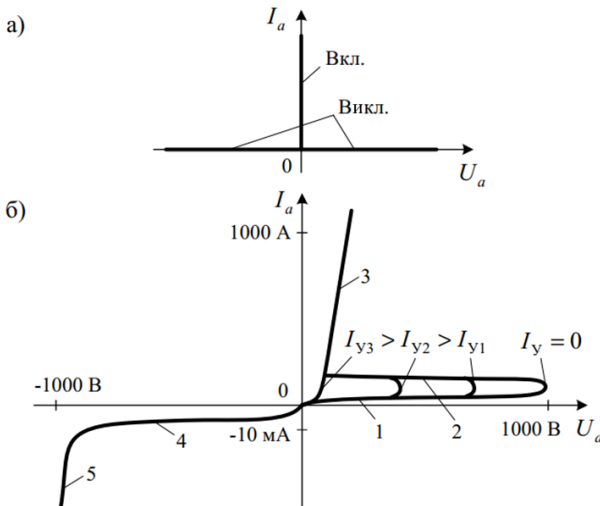


Рисунок 3.6 – Ідеальна (а) і реальна (б) вихідні статичні ВАХ тиристора

На рис. 3.6 б представлено сімейство реальних вихідних статичних ВАХ при різних значеннях струму управління I_y . Гранична пряма напруга, яку витримує тиристор без його включення, має максимальні значення при $I_y = 0$. Чим більший струм управління, тим при меншій напрузі на аноді включається тиристор. Включеному стану тиристора відповідає вітка 3, а виключеному – вітка 1. Процесу включення відповідає ділянка 2 ВАХ. При прикладанні до тиристора зворотньої напруги прилад весь час знаходиться в закритому стані

(ділянка 4), оскільки переходи П1 і П3 знаходяться під зворотною напругою, а П2 зміщений в прямому напрямку. При збільшенні зворотної напруги починається різке зростання зворотнього струму (ділянка 5), пов'язане з лавинним пробоем тиристора. Ділянка 5 є забороненою ділянкою роботи тиристора.

На рис. 3.7 а приведена схема управління тиристором. Керуючі імпульси амплітудою E_y (рис. 3.7 б) подаються на керуючий електрод через резистор R_y , що слугує для обмеження струму. Діаграма управління тиристором (рис. 3.7 в) служить для вибору параметрів схеми управління. Жирними лініями на рис. 3.7 в показані межі області існування вхідних характеристик, що відповідають мініальному і максимальному опору керуючого переходу. Заштрихована область 1 – це область існування струмів управління, при яких тиристор не включається при мінімальних напругах на аноді. Криві 2 – це гіперболи постійної середньої потужності, яка виділяється на керуючому переході при різній відносній тривалості імпульсів $A = (t_i \cdot 100\%) / T$ (див. рис. 3.7 б), де t_i – час імпульсу, а T – період їх слідування. На діаграмі показані також гранично допустимі значення струму і напруги управління.

За діаграмою управління вибираються значення E_y , R_y і t_i (A), при яких струм управління I_y і напруга на керуючому електроді U_y повинні знаходитися всередині дозволеної області. Під час дії керуючого імпульсу справедливе рівняння, записане за другим законом Кірхгофа для кола управління (див. рис. 3.7 а)

$$E_y = U_y + I_y \cdot R_y \text{ або } U_y = E_y - I_y \cdot R_y. \quad (3.4)$$

Рівняння (3.4) є прямою, яка може бути побудована по двох точках: якщо $I_y = 0$, то $U_y = E_y$; якщо $U_y = 0$, то $I_y = E_y / R_y$.

При значеннях E_y , R_y , вибраних на рис. 3.7 в, що не перевищуються допустимі величини $I_{y, \text{доп}}$, $U_{y, \text{доп}}$, а значення A не повинно перевищувати 0,1%.

Динамічні характеристики тиристорів

Динамічні характеристики тиристорів визначаються за перехідними процесам включення і виключення [50].

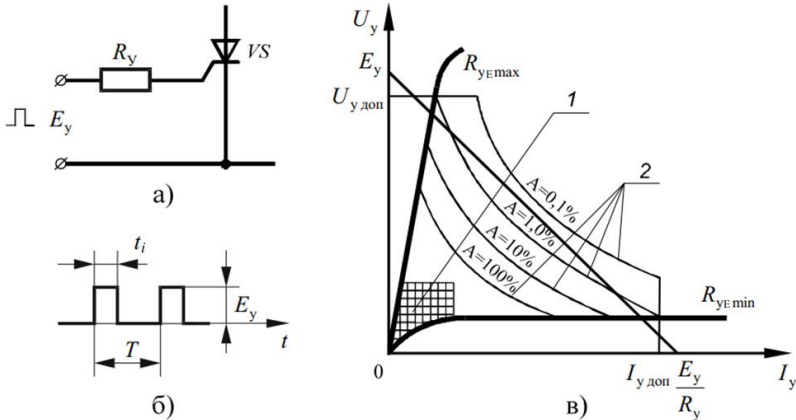


Рисунок 3.7 – Схема управління тиристором (а); форма сигналу управління (б) і діаграма управління тиристором (в)

1. Перехідний процес включення. Включення відбувається не миттєво, так як повинні відбутися складні фізичні процеси, пов'язані з накопиченням носіїв зарядів в середніх шарах і розширенням проводячого каналу від керуючого електрода по всьому об'єму. Для кількісної оцінки процес включення розбивається на ряд інтервалів. Час включення тиристора $t_{BKЛ}$ – це час від моменту подачі керуючого імпульсу до моменту спаду напруги на тиристорі до 0,1 початкового значення (він становить кілька мікросекунд)

$$t_{BKЛ} = t_3 + t_n, \quad (3.5)$$

де t_3 – час затримки (час від моменту подачі керуючого імпульсу до моменту спаду напруги на тиристорі до 0,9 початкового значення); t_n – час наростання (час зміни напруги на тиристорі від 0,9 до 0,1 початкового значення або наростання струму від 0,1 до 0,9 усталеного значення).

Однак після закінчення часу включення тиристор ще не повністю включається і напруга на ньому продовжує спадати до усталеного значення. Час спаду напруги на тиристорі від 0,1 початкового до сталого значення називається часом встановлення $t_{вст}$ (воно становить 10 ... 500 мкс).

При включенні тиристора миттєва потужність втрат може досягати дуже великих значень. Наприклад, якщо $E = 1000$ В, а $I_{уст} = 1000$ А, то $p_{max} = 0,5E \cdot 0,5 I_{уст} = 250000$ Вт = 250 кВт. Щоб полегшити умови роботи тиристора при включенні, доцільно включити послідовно з тиристором індуктивність L (див. рис. 3.8).

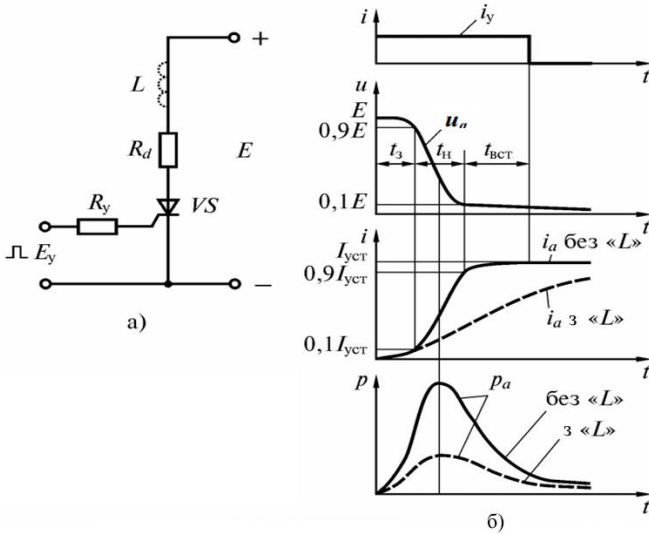


Рисунок 3.8 – Перехідний процес включення: схема включення (а) і перехідні процеси включення тиристора (б)

Це знизить швидкість наростання анодного струму і зменшить втрати при включенні. З урахуванням допустимих втрат при включенні тиристора вводиться параметр допустима швидкість наростання анодного струму $\left(\frac{di}{dt}\right)_{\text{доп}} = (10 \dots 100) \frac{\text{А}}{\text{мкс}}$.

2. Перехідний процес виключення. На рис. 3.9 показана схема подачі на включений тиристор зворотної напруги, і наведені часові діаграми перехідних процесів, що виникають при виключенні тиристора.

Перехідний процес виключення тиристора складається з двох етапів:

- 1) відновлення запирачої здатності в зворотньому напрямку;
- 2) відновлення запирачої здатності в прямому напрямку.

На інтервалі $0 - t_1$ тиристор знаходиться у включеному стані (анодний струм дорівнює $I_{\text{уст}}$, пряма напруга дорівнює U_T). При подачі тиристор стрибком зворотної напруги анодний струм починає зменшуватися (темп спаду обмежується індуктивністю $L_{\text{ОБМ}}$) - інтервал $t_1 - t_2$. Після спаду анодного струму і анодної напруги до нуля, як і у діодів, починається процес зворотнього відновлення протягом часу t_{rr} . За цей час p - n -перехід, утворений між керуючим електродом і катодом

(див. рис. 3.9 а), звільняється від заряду надлишкових носіїв Q_{rr} (дірок), накопичених в базовому p -шарі тиристора. Час зворотнього відновлення t_{rr} складається з двох інтервалів [51].

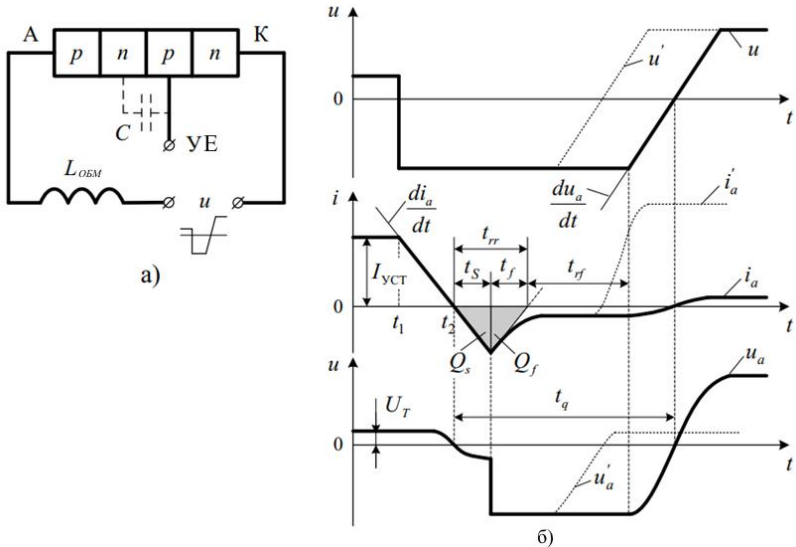


Рисунок 3.9 – Схема подачі на включений тиристор зворотної напруги (а) і діаграми перехідних процесів при виключенні тиристора

Заряд, що випливає з вентиля за час зворотнього відновлення

$$Q_{rr} = Q_s + Q_f. \quad (3.6)$$

Тут Q_s , Q_f – заряди, що витікають із вентиля відповідно за час запізнення зворотної напруги і за час спаду зворотнього струму.

Таким чином, час зворотнього відновлення t_{rr} – це час від переходу прямого струму через нуль до переходу через нуль дотичної до зменшуючогося зворотнього струму (складає долі або одиниці мікросекунд).

Однак після цього можна подавати пряму напругу на тиристор, так як заряд надлишкових дірок в n -базі досить великий і миттєво призведе до дії регенеративний механізм включення тиристора. Тому потрібен час на рекомбінацію накопиченого заряду дірок в базовому n -шарі тиристора. За цей час тиристор відновлює свою керуючу здатність в прямому напрямку [1].

Час виключення (час відновлення запираючої здатності тиристора в прямому напрямку) t_q – це найменший інтервал часу від моменту спаду струму до нуля, до моменту переходу анодної напруги через нуль без включення тиристора. Він становить 10...500 мкс і обмежує частотні можливості тиристорів. Якщо час, наданий для вимикання тиристора, менший t_q , то відбувається прорив анодного струму, тобто включення тиристора без подачі керуючого сигналу (це аварійний режим).

3.3 Характеристика, призначення та класифікація транзисторних ключів

Транзистор – це електроперетворювальний прилад, що містить два і більше p - n -переходів, має три і більше виводів і призначений для підсилення потужності. У силовій електроніці транзистори практично завжди застосовуються тільки в ключовому режимі, тобто можуть бути або повністю відкриті, або повністю закриті. Транзистори зазвичай не допускають прикладання до них зворотньої напруги і, тому, шунтуються зустрічно включеними діодами. Таке поєднання транзистора і діода будемо називати транзисторним ключем.

Транзистори за принципом дії діляться на біполярні (керовані струмом), уніполярні (керовані електричним полем або польові) і *IGBT*-транзистори. Абревіатура *IGBT* – це скорочення назви *Insulated gate bipolar transistor*. У перекладі це означає біполярний транзистор з ізольованим затвором (БТІЗ).

У біполярних транзисторах струм визначається рухом носіїв зарядів обох знаків: електронів і дірок, тому вони називаються біполярними. У польових транзисторах струм визначається шириною провідного каналу, по якому рухаються носії зарядів одного знаку, звідси їх інша назва – уніполярні.

IGBT-транзистори є гібридними, в них поєднуються позитивні властивості біполярних і польових транзисторів.

Біполярні транзистори містять три шари, що чергуються, з різним типом провідності. Середній шар структури називається базою. Крайній шар, який є джерелом носіїв заряду, називається емітером. Інший крайній шар, який приймає заряди, називається колектором. Залежно від порядку їх чергування біполярні транзистори поділяються на транзистори типу n - p - n і p - n - p .

Польові транзистори (ПТ) поділяються за принципом дії на ПТ з затвором у вигляді p - n -переходу і на ПТ з ізольованим затвором (ПТІЗ). Останні по їх структурі називають також МОН-транзисторами

(метал - оксид - напівпровідник) або МДН-транзисторами (метал - діелектрик - напівпровідник).

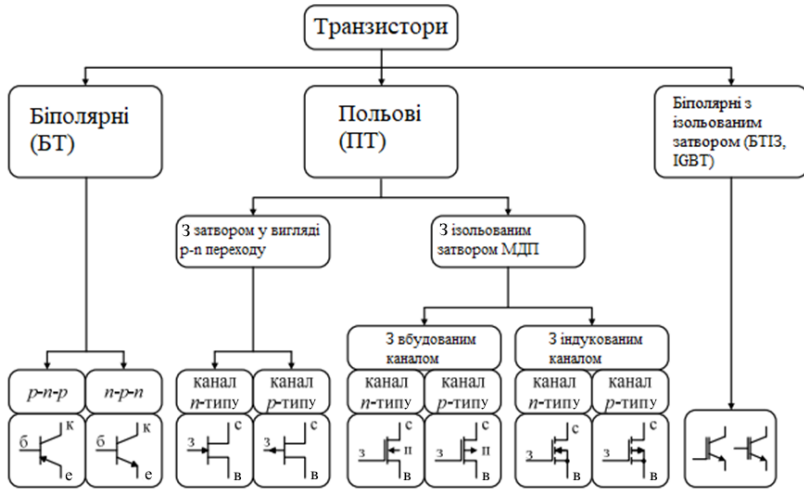


Рисунок 3.10 – Класифікація основних типів транзисторів
(к – колектор; е – емітер; б – база; с – стік; в – витік; з – затвор;
п – підкладка)

Електрод, з якого виходять основні носії, називається виток. Електрод, куди приходять основні носії, називається стоком. Від виток до стоку носії рухаються по каналу. Електрод, який регулює ширину каналу, називається затвором.

МОН-транзистори можуть бути виконані з вбудованим і з індукованим каналом. МОН-транзистори з вбудованим каналом при відсутності керуючого сигналу відкриті (нормально відкриті). МОН-транзистори з індукованим каналом при відсутності керуючого сигналу закриті (нормально закриті).

З польових транзисторів МОН-транзистори з індукованим каналом отримали найбільше застосування в перетворювальній техніці.

Залежно від типу напівпровідника, з якого виконаний канал, ПТ діляться на ПТ з каналом *n*-типу і ПТ з каналом *p*-типу.

Біполярні транзистори з ізолюваним затвором (БПІЗ) або, як вони скорочено називаються англійською IGBT, являють собою гібрид біполярного транзистора і ППІЗ, що поєднує їх кращі властивості. БПІЗ – це складна багатопшарова структура і процеси в ній досить складні. Тому на рис. 3.11 приведена дуже спрощена схема заміщення. При

подачі на затвор 3 напруги, додатньої відносно точки Е, ПТІЗ відкривається і починає проходити струм від точки К через емітерно-базовий перехід біполярного транзистора і відкритий ПТІЗ до точки Е. При цьому відкривається біполярний транзистор, через який проходить струм від точки К до точки Е. Буквами Е, К, 3 позначені емітер, колектор і затвор БТІЗ. БТІЗ можуть працювати тільки в ключовому режимі.

БТІЗ в даний час набули найбільшого поширення в пристроях силової електроніки при потужностях від сотень Вт до тисяч кВт.

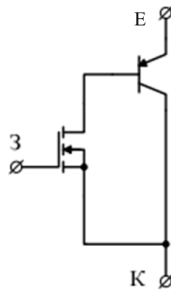


Рисунок 3.11 – Спрощена схема заміщення БТІЗ

На рис. 3.12 а приведено сімейство вихідних ВАХ $I_k = f(U_k)$, $I_b = const$ для схеми з спільним емітером.

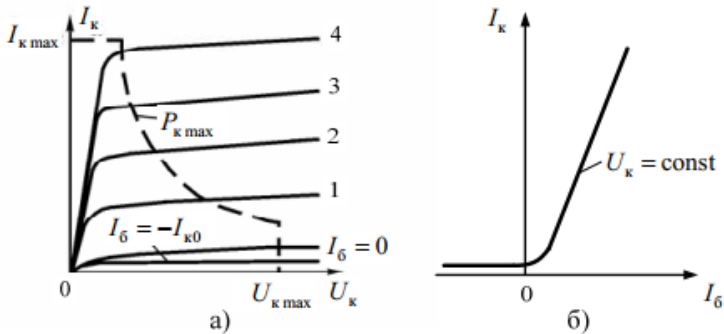


Рисунок 3.12 – Вихідні характеристики (а) і характеристики прямої передачі по струму (б) в схемі СЕ

Характеристика при $I_b = -I_{k0}$ відповідає подачі на базу запираючої напруги. Нанесена дозволена область роботи транзистора, обмежена допустимою напругою, допустимим струмом і кривою допустимої

потужності. Для опису підсилювальних властивостей часто використовують характеристику прямої передачі по струму (див. рис. 3.12 б).

На рис. 3.13 наведені вихідні $I_c = f(U_c)$, $U_3 = const$ і передавальні (стоко-затворні) $I_c = f(U_3)$, $U_c = const$ характеристики для ПТІЗ з індукованим каналом для схеми включення із спільним витоком. Інші схеми включення практично не застосовуються. Вихідні характеристики ПТІЗ схожі на характеристики біполярних (див. рис. 3.13). Але замість струму бази у них параметром є напруга на затворі U_3 , а замість струму колектора I_k і напруги на колекторі U_k – струм стоку I_c і напруга на стоці U_c (див. рис. 3.13 а) [52].

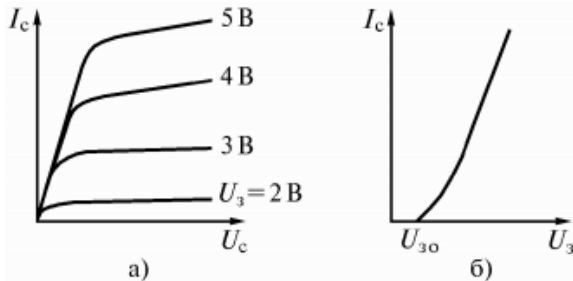


Рисунок 3.13 – Вихідні (а) і передавальні (б) характеристики ПТІЗ з індукованим каналом для схеми з СВ

Вихідні характеристики БТІЗ (рис. 3.14) схожі на характеристики ПТІЗ (див. рис. 3.13), але на ділянці насичення вони йдуть значно крутіше. Це обумовлює значно менше падіння напруги в ключовому режимі. Передавальні характеристики аналогічні.

У ключовому режимі робоча точка може знаходитися тільки в двох положеннях – в точці відсічки O і в точці насичення H . У точці відсічки транзистор замкнений, і через нього проходить дуже маленький струм I_{k0} . Тому, незважаючи на значне напругу, потужність, що виділяється у транзисторі в стані відсічки, дуже мала. Якщо на базу подано струм, який забезпечує насичення, то падіння напруги $U_{кн}$ на транзисторі мале. Тому навіть при істотному струмові $I_{кн}$ втрати в точці насичення невеликі. І ті й інші втрати істотно менші, ніж в точці P в лінійному режимі. Отже, ключовий режим енергетично значно вигідніший, ніж лінійний.

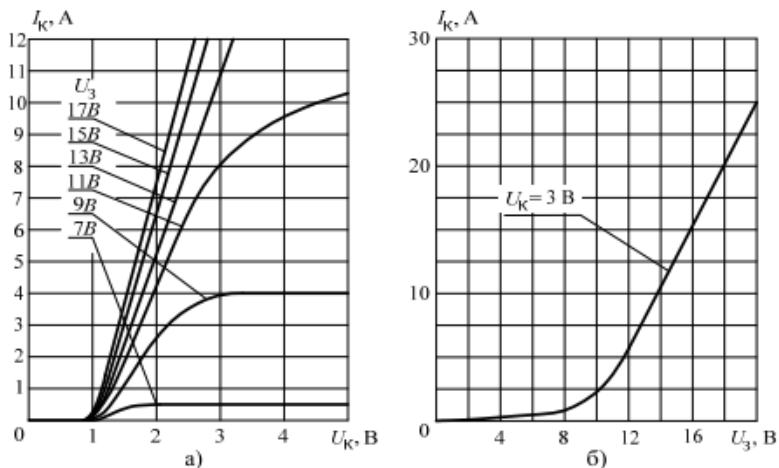


Рисунок 3.14 – Вихідні (а) і передаточні (б) характеристики БТІЗ (Вихідні характеристики наведені для області насичення)

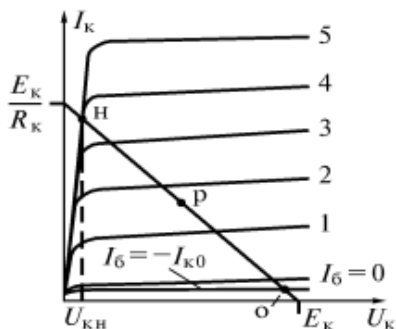


Рисунок 3.15 – Робочі точки в ключовому режимі

На рис. 3.16 наведені схеми, що забезпечують роботу транзисторів різних типів в ключовому режимі.

У ключовому режимі всі транзистори у відкритому стані працюють на вертикальній частині вихідної ВАХ (мале падіння напруги), а в закритому – на нижній горизонтальній ВАХ (малий струм). Всі транзисторні ключі не допускають прикладання зворотної напруги і, тому, як правило, шунтуються зворотними діодами (рис. 3.17 а - в).

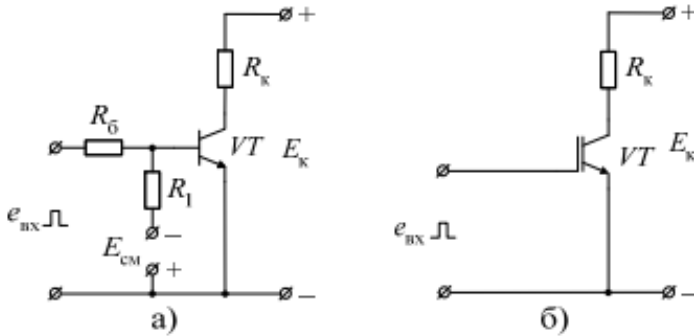


Рисунок 3.16 – Схеми включення транзисторів в ключовому режимі: (а) біполярного; (б) БТІЗ

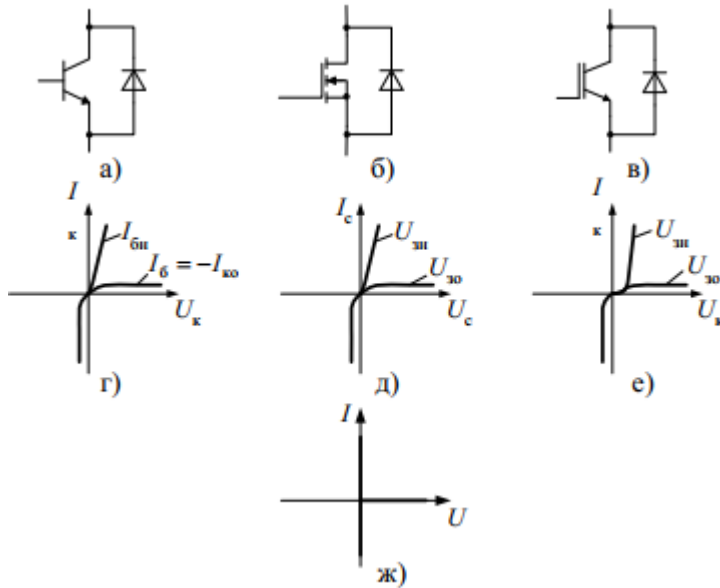


Рисунок 3.17 – Схеми транзисторних ключів (а, б, в), їх вихідні ВАХ (г, д, е) і ВАХ ідеального транзисторного ключа (ж)

У зв'язку зі зменшенням втрат в ключовому режимі зменшуються і тепловідвідні пристрої (радіатори), а отже, різко зменшуються габарити і маса пристроїв. Тому застосування ключового режиму –

основний шлях поліпшення масогабаритних і енергетичних показників електронних пристроїв [50-60].

Основні параметри біполярних транзисторів

По струму колектора:

- максимально допустимий струм колектора $I_{k,max}$ при заданій температурі корпусу (досягає 200 А);
- струм зворотньозміщеного колекторного переходу (через закритий транзистор) I_{k0} .

По напрузі на колекторі:

- максимально допустима напруга колектор-емітер $U_{ке,max}$ при струмі бази рівному нулю (досягає 1000 В);
- напруга насичення колектор-емітер $U_{ке,нас}$ при заданому струмі колектора (1-2 В і більше);

$I_{k,max}$ і $U_{ке,max}$ не можуть досягати одночасно максимальних значень.

За потужністю: максимальна потужність розсіювання на колекторі $P_{к,max}$ при заданій температурі корпусу.

По управлінню:

- коефіцієнт передачі (підсилення) по струму у схемі з спільним емітером β (до сотень, у високовольтних це одиниці);
- максимально допустима зворотня напруга база-емітер $U_{бе,max}$;
- гранична частота підсилення в схемі з спільним емітером f_{β} , при якій коефіцієнт β зменшується в $\sqrt{2}$.

Теплові параметри:

- тепловий опір перехід-корпус (при застосуванні охолоджувача)

$R_{T(П-К)}$;

- тепловий опір перехід-навколишнє середовище (при відсутності охолоджувача) $R_{T(П-С)}$;

- максимально допустима температура переходу $T_{n,max}$.

Тут $R_T = \Delta T / P_k$; ΔT – різниця температур між навколишнім середовищем або корпусом і переходом.

Основні параметри ПТІЗ і БТІЗ.

Основні параметри ПТІЗ і БТІЗ практично однакові, тільки замість назв електродів стік і витік вживаються терміни колектор і емітер.

За струмом стоку:

- максимально допустимий струм стоку $I_{с,max}$ при заданій температурі корпусу (досягає 100 А у ПТІЗ і 2000 А у БТІЗ);
- струм стоку відсічки (через запертий транзистор) $I_{вiдс}$.

По напрузі на стоці:

- максимально допустима напруга стік-витік $U_{св,max}$ при струмі

базі рівному нулю (досягає 900 В у ПТІЗ і 4500 В у БТІЗ);

$I_{c,max}$ і $U_{ce,max}$ не можуть досягати одночасно максимальних значень.

За опором: опір стік-витік у відкритому стані при заданому струмі стоку і напрузі затвор-витік R_{ce} (від десятків мОм до одиниць Ом).

За потужністю: максимальна потужність розсіювання на стоці $P_{c,max}$ при заданій температурі корпусу.

По управлінню:

- крутизна передаточної характеристики $S = (dI_c/dU_3) U_3 = \text{const}$;
- максимально допустима напруга затвор-витік $U_{zв,max}$ (до 20 В);
- порогова напруга затвор-витік U_{30} (2 - 5 В).

Теплові параметри:

- тепловий опір перехід-корпус (при застосуванні охолоджувача)

$R_{T(П-К)}$;

- тепловий опір перехід-навколишнє середовище (при відсутності охолоджувача) $R_{T(П-С)}$.

Параметри для БТІЗ практично такі ж, але замість параметра опір стік-витік R_{ce} у відкритому стані використовується напруга насичення колектор-емітер $U_{ке,нас}$, яка визначається при заданому струмі колектора і напрузі затвор-емітер (1,5 - 3,5 В).

Перехідні процеси в транзисторних ключах при активному навантаженні ілюструє рис. 3.18. Робоча точка переміщується по лінії навантаження. Точки $a, b, c \dots$ на рис. 3.18 b і v відповідають одна одній. Комутаційні втрати відносно малі.

Перехідні процеси в транзисторних ключах при активно індуктивному навантаженні ілюструє рис. 3.19. Точки $a, b, c \dots$ на рис. 3.19 b і v відповідають одна одній. Комутаційні втрати при включенні менші, ніж при активному навантаженні, так як сповільнюється наростання струму. При виключенні виникають величезні перенапруги (при миттєвому відключенні теоретично нескінченно великі), які можуть привести до виходу з ладу силового ключа. Тому таке навантаження недопустиме. Для виключення перенапруг воно повинне бути зашунтувано діодом [50-60].

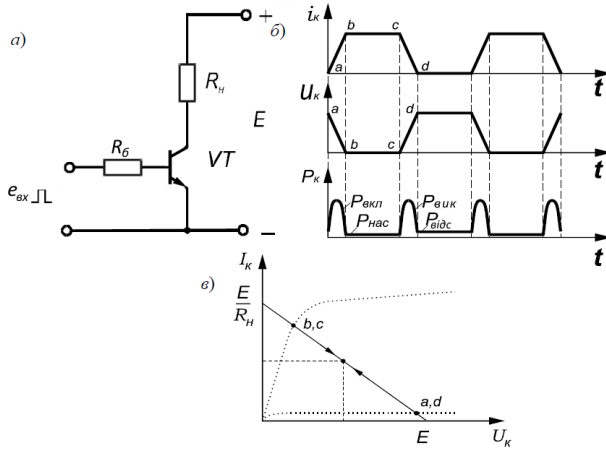


Рисунок 3.18 – Перехідні процеси в транзисторних ключах при активному навантаженні: схема (а), часові діаграми (б) і траєкторії робочої точки на площині вихідних характеристик (в)

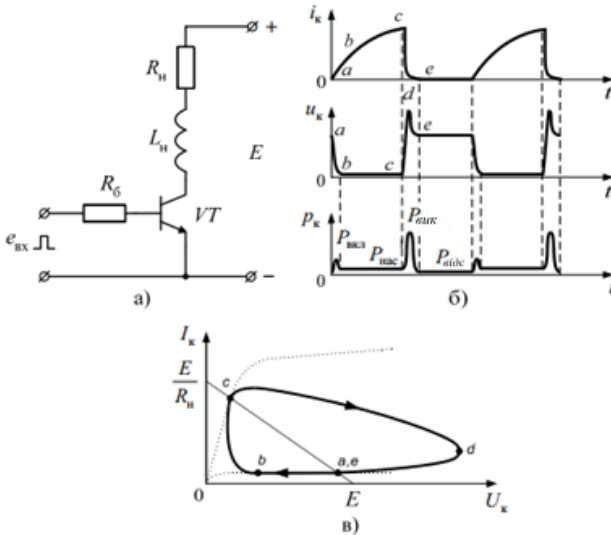


Рисунок 3.19 – Перехідні процеси в транзисторних ключах при активноїндуктивному навантаженні: схема (а), перехідні процеси (б) і траєкторії робочої точки на площині ВАХ (в)

Перехідні процеси в транзисторних ключах при активно-індуктивному навантаженні, яке шунтовано діодом ілюструє рис. 3.20. Точки $a, b, c \dots$ на рис. 3.20 б і в - відповідають одна одній. Втрати при виключенні зменшуються, але зростають втрати при включенні, так як діод не миттєво відновлює свої замикаючі властивості, і по колу E-VD-VT протікає імпульс струму, що істотно перевищує струм навантаження.

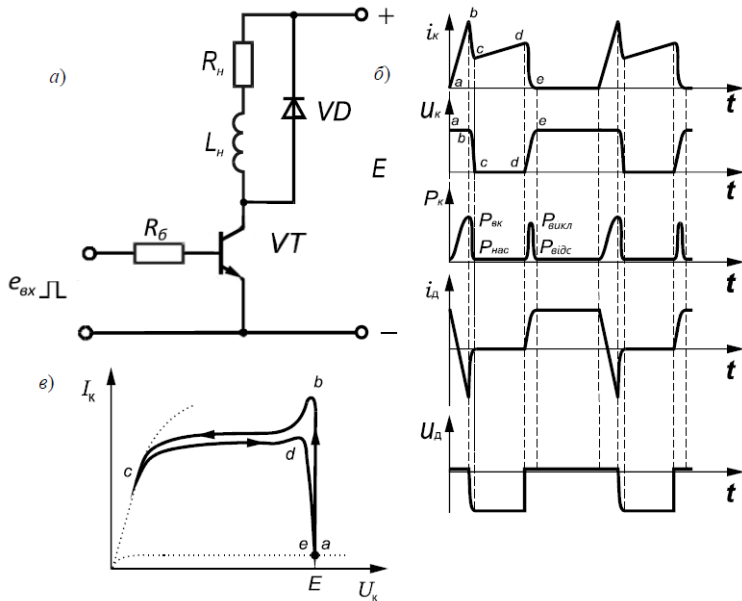


Рисунок 3.20 – Перехідні процеси в транзисторних ключах при активно-індуктивному навантаженні, при шунтуванні діодом: схема (а), перехідні процеси (б), траєкторії робочої точки на площині ВАХ (в)

У довідковій літературі часто вказують тільки сумарний час включення t_{on} , який для найбільш швидких БТ становить 0,1 ... 1,0 мкс і час вимкнення t_{off} , який сильно залежить від часу розсмоктування неосновних носіїв в базовому шарі транзистора. Для БТ t_{off} може досягати одиниць і навіть десятків мкс, що сильно погіршує їх частотні властивості в ключовому режимі. Робоча частота комутації для силових БТ, як правило, не перевищує 10 кГц.

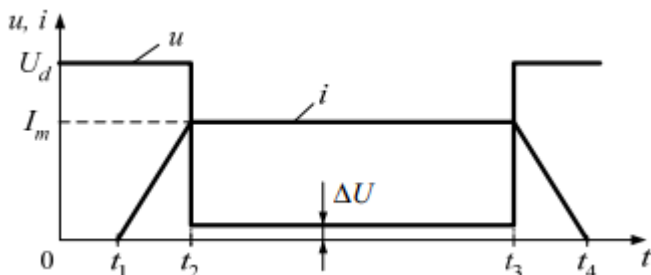


Рисунок 3.21 – Перехідні процеси при включенні і відключенні активно-індуктивного навантаження, шунтуватися діодом

Схема захищеного транзисторного ключа з поліпшеною траєкторією руху робочої точки при перемиканні приведена на рис. 3.22. Для обмеження імпульсу струму, що протікає через діод при включенні транзистора, застосовують малу індуктивність $L_{обм}$. Для зменшення перенапруг, що виникають при обриві струму, паралельно транзистору включають RCD -коло. Конденсатор $C_{ш}$ зменшує швидкість наростання напруги на транзисторі, а діод $V_{ш}$ запобігає швидкому розряду конденсатора на транзистор при його включенні. Резистор $R_{ш}$ забезпечує розряд конденсатора до наступного вимикання. Резистор R_p сприяє розряду енергії, що запасена в індуктивності, до наступного включення.

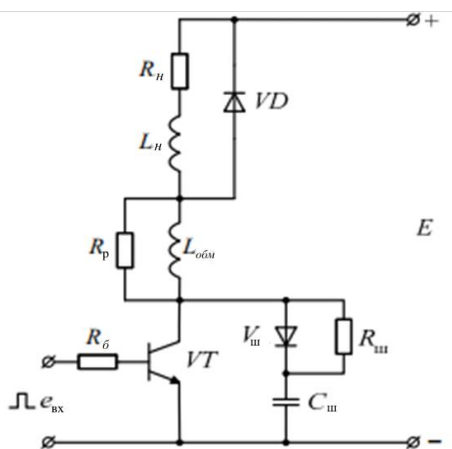


Рисунок 3.22 – Захищений транзисторний ключ

На рис. 3.23 б [10] показано, як змінюються падіння напруги з ростом температури p - n -переходів. Підвищення падіння напруги на ПТІЗ і БТІЗ з ростом температури полегшує їх паралельне з'єднання, що особливо важливо для підвищення потужності.

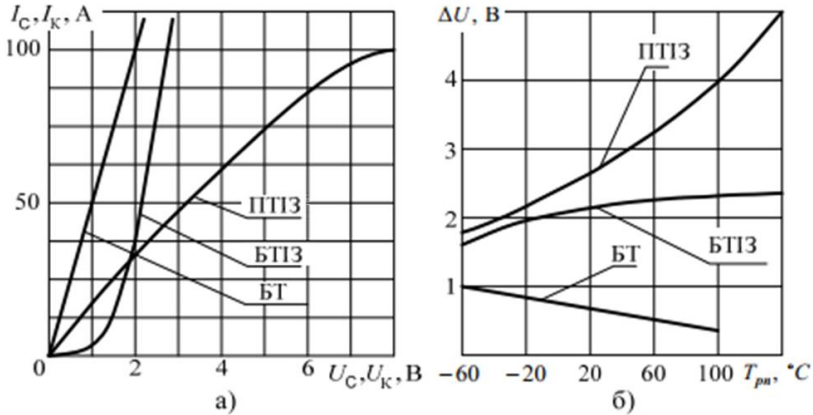


Рисунок 3.23 – Порівняння початкових ділянок вихідних характеристик (а) і залежність напруги насичення від температури p - n -переходів

Основні переваги польових транзисторів: дуже високі вхідні опори, працездатність до сотень мегагерц і відсутність вторинного пробою (вторинний пробій виникає при роботі біполярних транзисторів в ключовому режимі). ПТІЗ – це найбільш перспективні польові транзистори.

Основні переваги БТІЗ: дуже високі вхідні опори, допустимі струми напруги і потужності. Вони призначені тільки для роботи в ключовому режимі і працездатні до десятків кілогерц. На сьогодні БТІЗ – це найбільш перспективні прилади для потужних пристроїв, що перетворюють постійну напругу.

Гібридні силові схеми

При створенні силової частини перетворювачів напівпровідникові прилади (діоди, транзистори, тиристри) з'єднуються між собою за певними схемами. Як альтернатива дискретним приладам і схемам з зовнішніми по відношенню до приладів з'єднаннями, з'явилися гібридні силові модулі, що поєднують в одному корпусі декілька силових ключів і різні допоміжні елементи.

Застосування гібридних силових модулів спрощує конструкції перетворювачів і підвищує надійність його роботи.

Існують випрямні діодні модулі, що містять 2, 4 і 6 діодів, з'єднаних за схемами: два послідовно з'єднаних діода, однофазний міст, трифазний міст. За таким же схематичним з'єднанням транзисторно-діодні ключі, які містять IGBT-транзистори з зустрічно-паралельно з'єднаними діодами (рис. 3.24 а-г). Ці схеми застосовуються в автономних інверторах, що перетворюють постійний струм у змінний, і в перетворювачах постійного струму, що змінюють величину постійної напруги.

На рис. 3.24 д представлений силовий модуль перетворювача частоти, що містить трифазний випрямляч, ключ гальмування і трифазний міст інвертора. Такі модулі виконуються на потужності до 30 кВт. Силові модулі можуть доповнюватися температурним датчиком, датчиком струму, колами захисту та іншими допоміжними елементами. Такі модулі називаються гібридними. Застосування гібридних силових модулів спрощує конструкції перетворювачів і підвищує надійність його роботи.

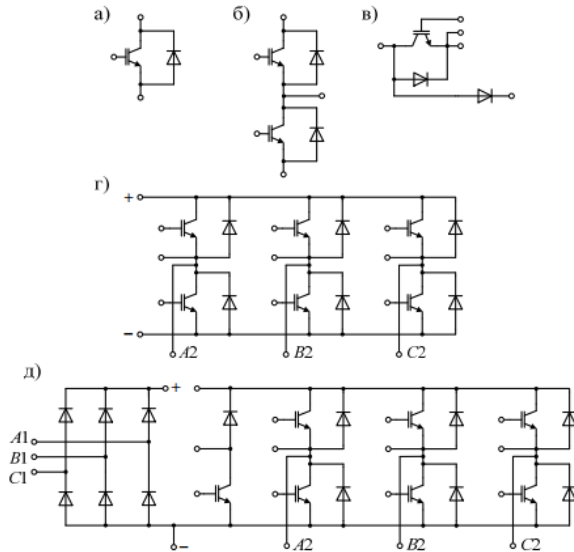


Рисунок 3.24 – Гібридні силові схеми: а) транзисторних-діодний ключ; б) здвоєний ключ (стіжка); в) модуль для понижуючого перетворювача постійної напруги; г) трифазний міст; д) модуль для перетворювача частоти

Існують спеціальні мікросхеми (драйвери) призначені для управління силовими ключами. Подальшим розвитком гібридних силових модулів є введення в них кіл управління. Такі модулі називають інтелектуальними модулями (рис. 3.24).

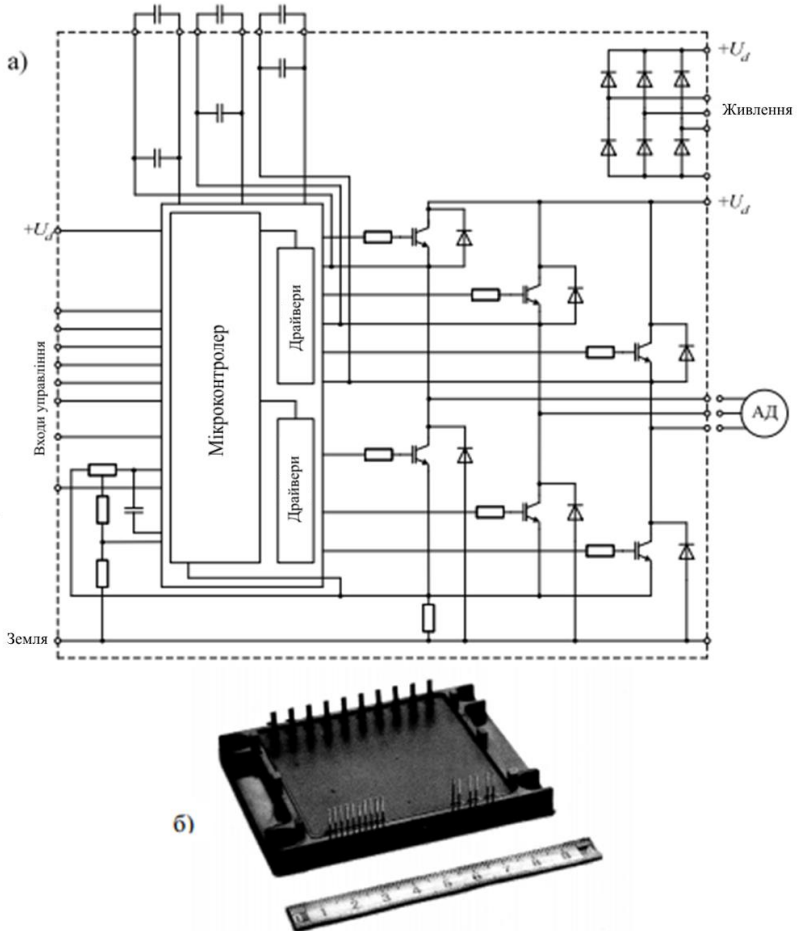


Рисунок 3.25 – Інтелектуальний силовий модуль: а) принципова схема; б) зовнішній вигляд

Параметри силових модулів визначаються параметрами елементів, що входять до їх складу.

Інтеграція мікропроцесорів і силових модулів дозволяє створювати схеми, що безпосередньо керують малопотужними двигунами постійного і змінного струму. При необхідності потужність електроприводів може бути збільшена за рахунок застосування проміжних драйверів і потужних силових ключів.

Контрольні питання до розділу 3

1. Назвіть основні визначення силової електроніки.
2. Охарактеризуйте силові гібридні схеми.
3. Що таке транзистор?
4. Що таке тиристор?
5. Що таке діод?
6. Яка роль транзисторних ключів в силових схемах?
7. Які види транзисторів існують?
8. У яких силових схемах використовуються діоди?

РОЗДІЛ 4. ІМПУЛЬСНІ РЕГУЛЯТОРИ ПОСТІЙНОЇ НАПРУГИ

Силові електронні пристрої широко застосовуються для перетворення та регулювання параметрів електричної енергії. Найчастіше вони є джерелами вторинного електроживлення споживачів електричної енергії і забезпечують їх електричною енергією з необхідними параметрами і відповідної якості. В процесі роботи споживачів електричної енергії дуже часто виникає необхідність регулювати кількість електричної енергії, що споживається, або підтримувати її на заданому рівні. Цього можна досягти за рахунок зміни величини напруги або струму, що подається на навантаження. Пристрої, що забезпечують регулювання струму або напруги на навантаженні називають регуляторами.

4.1 Принципи імпульсного регулювання постійної напруги

Імпульсні регулятори використовують для живлення навантаження сталою напругою U_n , величина якої відрізняється від напруги джерела живлення U_d . Як навантаження можуть використовуватися різні електронні схеми, обмотки збудження електричних машин, електромагнітні механізми, двигуни постійного струму. Головна перевага імпульсного метода регулювання – високий *ККД*.

Розглянемо основні особливості імпульсного регулятора з ідеальним ключем. Опір ідеального ключа у замкненому стані дорівнює нулю. Отже, на ньому немає падіння напруги і при будь-якому струмі втрати потужності дорівнюють нулю. У розімкненому стані опір ідеального ключа є нескінченним. Отже, струм через ключ не протікає і втрати потужності також дорівнюють нулю. Перехід ідеального ключа із замкненого стану в розімкнений і навпаки відбувається миттєво ($t_{перемик.} = 0$), і втрати потужності також відсутні. У реальних силових пристроях використовують силові напівпровідникові прилади, які працюють у ключовому режимі. Ці прилади не є ідеальними ключами, оскільки мають кінцеве значення опору як у ввімкненому стані, так і у вимкненому стані. Крім того, перехід з одного стану в інший відбувається також за кінцевий час. *ККД* силових електронних пристроїв завжди менший за 100%, проте достатньо високий і, як правило, перевищує (85-90%). Тому імпульсні методи регулювання напруги та струму широко застосовуються в пристроях силової електроніки [60-65].

Принцип дії імпульсних регуляторів базується на використанні імпульсних методів регулювання напруги. При цьому регулюючий елемент РЕ працює в режимі ключа (рис.4.1).

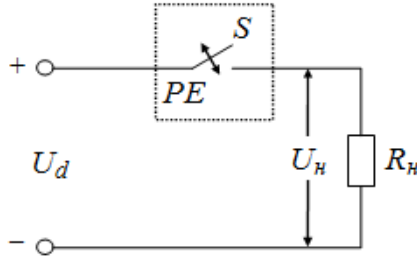


Рисунок 4.1 – Імпульсний регулятор

Середнє значення напруги на навантаженні U_n регулюється за рахунок зміни співвідношення між тривалостями замкнутого і розімкнутого стану ключа S . Напряга на навантаженні u_n має форму прямокутних імпульсів (рис. 4.2).

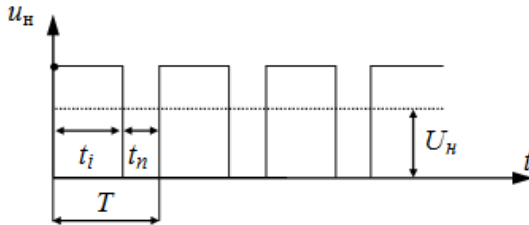


Рисунок 4.2 – Напряга на навантаженні

Середнє значення напруги на навантаженні:

$$U_n = \frac{1}{T} \int_0^{t_i} U_d dt = \frac{U_d t_i}{T} = \frac{U_d (T - t_n)}{T} = \gamma U_d, \quad (4.1)$$

де t_i – тривалість імпульсу напруги на навантаженні; t_n – тривалість паузи між імпульсами; $T=t_i+t_n$ – період повторення імпульсів;

$\gamma = \frac{T - t_n}{T} = \frac{t_i}{T}$ – коефіцієнт заповнення імпульсів.

Діюче значення вихідної напруги на навантаженні:

$$U_n = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{t_i} U_d^2 dt} = U_d \sqrt{\frac{t_i}{T}} = U_d \sqrt{\frac{(T - t_n)}{T}} = \sqrt{\gamma} \cdot U_d \quad (4.2)$$

Плавна зміна g від 0 до 1 забезпечує плавне регулювання U_n практично від 0 до U_d .

У схемах регуляторів постійної напруги як регулюючий елемент (ключ) використовують транзистори або тиристри. Тиристри (одноопераційні) за своїм принципом дії є напівкерваними ключами. При їх роботі в колах постійного струму треба застосовувати вузли примусової комутації. Тому спочатку розглянемо особливості побудови і роботи імпульсних регуляторів на повністю керованих ключах, а потім особливості імпульсних регуляторів постійної напруги на тиристорах [60-65].

З (4.1) випливає, що при сталій напрузі джерела живлення U_d , середнє значення напруги на навантаженні U_n можна регулювати змінюючи параметри імпульсної напруги: тривалість імпульсу t_i , паузи t_n , або період повторення T (частоту слідування f). Відповідно до цього розрізняють такі способи імпульсного регулювання:

Широтно-імпульсне регулювання (ШІР), при якому змінюється тривалість (ширина) імпульсів ($t_i = \text{var}$), а період їх повторення залишається сталим ($T = \text{const}$).

Частотно-імпульсне регулювання (ЧІР) характеризується тим, що регулювання здійснюється шляхом зміни періоду повторення імпульсів T (частоти їх слідування $f = 1/T$).

При цьому можливі такі випадки:

а) $t_i = \text{const}$; $t_n = \text{var}$; б) $t_i = \text{var}$; $t_n = \text{const}$; в) $t_i = \text{var}$; $t_n = \text{var}$.

Останній випадок, при якому одночасно змінюються усі параметри імпульсів називають комбінованим регулюванням.

Імпульсні регулятори постійної напруги крім регулювання середнього значення напруги на навантаженні використовуються для підтримання її на заданому рівні (стабілізації).

В режимі регулювання основною характеристикою є регульовальна характеристика – залежність середнього значення вихідної напруги від величини регульованого параметра.

Для широтно-імпульсного регулювання (ШІР) регульованим параметром є тривалість імпульсу t_i . У режимі регулювання вважають, що напруга джерела живлення U_d залишається сталою. Максимально можлива напруга на навантаженні $U_{n \max} = U_d$. Для зручності використання регульовальні характеристики доцільно подавати у

відносних одиницях. Введемо параметр *відносна напруга* на навантаженні, як $U_n^* = U_n / U_{n \max} = U_n / U_d$. У цьому випадку регульовальна характеристика широтно-імпульсного регулятора у відносних одиницях матиме такий вигляд:

$$U_n^* = \frac{t_i}{T} = \gamma, \quad (4.3)$$

При частотно-імпульсному регулюванні (*ЧИР*) регульованим параметром є частота імпульсів f . Відносна напруга на навантаженні $U_n^* = t_i f$. Враховуючи, що максимальна частота імпульсів $f_{\max} = 1/t_i$, регульовальна характеристика для *ЧИР*-у відносних одиницях має такий вигляд:

$$U_n^* = f^*, \quad (4.4)$$

де $f^* = f / f_{\max}$ – відносна частота імпульсів.

На рис. 4.3 наведено графік регульовальної характеристики для широтно-імпульсного та для частотно-імпульсного регулювання. Наведений графік дозволяє визначити для заданої напруги на навантаженні U_n величину регульованого параметра, або для заданого регульованого параметра – середнє значення напруги U_n .

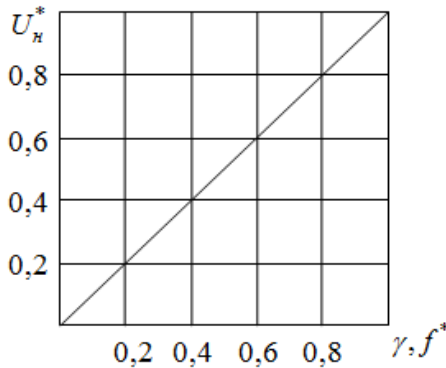


Рисунок 4.3 – Регульовальна характеристика для широтно-імпульсного та частотно-імпульсного регулювання

При комбінованому регулюванні, при якому одночасно змінюються параметри імпульсів t_i , t_n , система керування повинна одночасно регулювати обидва ці параметри. При цьому вихідна напруга U_n є функцією двох змінних і такий регулятор може мати безліч регульовальних характеристик. Комбіноване регулювання застосовується при стабілізації напруги, зокрема в двопозиційних стабілізаторах.

4.2 Варіанти схем силового кола імпульсних регуляторів

Схема 1 є одним з можливих варіантів побудови силового кола імпульсних регуляторів постійної напруги. Вона називається схемою із зниженою вихідною напругою. Особливістю цієї схеми є те, що у навантаженні не можна одержати напругу U_n , більшу за напругу джерела живлення. Існують і інші схеми побудови силового кола імпульсного регулятора, властивості яких суттєво відрізняються від розглянутої схеми.

Схема 2 із дроселем з'єднаним послідовно з навантаженням і транзистором, підключеним паралельно до навантаження являє собою схему з підвищеною вихідною напругою (рис. 4.4). Вона дає можливість одержати на навантаженні напругу U_n , що перевищує напругу джерела живлення.

При відкриванні транзистора VT дросель L під'єднується до джерела живлення U_d . Струм у дроселі зростає і відбувається накопичення енергії. При закриванні транзистора VT відкривається діод VD і конденсатор заряджається від послідовно з'єднаних джерела живлення U_d і дроселя L .

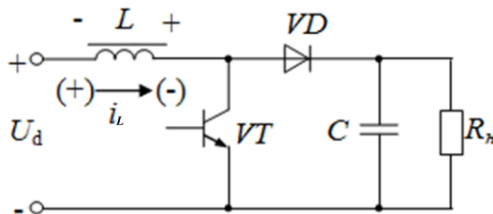


Рисунок 4.4 – Імпульсний регулятор з підвищеною вихідною напругою

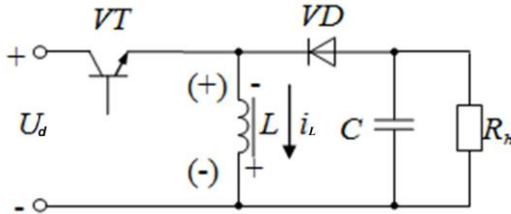


Рисунок 4.5 – Імпульсний регулятор з вихідною напругою, що може регулюватися як вище так і нижче вхідної

На цьому етапі роботи *EPC* самоіндукції дроселя має полярність вказану без дужок. Напруга на конденсаторі, а отже і на навантаженні U_n більша за напругу джерела живлення ($U_n > U_d$). При черговому відкриванні транзистора *VT* діод *VD* закривається за рахунок напруги на конденсаторі *C*, а струм у навантаженні підтримується за рахунок енергії, накопиченої у конденсаторі *C*.

Схема 3 (рис. 4.5) з регулюванням вихідної напруги як вище так і нижче вхідної має дросель, підключений паралельно до навантаження і транзистор, з'єднаний послідовно з навантаженням. При відпиранні транзистора *VT* дросель *L* підключений до джерела живлення U_d і в ньому відбувається накопичення енергії. При запиранні транзистора *VT* струм дроселя i_L продовжує протікати у попередньому напрямку. При цьому відкривається діод *VD* і енергія, що була накопичена в дроселі *L* передається до конденсатора *C* і навантаження R_n . Полярність напруги на конденсаторі, а отже і на навантаженні протилежна до полярності джерела живлення U_d . При наступному відпиранні транзистора *VT* діод *VD* закривається за рахунок підключення напруги джерела живлення, а струм у навантаженні підтримується за рахунок енергії, що була накопичена у конденсаторі *C*.

У залежності від опору навантаження R_n , а також параметрів імпульсів керування, індуктивність *L* може працювати в режимі безперервного або переривчастого протікання струму. Можна показати, що у схемах 2 та 3 аналогічно до схеми 1 у режимі безперервного протікання струму середнє значення вихідної напруги U_n не залежить від опору навантаження R_n .

Будемо вважати елементи схеми ідеальними. Отже, потужність, що споживається від джерела живлення U_d , повинна дорівнювати потужності, що надходить до навантаження:

$$U_d \cdot I_d = U_n \cdot I_n \quad (4.5)$$

Враховуючи, що в усталеному режимі середнє значення струму дроселя $I_L = I_d = \text{const}$, а середнє значення струму через конденсатор $I_c = 0$ для схеми 2 можемо записати:

$$U_d \cdot I_d = U_d \cdot I_L = U_n \cdot I_L t_n / T, \quad (4.6)$$

де t_n – тривалість закритого стану транзистора VT ; T – період роботи ключа. Звідки неважко отримати регульовальну характеристику у відносних одиницях:

$$U_n^* = \frac{U_n}{U_d} = \frac{T}{t_n} = \frac{T}{T - t_i} = \frac{1}{1 - \gamma}, \quad (4.7)$$

де t_i – тривалість відкритого стану транзистора VT ; $\gamma = t_i/T$ – відносна тривалість відкритого стану транзистора VT , або коефіцієнт заповнення імпульсів g .

Для схеми 3 можемо записати що $U_d I_L t_i / T = U_n I_L t_n / T$. Отже, для режиму ШИП регульовальна характеристика:

$$U_n^* = \frac{U_n}{U_d} = \frac{t_i}{t_n} = \frac{\gamma}{1 - \gamma}, \quad (4.8)$$

На рис. 4.6 наведено графік регульовальних характеристик для трьох схем імпульсних регуляторів. Ці характеристики дійсні для схем регуляторів, побудованих на ідеальних елементах. Слід зазначити, що вони досить добре описують властивості регуляторів на реальних елементах в режимі безперервного струму дроселя при $U_n^* < 3$. При $U_n^* > 3$ вплив паразитних опорів компонентів схеми стає помітним і відбувається обмеження зростання вихідної напруги U_n .

У режимі переривчастого струму дроселя середнє значення напруги на навантаженні U_n' для обох схем буде більшим, ніж у режимі безперервного протікання струму ($U_n' > U_n$). Це пов'язано з тим, що дросель L передає енергію в навантаження на протязі інтервалу t_n' , який менший від тривалості розімкненого стану ключа t_n ($t_n' < t_n$). Отже, відповідно до (2.18) і (2.19) $U_n' > U_n$, чим більший опір навантаження, тим менша тривалість інтервалу t_n' , а, отже, тим більшою буде напруга на навантаженні U_n' .

Як видно з графіків (рис. 4.6) у режимі безперервного протікання струму дроселя регульовальні характеристики для схеми 1 – лінійні, а для схем 2 та 3 – нелінійні. В той же час у режимі переривчастого струму

дроселя регулювальні характеристики схеми 1 стають нелінійними, а для схем 2 та 3 – майже лінійними.

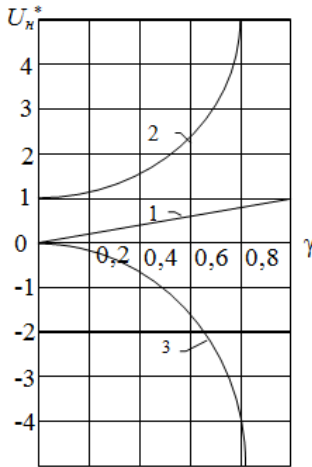


Рисунок 4.6 – Графіки регулювальних характеристик імпульсних регуляторів:

- 1) – із зниженою вихідною напругою;
- 2) – з підвищеною вихідною напругою;
- 3) – з вихідною напругою що може регулюватися як нижче так і вище вхідної

Оскільки в схемах 2 та 3 енергія до навантаження передається у два етапи, *ККД* цих схем буде меншим, ніж у схеми 1. Тому схеми 2 та 3 мають обмежене застосування. Схема 2 використовується у тих випадках, коли на навантаженні R_n треба одержати напругу $U_n > U_d$, а схема 3 – для одержання протилежної по відношенню до джерела живлення U_d полярності вихідної напруги U_n .

Для того, щоб при роботі транзистора VT до джерела живлення не проходили електромагнітні завади, бажано, щоб струм джерела живлення був безперервним, або змінювався плавно. У цьому плані схема 2 має переваги перед іншими схемами, оскільки між джерелом живлення U_d та транзистором VT ввімкнута дросель L .

Для зменшення електромагнітних завод на навантаженні, бажано, щоб струм, який заряджає конденсатор фільтра C був безперервним, або змінювався плавно. У цьому плані переваги має схема 1, в якій між транзистором VT і конденсатором C також ввімкнута дросель L .

4.3 Реверсивні імпульсні регулятори постійної напруги

Часто при регулюванні сталої напруги виникає необхідність одержати на навантаженні регульовану напругу різної полярності. Наприклад, в електроприводі, для регулювання швидкості обертання двигуна постійного струму і зміни напрямку його обертання треба забезпечувати на навантаженні регульовану напругу будь-якої полярності. Таку напругу можна одержати при живленні навантаження від двох паралельно працюючих імпульсних регуляторів, кожен з яких забезпечує свою полярність вихідної напруги. Кожен регулятор повинен мати свою систему керування, а у момент зміни полярності вихідної напруги, треба забезпечувати узгоджену роботу обох регуляторів.

Більш доцільно з цією метою застосовувати спеціальні схеми реверсивних регуляторів. Реверсивні регулятори будують за мостовою схемою, у діагональ якої включають навантаження Z_H (рис. 4.7).

Можливі три алгоритми керування силовими ключами регулятора $S_1 \dots S_4$.

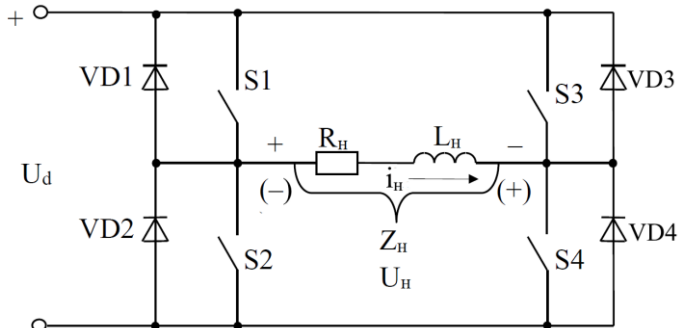


Рисунок 4.7 – Реверсивний регулятор за мостовою схемою

Алгоритм 1 – почергова робота пар ключів S_1, S_4 та S_2, S_3 . На рис.4.8 наведено алгоритм роботи ключів, а також часові діаграми роботи схеми. В інтервалі часу t_1 ввімкнені ключі S_1 та S_4 , а в інтервалі t_2 – ключі S_2 та S_3 .

Вихідна напруга перетворювача U_H має форму двополярних прямокутних імпульсів, амплітуда яких дорівнює напрузі джерела живлення U_d (рис.2.13,а).

Середнє значення напруги на навантаженні:

$$U_u = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt = \frac{1}{T} \left(\int_0^{\tau_1} U_d dt + \int_0^{\tau_2} (-U_d) dt \right) = \frac{U_d}{T} (\tau_1 - \tau_2), \quad (4.9)$$

З (4.9) випливає, що при $\tau_1 > \tau_2$ середнє значення напруги на навантаженні $U_u > 0$. При $\tau_1 < \tau_2$ $U_u < 0$, а при $\tau_1 = \tau_2$ $U_u = 0$ (рис.2.13, в, г). Таким чином змінюючи співвідношення між тривалостями роботи пар ключів S_1, S_4 та S_2, S_3 можна регулювати середнє значення і полярність напруги на навантаженні U_u .

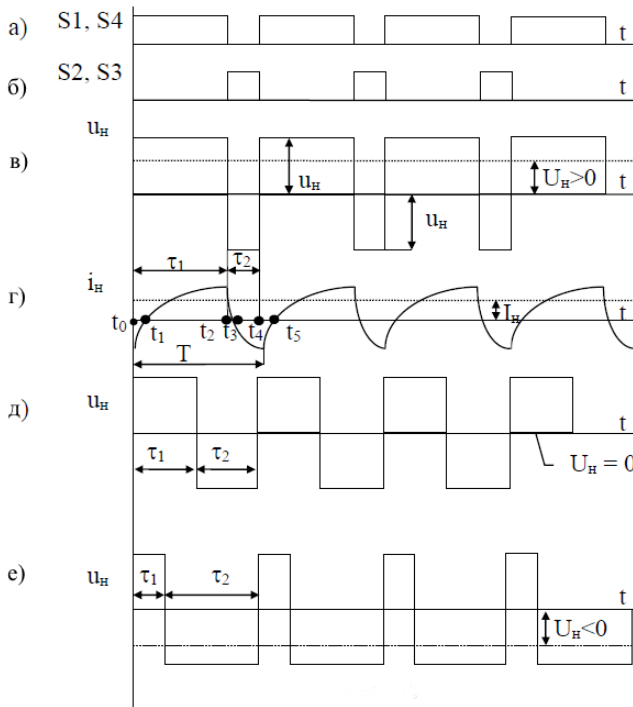


Рисунок 4.8 – Часові діаграми роботи схеми реверсивного регулятора за алгоритмом 1:

а), б) – алгоритм перемикання ключів $S_1 \div S_4$; в) – діаграма напруги на навантаженні; г) – діаграма струму в RL навантаженні; д) – діаграма напруги на навантаженні з середньою напругою $U_H = 0$; е) – діаграма напруги на навантаженні з від’ємним середнім значенням вихідної напруги

Розглянемо особливості роботи реверсивного ШП. Нехай до моменту часу t_2 працювали ключі S_1 та S_4 (рис. 4.8, г). При цьому струм навантаження замикався по колу $(+U_d) - S_1 - R_n - L_n - S_4 - (-U_d)$. Струм у навантаженні зростає і в індуктивності L_n відбувається накопичення енергії. У момент часу t_2 ключі S_1, S_4 вимикаються, а S_2, S_3 вмикаються. До навантаження Z_n подається напруга зворотньої полярності (на рис. 4.8 вказана в дужках). Однак, внаслідок наявності індуктивності L_n струм навантаження i_n не може швидко змінити свій напрямок. В інтервалі часу $t_2...t_3$ він продовжує протікати в тому самому напрямку (вказаний стрілкою, рис. 4.7) і замикається по колу $Z_n - S_3 - E - S_2 - Z_n$. На даному етапі роботи енергія не споживається від джерела живлення, а навпаки, від навантаження Z_n повертається до джерела живлення U_d .

У реальних схемах як ключі $S_1...S_4$ найчастіше використовують транзистори або тиристри, які мають односторонню провідність. Тому для створення шляху протікання струму в розглянутий інтервал часу ключі $S_1...S_4$ шунтовані зустрічно-паралельно з'єднаними діодами $VD_1...VD_4$, які і проводять струм на інтервалі $t_2 - t_3$.

У момент часу t_3 струм навантаження проходить через нуль і змінює свій напрямок. Діоди VD_2 та VD_3 закриваються і повернення енергії до джерела живлення припиняється. В інтервалі часу $t_3...t_4$ енергія знову надходить від джерела живлення до навантаження. Струм протікає по колу $(+U_d) - S_3 - L_n - R_n - S_2 - (-U_d)$. У момент часу t_4 знову вмикаються ключі S_1, S_4 , а S_2, S_3 вимикаються. В інтервалі часу $t_4...t_5$ енергія з навантаження знову повертається до джерела живлення і струм замикається по колу $Z_n - VD_1 - U_d - VD_4 - Z_n$. Після моменту часу t_5 до навантаження знову починає надходити енергія від джерела живлення U_d , і процеси повторюються. Якщо навантаженням розглянутого регулятора є двигун, то для плавного обертання його ротору треба зменшувати пульсацію струму навантаження i_n . Недоліком розглянутого алгоритму керування є значна пульсація напруги на навантаженні ($\Delta u_n = 2U_d$). Для зменшення пульсацій струму Δi_n треба застосовувати дросель L_n з достатньо великою індуктивністю [60-65].

Алгоритм 2 – незалежна робота пар ключів S_1, S_4 та S_2, S_3 . Алгоритм керування ключів та часові діаграми роботи для цього випадку наведено на рис. 4.9. Для одержання на навантаженні напруги позитивної полярності ($U_n > 0$) використовують лише ключі S_1, S_4 . Причому один з ключів, наприклад S_4 весь час ввімкнений, а інший – S_1 на кожному періоді T вмикається на інтервалі часу τ_1 (рис. 4.9, а, б).

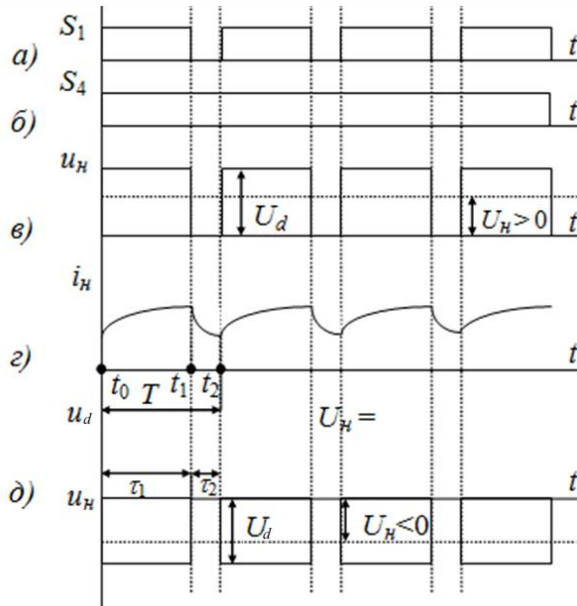


Рисунок 4.9 – Часові діаграми роботи реверсивного регулятора за алгоритмом 2:

а), б) – алгоритм перемикання ключів S_1, S_4 ; в) – діаграма напруги на навантаженні; г) – діаграма струму в RL навантаженні; д) – діаграма напруги на навантаженні з від’ємним середнім значенням вихідної напруги

Форма напруги на навантаженні для розглянутого випадку наведена на рис. 4.9, б. В інтервалі часу $t_0 \dots t_1$ ввімкнені ключі S_1, S_4 . Струм навантаження i_H замикається по колу $(+U_d) - S_1 - R_H - L_H - S_4 - (-U_d)$. Індуктивність L_H накопичує енергію. В інтервалі часу $t_1 \dots t_2$ ключ S_1 вимикається, а ключ S_4 працює. Струм навантаження i_H продовжує протікати в тому самому напрямку замикаючись по колу $Z_H - S_4 - VD_2 - Z_H$. При цьому навантаження Z_H шунтоване ключем S_4 та діодом VD_2 . Отже, напруга на навантаженні $u_H \approx 0$. При цьому енергія, що була накопичена в індуктивності L_H не повертається в джерело живлення U_d , а витрачається в активному опорі навантаження R_H .

Середнє значення напруги на навантаженні:

$$U_H = U_d \tau_1 / T.$$

Для одержання на навантаженні напруги протилежної полярності ($U_H < 0$) (рис. 4.9, д) використовують ключі S_2 та S_3 , причому один з них,

наприклад S_2 , весь час ввімкнений, а інший – S_3 вмикається на інтервалі часу τ_1 на кожному періоді T .

Розглянутий алгоритм керування забезпечує значно менші пульсації напруги на навантаженні ($\Delta u_n = U_d$). Отже, для згладжування пульсацій струму у навантаженні Δi_n можна використовувати дросель з меншою індуктивністю.

При роботі на проти-ЕРС, для забезпечення плавного характеру протікання процесів у навантаженні при реверсі напруги, керування з однієї пари ключів на іншу має передаватися у момент проходження струму навантаження через нуль.

Розглянута схема дає можливість здійснювати активне гальмування двигуна. Нехай працювали ключі S_1 та S_4 . Напрямок струму через навантаження показаний стрілкою. Для гальмування двигуна усі ключі вимикаються. При цьому струм навантаження починає спадати замикаючись через джерело живлення U_d по колу $Z_n - VD_3 - U_d - VD_2 - Z_n$. Полярність напруги на навантаженні вказана в дужках. При цьому накопичена енергія частково витрачається в активному опорі навантаження і частково повертається до джерела живлення U_d . Коли струм навантаження проходить через нуль, діоди VD_2 та VD_3 закриваються і двигун зупиняється.

Алгоритм 3 – почергове керування. При цьому способі керування (рис. 4.10) частота переключення кожного із комутуючих вентилів в два рази менша, ніж частота вихідної напруги. Наприклад, при одній полярності вихідної напруги на навантаженні вмикаються одночасно ключі S_1 і S_4 (ключі S_2 і S_3 при цьому весь час вимкнені), а вимикаються ці ключі неодноразомно (по черзі) із частотою в два рази меншою, ніж частота вихідної напруги. При зворотній полярності вихідної напруги вмикаються ключі S_2 і S_3 , а ключі S_1 і S_4 весь час вимкнені. При такому законі управління вихідна напруга має форму знакопостійних імпульсів (рис. 4.10, г).

При вимиканні ключа S_1 (момент часу t_0) струм навантаження під дією е.р.с. самоіндукції замикається через ключ S_4 і зворотній діод VD_2 . При цьому навантаження закорочується через S_4 і VD_2 і вихідна напруга дорівнює нулю на інтервалі часу t_0-T .

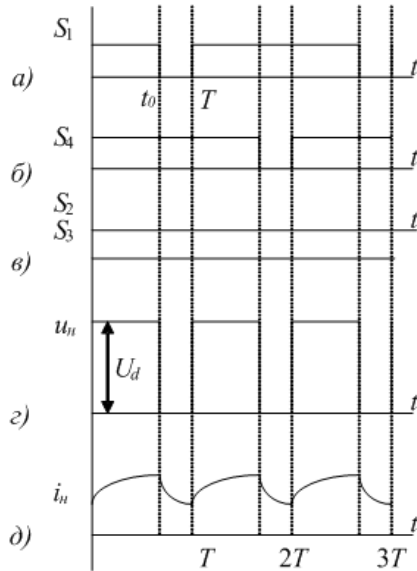


Рисунок 4.10 – Часові діаграми роботи схеми реверсивного регулятора за алгоритмом 3:

а), б), в) – алгоритм перемикання ключів $S_1 \div S_4$; г) – діаграма напруги на навантаженні; д) – діаграма струму в RL навантаженні

4.4 Багатофазні імпульсні регулятори

При побудові потужних імпульсних регуляторів доводиться використовувати паралельне з'єднання елементів схеми, зокрема керованих ключів та діодів. Однак при такому з'єднанні можливості кожного з цих елементів використовуються не повністю, оскільки точного розподілу струмів між ними добитися практично неможливо. Крім того, введення різних типів вирівнювальних елементів ускладнює схему і приводить до додаткових втрат енергії. Тому при підвищених потужностях більш доцільно використовувати не паралельне з'єднання елементів в регуляторі, а паралельну роботу кількох однотипних регуляторів на спільне навантаження. Якщо при цьому силові ключі перетворювальних модулів працюють з фазовим зсувом один відносно одного на T/n (T – період роботи кожного ключа, n – кількість перетворювальних модулів) можна значно зменшити пульсації струму

джерела живлення та навантаження і збільшити частоту цих пульсацій. Подібні перетворювачі називають багатофазними [60-65].

На рис. 4.11 наведено схему трифазного ($n = 3$) імпульсного регулятора постійної напруги.

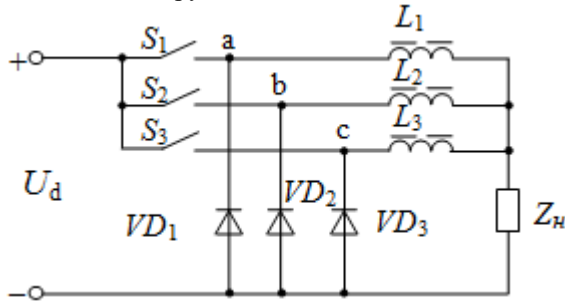


Рисунок 4.11 – Схема трифазного ($n = 3$) імпульсного регулятора постійної напруги

Із часових діаграм (рис. 2.17) видно, що незважаючи на те, що кожен модуль-регулятор працює на частоті $f = 1/T$ і його вихідний струм має досить велику пульсацію, струм навантаження i_n , що є сумою струмів окремих регуляторів, має значно меншу пульсацію, причому частота цієї пульсації у $n = 3$ рази більша, ніж частота пульсацій кожного з модулів-регуляторів. Така побудова регулятора крім рівномірного розподілу потужності між однотипними модулями, дозволяє суттєво зменшити масогабаритні показники згладжувальних дроселів.

Так, якщо масу згладжувального дроселя однофазного регулятора прийняти за 100%, то загальна маса дроселів двофазного регулятора такої ж самої потужності становитиме 42%, а трифазного – 25,5%. Це пов'язано з тим, що робота силових ключів регуляторів з фазовим зсувом один відносно одного, по відношенню до навантаження еквівалентна підвищенню робочої частоти перетворювача.

Ще один фактор, який обумовлює застосування паралельної роботи перетворювальних модулів, є підвищення надійності роботи перетворювача в цілому. Нехай перетворювач складається з трьох паралельно включених модулів, причому для забезпечення необхідної потужності досить двох модулів. У нормальному режимі одночасно працюють усі три модулі, причому в полегшеному режимі. При відмові одного з перетворювальних модулів він вимикається і задану

потужність в навантаженні забезпечують інші два модулі, причому тепер вони працюють в номінальному режимі.

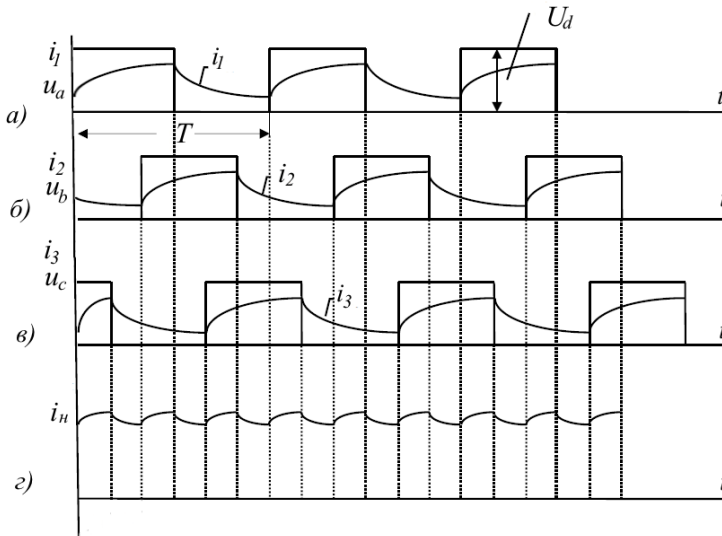


Рисунок 4.12 – Часові діаграми трифазного регулятора постійної напруги:

а), б), в) – діаграми напруги (u_a , u_b , u_c) на виходах трифазного регулятора струмів (i_1 , i_2 , i_3) в згладжуючих дроселях; г) – діаграма струму у навантаженні

4.5 Особливості імпульсних регуляторів постійної напруги на тиристорах

При побудові імпульсних регуляторів постійної напруги підвищеної потужності (десятки, сотні кВт) як керований ключ S можна використовувати тиристор. Однак звичайні тиристори є напівкерованими приладами (за допомогою керуючого електрода їх можна тільки включити). Тому при роботі тиристорів в електричних колах постійної напруги треба застосовувати спеціальні пристрої, які б давали можливість вимикати тиристори в необхідний момент часу.

Процес вимикання тиристора починається при зменшенні анодного струму I_A до величини меншої $I_{упр}$, яка називається струмом утримування ($I_A < I_{упр}$).

В колах постійного струму використовується вмикання тиристора за рахунок короткочасного підключення між його анодом та катодом допоміжного джерела напруги E_K , або спеціального, заздалегідь зарядженого конденсатора C_K (рис. 4.13, а,б).

Таке вмикання тиристора називають примусовою, або штучною комутацією, а елементи, що здійснюють вмикання тиристора – вузлом примусової комутації.

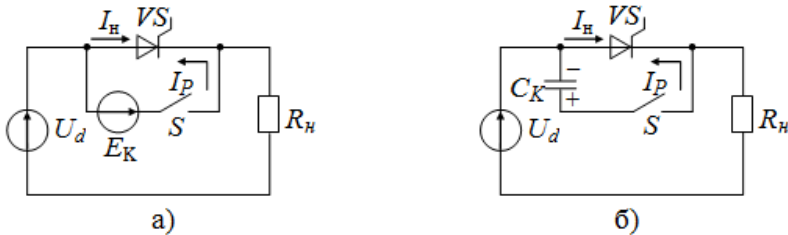


Рисунок 4.13 – Кола примусової комутації:
 а) – з допоміжним джерелом напруги E_K ; б) – із заздалегідь зарядженим конденсатором C_K

Принцип дії вузла примусової комутації, побудованого на основі конденсатора полягає в тому, що в інтервалі часу, який передує моменту виключення тиристора, конденсатор через спеціально створене електричне коло заряджається до певної напруги з відповідною полярністю. У момент вмикання тиристора між його анодом та катодом вмикається конденсатор. Через тиристор починає швидко зростати струм розряду I_p конденсатора, який направлений назустріч основному струму I_n . Коли результуючий струм тиристора стає меншим від струму утримування I_{ymp} , тиристор вимикається. Після цього за рахунок конденсатора C_K на тиристорі певний час підтримується напруга зворотної полярності, яка забезпечує умови для відновлення вентильних властивостей тиристора.

Існує багато різних схем вузлів примусової комутації тиристора. Як правило, ці схеми містять конденсатори, дроселі, діоди та допоміжні тиристори. Аналіз багаточисельних схем вузлів примусової комутації значно спрощується, якщо їх класифікувати за ознаками, які характеризують їх спільні властивості.

У залежності від способу підключення комутуючого конденсатора відносно тиристора і навантаження розрізняють:

- вузли з паралельною комутацією;

- вузли з послідовною комутацією.

У вузлах з паралельною комутацією комутуючий конденсатор C_k при вимиканні тиристора підключається паралельно тиристорі VS (рис. 4.14, а) або навантаженню R_n (рис. 4.14, б).

В результаті, на протязі деякого інтервалу часу t_n , після підключення конденсатора, навантаження R_n буде зв'язане з джерелом напруги U_d або комутуючим конденсатором C_k . При цьому у навантаженні продовжує протікати струм через елементи вузла комутації, незважаючи на те, що тиристор VS уже закритий.

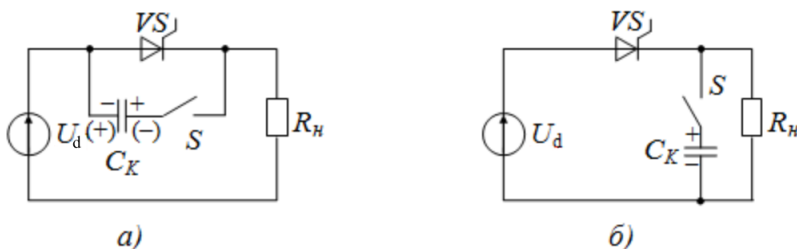


Рисунок 4.14 – Вузли примусової паралельної комутації:
а) – з підключенням контурного конденсатора C_k паралельно тиристорі VS ; б) – з підключенням контурного конденсатора C_k паралельно навантаженню

Внаслідок наявності вказаного зв'язку у кривій вихідної напруги u_n з'являється додатковий імпульс напруги, заштрихований на рис. 4.15.

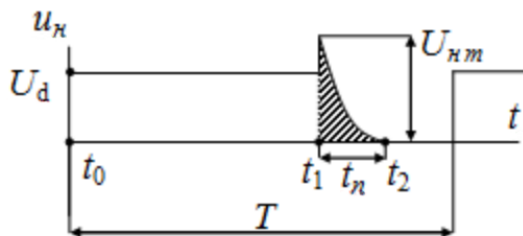


Рисунок 4.15 – Додатковий імпульс напруги при паралельній комутації

У момент вимикання тиристора t_1 у схемі (рис. 4.14, а) напруга на навантаженні зростає до величини $U_{nm} = U_d + U_{Ck}$ (U_{Ck} – напруга на конденсаторі C_k), оскільки послідовно з джерелом напруги U_d по відношенню до навантаження підключений конденсатор C_k , полярність напруги на якому вказана без дужок. Після цього відбувається

перезаряджання конденсатора C_K через навантаження R_n , в результаті чого напруга на конденсаторі змінює полярність. У момент часу t_2 , коли конденсатор C_K перезарядиться до напруги $U_c = U_d$ з полярністю, вказаною у дужках, напруга на навантаженні стає рівною нулю. Очевидно, що тривалість перезаряду t_n залежить від струму навантаження I_n (опору навантаження R_n). У зв'язку з цим середнє значення напруги U_n також буде залежати від струму навантаження I_n . Тому жорсткість навантажувальної характеристики регулятора зменшується. Відносна тривалість інтервалу перезаряду t_n/T зростає при збільшенні робочої частоти регулятора (зменшенні періоду T). Тому із зростанням робочої частоти $f=1/T$ жорсткість навантажувальної характеристики також буде зменшуватися. Іншим недоліком є обмежений діапазон регулювання паузи між імпульсами, пов'язаний з наявністю інтервалу перезаряду t_n .

У схемі (рис. 4.14, б) початкова напруга на конденсаторі C_K має бути більшою за напругу живлення ($U_c > U_d$). При цьому в момент вимикання тиристора VS до нього прикладається зворотня напруга, яка дорівнює $U_c - U_d$, а на навантаженні $U_{nm} = U_c$. Далі конденсатор розряджається через навантаження. Напруга на конденсаторі, а отже і навантаженні поступово зменшується і у момент часу t_2 дорівнює нулю. Таким чином в обох схемах напруга на навантаженні залежить від напруги на конденсаторі C_K , а швидкість зміни цієї напруги на інтервалі часу $t_1...t_2$ залежить від опору навантаження R_n .

Особливістю вузлів послідовної комутації є те, що конденсатор C_K на стадії комутації включається послідовно в коло тиристора VS і навантаження R_n (рис. 4.16). При цьому напруга на конденсаторі C_K має бути більшою напруги джерела живлення $U_{Ck} > U_d$. У момент комутації t_1 тиристор VS вимикається.

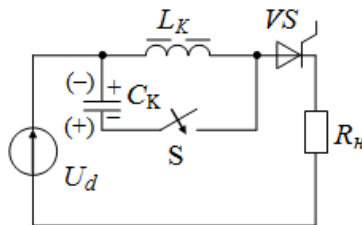


Рисунок 4.16 – Вузол послідовної комутації

Після цього до нього прикладено зворотню напругу $U_{Ck} - U_d$. Конденсатор C_K перезаряджається через індуктивність L_K . Оскільки в коло перезаряду не входить навантаження R_n , у момент комутації t_1

напруга на навантаженні одразу стає рівною нулю і не залежить від процесів, що відбуваються в контурі комутації. Тому форма вихідної напруги не залежить від струму навантаження і має такий самий вигляд як і для повністю керованого ключа.

Тому навантажувальна характеристика тиристорних імпульсних регуляторів з послідовною комутацією буде більш жорсткою, ніж при паралельній комутації. За своїми властивостями вузли послідовної комутації наближаються до повністю керованого ключа. Однак схеми вузлів послідовної комутації як правило більш складні, ніж паралельної. Крім того, в таких вузлах комутації, як правило, має місце ефект накопичення енергії в елементах вузла комутації, яку треба обмежувати.

У залежності від характеру протікання процесів у вузлі комутації та навантаженні вузли комутації діляться на:

- залежні вузли комутації;
- незалежні вузли комутації.

У залежних вузлах комутації комутуючий конденсатор після вимикання тиристора перезаряджається струмом навантаження. В незалежних вузлах комутації після вимикання тиристора комутуючий конденсатор перезаряджається струмом спеціально створеного коливального контуру.

В залежних вузлах комутації тривалість процесу перезаряду комутуючого конденсатора буде залежати від струму навантаження. У зв'язку з цим при малих струмах у навантаженні робота таких вузлів комутації неможлива. Незалежні вузли комутації зберігають працездатність навіть у режимі холостого ходу навантаження, оскільки комутуючий конденсатор перезаряджається струмом коливального контуру, який є незалежним від навантаження.

Розрізняють також:

- вузли з одноступінчатою комутацією;
- вузли з двоступінчатою комутацією.

Вузли з одноступінчатою комутацією містять коливальний LC контур (на рис. 4.17 наведено схему найпростішого вузла з одноступінчатою комутацією, а на рис. 4.18 - часові діаграми струмів та напруг, що пояснюють його роботу).

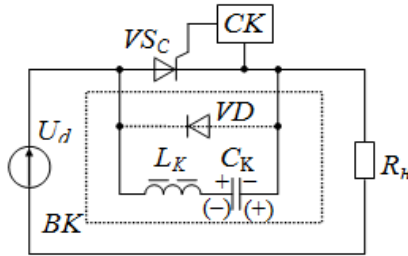


Рисунок 4.17 – Схема вузла з одноступінчатою комутацією

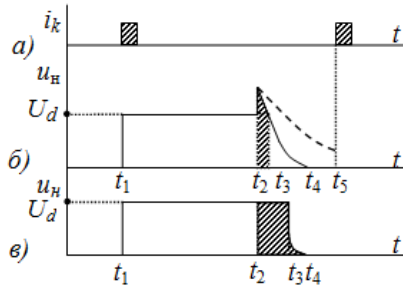


Рисунок 4.18 – Часові діаграми струмів та напруг:

- а) – струм керування тиристором VS_C ; б) – діаграма напруги на навантаженні без діоду VD ; в) - діаграма напруги на навантаженні з діодом VD

Тиристор VS_C є силовим ключем, який здійснює імпульсне регулювання напруги на навантаженні R_n . Елементи обмежені штриховою лінією являються вузлом примусової комутації BK , який забезпечує вимикання силового тиристора VS_C . Для роботи вузла комутації, як і будь якого іншого перетворювального пристрою необхідна система керування CK , яка формує імпульси керування тиристора i_k .

Поки система керування не працює, силовий тиристор VS_C закритий і напруга на навантаженні R_n дорівнює нулю. У момент підключення джерела живлення U_d відбувається заряд конденсатора C_k по колу $(+U_d)-L_k-C_k-R_n-(-U_d)$ до напруги $U_c \approx U_d$ з полярністю, вказаною без дужок. Якщо у момент часу t_1 система керування CK подає на керуючий електрод тиристора VS_C імпульс керування (рис. 4.18, а), тиристор включається і навантаження підключається до джерела живлення U_d . Енергія починає надходити до навантаження R_n . Одночасно з цим починається резонансний перезаряд конденсатора C_k

по колу $C_k - L_k - VS_C - C_k$. Внаслідок перезаряджання конденсатора на ньому встановлюється напруга, полярність якої вказана в дужках і одразу починається зворотній перезаряд по колу $C_k - VS_C - L_k - C_k$. При цьому струм перезаряду протікає через силовий тиристор VS_C у зворотньому напрямку. Коли цей струм збільшуючись досягне значення струму навантаження i_n , який протікає через тиристор у прямому напрямку, сумарний струм через тиристор буде дорівнювати нулю і тиристор виключається. При цьому струм навантаження буде замикатись по колу $U_d - L_k - C_k - R_n - U_d$ і конденсатор C_k буде перезаряджатися до напруги $U_c = U_d$ з полярністю, вказаною без дужок. У момент виключення силового тиристора t_2 напруга на конденсаторі ще має полярність, вказану у дужках. Тому напруга на навантаженні у цей момент зростає: $u_n(t_2) = U_d + u_c$ (рис. 4.18, б). Внаслідок перезаряджання конденсатора напруга на ньому поступово зменшується і змінює полярність. У момент t_3 напруга на конденсаторі проходить через нуль. На інтервалі $t_2 \dots t_3$ до тиристора VS_C була прикладена зворотня напруга з конденсатора C_k , яка сприяє відновленню вентильних властивостей тиристора.

Тривалість відкритого стану тиристора визначається періодом власних коливаний LC контура і її практично не можливо регулювати. У зв'язку з цим регулювання середнього значення напруги на навантаженні можна здійснювати тільки зміною частоти включення силового тиристора, тобто за рахунок частотно-імпульсного регулювання.

Для нормальної роботи вузла комутації повинна виконуватися умова:

$$\Delta t = t_3 - t_2 = t_{\text{відновл.}} \geq t_{\text{викл.}}$$

де $t_{\text{відновл.}}$ – час, який надається схемою для відновлення вентильних властивостей тиристора; $t_{\text{викл.}}$ – паспортний час виключення тиристора.

На інтервалі $t_3 \dots t_4$ полярність напруги на конденсаторі вказана без дужок. У момент t_4 напруга на конденсаторі $U_c = U_d$. Струм через конденсатор припиняється і навантаження відділяється від джерела живлення. Очевидно, що при зміні опору навантаження буде змінюватися час перезаряджання конденсатора $t_2 \dots t_4$.

При збільшенні R_n час перезаряджання конденсатора зростає. При деякій величині цього опору $R_{n \text{ max}}$ у момент чергового включення тиристора t_5 перезаряджання конденсатора не встигає закінчитися і він буде не готовий до комутації тиристора.

При зменшенні опору навантаження R_n інтервал $t_2 \dots t_4$ буде зменшуватися. Відповідно буде зменшуватися і інтервал $t_2 \dots t_3$, який надається тиристорі для відновлення вентильних властивостей. При

певній величині опору $R_{n \min}$ $t_{\text{відновл.}}$. Стає меншим $t_{\text{виск.}}$. При цьому тиристор не встигає відновити свої вентиляльні властивості і повторно включається. Оскільки при цьому напруга на конденсаторі C_k $U_c \approx 0$ нова комутація неможлива і вузол комутації втрачає працездатність.

Таким чином дана схема може працювати тільки при обмеженому діапазоні зміни опору навантаження $R_{n \min} \dots R_{n \max}$. Відповідно до розглянутих класифікацій у розглянутій схемі комутація є – паралельною, залежною, одноступінчатою.

Якщо в розглянуту схему додатково ввести діод VD (див. рис. 4.17), то після вимикання тиристора у момент t_2 струм перезаряджання конденсатора буде замикатися через цей діод по колу $C_k - VD - L_k - C_k$. Час перезаряджання конденсатора $t_2 \dots t_3$ (рис. 4.18, в) буде визначатися періодом власних коливань контура $L_k C_k$ і мало залежатиме від опору навантаження R_n . Тому для цієї схеми опір $R_{n \max}$ буде значно більшим, ніж у попередній схемі, а діапазон допустимої зміни опору навантаження R_n значно ширшим.

Отже для розглянутого варіанта схеми комутація є – паралельною, незалежною, одноступінчатою.

У вузлах двоступінчатої комутації при включенні основного (силового) тиристора здійснюється підготовка вузла комутації до роботи (відбувається заряджання комутуючого конденсатора). Для виключення силового тиристора треба включити допоміжний комутуючий тиристор, який підключає комутуючий конденсатор до силового тиристора. В таких вузлах комутації можна регулювати тривалість включеного стану силового тиристора, тобто здійснювати широтно-імпульсне регулювання. Незважаючи на більш складні схеми, такі вузли комутації мають більш широке застосування, оскільки дають змогу більш гнучко регулювати середнє значення напруги на навантаженні, а також більш ефективно використовувати згладжувальні фільтри на виході регулятора.

У схеми з паралельною двоступінчатою комутацією (рис. 4.19) перший імпульс від системи керування треба подати на комутуючий тиристор VS_k . При цьому комутуючий конденсатор C_k буде заряджатися до $U_c \approx U_d$ по колу $(+U_d) - C_k - VS_k - R_n - (-U_d)$ з полярністю, що вказана без дужок на рис. 4.19. Після повного заряджання конденсатора тиристор VS_k виключається.

При включенні силового тиристора VS_c навантаження R_n підключається до джерела живлення U_d . Одночасно починається резонансне перезаряджання конденсатора C_k по колу $C_k - VS_c - L1 - VD1 - C_k$. На конденсаторі встановлюється напруга, полярність якої вказана

в дужках. Зворотньому перезаряджанню конденсатора перешкоджає діод $VD1$. Тепер вузол комутації готовий до роботи.

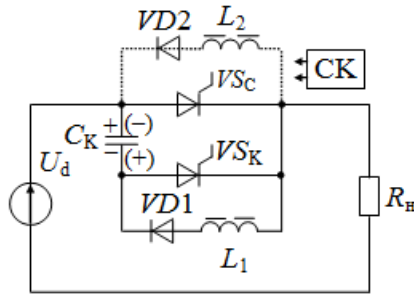


Рисунок 4.19 – Схема з паралельною двоступінчатою комутацією

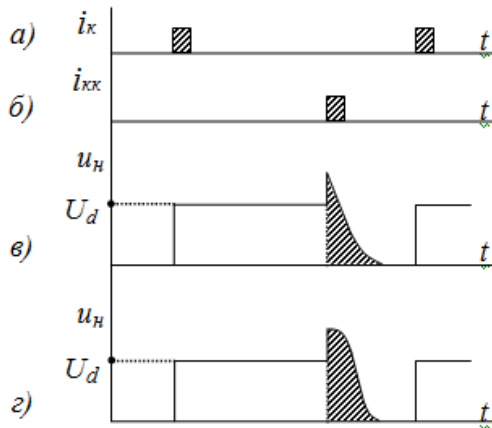


Рисунок 4.20 – Часові діаграми роботи схеми з двоступінчатою комутацією:

a), б) – імпульси керування силовим (i_k) та комутуючим (i_{kk}) тиристорами; *в)* – діаграма напруги на навантаженні без кола з діодом $VD1$; *г)* – діаграма напруги на навантаженні із колом з діодом $VD2$

Для виключення силового тиристора VS_C треба подати імпульс керування на комутуючий тиристор VS_K . При включенні тиристора VS_K комутуючий конденсатор C_K підключається до силового тиристора VS_C плюсом до катода і мінусом до анода. Силовий тиристор VS_C закривається, а конденсатор починає перезаряджатися від джерела

живлення через навантаження до напруги $U_C \approx U_d$ з полярністю, вказаною без дужок. Оскільки перезарядження конденсатора відбувається через навантаження, тривалість перезаряду буде залежати від опору навантаження R_H .

Таким чином для розглянутої схеми комутація є – паралельною, залежною; двохступінчатою.

Якщо в розглянуту схему додатково ввести ланцюжок $VD2-L2$, перезарядження конденсатора C_K буде відбуватися переважно по колу $C_K - VS_K - L2 - VD2 - C_K$ і мало залежатиме від опору навантаження R_H .

У цьому випадку комутація є – паралельною, незалежною, двохступінчатою. Часові діаграми роботи схеми наведено на рис. 4.20.

У схемі з двоступінчатою комутацією і підключенням комутуючого конденсатора C_K паралельно R_H (рис. 4.21), як правило, система керування СК одночасно подає сигнали керування на силовий VS_C та зарядний VS_3 тиристри (часові діаграми роботи схеми наведено на рис. 4.22).

При цьому навантаження, підключене до джерела живлення, а комутуючий конденсатор C_K заряджається по колу $(+U_d) - VS_3 - L_3 - C_K - (-U_d)$, з вказаною на рис.4.21 полярністю.

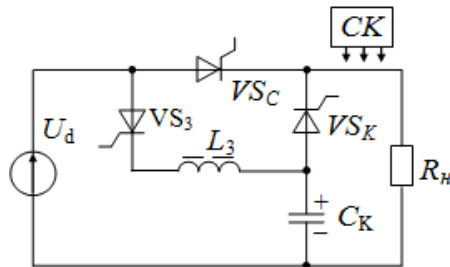


Рисунок 4.21 – Схема з двоступінчатою комутацією і підключенням комутуючого конденсатора C_K паралельно R_H

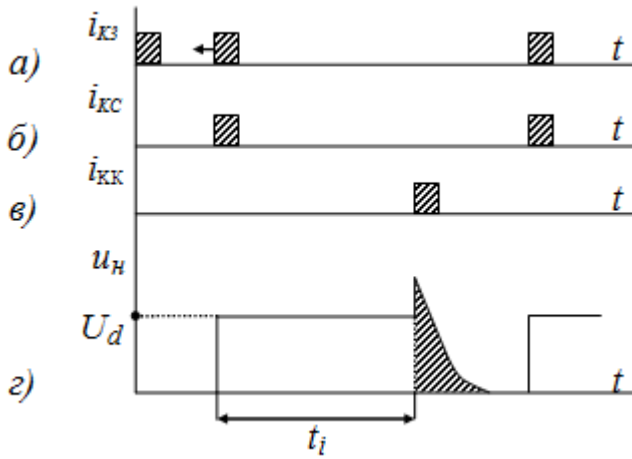


Рисунок 4.22 – Часові діаграми роботи схеми з двоступінчатою комутацією:

a), б), в) – імпульси керування зарядним (i_{K3}), силовим (i_{Kc}) та комутуючим (i_{Kk}) тиристорами; *г)* – діаграма напруги на навантаженні

Для вимкнення силового тиристора VS_C треба включити комутуючий тиристор VS_K . Оскільки заряджання конденсатора C_K має резонансний характер, напруга на ньому $U_C > U_d$. Тому в момент включення тиристора VS_K до силового тиристора прикладається напруга зворотної полярності $U_{VSc} = U_C - U_d$, яка забезпечує виключення тиристора VS_C . Після закриття силового тиристора конденсатор розряджається через навантаження R_H .

У розглянутій схемі комутація є – паралельною, залежною, двохступінчатою. Розглянута схема містить три тиристора, що збільшує її вартість. Однак, завдяки наявності додаткового зарядного тиристора VS_3 є можливість працювати при малих коефіцієнтах заповнення імпульсів γ . Однак при цьому необхідно ускладнювати систему керування і зміщувати імпульси керування зарядного тиристора i_{K3} відносно імпульсу керування силовим тиристором i_{Kc} . Якщо зарядний тиристор VS_3 включають одночасно з силовим VS_C , то при малих тривалостях імпульсу напруги на навантаженні t_i , до моменту включення комутуючого тиристора VS_K комутуючий конденсатор C_K не встигає зарядитися і станеться зрив комутації. Якщо імпульс керування

на зарядний тиристор VS_3 подавати раніше, ніж на силовий VS_C , вузол комутації зберігає працездатність навіть при мінімальних значеннях t_i .

Аналогічно попередній схемі, у схемі з послідовною, двоступінчатою комутацією (рис. 4.23) імпульс керування на силовий VS_C та зарядний VS_3 тиристри можна подавати одночасно. Якщо ж необхідно забезпечити можливість одержання малої тривалості імпульсу напруги на навантаженні, імпульс керування зарядного тиристора i_{K3} повинен випереджати імпульс керування силового тиристора i_{KC} . При вмиканні тиристорів VS_C та VS_3 навантаження R_d підключається до джерела напруги E , а комутуючий конденсатор C_K заряджається по колу $(+U_d) - C_K - L_3 - VS_3 - (-U_d)$. В результаті резонансного заряду конденсатора на ньому встановлюється напруга $U_C > U_d$ з полярністю, вказаною без дужок.

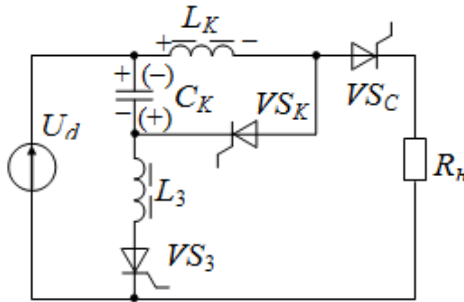


Рисунок 4.23 – Схема з послідовною двоступінчатою комутацією

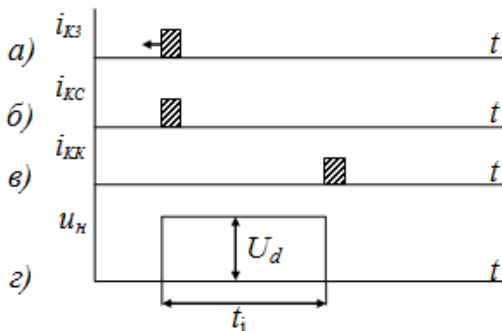


Рисунок 4.24 – Часові діаграми роботи схеми з послідовною, двоступінчатою комутацією:

$a), б), в)$ – імпульси керування зарядним (i_{K3}), силовим (i_{KC}) та комутуючим (i_{KK}) тиристорами; $г)$ – діаграма напруги на навантаженні

Для вимикання силового тиристора VS_C треба включити комутуючий тиристор VS_K . Напруга конденсатора C_K підключається до комутуючої індуктивності L_K і на ній виділяється напруга $U_L = U_c > U_d$. Ця напруга послідовно включена в контур, який складається з джерела напруги U_d , силового тиристора VS_C та навантаження R_n .

Оскільки $U_c > U_d$, силовий тиристор VS_C виключається і навантаження R_n відділяється від джерела U_d та елементів вузла комутації $L_K C_K$. Завдяки цьому імпульс напруги на навантаженні має таку ж саму форму, як і у імпульсних регуляторах на повністю керованих ключах (рис. 4.24, г). Тому жорсткість регулювальних характеристик даної схеми буде більшою, а діапазон регулювання ширшим, ніж у попередніх схем.

У розглянутій схемі комутація є – послідовною, незалежною, двохступінчатою.

Однак розглянута схема має і суттєвий недолік. Після закривання силового тиристора VS_C струм дроселя L_K , що дорівнював струму навантаження i_n , переходить у комутуючий тиристор VS_K і енергія, що була накопичена в дроселі L_K передається в комутуючий конденсатор C_K . Очевидно, що після кожної комутації до комутуючого конденсатора C_K буде надходити нова порція енергії:

$$W = \frac{L_K i_n^2}{2}$$

За рахунок цього напруга на комутуючому конденсаторі буде зростати. Для обмеження зростання цієї напруги треба передбачити заходи для розсіювання надлишків енергії, або, що краще, передавання її в джерело живлення або навантаження. У першому випадку зменшується *ККД* схеми, а у другому – схема суттєво ускладнюється.

Розглянута вище класифікація та вузли примусової комутації тиристорів дають можливість звести багатоманітність існуючих схем до порівняно невеликої кількості груп, які мають аналогічні властивості. Це полегшує аналіз процесів у вузлах комутації та їх розрахунок, а також дає можливість вибрати найбільш придатний для конкретної галузі застосування вузол комутації.

Якісні показники вузла комутації відображає його комутаційна характеристика.

Комутаційна характеристика – залежність часу $t_{\text{відновл.}}$, який надається тиристорі для відновлення вентильних властивостей від сили струму навантаження I_n , який протікав через тиристор безпосередньо перед комутацією.

$$t_{\text{відновл.}} = f(I_n).$$

Комутаційні характеристики одержують аналізуючи процеси, які відбуваються у вузлі комутації. Оскільки одну й ту ж саму структуру має ціла група вузлів комутації, одержану для даної структури комутаційну характеристику можна використовувати для розрахунку великої групи різних вузлів комутації.

Як приклад, проаналізуємо більш докладно вузол комутації, схема якого наведена на рис. 4.24. При включенні комутуючого тиристора VS_K створюється практично короткозамкнений контур $C_K \cdot VS_K - VS_C - C_K$ (вважаємо, що опір включених тиристорів $r \rightarrow 0$). Внаслідок цього струм у цьому контурі i_k швидко зростає. Як тільки цей струм досягне значення $\approx I_H$ (струм, що протікав через силовий тиристор VS_C у навантаження Z_H), сумарний струм через силовий тиристор стає меншим від струму утримування і VS_C виключається. Оскільки у момент комутації струм i_k зростає дуже швидко, до моменту виключення силового тиристора VS_C напруга на конденсаторі C_K практично не встигає змінитися. Будемо вважати, що у момент комутації напруга на конденсаторі C_K , $U_{Ck} = U_d$. Перезарядження конденсатора здійснюється струмом навантаження i_H . Як правило, для згладжування пульсацій струму послідовно з навантаженням R_H ставлять дросель L_H з достатньо великою індуктивністю. У зв'язку з цим на інтервалі комутації струм навантаження i_H не встигає помітно змінитися ($i_H = I_H$). У зв'язку з цим у розрахунковій схемі (рис. 4.25) навантаження можна замінити джерелом струму $I = I_H$.

Згідно до розрахункової схеми напруга на конденсаторі C_K буде змінюватися за законом:

$$u_c(t) = -U_{C0} + \frac{1}{C_K} \int_0^t I_H dt = -U_{C0} + \frac{I_H t}{C_K}$$

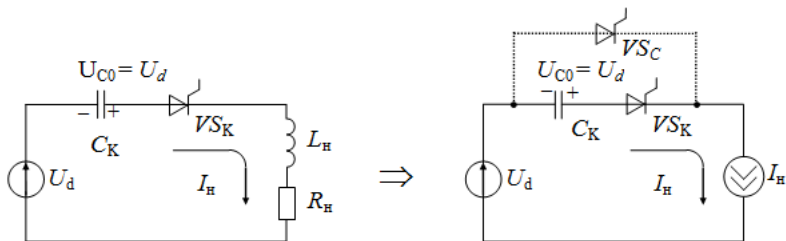


Рисунок 4.25 – Заміна у розрахунковій схемі навантаження джерелом струму $I = I_H$

На силовому тиристорі VS_c зворотна напруга буде зберігатися до моменту, коли напруга на конденсаторі C_k пройдёт через нуль. Отже, час, який надається для відновлення вентильних властивостей, можна розрахувати з наступного рівняння:

$$-U_{Co} + \frac{I_n t_{\text{відновл.}}}{C_k} = 0$$

Таким чином комутаційна характеристика для розглянутої структури вузла комутації описується виразом:

$$t_{\text{відновл.}} = \frac{C_k U_{Co}}{I_n}$$

Графіки комутаційної характеристики наведені на рис. 4.26.

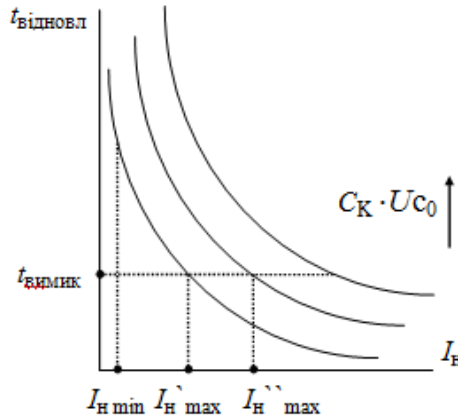


Рисунок 4.26 – Графіки комутаційної характеристики

Як видно з комутаційних характеристик, при малих струмах у навантаженні час перезарядження конденсатора, а отже $t_{\text{відновл.}}$ сильно зростає. Якщо частота комутації силового тиристора VS_c досить висока, комутуючий конденсатор не встигає перезаряджатися і вузол комутації не буде готовий до чергової комутації. У цьому випадку треба обмежувати мінімальний струм навантаження $I_{n \text{ min}}$.

Якщо струм $i_n > I_{n \text{ max}}$, час для відновлення вентильних властивостей тиристора VS_c є недостатнім ($t_{\text{відновл.}} < t_{\text{вимик.}}$). При цьому силовий тиристор повторно включається і подальша робота вузла комутації неможлива [60-65].

Отже, розглянутий вузол комутації може працювати в обмеженому діапазоні зміни струму навантаження $I_{\min} \dots I_{\max}$. За допомогою комутаційних характеристик розраховується необхідна ємність комутуючого конденсатора C_k . Цю ж ємність можна розрахувати аналітично, користуючись виразом:

$$C_k = \frac{t_{\text{відновл}} I_H}{U_{C0}}$$

Аналогічно можна одержати комутаційні характеристики для інших структур вузлів комутації.

Контрольні питання до розділу 4

1. У чому переваги імпульсного способу регулювання напруги ?
2. Охарактеризуйте ідеальний ключ.
3. Наведіть формулу для визначення середнього значення напруги на навантаженні при імпульсному способу регулювання.
4. Наведіть формулу для визначення діючого значення напруги на навантаженні при імпульсному способу регулювання.
5. Поясніть, що розуміється під частотно- та широтно-імпульсним способом регулювання вихідної напруги.
6. Що розуміється під терміном “регульовальна характеристика”?
7. Чому в імпульсних регуляторах не використовуються RC та C фільтри?
8. Для чого в імпульсних регуляторах встановлюється зворотній діод?
9. Від чого і як залежить середній струм навантаження імпульсного регулятора при RL навантаженні?
10. Дайте порівняльну характеристику режимам безперервного і переривчатого струму дроселя фільтру.
11. По якому закону змінюється струм в індуктивності LC фільтра в режимі безперервних струмів та ємності фільтра близької до нескінченності?
12. Дайте формулювання коефіцієнта пульсацій.
13. Наведіть регульовальну характеристику для схеми з ШПР і підвищеною вихідною напругою на ідеальних елементах.
14. Наведіть регульовальну характеристику для схеми на ідеальних елементах з ШПР і напругою що регулюється вище і нижче вхідної.
15. Наведіть регульовальну характеристику для схеми з ШПР і

підвищеною вихідною напругою з врахуванням опору живлення.

16. Які недоліки мають схеми з підвищеною вихідною напругою та напругою що регулюється вище і нижче вхідної.

17. Поясніть роботу реверсивного регулятора постійної напруги при першому алгоритмі керування.

18. Поясніть роботу реверсивного регулятора постійної напруги при другому алгоритмі керування.

19. Поясніть роботу реверсивного регулятора постійної напруги при третьому алгоритмі керування.

20. У чому переваги багатофазних імпульсних регуляторів?

21. Що дає підвищення результуючої частоти пульсацій у багатофазних імпульсних регуляторах?

22. За рахунок чого підвищується надійність роботи багатофазних імпульсних регуляторів?

23. Яка відмінність у керуванні транзистора і тиристора?

24. Поясніть термін “струм утримування”.

25. Поясніть різницю між природною і примусовою (штучною) комутацією тиристорів.

26. Дайте визначення паралельній комутації тиристорів.

27. Дайте визначення послідовній комутації тиристорів.

28. Порівняйте вузли з паралельною і послідовною комутацією по жорсткості навантажувальної характеристики, поясніть різницю.

29. У чому різниця між залежними і незалежними вузлами комутації ?

30. Чому в схемах з одноступінчатою комутацією можливе тільки частотно-імпульсне регулювання?

31. Поясніть, чому схема з одноступінчатою комутацією не працює при великих опорах навантаження?

32. Що дає введення в схему з одноступінчатою комутацією додаткового діоду ?

33. Для чого в схему з паралельною двоступінчатою комутацією введено діод VD1?

34. Поясніть, чому комутуючий конденсатор в схемі з послідовною двоступінчатою комутацією перезаряджається до напруги більшої чим U_d ?

35. Чому в схемі з послідовною двоступінчатою комутацією відсутні спотворення напруги на вході фільтру?

36. Який суттєвий недолік має схема з послідовною двоступінчатою комутацією?

37. Дайте пояснення терміну “комутаційна характеристика”.

РОЗДІЛ 5. ІНВЕРТОРИ

5.1 Загальні відомості

Залежно від типу використання інвертори сонячної електроенергетики можна розділити на три основні типи [65-70]:

– автономні (off grid) – інвертори, не під'єднанні до зовнішньої електричної мережі, призначені для автономних фотоелектричних систем;

– мережеві (on grid) – інвертори, ведені мережею, що працюють синхронно з централізованою мережею електропостачання. Крім своїх прямих функцій, такі пристрої забезпечують регулювання основних експлуатаційних параметрів мережі: частота напруги, амплітуда тощо. У разі збою живлення інвертор автоматично вимкнеться. Цей тип інверторів підходить для сонячних систем без акумуляторних батарей. Вся вироблена енергія генерується в загальну мережу за «зеленим тарифом»;

– гібридний (hybrid) – ще званий «акумуляторно-мережевий» перетворювач, який поєднує властивості автономних і мережевих пристроїв. Такий інвертор має велику кількість налаштувань для оптимізації роботи сонячної системи від загальної електричної мережі та за наявності акумуляторних батарей.

Для побудови інверторів застосовують ті самі вентильні схеми, що й для побудови випрямлячів. Тільки вентиля мають бути керованими.

5.2 Однофазні залежні інвертори

Інвертування - це процес перетворення постійного струму у змінний. Пристрої, що реалізують цей процес, названо інверторами. Інвертори бувають залежними (ведені мережею) і автономні. Якщо інвертор передає енергію з мережі постійного струму в мережу змінного, частота і напруга в якій вже задані роботою інших генераторів, то його названо залежним (веденим) [65].

На рис. 5.1 наведена схема однофазного інвертора, на якій зображено керований випрямляч, до вихідного кола якого підключено джерело U_d із вказаною полярністю.

При цьому пристрій може виконувати дві функції:

1. Керованого випрямляча, якщо кут керування задавати у межах

$$0 < \alpha < \pi/2;$$

2. Інвертора, веденого мережею, якщо кут керування задавати у межах

$$\pi/2 < \alpha < \pi.$$

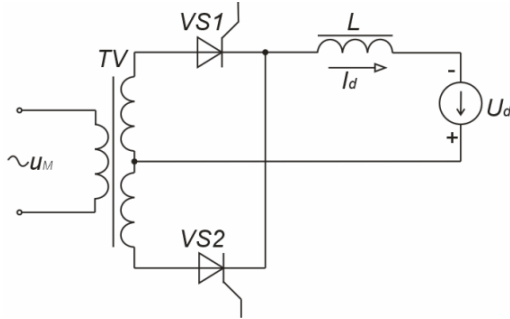


Рисунок 5.1 – Однофазний інвертор, ведений мережею

На рис. 5.2 зображені залежності напруги U_d від кута керування α та кута випередження: $\beta = \pi - \alpha$.

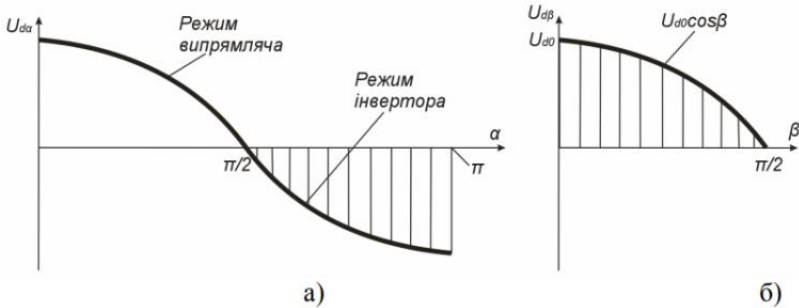


Рисунок 5.2 – Регульовальні характеристики інвертора, веденого мережею:

а – для режиму керованого випрямляча; б – для режиму інвертора

Характеристика $U_{ab} = f(\beta)$ свідчить, що при різних β напруга U_{ab} повинна бути меншою або дорівнювати за величиною U_{d0} :

$$U_{ab} \leq U_{d0}. \quad (5.1)$$

Інвертори, ведені мережею, використовуються у таких випадках:

1. Для плавного регулювання швидкості обертання двигунів (режим випрямляча);
2. Для регульованого гальмування двигунів (режим інвертора)

На рис. 5.3 зображена схема реверсивного перетворювача напруги, призначеного для регулювання швидкості обертання і реверсу (змін напрямку обертання) двигуна постійного струму

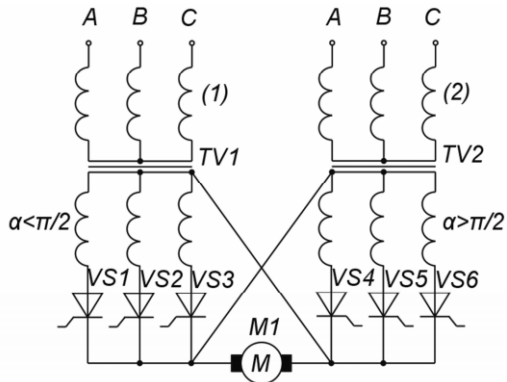


Рисунок 5.3 – Реверсивний перетворювач напруги

Коли ліва частина (1) схеми працює у режимі керованого випрямляча, а права (2) – у режимі інвертора, веденого мережею, двигун обертається в одному напрямку і можливе регулювання швидкості його обертання і прискорене його гальмування.

Коли ліва частина (1) працює у режимі інвертора, а права (2) – у режимі керованого випрямляча, напрямок обертання двигуна протилежний і також можливе регулювання швидкості обертання і прискорене гальмування.

Реверсивний перетворювач працює таким чином, що схема керування надсилає керуючі сигнали, наприклад, у частину (2), лише після припинення їх подачі у частину (1). Кут керування α задається так, щоб виконувати умову $U_{d\beta} = U_{d0}$.

Під час використання такого пристрою енергія двигуна в режимі гальмування не гаситься, як зазвичай, у спеціальних потужних резисторах, а віддається у мережу живлення – рекуперується.

Отже, коли пристрій працює в режимі інвертора, джерелом енергії є двигун, а споживачем (навантаженням) – мережа змінного струму [66].

5.3 Двопівперіодний залежний інвертор зі середньою точкою

Розглянемо роботу інверторів, що ведуться мережею, на прикладі однофазного інвертора з середньою точкою вторинної обмотки трансформатора, схема якого наведена на рис. 5.4. Між середньою точкою та катодами тиристорів включено джерело постійної е.р.с. E . Інвертор, який ведеться мережею, при кутах керування $\alpha \leq 90^\circ$ працює як випрямляч (рис. 5.5). При куті керування $\alpha = 90^\circ$ середнє значення випрямленої напруги дорівнює нулю.

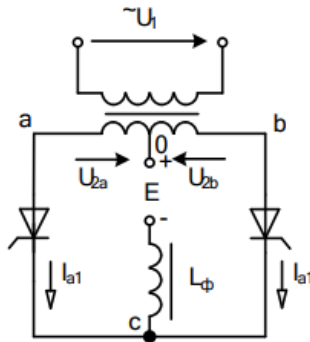


Рисунок 5.4 – Схема однофазного інвертора з середньою точкою

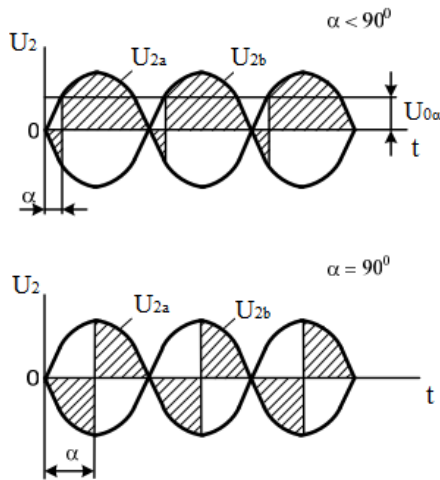


Рисунок 5.5 – Часові діаграми при роботі однофазного інвертора з кутами керування $\alpha \leq 90^\circ$

Для передачі енергії від джерела E до мережі живлення необхідно, щоб напруга U_1 і струм I_1 знаходились в протифазі (рис. 5.6).

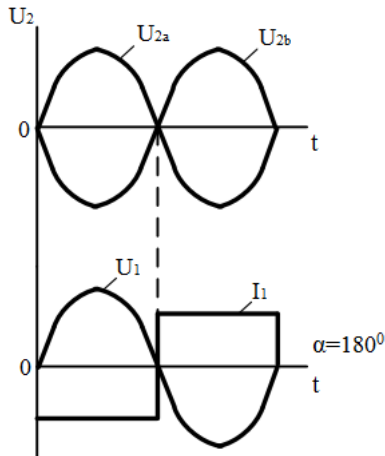


Рисунок 5.6 – Часові діаграми при роботі однофазного інвертора з кутами керування $\alpha = 180^0$

Подібний зсув фаз можливий, якщо тиристори по черзі будуть відкриватися при від'ємній полярності напруг U_{2a} і U_{2b} . При цьому буде почергове підключення вторинних обмоток трансформатора до джерела E . Слід урахувати той фактор, що при кутах керування $\alpha=180^0$, коли один тиристор закривається, а інший відкривається, можливий режим короткого замикання джерела E через вторинні обмотки трансформатора. Щоб виключити такий режим, необхідно зменшити кут керування α на кут випередження β . Тоді кут керування буде дорівнювати:

$$\alpha = 180^0 - \beta \quad (5.2)$$

Часові діаграми при роботі однофазного інвертора з кутами керування $\alpha < 180^0$ на кут випередження β наведені на рис. 5.4.

Відкриття та закриття тиристорів при роботі однофазного інвертора відбувається під дією напруги вторинної обмотки трансформатора, яка створюється мережею змінного струму. Тому такі інвертори називаються інверторами, які ведуться мережею.

Інвертори, які ведуться мережею, досить часто використовуються на електричному транспорті, де електричні машини постійного струму можуть працювати як у режимі двигуна, так і в режимі генератора.

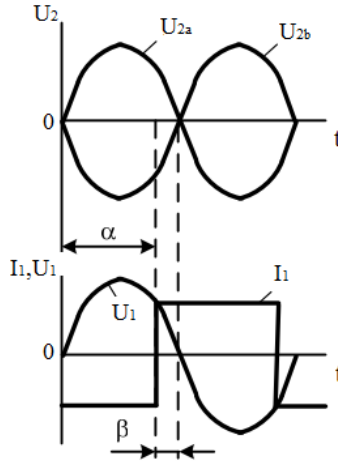


Рисунок 5.7 – Часові діаграми при роботі однофазного інвертора з кутами керування $\alpha < 180^0$ на кут випередження β

На рис. 5.8 наведено сімейство зовнішніх характеристик однофазного двопівперіодного інвертора при фіксованих значеннях кута випередження β [67].

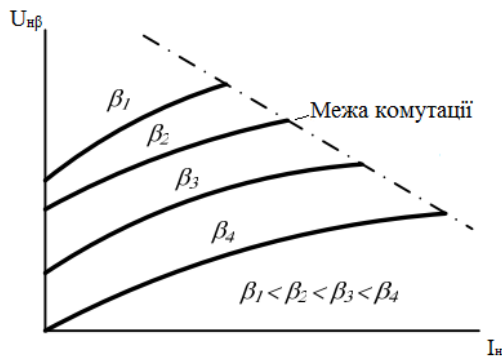


Рисунок 5.8 – Сімейство зовнішніх характеристик однофазного інвертора при фіксованих значеннях кута випередження β

5.4 Паралельні інвертори

Автономні інвертори – це пристрої, що перетворюють постійний струм на змінний із постійною чи регульованою частотою та мають

автономне навантаження. В автономних інверторах (АІ), на відміну від інверторів, ведених мережею, процес комутації ключів ніяким чином не пов'язаний із напругою мережі живлення. Тому АІ може працювати з навантаженням, у складі якого немає джерела змінної напруги.

Автономні інвертори (АІ) класифікуються за рядом ознак.

За видом вхідного струму або напруги АІ поділяються на:

- автономні інвертори струму (АІС).
- автономні інвертори напруги (АІН).
- резонансні (коливальні) автономні інвертори (РАІ).

За вентилями, що використовуються, АІ поділяються на:

– АІ на вентилях з неповним керуванням (звичайних тиристорів та симісторів);

– АІ на вентилях з повним керуванням (транзисторів і запираючих тиристорів).

За способом комутації АІ на незапираючих тиристорах поділяються на:

– АІ з одноступінчастою комутацією, в яких комутація здійснюється за допомогою комутуючих конденсаторів основними вентилями схеми без застосування додаткових тиристорів;

– АІ з двоступеневою комутацією, в яких для комутації застосовуються спеціальні комутуючі вентиля.

За місцем ввімкнення комутуючих конденсаторів АІ з одноступінчастою комутацією поділяються на:

– паралельні АІ (комутуючі конденсатори ввімкнені паралельно навантаженню);

– послідовні АІ (комутуючі конденсатори ввімкнені послідовно з навантаженням).

Автономний інвертор струму (АІС) формує в навантаженні струм, а форма напруги визначається параметрами навантаження. В схемі АІС використовуються як повністю керовані, так і напівкеровані ключі з однобічною провідністю. Комутація тиристорів, що не вимикаються за колом керування, здійснюється примусово з використанням попередньо зарядженого конденсатора як джерела зворотної напруги.

Особливості АІС:

1. Джерело постійного струму працює в режимі генератора струму. Для цього у вхідне коло АІС вмикається реактор (дросель) з достатньо великою індуктивністю L , що не дає змінюватись струму (струм на вході АІС незмінний). Окрім того, реактор виконує функції

фільтру вищих гармонік. При цьому функція ключів схеми – періодичне перемикання напрямку струму на виході.

2. Вихідне коло повинно допускати зміну струму стрибком, тобто мати властивості джерела напруги. Зазвичай це досягається підключенням до виходу АІС конденсатору, що дозволяє підключати до виходу активно-індуктивне навантаження.

Принцип роботи схеми:

На вході АІС діє джерело струму, утворене джерелом ЕРС і великою індуктивністю, форма струму на виході вентильної групи прямокутна, а форма напруги визначається характером навантаження (рис. 5.9, 5.10). Навантаження може бути тільки активним або активно-емнісним, тому що при активно-індуктивному навантаженні струм не може миттєво змінити напрям. При роботі схеми з активно-емнісним навантаженням у момент t_1 починають проводити тиристри V_1, V_2 ; в момент t_2 тиристри V_1, V_2 вимикаються, а тиристри V_3, V_4 вмикаються. Струм через навантаження змінює напрям. Під дією струму напруга на навантаженні змінюється по експоненті.

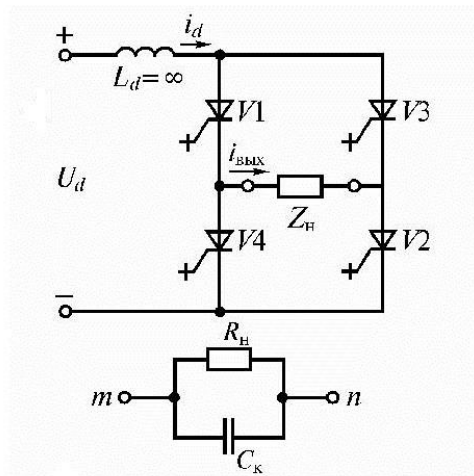


Рисунок 5.9 – Автономний інвертор струму

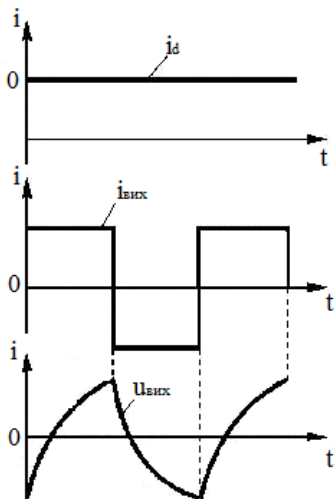


Рисунок 5.10 – Діаграми напруги та струму при роботі АІС

Розглянемо принцип роботи автономного інвертора струму на прикладі однофазного паралельного інвертора струму з середньою точкою, наведеного на рис. 5.11.

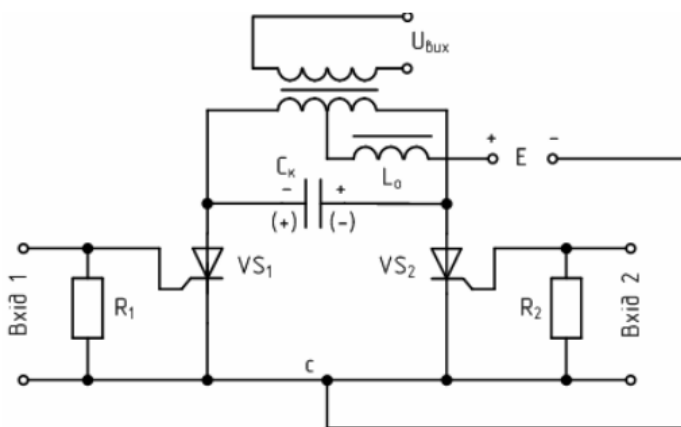


Рисунок 5.11 – Схема однофазного паралельного інвертора струму з середньою точкою

Часові діаграми, наведені на рис. 5.12, ілюструють роботу однофазного паралельного автономного інвертора струму з середньою точкою.

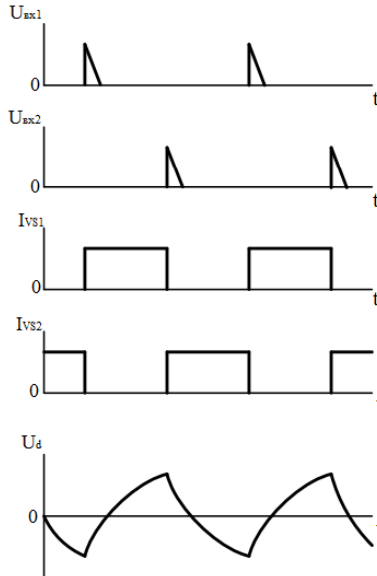


Рисунок 5.12 – Часові діаграми роботи однофазного паралельного автономного інвертора струму з середньою точкою

На керуючі електроди тиристорів VS1 та VS2 від системи керування (СК) поступають імпульси керування відповідної амплітуди й частоти з відносним зсувом фаз у 180° . До кола джерела живлення введено дросель L_0 із достатньо великою індуктивністю, завдяки чому вхідний струм I_d ідеально згладжений, а струм, що йде через тиристири, має прямокутну форму. При вмиканні, наприклад, тиристора VS1 у його анодному колі починає протікати струм, що визначається струмом заряду конденсатора C_k і струмом в одній половині обмотки трансформатора Tr . Унаслідок явища взаємодукції при проходженні зростаючого струму i_1 в одній половині обмотки трансформатора Tr – в іншій виникає така сама за величиною е.р.с. Конденсатор C_k до кінця півперіоду виявляється зарядженим до напруги u_c . При увімкненні тиристора VS2 утворюється коло для розрядження конденсатора C_k через тиристор VS1. Під дією розрядного струму конденсатора C_k , направлено назустріч анодному струму тиристора VS1, останній

замикається. Комутація струму відбувається практично миттєво, оскільки індуктивності розсіяння обмоток трансформатора – поза контуром комутації. Конденсатор C_k через тиристор VS2 починає розряджатися і набуває протилежної полярності. У результаті через вторинну обмотку трансформатора T_r проходить змінний струм. Слід зазначити, що при увімкненні наступного тиристора, одночасного з розрядженням конденсатора C_k по контуру двох відкритих тиристорів, відбувається також його розрядження на первинну обмотку трансформатора. При цьому частина енергії конденсатора переходить до енергії індуктивностей контуру, а частина розсіюється в його активних опорах.

При відмиканні тиристора VS1 весь процес повторюється. До тиристора, що вимикається, прикладається напруга конденсатора C_k , який перезаряджається і протягом часу твмк підтримує на тиристорі від'ємну напругу.

У режимі холостого ходу інвертор струму не може працювати внаслідок зростання амплітуди зворотних і прямих напруг на тиристорах, що є його суттєвим недоліком. При перевантаженнях робота АІС ускладнена через недостатність часу для відновлення замикаючих властивостей тиристорів. Інвертори струму мають близьку до синусоїдальної форму вихідної напруги та прямокутну форму вихідного струму, відносно малі пульсації вхідного струму. Зовнішня характеристика інвертора струму м'яка [68].

5.5 Послідовні інвертори струму

Загальний ємнісний характер навантаження може бути одержаний за допомогою ввімкнення комутуючого конденсатора послідовно з навантаженням. У цьому випадку інвертор називають послідовним (рис. 5.13). Формування змінної напруги на навантаженні здійснюється поперемінним відкриттям і закриттям за допомогою LC-кіл тиристорів VS1...VS4. При достатньо великій індуктивності вхідного дроселя L_d (або дроселів L у плечах тиристорів), яка забезпечує безперервний вхідний струм, послідовний інвертор можна використовувати в режимі інвертора струму.

Комутуючі дроселі L мають коефіцієнт зв'язку між обмотками w_1 і w_2 , рівний одиниці ($w_1=w_2$) і забезпечують комутацію через те, що початковий магнітний стан у дроселі тиристора, що закривається, визначається значенням струму, який протікає в цей момент у тиристорі, що закривається, з цієї причини в момент відкриття тиристора через нього зразу ж починає протікати струм, який дорівнює

струму в тиристорі, що закривається. Надійне закриття відбувається під дією комутуючих дроселів (наприклад, при зростанні струму в тиристорі VS4 дросель тиристора VS1 забезпечує запираючий позитивний потенціал на його аноді).

Послідовний інвертор струму за своїми властивостями протилежний паралельному: у паралельному інверторі комутація порушується при перевантаженнях, а у послідовному при малих навантаженнях [65-70].

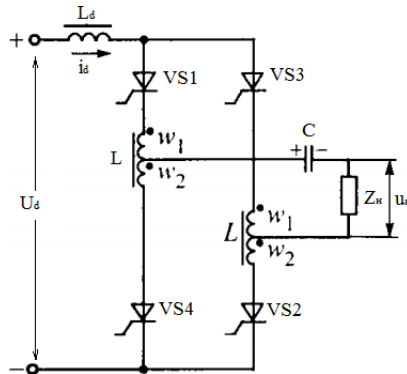


Рисунок 5.13 – Схема послідовного інвертора струму

5.6 Послідовно – паралельні інвертори струму

У послідовно – паралельному інверторі струму (рис. 5.14) комутуючі конденсатори C_1 і C_2 ввімкнені як послідовно, так і паралельно з навантаженням.

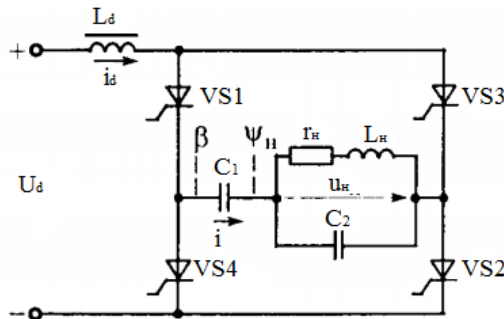


Рисунок 5.14 – Схема послідовно-паралельного інвертора струму

У режимах холостого ходу та короткого замикання послідовно-паралельний інвертор перетворюється в паралельний. При цьому як значне зростання навантаження, так і його значне зменшення призводить до зростання кута β , а при деякому проміжному значенні навантаження кут β виявляється мінімальним. У цьому велика перевага послідовно-паралельного інвертора перед паралельним, тому що вибираючи відповідним чином параметри навантаження можна добитися, щоб мінімальний кут β був достатній для відновлення запірних властивостей тиристорів, і забезпечити працездатність інвертора в широкому діапазоні зміни навантаження.

На рис. 5.15 наведені часові діаграми однофазного послідовно-паралельного інвертора струму з синусоїдною кривою вихідної напруги.

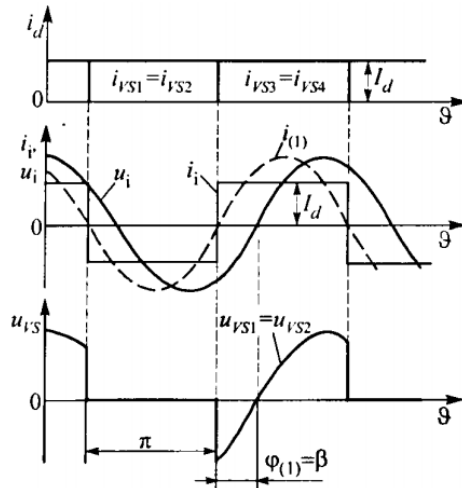


Рисунок 5.15 – Часові діаграми однофазного послідовно-паралельного інвертора струму [4]

5.7 Резонансні інвертори

Резонансний автономний інвертор (РАІ) - це інвертор, на вході і на виході вентиляційної групи якого струм преривчастий, а форма напруги на виході визначається навантаженням. У цих інверторах періодичний характер електромагнітних процесів в навантаженні обумовлений коливальними властивостями LC-контура інвертора. При цьому можливі три варіанти композиції LC-контуру і навантаження [70]:

1. послідовне включення навантаження в послідовний LC-контур - послідовні резонансні інвертори;
 2. паралельне підключення навантаження до L або C частини LC-контура;
 3. підключення навантаження паралельно до частини C контуру.
- Ці три види підключення навантаження визначають три види резонансних інверторів:
1. паралельний;
 2. послідовно-паралельний;
 3. послідовний.

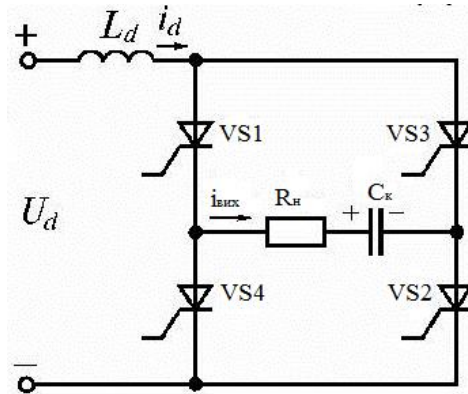


Рисунок 5.16 – Схема резонансного автономного інвертора струму

У РАІ повинна виконуватися умова:

$$R_H < 2 \sqrt{\frac{L_d}{C_k}} \quad (5.3)$$

При виконанні даної умови процеси при включенні тиристорів носять коливальний характер. При включенні VS1 і VS2 проходить півхвиля струму і конденсатор C_k заряджається з вказаною полярністю. Після переходу струму через нуль тиристор запирається. При включенні VS3 і VS4 напруга джерела і напруга на конденсаторі C_k діють узгоджено, струм проходить в протилежному напрямку, конденсатор перезаряджається VS3 і VS4 закриваються при спаді струму до нуля. Напруга на навантаженні R_H повторює форму струму.

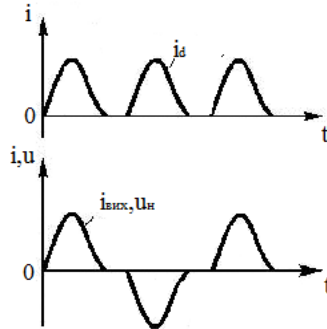


Рисунок 5.17 – Діаграми напруги та струму при роботі РАІ

Послідовний інвертор з відкритим входом без зворотних діодів (рис. 5.18). Принцип роботи даного інвертора полягає в наступному. При подачі керуючого сигналу на тиристор $VS1$ останній відкривається і конденсатор C починає заряджатися від джерела постійної напруги таким чином, що його верхня (по схемі) обкладка отримує позитивний потенціал. Наступний на півперіод відкривається тиристор $VS2$ і конденсатор C розряджається через коло R_H , L_2 . Таким чином, через навантаження протікає змінний струм.

Параметри елементів схеми зазвичай підбираються таким чином, щоб струм тиристора протягом всього між комутаційного проміжку змінювався по коливальному закону, тобто, в момент комутації напруга на дроселі була б більше напруги джерела живлення ($U_L > U_d$). Якщо дана нерівність не буде виконуватися, то при відкриванні чергового тиристора струм тиристора, що проходив раніше не закриється і джерело живлення виявиться замкнутим на коротко. Зазначена нерівність має зберегтися протягом деякого часу, достатнього для відновлення керованості тиристорів.

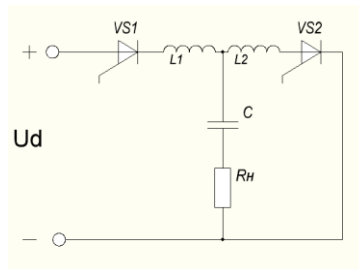


Рисунок 5.18 – Схема послідовного інвертора з відкритим входом без зворотних діодів [6]

5.8 Інвертори напруги

Однофазні автономні інвертори напруги. Роботу автономного інвертора напруги розглянемо на прикладі однофазного мостового інвертора напруги. Схема такого інвертора напруги наведена на рис. 5.19. Як видно, вона цілком подібна до схеми імпульсного перетворювача постійної напруги. Інвертор на рис. 5.19 реалізований на двоопераційних тиристорах, хоча замість них можуть бути одноопераційні тиристори, силові польові, біполярні або IGBT-транзистори. У разі використання одноопераційних тиристорів потрібні спеціальні схеми штучної комутації для закривання тиристорів у будь-який потрібний момент.

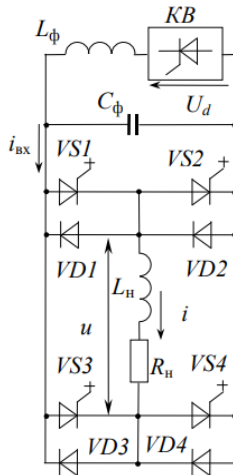


Рисунок 5.19 – Схема однофазного мостового інвертора напруги

Діаграми напруг та струмів при активному навантаженні наведені на рис. 5.20.

Живиться інвертор від джерела постійної напруги, наприклад від керованого випрямляча KB. Дросель L_ϕ призначений для згладжування коливань випрямленого струму та забезпечення його безперервного характеру.

Завдяки перемицанню діагоналей інвертора до навантаження подається напруга від джерела постійної напруги з тим чи іншим знаком. Напруга та струм на виході інвертора знакозмінні та синфазні. Частота вихідної напруги дорівнює частоті перемицання ключів. Струм через зворотні діоди не тече. Струм на вході інвертора незмінний у часі.

Енергія протягом усього періоду вихідної напруги передається лише в одному напрямку: від джерела живлення через АН до навантаження.

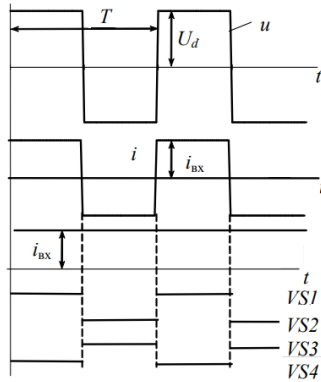


Рисунок 5.20 – Діаграми напруги та струмів однофазного мостового інвертора напруги

Щоб змінити частоту вихідної напруги, достатньо змінити частоту перемикання ключів, не змінюючи послідовності цього перемикання. Оскільки інвертор змінити свою вихідну напругу за такого алгоритму керування не може, регулювання амплітуди вихідної напруги здійснюється за допомогою керованого випрямляча КВ.

Процеси в АН при індуктивному навантаженні наведені на рис. 5.21.

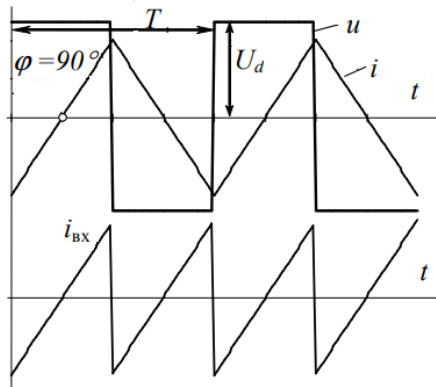


Рисунок 5.21 – Діаграми напруг та струмів при індуктивному навантаженні

Якщо навантаження тільки індуктивне, вихідний та вхідний струми мають кусково-лінійний характер, причому середнє значення вхідного струму дорівнює нулю, оскільки вся енергія, спожита інвертором при роботі тиристора, віддається назад до конденсатора, коли відкритий діод. Тривалість роботи тиристорів та діодів однакова.

Якщо навантаження активно-індуктивне, процеси в інверторі описуються рівнянням:

$$u = iR_n + L_n \frac{di}{dt}, \quad (5.4)$$

а вихідний струм має кусково-експоненціальний характер (рис. 5.22).

Хоча кожний із тиристорів, як і раніше, отримує керуючі імпульси впродовж півперіоду, тривалість їх роботи менша. Одразу після закривання однієї пари тиристорів і подачі імпульсів до іншої, струм навантаження спочатку тече через зворотні діоди за рахунок енергії, накопиченої на попередньому інтервалі в індуктивності, і лише після зміни свого знаку переходить на зустрічно-паралельні їм тиристори. Фазовий зсув струму відносно напруги дорівнює 90° . Вхідний струм при цьому короткочасно стає негативним, однак його середнє значення більше від нуля.

Це означає, що хоча потік енергії і змінює періодично напрям, але в середньому за період інвертор споживає електричну енергію, яка витрачається у вигляді тепла в активному опорі навантаження. Тривалість відкритого стану керованих ключів за RL-навантаження завжди більша, ніж діодів.

Якщо інвертор живиться від неререверсивного випрямляча, зміна напрямку вхідного струму можлива завдяки наявності конденсатора Сф. Крім накопичення енергії, переданої від навантаження, конденсатор виконує також функцію згладжування коливань вихідної напруги випрямляча.

Однофазний автономний інвертор напруги може працювати на проти-ЕРС. Розглянемо роботу однофазного автономного інвертора напруги з амплітудною модуляцією, навантаженням якого є фазна обмотка статора двигуна змінного струму (рис. 5.23). Під час обертання ротора двигуна в обмотці статора виникає синусоїдна проти-ЕРС. На рис. 5.23 позначені напрямки струмів та проти-ЕРС.

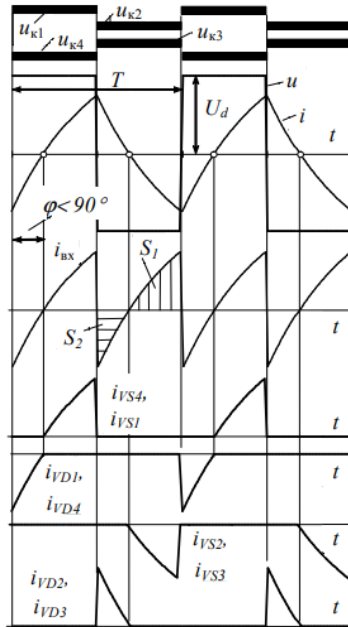


Рисунок 5.22 – Діаграми напруг та струмів при активно-індуктивному навантаженні

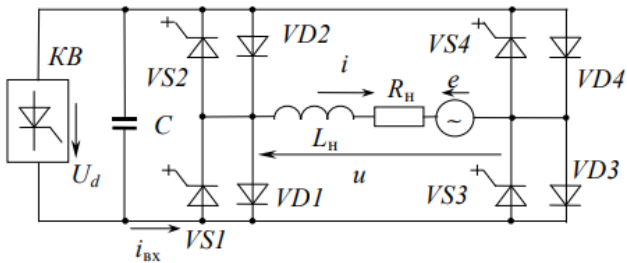


Рисунок 5.23 – Схема однофазного автономного інвертора напруги при роботі на проти-ЕРС

Часові та векторна діаграми при роботі однофазного автономного інвертора напруги на проти-ЕРС наведені на рис. 5.24.

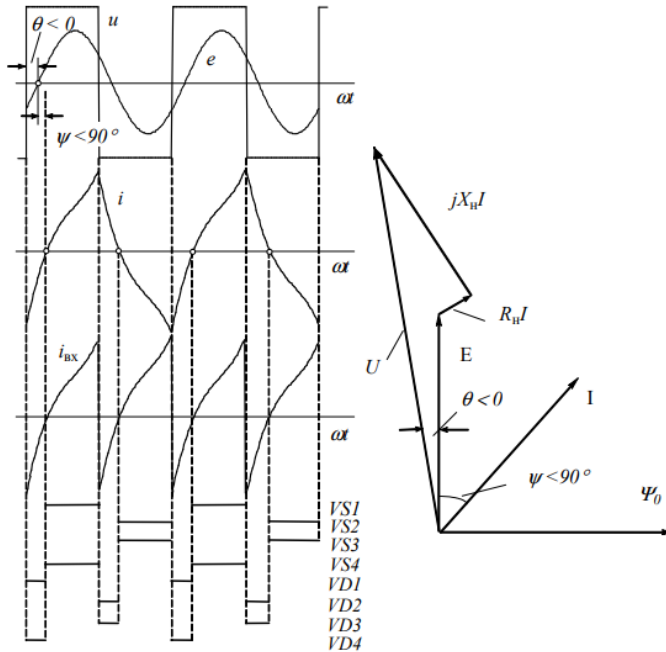


Рисунок 5.24 – Часові та векторна діаграми при роботі однофазного автономного інвертора напруги на проти-ЕРС у режимі двигуна

Режим роботи інвертора суттєво залежить від фази θ . Коли електрична машина працює у режимі двигуна, проти-ЕРС статора запізнюється відносно вихідної напруги АІН на кут θ (векторна діаграма на рис. 5.24). Тому одразу після чергової комутації проти-ЕРС завжди направлена згідно з напругою інвертора та назустріч струмові. Це сприяє швидшому зменшенню останнього, ніж при активно-індуктивному навантаженні. Діоди закриваються раніше, а протягом більшої частини періоду вихідної напруги відкриті тиристори АІН.

Струм статора при цьому відстає від проти-ЕРС на кут $\psi < 90^\circ$. Середнє значення випрямленого струму збігається за знаком із випрямляча напругою. Енергія споживається інвертором від випрямляча навіть за відсутності активного опору навантаження.

Якщо електрична машина переходить до режиму ідеального холостого ходу, кут між проти-ЕРС та напругою АІН наближається до нуля тим ближче, чим менший активний опір обмотки статора. Проти-ЕРС протягом усього періоду направлена назустріч напрузі АІН. Тому,

викривлюючи форму вихідного струму, вона не зсуватиме його відносно напруги.

У разі відсутності у двигуні втрат на гістерезис струм статора синфазний із головним потоком ψ_0 і запізнюється відносно проти-ЕРС на кут $\psi=90^\circ$ (рис. 5.25). Це означає, що джерело проти-ЕРС не споживає активної енергії від АІН (протягом однієї половини кожного періоду вихідної напруги повертається та сама кількість енергії, яка споживається протягом другої). Про це також свідчить те, що середнє значення споживаного інвертором струму $I_{вх} = 0$, а тривалості відкритого стану тиристорів та діодів однакові (рис. 5.25).

При роботі машини змінного струму в рекуперативному режимі проти-ЕРС випереджує напругу. Тому на момент комутації напруга на виході інвертора та проти-ЕРС направлені зустрічно.

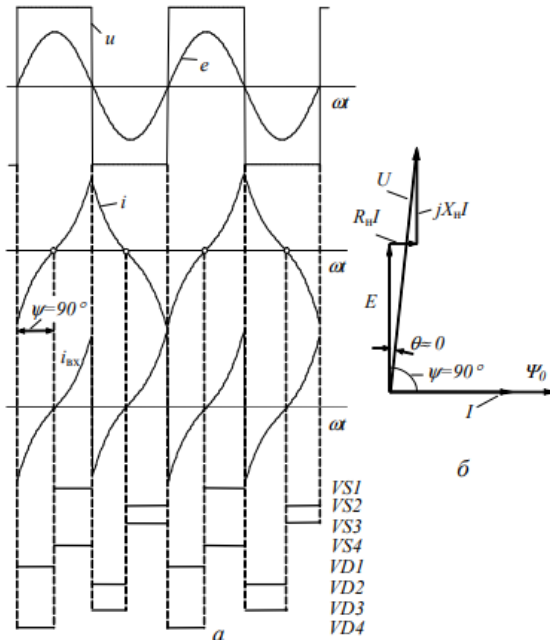


Рисунок 5.25 – Часові та векторна діаграми при роботі однофазного автономного інвертора напруги на проти-ЕРС у режимі холостого ходу [3]

Контрольні питання до розділу 5

1. Опишіть принцип дії інвертора.
2. Які види інверторів ви знаєте?
3. Які особливості функціонування інверторів?
4. З яких елементів складається інвертор?
5. Які характеристики інверторів відображені на часових діаграмах?

РОЗДІЛ 6. СПОСОБИ РЕГУЛЮВАННЯ ТА ПОЛІПШЕННЯ ЯКОСТІ ВИХІДНОЇ НАПРУГИ ІНВЕРТОРІВ

6.1 Способи регулювання напруги перетворювачів зі змінною вихідною напругою

Регулювання вихідної напруги (її діючого, середнього значення чи амплітуди першої гармоніки – залежно від вимог) або стабілізацію цієї напруги при зміні параметрів навантаження інвертора або напруги живлення можна проводити такими способами:

- регулюванням напруги постійного струму на вході інвертора;
- регулюванням напруги змінного струму на виході інвертора;
- регулюванням параметрів власне інвертора;
- широтно-імпульсним регулюванням за допомогою вентилів інвертора;
- фазовим регулюванням шляхом додавання напруг двох або декількох інверторів.

Регулювання напруги на вході інвертора

Регулювання напруги постійного струму на вході інвертора можна здійснити за допомогою керованого випрямляча, що живить інвертор, або імпульсним регулятором постійної напруги чи вольтододаючим пристроєм, що включаються на вході інвертора.

При глибокому регулюванні вихідної напруги керованого випрямляча значно знижується коефіцієнт потужності з боку мережі живлення, і для згладжування пульсацій необхідно мати фільтр з великим коефіцієнтом фільтрації, що погіршує масогабаритні та динамічні показники перетворювача.

Імпульсний регулятор постійної напруги застосовується, коли первинне джерело живлення є нерегулюємим (акумуляторна батарея, некерований випрямляч).

Застосування імпульсного регулятора має ряд переваг:

- робоча частота імпульсного регулятора може бути обрана вище, ніж частота першої гармоніки випрямленої напруги при живленні випрямляча від мережі (це може помітно знизити габарити згладжуючого фільтра та покращити швидкодію системи);
- імпульсний регулятор може виконувати функції швидкодіючого вимикача при перенавантаженнях та зривах інвертування;
- коефіцієнт потужності перетворювача з боку мережі живлення значно поліпшується (при наявності некерованого випрямляча).

Недоліком імпульсного регулятора є те, що він повинен бути розрахований на повну потужність навантаження. Якщо діапазон зміни вихідної напруги малий, то можна застосувати вольтододаючий пристрій (рис. 6.1, а), що включається послідовно з нерегульованим джерелом живлення U_d . Вольтододаючий пристрій являє собою автономний інвертор $I2$, що працює на випрямляч B . Вихідну напругу вольтододаючого пристрою можна регулювати за допомогою або керованого випрямляча B , включеного на виході інвертора $I2$ (часові діаграми - рис.6.1, б), або широтно-імпульсним регулюванням напруги самого інвертора $I2$ (часові діаграми – рис. 6.1, в). В останньому випадку випрямляч B є некерованим. В будь-якому разі, напруга що подається на вхід згладжуючого фільтра ($VD2, L, C$) являє собою суму напруги U_d первинного джерела живлення та імпульсної напруги u_e амплітудою U_{e0} , вольтододаючого пристрою.

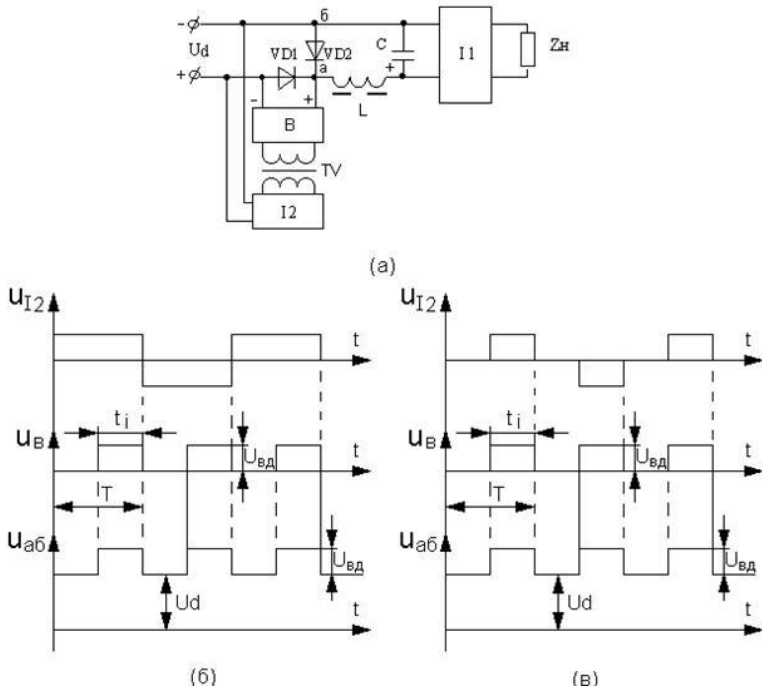


Рисунок 6.1 – Схема та часові діаграми інвертора: а) – схема з вольтододаючим пристроєм; б) – діаграми вихідної напруги, регульованої

за допомогою керованого випрямляча В; в) - діаграми вихідної напруги з широтно-імпульсним регулюванням за допомогою інвертора І2.

Середнє значення напруги U'_d на вході фільтра, тобто між точками *аб*, може бути визначене слідуючим чином:

$$U'_d = U_d + U_{e\delta} \cdot \gamma, \quad (6.1)$$

де $\gamma = t_i/T$ – коефіцієнт заповнення імпульсів на виході випрямляча В.

Таким чином, змінюючи γ в межах від 0 до 1, можна регулювати середнє значення U'_d напруги на вході основного інвертора І1 від U_d до $U_d + U_{e\delta}$.

Напруга на вторинній обмотці трансформатора інвертора І2 розраховується, виходячи з діапазону регулювання вихідної напруги основного інвертора І1.

Встановлена потужність вольтододаючого пристрою є незначною у випадку невеликого діапазону регулювання вихідної напруги.

Діод *VD1* створює прямий шлях для живлення інвертора І1 від джерела U_d , а керований випрямляч В працює тільки в режимі додавання напруги. Якщо застосовується некерований випрямляч, то діод *VD1* відсутній.

Якщо основний інвертор виконаний на повністю керованих вентилях, то вадою всіх способів регулювання напруги на вході інвертора є ускладнена робота деяких схем примусової комутації тиристорів при широкодіапазонному керуванні напруги.

Регулювання напруги на виході інвертора

Регулювання напруги змінного струму на виході інвертора може здійснюватися регулятором змінної напруги з природньою чи штучною комутацією, які були розглянуті у першому розділі. Цьому способу регулювання властиві всі недоліки регуляторів змінної напруги.

Регулятор змінної напруги можна виконати і на повністю керованих ключах змінного струму, що значно розширює можливості регулювання. На рис.6.2 показані два таких ключі, виконані на основі біполярних транзисторів. Незавжно побачити, що при відкритих транзисторах у схемах на рис.6.2, а або рис.6.2, б забезпечується протікання струму в будь-якому напрямку між клемми 1 та 2, а при закритих транзисторах протікання струму неможливе.

На рис.6.2, а наведено приклад побудови регулятора змінної напруги на ключах змінного струму *K1*, *K2* підключеного на вихід інвертора І1.

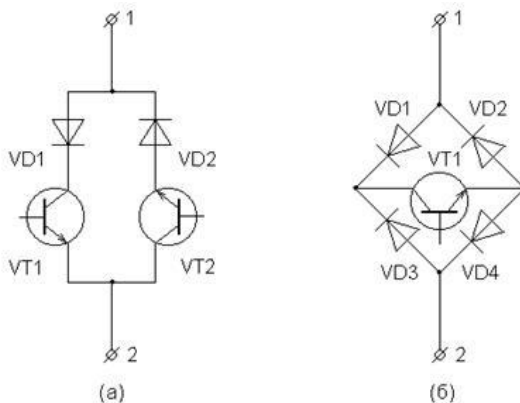


Рисунок 6.2 – а), б) – ключі з двостороннюю провідністю, виконані на основі біполярних транзисторів

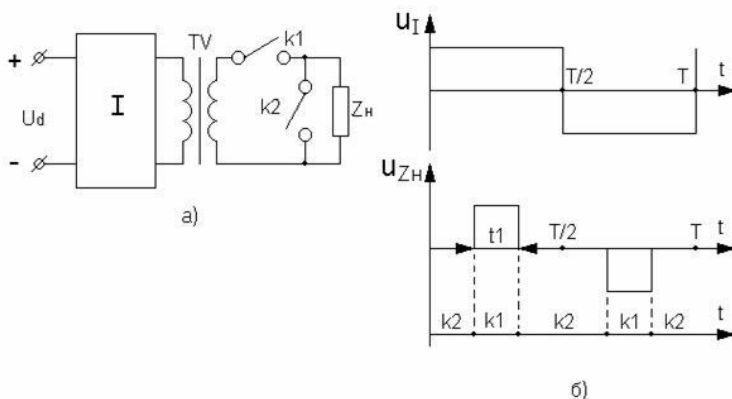


Рисунок 6.3 – а) - приклад побудови регулятора змінної напруги на ключах змінного струму $K1, K2$ підключеного на вихід інвертора I ; б) - діаграми напруг регулятора

Регулювання вихідної напруги інвертора I здійснюється зміною тривалості t_1 (рис.6.3, б) провідного стану ключа $K1$. Ключ $K2$ потрібен для забезпечення безперервного протікання струму, коли навантаження Z_n має активно-індуктивний характер.

Регулювання напруги на виході інвертора можливе також зміною коефіцієнта трансформації вихідного трансформатора за допомогою ключів змінного струму (рис. 6.4).

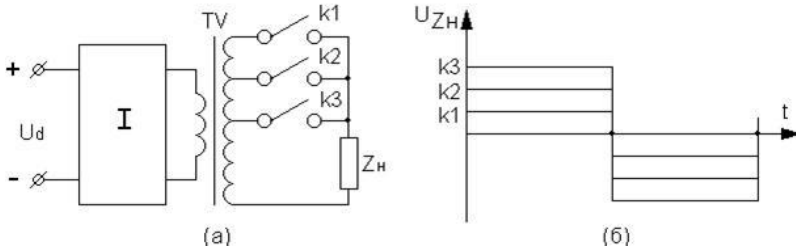


Рисунок 6.4 – а) – схема з ключами змінного струму; б) – діаграми вихідної напруги

Більш докладні відомості про варіанти побудови силових схем таких регуляторів, їх переваги та недоліки будуть розглянуті у наступних розділах.

Регулювання напруги зміною параметрів інвертора

Регулювання напруги на виході інвертора може бути здійснено в інверторах струму шляхом зміни параметрів самого інвертора. Як відомо, вихідна напруга паралельного інвертора струму залежить від значення величин активної та реактивної потужностей, що споживаються від інвертора, тобто від $\cos\varphi_n$. Цю залежність можна використовувати для регулювання вихідної напруги при $U_d = const$, або його стабілізації при $U_d = var$ за допомогою керованого зворотнього випрямляча, або регулятора реактивної потужності (рис.6.5, рис.6.6).

Регулювання вихідної напруги у схемі зі зворотнім керованим випрямлячем (VS5 - VS8) (рис.6.5) виконується шляхом зміни кута регулювання a , що призводить до зміни споживання еквівалентних активної та реактивної потужностей в колі змінного струму. Дроселі L_e в колі випрямлювача забезпечують режим безперервного струму при $a \neq 0$. Недоліком розглянутого способу регулювання вихідної напруги інвертора є велика встановлена потужність основних елементів інвертора, бо при розвантаженні інвертора струм через тиристри зворотнього випрямлювача значно збільшується.

Регулювання вихідної напруги за допомогою регулятора реактивної потужності, що складається з тиристорів VS5, VS6 та дроселя L (рис.6.6), включених паралельно навантаженню, полягає в тому, що змінюється кут зсуву фаз β , між струмом, що інвертується, та вихідною напругою інвертора при зміні величини еквівалентної індуктивності, яку введено паралельно навантаженню. Величину еквівалентної індуктивності можна змінювати, якщо регулювати кут вмикання тиристорів VS5 та VS6. Параметри елементів регулятора

(дроселя L та тиристорів) визначаються максимальною реактивною потужністю, яку регулятор повинен споживати від інвертора. Максимальна реактивна потужність споживається при мінімальному куті регулювання а тиристорів $VS5$ та $VS6$.

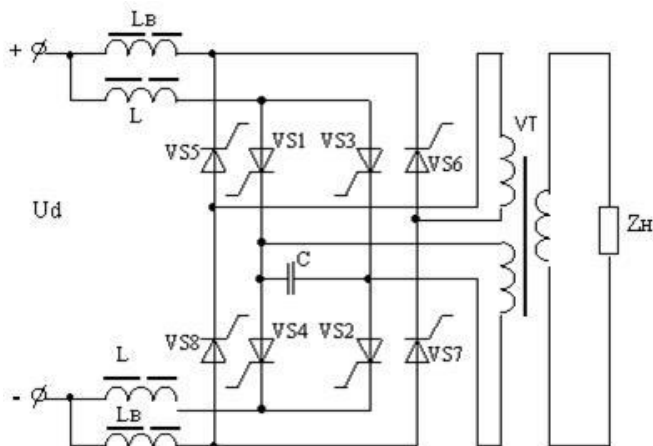


Рисунок 6.5 – Схема зі зворотнім керуванням випрямлячем

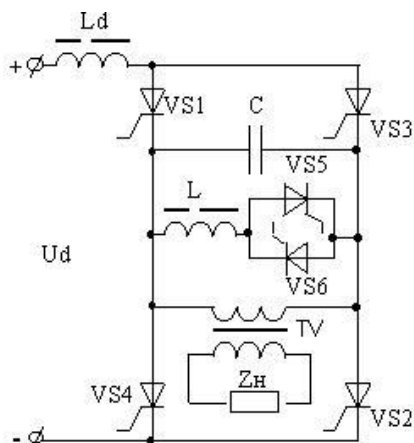


Рисунок 6.6 – Схема з регулятором реактивної потужності.

Розглянутий метод регулювання доцільно застосовувати для регулювання вихідної напруги в невеликих межах або для стабілізації напруги, оскільки регулятор має велику встановлену потужність.

6.2 Широтно-імпульсне регулювання

При широтно-імпульсному способі регулювання вихідної напруги функції інвертування та регулювання суміщені в одній силовій частині. Такий спосіб регулювання вихідної напруги дозволяє зменшити габарити та масу всього перетворювача. Суть способу полягає в тому, що в процесі роботи інвертора можна змінювати тривалість імпульсу напруги на навантаженні і тим самим змінювати величину напруги. Широтно-імпульсний спосіб регулювання найбільш доцільно застосовувати в інверторах напруги.

Розглянемо наданий спосіб більш докладно на прикладі однофазного мостового інвертора (рис. 6.7).

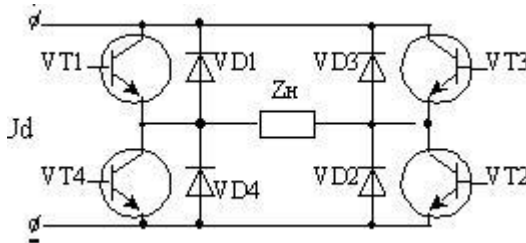


Рисунок 6.7 – Однофазний мостовий інвертор.

Можливі два основних алгоритми керування транзисторами.

1. Зсув моментів вмикання або вимикання протифазних транзисторів та одночасному перемиканні діагонально розміщених транзисторів.

При цьому способі керування (рис.6.8, а) після вимикання, наприклад, транзисторів $VT1$ та $VT2$ в напрузі на навантаженні з'являється після додатнього імпульсу – від'ємний імпульс, тривалість якого залежить від сталої часу кола навантаження τ_H . Це відбувається тому, що струм навантаження за рахунок електрорушійної сили (ЕРС) самоіндукції після вимикання транзисторів $VT1$ та $VT2$ деякий час зберігає свій напрямок і замикається через зворотні діоди $VD3$ та $VD4$. При цьому до навантаження прикладається напруга джерела живлення зі зворотною полярністю. Після спаду струму навантаження до нуля (момент часу ϱ_2) напруга на навантаженні дорівнює нулю. В момент часу π вмикаються вентиля $VT3$, $VT4$ і напруга на навантаженні знову стає від'ємною.

При збільшенні параметра навантаження k кут λ_{VD} збільшується і коли він буде дорівнювати θ , настає режим безперервного струму (рис.6.8, б). Напряга на навантаженні в цьому режимі має вигляд прямокутних імпульсів тривалістю π та полярністю, що чергується. Широтно-імпульсне регулювання вихідної напруги в цьому режимі стає неможливим. В цьому режимі струм та напруга визначаються тими ж виразами, що і для однофазного мостового інвертора без регулювання вихідної напруги.

2. При другому способі керування форма вихідної напруги визначається тільки кутом регулювання і не залежить від параметрів навантаження (рис.8.9, в). Це відбувається тому, що навантаження, наприклад, при вимиканні транзистора VT_2 , виявляється закороченим в інтервалі θ транзистором VT_1 і зворотним діодом VD_3 (в другий півперіод при вимиканні транзистора VT_3 транзистором VT_4 та зворотним діодом VD_2).

Як показано на часових діаграмах (рис.8.9, в), транзистори і зворотні діоди у процесі роботи схеми навантажені неоднаково. Миттєве значення струму на інтервалах $0 < \vartheta < \pi - \theta$ та $\pi - \theta < \vartheta < \pi$.

Основні характеристики кола навантаження, кола джерела постійної напруги, а також приладів, які входять в інвертор, доцільно визначити в залежності від значень параметра кола навантаження k та кута λ , що визначають тривалість прямокутного імпульсу напруги на навантаженні в межах від 0 до максимального значення, рівного π .

Глибоке регулювання напруги при живленні динамічного активно-індуктивного навантаження зазначеним способом недоцільне, оскільки при такому регулюванні зростає кількість вищих гармонік у вихідній напрузі. Гармонічний склад вихідної напруги не залежить від параметрів навантаження, а визначається тільки тривалістю імпульсу напруги $\lambda = \pi - \theta$. При значному зменшенні λ гармонічний склад помітно гіршає, бо зменшується величина першої гармоніки.

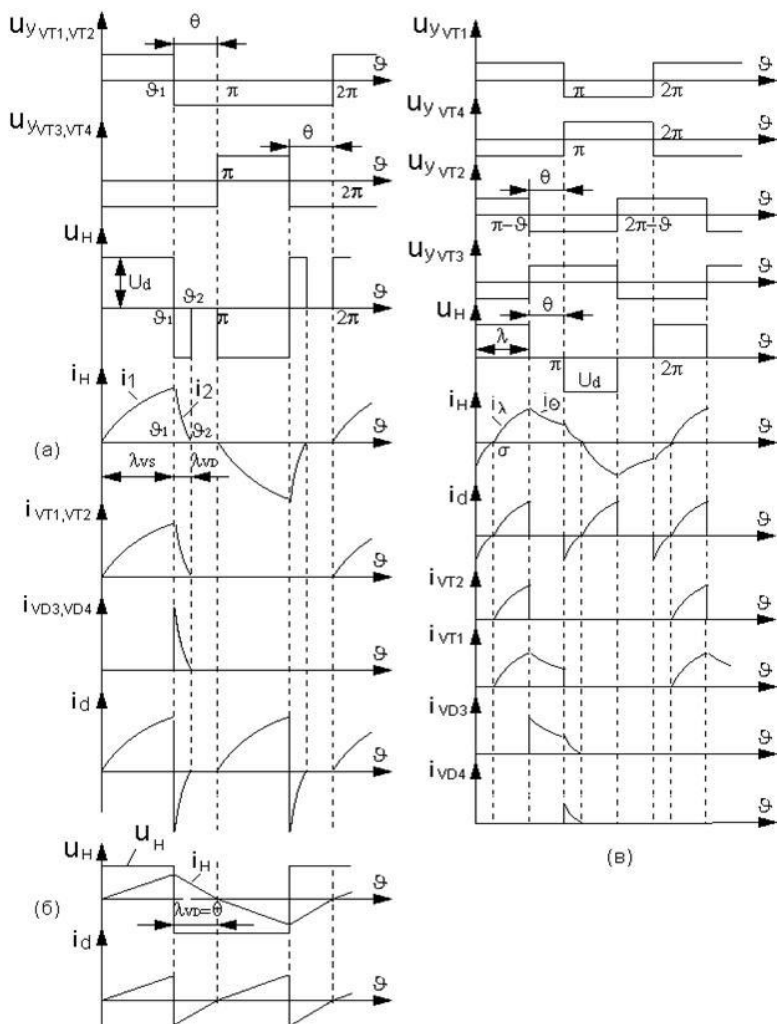


Рисунок 6.8 – Методи широтно-імпульсного регулювання транзисторами:
 а) – часові діаграми регулювання з зсувом моментів вмикання або вимикання протифазних транзисторів; б) - режим безперервного струму; в) – метод керування, при якому форма вихідної напруги визначається тільки кутом регулювання і не залежить від параметрів навантаження.

В інверторі з нульовим виводом та в півмостовому інверторі можливий тільки перший спосіб регулювання вихідної напруги з вище розглянутими недоліками. Пояснюється це тим, що у згаданих інверторах без допоміжних заходів неможливо створити коло замкнення навантаження активно-індуктивного характеру у той час, коли обидва транзистора інвертора вимкнені. Це буде призводити до спотворення форми вихідної напруги як і в мостовому інверторі при першому способі регулювання. На рис.6.9,а наведено приклад побудови інвертора з нульовим виводом, у якому за допомогою ключа змінного струму $K1$ забезпечується замкнення кола навантаження на інтервалі, коли обидва транзистори інвертора $VT1$ та $VT2$ вимкнені. Часові діаграми роботи інвертора представлені на рис.6.9, б і по колу навантаження співпадають з роботою мостового інвертора при другому способі регулювання.

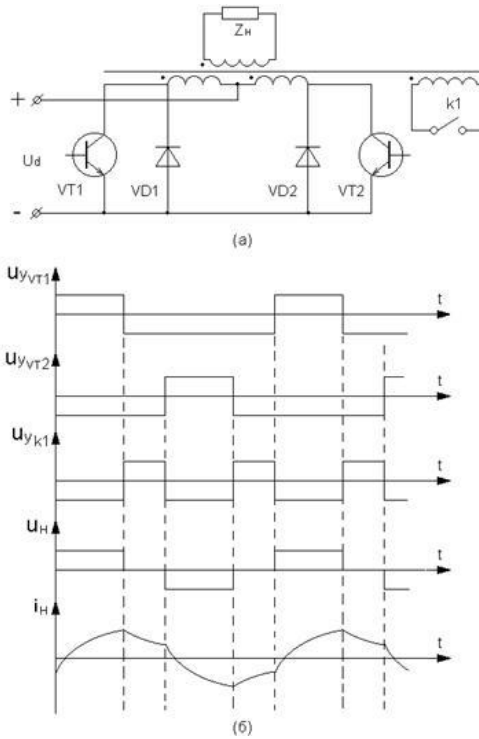


Рисунок 6.9 – а) – схема регульованого інвертора з нульовим виводом;
б) - часові діаграми роботи інвертора.

6.3 Регулювання шляхом підсумовування напруг декількох інверторів

Регулювання напруги на навантаженні може бути виконано шляхом підсумовування напруг декількох інверторів, вихідні обмотки силових трансформаторів яких з'єднані послідовно, а фаза імпульсів керування напруги одного інвертора змінюється відносно іншого.

На рис.6.10, а приведено схему перетворювача, складеного з двох однофазних мостових інверторів, і алгоритм перемикання транзисторів та часові діаграми струмів та напруг (рис.6.10, б). Треба зазначити, що якщо трансформатори однакові, то значення цих формул треба домножити на $2n$, де n -коефіцієнт трансформації. Якщо між джерелом живлення та навантаженням допускається гальванічний зв'язок, то замість двох роз'єднуючих трансформаторів може застосовуватися один. Розглянутий спосіб регулювання вихідної напруги використовується в перетворювачах з фіксованою частотою. При регулюванні вихідної частоти в широких межах цей спосіб недоцільний, тому що вихідні трансформатори розраховуються на найнижчу вихідну частоту, і їх типова потужність велика. Тому якщо кожний з інверторів буде формувати на вихідній обмотці імпульс напруги тривалістю $\lambda = 2\pi/3$ та ці імпульси будуть зсуватися відносно один одного на кут θ , то в струмі кривої напруги на навантаженні буде відсутня третя гармоніка в усьому діапазоні зміни кута θ .

На рис.6.11 приведений алгоритм перемикання керованих транзисторів та форми вихідної напруги перетворювача для різних кутів регулювання (коефіцієнт трансформації трансформаторів $n = 1$).

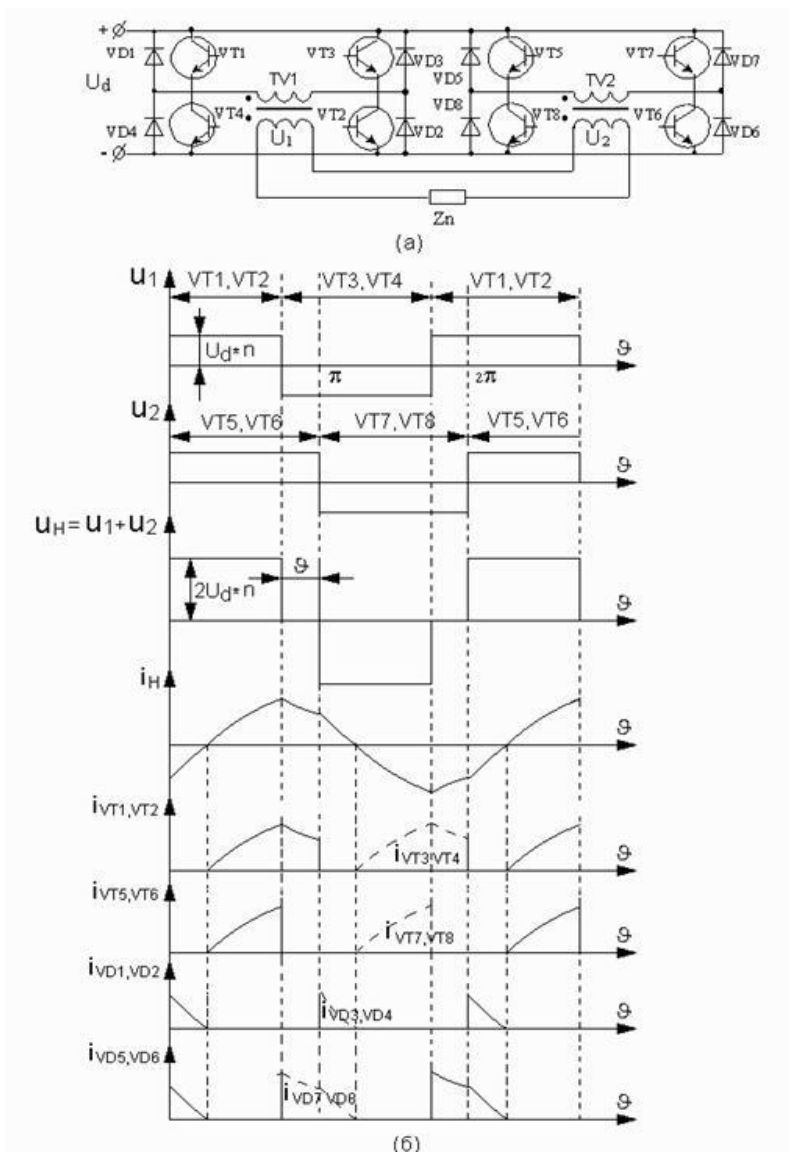


Рисунок 6.10 – а) - схема перетворювача, складеного з двох однофазних мостових інверторів; б) - алгоритм перемикування транзисторів та часові діаграми струмів та напруг.

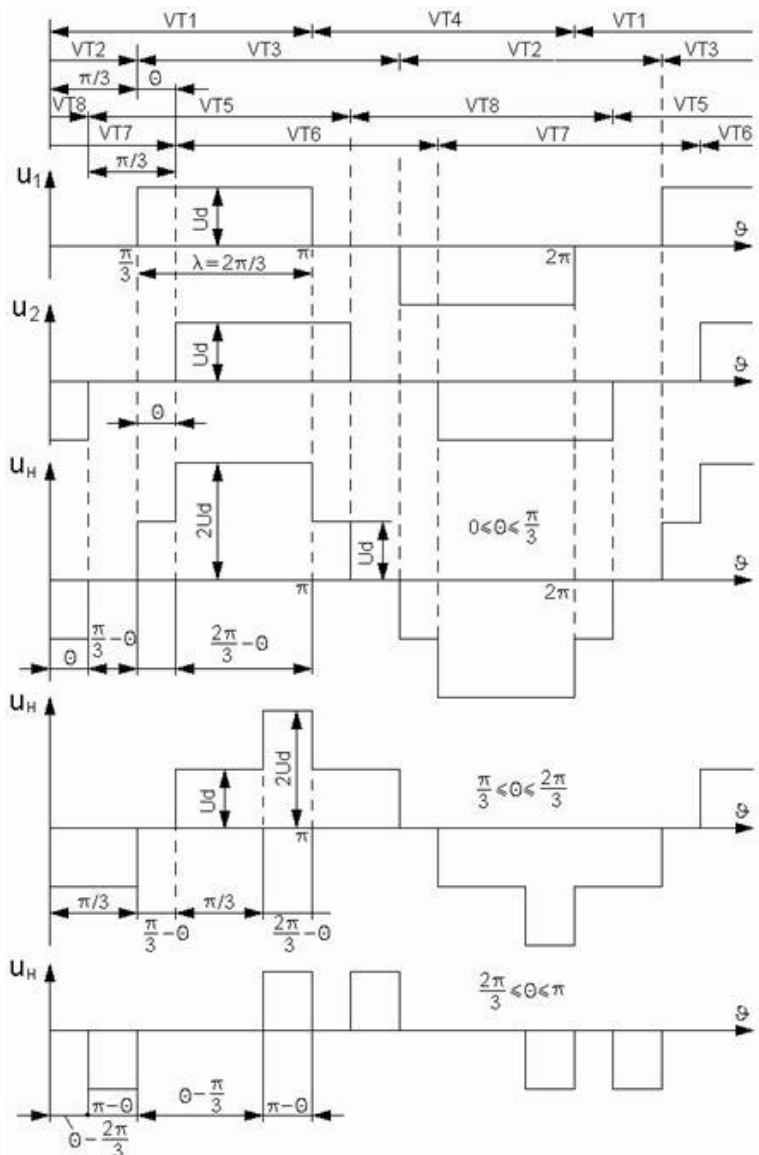


Рисунок 6.11 – Алгоритм перемикання транзисторів та форми вихідної напруги перетворювача для різних кутів регулювання

6.4 Спосіб підсилення

Класифікація способів формування кривої вихідної напруги наведена на рис.6.12.

Як бачимо, у найпростішому випадку, синусоїдальна вихідна напруга може бути одержана способом підсилення за допомогою лінійного підсилювача потужності.

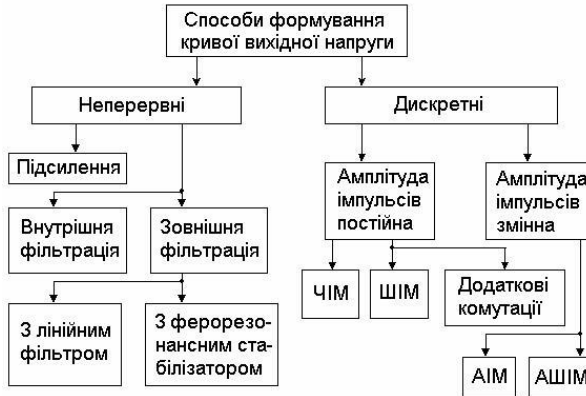


Рисунок 6.12 – Класифікація способів формування кривої вихідної напруги.

На рис.6.13 показано діаграму одного напівперіоду вихідної напруги підсилювача класу В.

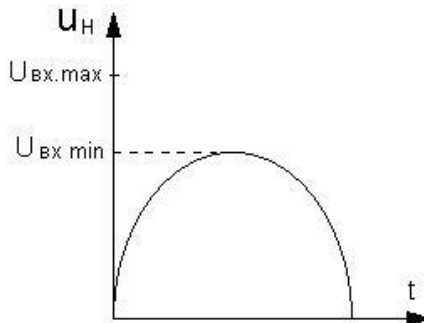


Рисунок 6.13 – Діаграма напівперіоду вихідної напруги підсилювача класу В.

Потужність на навантаженні може бути визначена таким чином

$$P_H = U_H I_H = \frac{U_{ск. min}}{\sqrt{2}} \frac{I_{H m}}{\sqrt{2}} = \frac{U_{ск. min} I_H}{2}$$

де U_H , I_H – діючі значення напруги та струму навантаження; $I_{H m}$ – амплітудне значення струму навантаження, $U_{ск. min}$ – мінімальне значення вхідної напруги живлення.

Потужність, що споживається підсилювачем при максимальній вхідній нарузі

$$P_{ск. max} = U_{ск. max} I_{H.сер} = \frac{U_{ск. max}}{\pi} \int_0^{\pi} I_{Hm} \sin \vartheta d\vartheta = \frac{2}{\pi} U_{ск. max} I_{Hm}$$

де $U_{ск. max}$ – максимальне значення вхідної напруги живлення, $I_{H.сер}$ – середнє значення струму навантаження.

Коефіцієнт корисної дії підсилювача

$$\eta = \frac{P_H}{P_{ск. max}} = (\pi / 4) \frac{U_{ск. min}}{U_{ск. max}}$$

Навіть при $U_{ск. min} = U_{ск. max}$ теоретично досяжний *ККД* буде складати 78%, а при необхідності регулювання вихідної напруги, наприклад, в 2 рази, *ККД* складатиме всього 39%, тобто в силових транзисторах розсіюється більше 60% потужності, що споживається. У зв'язку з цим, застосування перетворювальних пристроїв на основі лінійних підсилювачів обмежено малою потужністю та вузьким діапазоном зміни вихідної напруги.

6.5 Покращення форми вихідної напруги способом фільтрації

Для одержання значного *ККД* в широкому діапазоні зміни вхідних або вихідних напруг в перетворювальній техніці переважно використовується ключовий режим роботи напівпровідникових пристроїв, при яких вихідна напруга має, як правило, прямокутну форму. Одним з найбільш простих способів поліпшення такої напруги є використання зовнішньої або внутрішньої фільтрації вихідної напруги.

Внутрішня фільтрація може здійснюватися в послідовних і паралельних інверторах струму та резонансних інверторах. В послідовних інверторах конденсатор та дросель, які необхідні для здійснення комутації, забезпечують також і фільтрацію. У випадку, якщо потужність послідовного коливного контуру в резонансному інверторі велика відносно потужності навантаження, а величина і

характер навантаження змінюється незначно, форма кривої вихідної напруги близька до синусоїдальної.

Паралельні резонансні інвертори та інвертори струму також здійснюють внутрішню фільтрацію. У випадку, коли ємність конденсатора комутації велика, вона разом із дроселем в колі джерела постійного струму може здійснювати фільтрацію, що забезпечує одержання напруги, близької до синусоїдальної форми. В цьому випадку інвертор має відносно велику потужність коливального контуру.

В інверторах напруги синусоїдальність вихідної напруги забезпечується за допомогою зовнішньої фільтрації з використанням лінійного або нелінійного фільтрів. На рис.6.14 представлені деякі з можливих схем лінійних фільтрів. Паралельний елемент фільтра звичайно збільшує загальний струм навантаження інвертора. Послідовний елемент збільшує втрати вихідної напруги від струму навантаження, який проходить крізь нього [65-70].

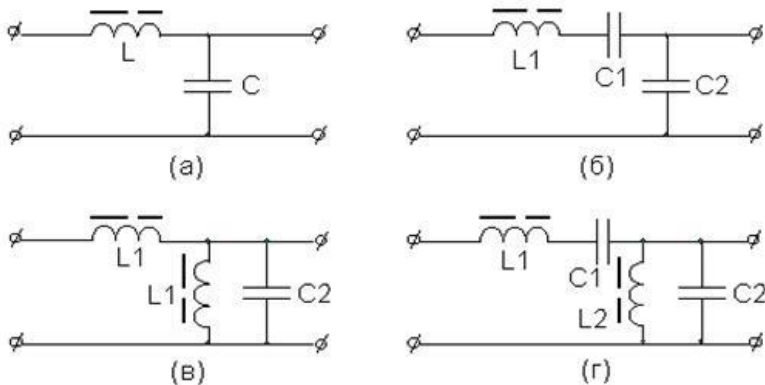


Рисунок 6.14 – Схеми лінійних фільтрів:

- а) – простий LC-фільтр; б) - фільтр з послідовним резонансним контуром; в) - фільтр з паралельним резонансним контуром); г) -полосовий фільтр

Основним недоліком простих LC-фільтрів (рис.6.14, а) є падіння напруги на дроселі та підвищення навантаження інвертора через струм конденсатора.

Резонансні контури в послідовному та паралельному елементах дозволяють частково компенсувати зазначені недоліки. Наприклад, послідовний контур $L1C1$ (рис.6.14, б), налаштований в резонанс на

основну гармоніку, зводить до мінімуму падіння напруги від струму основної гармоніки. Паралельний резонансний контур (рис.6.14, в), який має великий опір для струму основної гармоніки та малий для вищих гармонік, служить для зменшення додаткового навантаження на основній гармоніці. Дослідження фільтрів показує, що найкращими фільтруючими властивостями володіє полосовий фільтр (рис.6.14, г), що передає в навантаження першу гармоніку струму практично без послаблення та максимально послаблює вищі гармоніки. Обидві ланки фільтра налаштовуються на першу гармоніку вихідної напруги.

Загальним недоліком розглянутих фільтрів є велика встановлена потужність елементів фільтру, а, отже, габарити та маса, що зростають при зменшенні коефіцієнта гармонік.

Наявність фільтра впливає на форму вихідної напруги, яка залежить від величини та характеру навантаження. В інверторах, частота вихідної напруги в яких регулюється, необхідно перелаштовувати фільтри зі зміною частоти, що робить практично неможливим її оперативне регулювання. Крім того, в колі інвертор-навантаження можуть з'являтися ферорезонансні або автоколивальні процеси. При живленні від інвертора синхронного або асинхронного двигуна може виникнути явище конденсаторного самозбудження, що виявляється у вигляді сталих автоколивань або "застрявання" двигуна на швидкості, не відповідній частоті вихідної напруги інвертора.

Аналіз процесів в фільтрі рис.6.14, г виконаємо, нехтуючи активними втратами в елементах фільтра та вважаючи характеристики елементів лінійними.

Незважаючи на відносну простоту, застосування метода фільтрації обмежено рядом причин: можливість виникнення паразитних коливань при динамічних навантаженнях, нестабільність форми кривої вихідної напруги при зміні характеру навантаження, незадовільні масо-габаритні характеристики фільтрів при низьких та інфранизьких вихідних частотах, необхідність переналадження фільтрів (особливо вміщуючих резонансні контури) при зміні частоти у широких межах.

Усунути або в значній мірі послабити зазначені недоліки дозволяють модуляційні методи формування квазісинусоїдальної напруги.

6.6 Формування квазісинусоїдальної напруги способом амплітудно-імпульсної модуляції

Суть способу *АІМ* полягає в тому, що квазісинусоїдальна напруга являє собою набір імпульсів у загальному випадку з різною тривалістю та дискретно модульованою амплітудою. В силовій перетворювальній техніці ця задача переважно має на меті синтезування напруги заданої (квазісинусоїдальної) форми з окремих імпульсів. Тому цей процес найчастіше визначають як дискретний синтез напруги, який відрізняється від модуляції тим, що модулюючий сигнал в чистому вигляді відсутній, а амплітуда кожного окремого імпульсу встановленої тривалості незмінна. В наведеному випадку алгоритм роботи ключових елементів задає система управління i , в зв'язку з цим, еквівалентом модулюючого сигналу є функція побудови, яка зв'язана з необхідним законом формування кривої напруги. Як функцію побудови, що охоплює практично доцільні варіанти наближення синтезуємої напруги до синусоїдальної, найбільш часто використовують трапецію та синусоїду.

Найбільше розповсюдження у перетворювальній техніці одержали різновиди *АІМ* у вигляді імпульсної послідовності з однаковою тривалістю імпульсів τ_i та пауз між ними τ_n (рис.6.15, а) та у вигляді східчастої кривої, коли $\tau_n = 0$ (рис.6.15, б).

Формування східчастої напруги, яка апроксимує синусоїду, може здійснюватися різними методами.

Найчастіше використовуються методи підсумовування напруг:

- на секціях обмоток вихідного силового трансформатора (перетворювачі з підсумовуванням в загальному вузлі),
- на вторинних послідовно з'єднаних обмотках силових трансформаторів окремих інверторів, які формують напругу типу меандр, або імпульсну змінну напругу з паузою на нулі (перетворювачі з підсумовуванням в загальному контурі),
- окремих, гальванічно роз'єднаних джерел живлення.

Залежно від вимог до якості квазісинусоїдальної напруги, можуть реалізовуватися різноманітні закони *АІМ*. Розглянемо основні види амплітудно-імпульсної модуляції, які застосовуються у перетворювальній техніці.

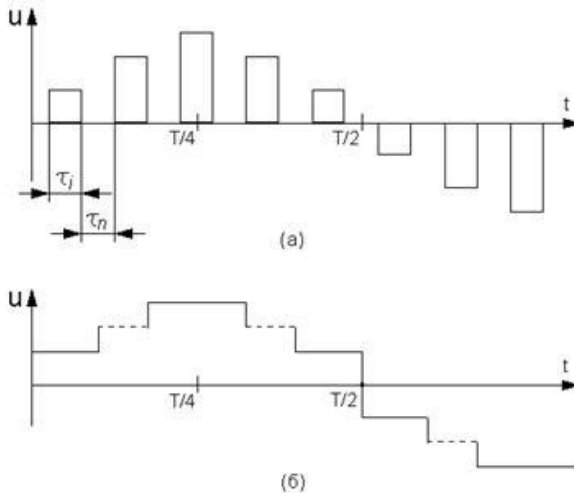


Рисунок 6.15 – а) - АІМ у вигляді імпульсної послідовності з однаковою тривалістю імпульсів τ_i та пауз між ними τ_n ; б) - АІМ у вигляді східчастої кривої, коли $\tau_n = 0$.

Трапецеїдальна АІМ є однією з найпростіших з точки зору технічної реалізації, використання якої найбільш доцільне в перетворювачах з підсумовуванням в загальному контурі. Трапецеїдальної АІМ можна досягнути при додаванні N напруг типу меандр, взаємно зсунутих одна відносно одної на кут $\varphi = 2\pi/3N$. При цьому формується сумарна напруга u_{Σ} з числом рівнів $N_p = N/2$, що апроксимує рівнобоку трапецію, тривалість плоскої вершини якої дорівнює половині напівперіоду.

На рис.6.16, а представлений приклад формування трапецеїдальної АІМ при підсумовуванні чотирьох напруг $u_1 \div u_4$.

Якщо кожна з підсумованих напруг буде мати паузу на нульовому рівні (рис.6.16, б) тривалістю $\varphi/2$, то число рівнів подвоюється, тобто буде дорівнювати N .

При збільшенні числа підсумованих напруг та, отже, числа інтервалів i K_{Γ} вихідної напруги наближається до 4,64% (відповідає K_{Γ} трапеції, у якої тривалість плоскої вершини дорівнює половині півперіоду).

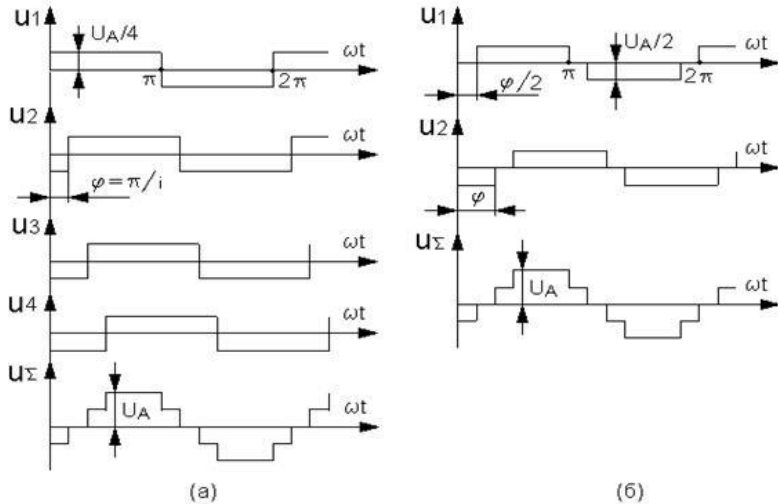


Рисунок 6.16 – а) - приклад формування трапецеїдальної *AIM* при підсумовуванні чотирьох напруг u_1, u_4 ;
 б) - приклад формування трапецеїдальної *AIM* при підсумовуванні двох напруг $u_1 \div u_2$ з паузою на нульовому рівні кожної з них

В напругах одержаних способом трапецеїдальної *AIM* відсутні парні гармоніки та гармоніки кратні трьом. Так, найближча до першої гармоніки буде п'ята гармоніка. При $i = 12 \dots 18$ K_T сформованих напруг буде відповідно 8-6%, що дозволяє без додаткової фільтрації використовувати їх для живлення великого класу навантажень.

Синусоїдальна *AIM*. Якщо для формування східчастої напруги використовується синусоїдальна функція побудови, то в загальному випадку для одержання мінімального коефіцієнта гармонік можуть варіюватися не тільки амплітуди східців, але й кути появи сходинок. Така *AIM* в наслідок нерівності та некратності кутів східців важко реалізується та практично недоцільна внаслідок того, що коефіцієнт гармонік при цьому незначно зменшується у порівнянні з коефіцієнтом гармонік з однаковою тривалістю східців (рівномірною *AIM*). Крім того, згідно з дослідженнями у частотному спектрі з'являються вищі гармоніки всіх номерів, починаючи з третьої, що призводить до погіршення гармонійного складу в низькочастотному діапазоні.

Основні способи формування рівномірної синусоїдальної *AIM* представлені на рис.6.18. При цьому число інтервалів поділу за

півперіод синусоїдальної функції побудови може бути як парним (рис.6.17, а, в) так і непарним (рис.6.17, б, г). Розрізняють два способи одержання рівномірної синусоїдальної АІМ. При першому способі на початку кожного інтервалу знаходять значення синусоїдальної функції побудови, яке і визначає значення відповідного східця напруги з АІМ (рис.6.17, а, б).

При другому способі, амплітуда кожного східця визначається як середнє арифметичне значення функцій побудови, взятих на початку та кінці кожного інтервалу (рис.6.17, в, г).

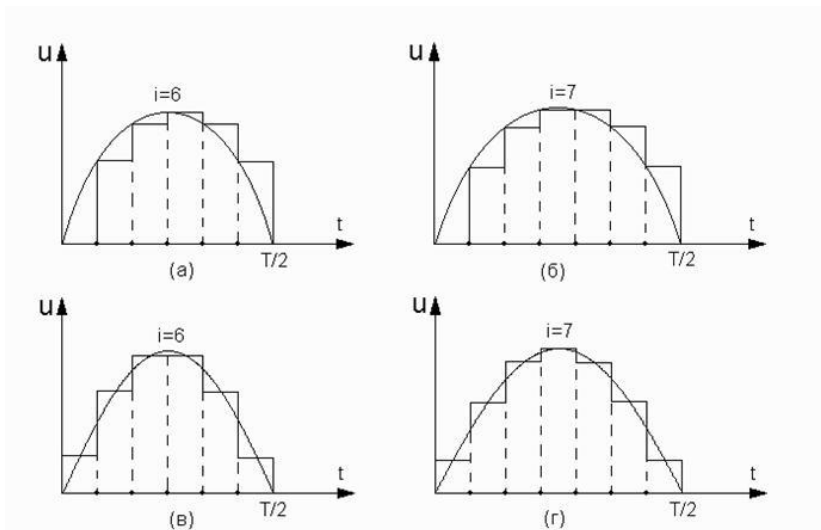


Рисунок 6.17 – Основні способи формування рівномірної синусоїдальної АІМ:

- а), в) - з парним числом інтервалів поділу за півперіод синусоїдальної функції побудови;
- б), г) - з непарним числом інтервалів поділу за півперіод синусоїдальної функції побудови.

Перевага розглянутої рівномірної синусоїдальної АІМ порівняно з трапецеїдальною полягає у повному виключенні масиву вищих гармонік нижчого порядку, що дозволяє використовувати *LC*-фільтри з малими габаритами та масою.

6.7 Формування квазісинусоїдальної напруги методом ШІМ та АШІМ

Формування квазісинусоїдальної напруги методом класичної широтно-імпульсної модуляції ґрунтується на зміні по визначеному закону тривалості імпульсів незмінної амплітуди і періоду. ШІМ класифікують по: полярності, тактності, числу фронтів, що модулюються та роду.

В залежності від того, змінюється чи ні на півперіоді модулюючої функції $f(t)$ полярність імпульсів, які слідуєть з частотою ω , розрізняють двополярну (рис.6.18,а) та одно полярну (рис.6.18, б) модуляцію.

Якщо зміні полярності модулюючої функції $f(t)$ відповідає зміна полярності модулюємих імпульсів, то така модуляція називається двотактною (рис.6.18, б). У випадку однократної модуляції полярність імпульсів не змінюється (рис.6.18, в).

В залежності від зміни положення фронтів імпульсів ШІМ поділяють на односторонню (коли один фронт імпульсів співпадає з тактовими інтервалами) та двосторонню (коли обидва фронти імпульсів що модулюються змінюють своє положення у відповідності зі значенням модулюючої функції).

Рід ШІМ залежить від методу формування тривалості імпульсів. При ШІМ першого роду тривалість імпульсів задається пропорційно значенням модулюючої функції, взятими у наперед відомі тактові моменти часу (рис.6.19,а).

При ШІМ другого роду тривалість імпульсів пропорційна значенню модулюючої функції в момент закінчення імпульсу (рис. 6.19, б). Також відомі ШІМ інших родів.

ШІМ також характеризується глибиною модуляції μ :

$$\mu = t_{\max} / T,$$

де t_{\max} – максимальна тривалість імпульсу яка досягається на півперіоді модулюючої функції; T – період слідування імпульсів з ШІМ.

Для ШІМ другого роду глибина модуляції може бути визначена також як відношення амплітуди модулюючої функції C до амплітудного значення B пилкоподібної функції, тобто: $\mu = C/B$.

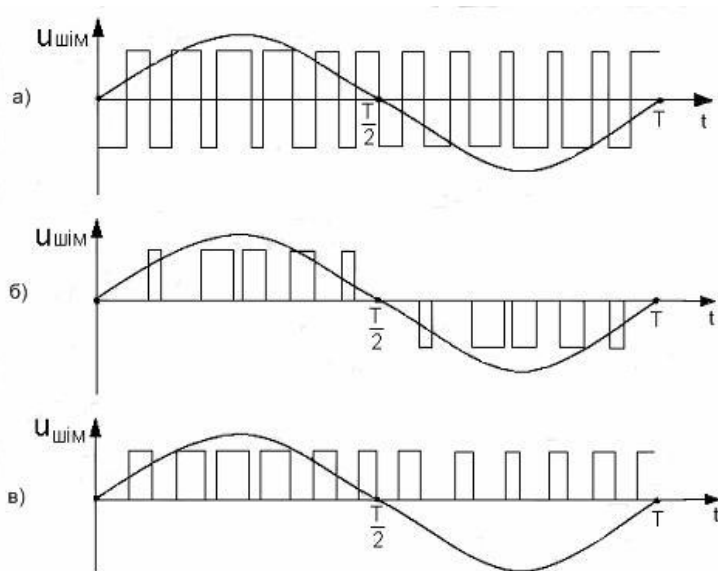


Рисунок 6.18 – Види напруг з ШІМ:

- а) - з двополярною модуляцією; б) - з однополярною модуляцією;
в) - з однотоктною модуляцією

Основною вимогою, що ставиться до квазісинусоїдальної напруги, отриманої методом ШІМ, є подавлення гармонік близьких до основної, що відповідає мінімальному коефіцієнту гармонік по струму.

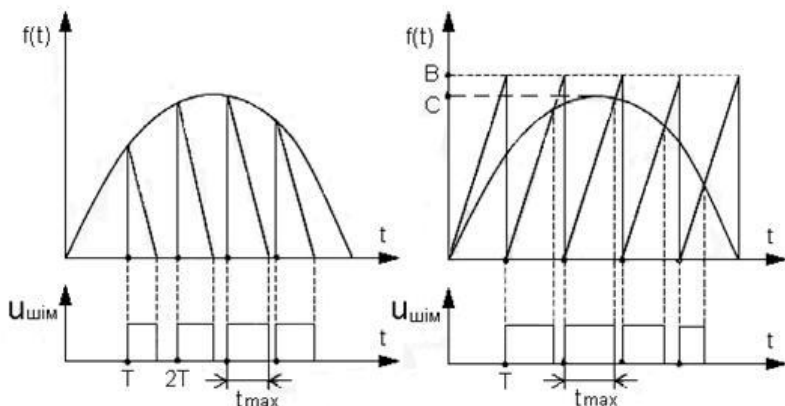


Рисунок 6.19 – а) ШІМ першого роду; б) ШІМ другого роду

Як і при АІМ можливо синтезування ШІМ по трапецеїдальній та "оптимальній" функціям побудови.

У випадку великих кратностей $P = \omega/\Omega$ несучої ω і модулюючої Ω частот ($P \geq 20$) класична ШІМ по синусоїдальному закону реалізується достатньо просто з використанням аналогової чи цифрової техніки. При невеликих кратностях частот раціональним вважають використання синтезованої ШІМ з "оптимальною" і близькою до неї трапецеїдальною функцією побудови, коли тривалість і місце розташування імпульсів з ШІМ розраховується і оптимізується ще на етапі проектування перетворювача. Реалізація даних ШІМ з використанням цифрової техніки підвищує стабільність та надійність роботи схем керування.

Незважаючи на існуюче різноманіття ШІМ, в перетворювальній техніці найбільш широке застосування мають двотактні, однополярні види модуляції, яким притиманні кращі енергетичні показники і більш великий динамічний діапазон. Враховуючи це, питання схемної реалізації в майбутньому будуть обмежені тільки цими видами модуляції.

Необхідність живлення навантаження перетворювача напругою з низьким K_L обумовлює використання вихідного фільтра, масо-габаритні показники якого, в основному, визначаються низькочастотними гармоніками квазисинусоїдальної напруги. Збільшення кратності частот P , у випадку ШІМ по синусоїдальному закону призводить до зменшення нижчих гармонічних складових упритул до значень, які складають 0,1 - 0,01% від амплітуди першої гармоніки. Це дає можливість, для поліпшення гармонічного складу квазисинусоїдальної напруги в низькочастотному діапазоні, використовувати простий Γ -подібний LC-фільтр, розрахований на подавлення тільки високочастотних складових, який дозволяє здійснювати регулювання вихідної частоти в широких межах практично без зміни K_L на його виході. При цьому, з зростанням несучої частоти ω зменшується встановлення потужність елементів фільтра. Використання метода ШІМ при формуванні квазисинусоїдальної напруги дозволяє просто здійснити регулювання його рівня шляхом зміни глибини модуляції (пропорційною зміною тривалості імпульсів, що модулюються), тоді як використання АІМ найчастіше потребує додаткового регулюючого вузла, наприклад, широтно-імпульсного перетворювача чи керованого випрямляча, встановленого на вході перетворювача.

До недоліків перетворювачів з ШІМ відноситься значний рівень високочастотних складових. Їх зміст, а отже і масо-габаритні

характеристики фільтра, можуть бути поліпшені при формуванні квазисинусоїдальної напруги методом амплітудно-широотно-імпульсної модуляції (АШІМ). В цьому випадку квазисинусоїдальна напруга представляється у вигляді амплітудно модульованої напруги з ШІМ самих східців (рис.6.20, а) або з додатковою ШІМ на східцях (рис.6.20, б). В останньому випадку додаткова ШІМ може використовуватися для регулювання напруги з АІМ чи для поліпшення його гармонічного складу в низькочастотній області.

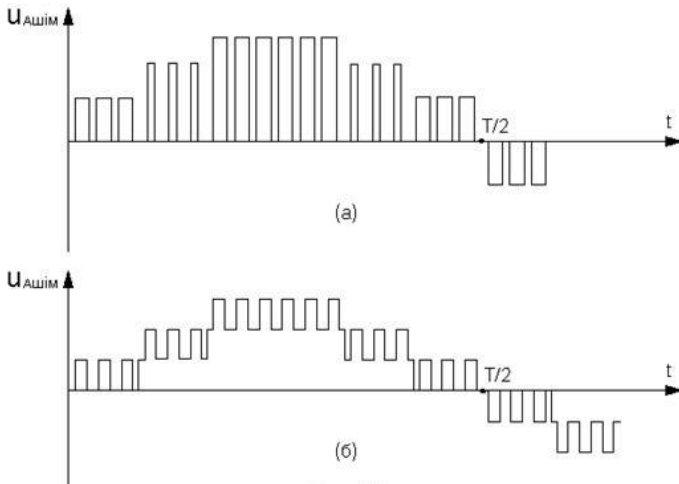


Рисунок 6.20 – Квазисинусоїдальна напруга з АШІМ:
а) з ШІМ самих східців;
б) з додатковою ШІМ на східцях

Контрольні питання до розділу 6

1. Назвіть основні критерії якості напруги перетворювачів зі змінною вихідною напругою.
2. Який критерії якості напруги перетворювачів враховує частоту гармонік?
3. Приведіть основні способи регулювання напруги перетворювачів зі змінною вихідною напругою?
4. За допомогою яких пристроїв здійснюється регулювання напруги постійного струму на вході інвертора? Назвіть переваги та недоліки кожного з них.
5. Які переваги регулювання з використанням вольтододаючого пристрою?

6. Яким чином здійснюється регулювання напруги змінного струму на виході інвертора?

7. Поясніть метод регулювання напруги зміною параметрів інвертора. Його недоліки.

8. Широтно-імпульсне регулювання. Поясніть суть способу.

9. Поясніть два основних алгоритми керування транзисторами при широтно-імпульсному регулюванні.

10. Чому при широтно-імпульсному регулюванні у напівмостовому інверторі та інверторі з середньою точкою потрібне застосування ключа змінного струму?

11. В яких перетворювачах використовується регулювання шляхом підсумовування напруг декількох інверторів?

12. Які способи формування кривої вихідної напруги Вам відомі?

13. У чому полягають основні недоліки способу підсилення при формуванні синусоїдальної форми вихідної напруги перетворювачів?

14. Які види фільтрації використовуються при покращенні форми вихідної напруги?

15. Назвіть основний недолік простих LC-фільтрів та методи його усунення.

16. Перечисліть причини, у зв'язку з якими обмежується застосування методу фільтрації.

17. У чому суть способу амплітудно-імпульсної модуляції?

18. Які основні види амплітудно-імпульсної модуляції застосовуються у перетворювальній техніці? Дайте коротку характеристику кожного з них.

19. Назвіть перевагу рівномірної синусоїдальної АІМ над трапецієдальною.

20. Охарактеризуйте формування квазісинусоїдальної напруги методом ШІМ та АШІМ.

21. По яким параметрам класифікують ШІМ?

22. Яким шляхом здійснюється формування квазісинусоїдальної напруги з АІМ у перетворювачах з підсумовуванням у загальному вузлі?

23. Які недоліки перетворювачів з АІМ і підсумовуванням в загальному вузлі?

РОЗДІЛ 7. ЕЛЕМЕНТИ ТА ЗАГАЛЬНІ СХЕМИ СОНЯЧНОЇ ТА ВІТРОВОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

7.1 Елементи сонячної батареї та загальні схеми сонячної електростанції

Схеми сонячних електростанцій складаються з основних чотирьох складових:

- сонячні панелі;
- контролер заряду;
- накопичувачі енергії (акумулятори);
- мережевий інвертор.

Сонячні батареї перетворюють сонячне світло в електричний струм завдяки фотоелементу.

Контролер заряду стежить за рівнем вироблення енергії і регулює режим роботи батареї.

Акумулятори накопичують отриману енергію і забезпечують підтримку стабільної роботи пристрою в темний час, коли сонячні батареї не працюють.

Інвертор перетворює отриманий від сонячних батарей заряд у прийнятний вид електричного струму, що підходить для живлення споживачів.

Модулі сонячної батареї наземного застосування як правило конструюються для зарядки свинцево-кислотних акумуляторних батарей з номінальною напругою 12 В. При цьому послідовно з'єднуються 36 сонячних елементів, які далі збираються в модуль. Отриманий пакет обрамляють в алюмінієву раму, яка полегшує кріплення до несучої (опорної) конструкції. Потужність модулів сонячної батареї може досягати 10–300 Вт.

Електричні параметри таких модулів відображаються за допомогою вольт-амперної характеристики, показаної на рисунку 7.1. Вона будується за стандартних умов – коли потужність сонячної радіації дорівнює $1\ 000\ \text{Вт/м}^2$, температура елементів $25\ ^\circ\text{C}$ і сонячний спектр – на широті 45° [70].

Точка перетину кривої з віссю напруги називається **напругою холостого ходу** U_{xx} , а з віссю струму – **струмом короткого замикання** $I_{кз}$.

На цьому ж графіку наведена крива потужності, одержуваної від сонячних елементів залежно від навантаження.

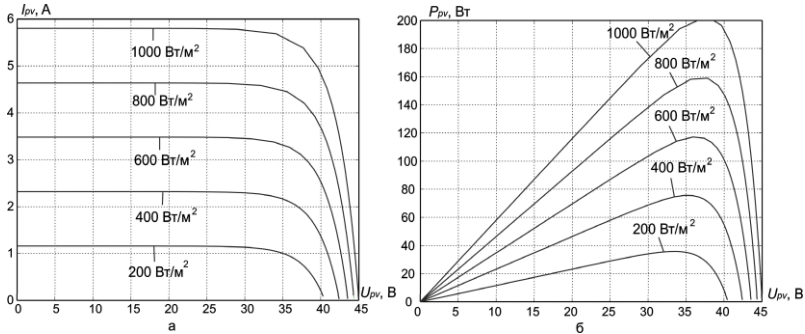


Рисунок 7.1 – Вольт-амперна характеристика та залежність потужності сонячної батареї від напруги модуля

Номінальна потужність модуля визначається як найбільша потужність за стандартних умов.

Значення напруги, що відповідає максимальній потужності, називається **робочою напругою** U_p , а відповідний струм – **робочим струмом** I_p . Значення робочої напруги для модуля, що складається з 36 елементів, приблизно становить 16–17 В (0,45–0,47 В/елемент) за 25 °С. Такий запас за напругою потрібен для компенсації зменшення робочої напруги за розігріву модуля сонячним випромінюванням.

Температурний коефіцієнт напруги холостого ходу для кремнію становить мінус 0,4 %/електричний градус.

Температурний коефіцієнт струму +0,07 %/градус.

Напруга холостого ходу сонячного модуля мало змінюється за зміни освітленості, а струм короткого замикання прямо пропорційний освітленості.

ККД сонячного модуля визначається як відношення максимальної потужності модуля до загальної потужності випромінювання, що падає на його поверхню за стандартних умов, і складає 15–40 %.

З метою отримання необхідної потужності і робочої напруги модулі з'єднують послідовно або паралельно. Так отримують **сонячну батарею**.

Потужність сонячної батареї завжди нижча, ніж сума потужностей модулів через втрати, зумовлені різницею в характеристиках однотипних модулів (втрати на неузгодженість). Чим ретельніше підібрані модулі в батареї, тобто, чим менша різниця в характеристиках модулів, тим нижчі втрати на неузгодженість. Наприклад, за послідовного з'єднання десяти модулів із розкидом

характеристик 10 % втрати становлять приблизно 6 %, а за розкиду 5% – знижуються до 2 %.

У випадку затінення одного модуля або частини елементів у модулі, у сонячній батареї за послідовного з'єднання з'являється «ефект гарячої плями», коли затінений модуль (або елемент) починає розсіювати всю вироблену освітленими модулями (або елементами) потужність, стрімко нагрівається і виходить з ладу. Для усунення цього ефекту паралельно з кожним модулем або його частиною встановлюють **шунтувальний діод** за послідовного з'єднання більше двох модулів.

До кожної лінійки послідовно з'єднаних модулів також під'єднується **блокувальний діод** для вирівнювання напруг лінійок.

Діоди зазвичай розміщуються в сполучній коробці самого модуля.

Вольт-амперна характеристика сонячної батареї має такий саме вигляд, що і в одиничного модуля.

Робоча точка батареї, під'єднаної до навантаження, не завжди збігається з точкою максимальної потужності. Тим більше, що положення останньої залежить від умов освітленості та температури навколишнього середовища.

Підмикання деяких навантажень, як, наприклад, електродвигунів, може зрушити робочу точку системи в область мінімальної або навіть нульової потужності – двигун просто не запуститься. Через це важливим компонентом сонячної батареї є перетворювач напруги, що узгоджує сонячну батарею з навантаженням.

Зазвичай у цих регуляторах реалізується принцип пошуку максимуму потужності шляхом коротких періодичних змін положення робочої точки. Якщо потужність на виході приладу зростає, то положення робочої точки змінюється в цьому напрямку під час наступного етапу.

У такий спосіб безперервно оптимізується навантажувальна характеристика для відбору максимальної потужності, а також забезпечується можливість регулювання в широкому динамічному діапазоні і формування імпульсів струму, здатних зарядити акумуляторну батарею навіть в умовах слабкої освітленості. Цей досить простий алгоритм може бути поліпшений запам'ятовуванням часто повторюваних напрямів зміщення робочої точки, що буває важливо в умовах мінливої освітленості.

На виході регулятора формуються імпульси постійного струму, ширина і частота надходження яких залежать від потужності, виробленої сонячною батареєю в конкретний момент. Водночас, якщо робоча напруга навантаження нижча за робочу напругу модуля, то

можна отримувати значення струмів в навантаженні, більші ніж струм короткого замикання батареї. Потрібно враховувати, що такі регулятори мають ККД 0,85–0,95 [5].

7.2 Акумулятори електростанцій

Вироблену сонячною батареєю енергію можна зберігати в різних формах:

- хімічна енергія в електрохімічних акумуляторах;
- потенційна енергія води в резервуарах;
- теплова енергія в теплових акумуляторах;
- кінетична енергія обертових мас або стисненого повітря.

Для сонячних батарей більше підходять електроакумулятори, бо сонячні батареї виробляють, а споживач споживає електроенергію, яка безпосередньо і запасється в акумуляторі. Винятком є сонячні станції для водопостачання, де споживається вода, а енергія запасється в потенційній енергії води у водонапірній башті.

У більшості фотоелектричних систем застосовують свинцево-кислотні або літій-іонні акумулятори. Зазначимо, що акумулятори призначені для сонячних батарей (і інших подібних систем), істотно відрізняються від стартерних автомобільних акумуляторів, хоч і можуть мати за основу ту ж саму технологію.

Головними умовами при виборі акумуляторів є:

- стійкість до циклічного режиму роботи;
- здатність переносити глибоке розрядження;
- низьке саморозрядження акумулятора;
- некритичність до порушення умов заряджання та розряджання;
- довговічність;
- простота в обслуговуванні;
- компактність і герметичність (важливий критерій для переносних або сонячних батарей, що періодично демонтуються).

Цим вимогам повною мірою задовольняють акумулятори, виготовлені за технологіями «dryfit» і AGM (адсорбований електроліт) або за рекомбінаційною технологією. Вони характеризуються відсутністю експлуатаційних витрат і перекривають діапазон ємностей 1–1 2000 А•год, що дозволяє задовольняти вимогам усіх споживачів. Ці акумулятори відрізняються зниженим газовиділенням і рекомбінацією кисню. Внаслідок цього вода електроліту не електролізується і не випаровується, і такі акумулятори не вимагають доливання електроліту. Наприклад, акумулятори однієї з фірм з трубчастими позитивними пластинами, мають такі характеристики:

- термін використання – 15 років;
- стійкість до циклічного режиму – понад 1 200 циклів;
- відсутність необхідності обслуговування протягом усього терміну використання;
- мінімальне газовиділення (завдяки застосуванню сплаву без сурми та використанню технології внутрішньої рекомбінації газу);
- саморозрядження – приблизно 3 % у місяць.

Такі акумулятори мають досить високу вартість. З-за цього з'являється бажання використовувати звичайні стартерні свинцево-кислотні акумуляторні батареї (автомобільні акумулятори). Проте термін використання таких акумуляторів у складі сонячної батареї не перевищує 3–5 років. Унаслідок цього за термін використання сонячної батареї (15–20 років і більше) необхідно буде міняти акумулятори. Додадуться також витрати на обслуговування акумуляторів і обладнання приміщень.

З метою отримання необхідної робочої напруги акумулятори або акумуляторні батареї з'єднують послідовно, дотримуючись таких правил:

- використовують акумулятори тільки одного типу, вироблені одним виробником;
- експлуатують усі акумулятори одночасно, не роблячи відводів від окремих акумуляторів складових батареї;
- не об'єднують акумулятори з різницею в даті випуску більш ніж на місяць в одну акумуляторну батарею;
- забезпечують різницю температур окремих акумуляторів не більшою за 3 °С.

Таблиця 7.1 – Порівняння властивостей акумуляторних батарей

АКУМУЛЯТОРНІ БАТАРЕЇ (АКБ)	
Розуміння необхідного режиму роботи дозволяє правильно підібрати тип АКБ для сонячної електростанції	
Переваги	Недоліки
Свинцево-кислотні АКБ, що не обслуговуються (Solar GEL AGM, Deep Cycle)	
Широкий спектр застосування «Поставив і забув» – мінімум зусиль на обслуговування	Не рекомендується розряджати нижче 50 % Добре працює у вузькому температурному діапазоні
Низька вартість	500–600 циклів «зарядження–розрядження»
Свинцево-кислотні АКБ, що обслуговуються (OPzS, OPzV)	
Допускають розрядження на 80 %	Труднощі під час транспортування Вимагають щорічного обслуговування Погано переносять перепади температури

1 500 циклів «зарядження–розрядження» Гарантований термін використання 10 років	
Літій ферум фосфатні (LiFePo4)	
Допускають розрядження на 80 % 4 000 циклів «зарядження–розрядження» (за температури доквілля 20 °C) Температурний діапазон від мінус 20 °C до плюс 65 °C Мають велику потужність за невеликого об'єму	Висока вартість Для виявлення несправності необхідна допомога спеціаліста Погано переносять перепади температури

Заради продовження терміну використання акумуляторів за циклічного режиму роботи в сонячних батареях важливо не допускати глибокого розрядження. Рівень розрядження характеризується глибиною розряду у відсотках від номінальної ємності акумулятора [5].

Отже, використання акумуляторної батареї за глибокого розрядження веде до більш часті її заміни і, відповідно, до подорожчання системи. Глибину розрядження акумуляторів сонячних батарей необхідно обмежувати на рівні 30–40 %. Це забезпечується зниженням потужності або відімкненням навантаження, а також використанням акумуляторів більшої ємності.

Для управління процесом зарядження і вибору оптимального режиму до складу сонячної електростанції обов'язково включають контролери зарядження-розрядження акумуляторної батареї [6].

7.3 Контролери заряду акумуляторів

Вартість регулятора заряду акумуляторів становить не вище 5 % від вартості всієї системи. Проте від якості зарядних регуляторів залежить те, як часто доведеться замінювати акумулятор.

Щоб уберегти батарею від надлишкового розряджання, навантаження повинно бути відімкнене, якщо напруга батареї опускається нижче напруги відімкнення. Навантаження не повинно підмикатися до моменту, коли напруга не зростає вище напруги відімкнення. Існують доволі досить суперечливі стандарти цих значень. Вони залежать від конструкції батарей, виробничого процесу і терміну використання акумуляторних батарей. У деяких моделях регуляторів застосовується звуковий сигнал, що повідомляє користувачеві про швидке відімкнення живлення.

Щоб захистити батарею від перезарядження, потрібно обмежити зарядний струм за досягнення напруги завершення заряду. Напруга почне знижуватися, поки не досягне іншого порога, званого напругою відновлення заряду. Невеликі сонячні електростанції мають схильність до надмірного споживання енергії (а не до перезарядження), тому допускається перезарядження. При цьому застосовують більш високу напругу завершення заряду.

Викладене стосується регуляторів для автономних сонячних електростанцій невеликої потужності (до 1 кВт).

У потужніших системах сонячних батарей функції контролю зарядження і розрядження бере на себе системний контролер. Цей пристрій зазвичай пов'язаний із комп'ютером і здійснює також постійний моніторинг роботи елементів із записом значень освітленості, температури, струму і напруги для подальшого аналізу [71].

7.4 Інвертори

Сонячний генератор, яким би складним і великим він не був, може виробляти лише постійний струм. Існує багато споживачів, що використовують саме постійний струм – заряджання акумуляторів, освітлення, радіоапаратура тощо. Але споживачів змінної напруги 220 В не менше. Через це виникає необхідність у перетворенні напруги постійного струму акумуляторної батареї в напругу змінного струму синусоїдної форми.

Інвертор – завершальний елемент у цій системі. Його основна функція полягає у перетворенні напруги постійного струму, яку отримуємо завдяки сонячним батареям, у стандартний змінний струм з напругою 220 В, 50 Гц. Це дає можливість під'єднувати електрообладнання, що потребує живлення напругою змінного струму.

Інвертори – напівпровідникові пристрої. Вони можуть бути поділені відповідно до типу фотоелектричних систем на два типи:

- інвертори для автономних систем сонячних батарей;
- інвертори для мережевого використання [8].

Отже, як зазначалося вище, для перетворення напруги постійного струму акумуляторної батареї в напругу змінного струму синусоїдної форми, потрібен інвертор.

Докладніше розглянемо типи інверторів відповідно до типу фотоелектричних систем:

- інвертори для автономних систем сонячних батарей;
- інвертори для мережевого використання;

- комбіновані або багатофункціональні;
- гібридні.

Автономний мережевий інвертор, як видно з назви, несе на собі все енергетичне навантаження схеми. Такі інвертори використовуються в цілком самостійних робочих комплектах. Автономний інвертор працює тільки спільно з сонячними панелями в комплекті з акумуляторними батареями. У перебігу світлового дня вироблена сонячними панелями енергія через контролер заряду надходить в акумуляторні батареї і накопичується в них. Інвертор перетворює постійну напругу (12, 24, 36, 48 В, ...) з акумуляторів у змінну напругу 220 В і передає на навантаження. В автономних інверторах із вбудованим контролером заряду накопичення в акумуляторах енергії і її передача на навантаження здійснюється трохи інакше: енергія, що надходить з сонячних панелей в інвертор-контролер, насамперед живить навантаження, а її надлишок накопичується в акумуляторах. Існують інвертори, у яких можна виставляти пріоритети зарядки і навантаження.

Синхронний мережевий інвертор застосовують тоді, коли використання сонячних батарей не є єдиним способом отримання електроенергії. В таких схемах щоденне навантаження лежить на альтернативних джерелах, але за нестачі електрики в гру вступають традиційні способи, тобто центральне енергопостачання. Такий вид вважається найпоширенішим і найбільш прийнятним. Завдяки наявності резервної функції відмикання сонячних батарей, подібні інвертори рідко виходять із ладу та підтримують більш стабільну роботу. Мережевий інвертор працює тільки спільно з мережею змінного струму без використання акумуляторних батарей і використовується або для економії витрат на електроенергію, або у випадках, коли виділених лімітів на електроенергію недостатньо. У системах із мережевими інверторами вироблена сонячними панелями енергія відразу ж через інвертор надходить у мережу. Функція зарядження або живлення від акумуляторів не передбачена.

Комбінований інвертор поєднує в собі обидві можливі схеми підімкнення. Він працює з сонячними панелями й акумуляторними батареями, але він так само може бути підімкнений до мережі 220 В для живлення від неї навантаження і заряджання акумуляторних батарей. У сучасних комбінованих інверторах (наприклад, у таких як SILA) можливий вибір режимів і пріоритетів зарядження або навантаження. Користувач може сам вирішити звідки передусім повинна братися енергія для живлення навантаження і на зарядження акумуляторів. Наприклад, можна налаштувати інвертор так, що спочатку енергія з

сонячних батарей буде жити електроприлади. Енергія, що залишилася, буде заряджати акумулятори. Водночас, якщо енергії від сонячних батарей буде недостатньо для навантаження, вона буде добиратися з мережі змінного струму або спочатку з акумуляторів, а вже потім із мережі.

Гібридний інвертор об'єднує в собі всі функції мережевого, автономного та комбінованого інвертора.

Вихідний каскад у всіх типів інверторів подібний (рис. 7.2). Відмінність полягає в схемі управління. Перший тип має генератор частоти, а другий повинен працювати синхронно з промисловою мережею, використовуючи за генератор частоти саму мережу [10].

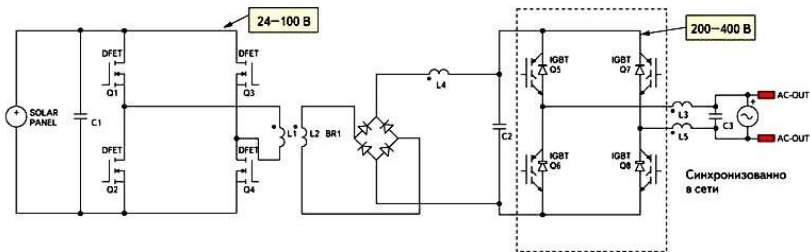


Рисунок 7.2 – Структурна схема сонячного інвертора

Для всіх типів ключовим параметром є ККД, що має бути більшим за вихідна напруга автономних інверторів, зазвичай, становить 220 В (50/60 Гц), а в інверторах потужністю 10–100 кВт можна отримувати трифазну напругу 380 В. Усі автономні інвертори перетворюють постійний струм акумуляторних батарей. Внаслідок цього вхідна напруга вибирається з ряду 12, 24, 48 і 120 В. Чим більша вхідна напруга, тим простіший інвертор і тим вищий його ККД. За великої напруги істотно меншими є втрати на передачу енергії від сонячного генератора до акумуляторної батареї, регулятора зарядження та інвертора. Однак разом із тим ускладнюється конструкція сонячної електростанції і її експлуатація за небезпечних напруг (вище 42 В).

Форма вихідного сигналу автономних інверторів значною мірою не є критичною. У низці випадків, якщо дозволяє навантаження, можливе використання інверторів з трапецієподібним вихідним сигналом. Такі інвертори в 2–3 рази дешевші інверторів із синусоїдним вихідним сигналом. Важливим параметром автономних інверторів є залежність ККД від потужності навантаження. ККД не повинен значно знижуватися за підмикання навантаження в десять разів меншого за споживану потужністю від номінальної. Разом із тим інвертор

повинен витримувати перевантаження в вихідних колах за підмикання електродвигунів та інших динамічних навантажень.

Отже, до автономного інвертора ставляться такі вимоги:

- здатність переносити без наслідків як короточасні, так і тривалі перевантаження;
- незначні втрати за малих навантажень і на холостому ходу;
- стабілізація вихідної напруги;
- низький коефіцієнт гармонік;
- високий ККД;
- відсутність перешкод на радіочастотах.

Іноземні фірми пропонують широкий асортимент інверторів, спеціально розроблених для сонячних батарей. Такі інвертори вже мають блок регулятора відбору максимальної потужності, блок регулятора заряду, а також додатковий вхід підмикання дизель-генератора для екстреного підзарядження акумуляторної батареї.

До вихідного сигналу мережевих інверторів висуваються найжорсткіші вимоги. Для зниження втрат на перетворення такі інвертори працюють за високих вхідних напруг. Оскільки їхні вхідні кола живляться безпосередньо від сонячної батареї, вони мають вбудований регулятор відбору максимальної потужності.

Мережеві інвертори також мають блок контролю потужності сонячної батареї і вмикаються автоматично, як тільки вона стає достатньою для формування змінного сигналу [71].

Автономні інвертори напруги, призначені для сонячних електричних станцій, самі задають параметри живлення для автономних, тобто незалежних від зовнішньої мережі сонячних систем. Наприклад, забезпечуючи автономне живлення освітлювального пристрою (рис. 7.3).

За формою вихідної напруги вирізняють два види інверторів.

«NV-M» інвертор на виході має модифікований синус (генерує ступінчасту або прямокутну форму напруги) і підійде для автономного живлення різної побутової техніки: комп'ютерів, аудіо- та відеотехніки, освітлювальних приладів, крім пристроїв з асинхронними двигунами (циркуляційні насоси, холодильне обладнання). Модель має захист від неправильної полярності, короткого замикання, перевантажень, підвищеного або зниженого струму, має USB-вихід для зарядження портативної техніки напряму та витримує короточасні перевантаження, які в два рази перевищують номінальну потужність приладу.



Рисунок 7.3 – Автономний інвертор для живлення освітлювального пристрою

«NV-P» сонячні інвертори на виході видають чистий синус. Форма вихідної напруги у вигляді «чистої синусоїди» забезпечить повну сумісність із будь-яким електрообладнанням потужністю до 1 500 Вт [71].

Мережевий (або grid-tie) інвертор є пристроєм, що перетворює напругу постійного струму (DC) від сонячних панелей в напругу змінного струму (AC), і передає її безпосередньо в мережу 220 В або 380 В, тим самим знижуючи споживання електроенергії від енергомереж (рис. 7.4).



Рисунок 7.4 – Мережевий інвертор [12]

Мережеві інвертори є синхронними перетворювачами, бо мають синхронізацію вихідних напруги та струму зі стаціонарною мережею з належними значеннями частоти і фази. Перетворення зазвичай здійснюється за допомогою PWM – широтно-імпульсної модуляції.

Інвертори мережевого типу не мають можливості під'єднання до них акумуляторних батарей. Вони також не зможуть працювати, у разі зникнення напруги мережі, наприклад, через аварію. Зроблено це для того, щоб убезпечити від ураження електричним струмом персонал, який буде займатися відновленням ліній електропередач.

У разі необхідності живлення електроприймачів за аварійного відімкнення електроенергії, його потрібно забезпечити від сонячних панелей, а отже потрібен мережевий інвертор із резервуванням.

Мережеві інвертори без резервування краще застосовувати за стабільного безперебійного енергопостачання і коли планується підключення «зеленого» тарифу або ж для економії на електриці шляхом вироблення власної. Схему сонячної електростанції такого типу наведено на рисунку 7.5.

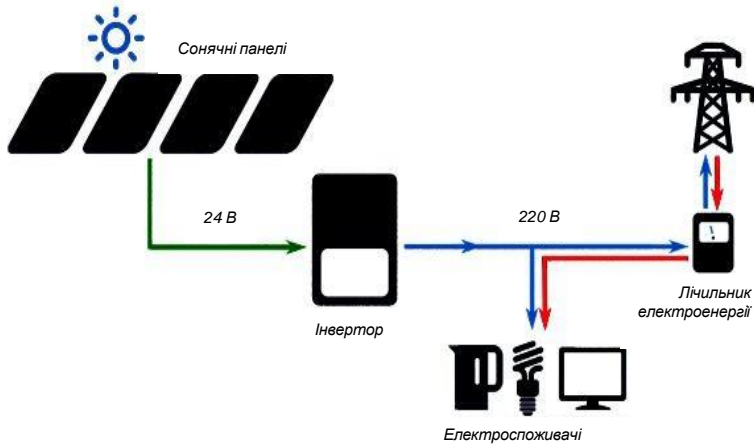


Рисунок 7.5 – Сонячна електростанція з мережевим інвертором

Отже, мережевий інвертор бере електроенергію, вироблену сонячними панелями, і передає її споживачам. Якщо споживання менше за вироблену сонячними панелями енергію, то надлишки електроенергії будуть віддаватися в зовнішню мережу. При підключеному «зеленому» тарифі за це буде нараховуватись відповідна плата.

Ефективність роботи таких інверторів складає до 96 %.

Іншим типом інверторів є мережеві інвертори з резервуванням (накопиченням) – (рис. 7.5). Вони не тільки заряджають акумулятори від мережі, але й віддають в цю ж мережу вироблену електроенергію. Якщо підключено «зелений» тариф, зайва вироблена сонячними панелями електроенергія буде віддаватися в мережу. У разі ж аварії в мережі цей тип інвертора перейде на автономний режим роботи і буде живити споживачів без участі мережі. Важливою перевагою є вбудований у цей тип інвертора контролер заряду МРРТ. Ефективність перетворення становить до 95 %.

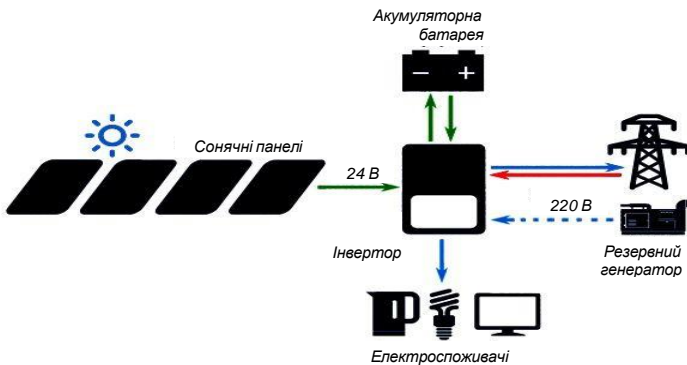


Рисунок 7.6 – Сонячна електростанція з мережевим інвертором і резервуванням

Основні характеристики мережевих інверторів:

- номінальна вихідна потужність – потужність, що отримується від певного інвертора;

- вихідна напруга – показник, що визначає, до якої мережі за напругою може бути підімкнений інвертор. Для невеликих інверторів побутового призначення вихідна напруга зазвичай становить 240 В. Інвертори промислового призначення розраховані на 208, 240, 277, 400 або 480 В, крім того, їх можна під'єднувати до 3-фазної мережі;

- максимальна ефективність – найвища ефективність перетворення енергії, яку може забезпечити інвертор. Максимальний ККД більшості мережевих інверторів становить понад 94 %, у деяких – до 97 %;

- зважена ефективність – середня ефективність інвертора. Цей показник краще характеризує ефективність роботи інвертора. Він є важливим, бо інвертори, здатні перетворювати енергію за різних вихідних напруг змінного струму, мають різну ефективність за кожного

значення напруги;

– максимальний вхідний струм – максимальне значення постійного струму, що його виробляє сонячна панель. У разі, якщо сонячна панель буде виробляти струм, що перевищує це значення, мережевий інвертор його не використовуватиме;

– максимальний вихідний струм – максимальне значення безперервного змінного струму, що його виробляє інвертор. Цей показник використовують для визначення мінімального (номінального) значення перевантаження за струмом пристроїв захисту (наприклад, вимикачів або запобіжників);

– діапазон відстеження напруги максимальної потужності – діапазон напруги постійного струму, у якому буде працювати точка максимальної потужності мережевого інвертора;

– мінімальна вхідна напруга – мінімальна напруга, необхідна для вмикання інвертора та його роботи. Цей показник особливо важливий для сонячних систем, тому що розробник системи має бути впевнений, що для створення цієї напруги в кожному ланцюжку послідовно з'єднано достатню кількість сонячних модулів;

– ступінь захисту IP – характеризує ступінь захисту корпусу від проникнення зовнішніх твердих предметів і води [13].

Дешеві інвертори генерують ступінчасту або прямокутну форму напруги, так звану квазісинусоїдну форму, або модифіковану синусоїду. Така форма напруги підходить не для всіх споживачів. Інвертори з синусоїдною формою напруги забезпечують якість енергії таку ж саме, як у мережі, і можуть жити без проблем будь-яке навантаження змінного струму.

Інвертори також можна розділити на трансформаторні (низькочастотні) і безтрансформаторні (високочастотні).

Головною відмінністю перших є наявність трансформатора на виході інвертора, призначеного для підвищення напруги до мережевого значення (220/380 В). У безтрансформаторних пристроях функції трансформатора виконує електроніка.

Решта відмінностей двох технологій:

– безтрансформаторна архітектура дозволяє домогтися ефективності в 98 % у порівнянні з 80–92 % трансформаторної;

– власне споживання безтрансформаторних інверторів значно менше, ніж у трансформаторних;

– безтрансформаторні інвертори більш уразливі до поломок, оскільки електронні блоки менш надійні, ніж пасивний трансформатор;

– трансформаторні пристрої підтримують більш високий струм заряду, що збільшує швидкість зарядження батарей і їхню кількість;

– трансформаторні пристрої мають більшу масу і розміри порівняно з бестрансформаторними;

– безтрансформаторні інвертори мають більш низьку вартість порівняно з трансформаторними;

Багато сучасних інверторів також мають додаткові функції.

1. Вимірювання: на дисплеї відображаються напруги і струми, частота і потужність.

2. Можливість автоматичного запуску і зупинки резервного генератора (наприклад, дизельного) залежно від напруги батареї. Часто ця функція реалізована у вигляді опції як окремий блок до інвертора. Високоякісні інвертори можуть заряджати акумулятори від мережі тільки в певний час, або запускати генератор тільки в денний час, щоб не створювати шуми вночі.

3. Робота паралельно з мережею. Мережеві інвертори безпосередньо постачають енергію від сонячних батарей в мережу, і не потребують спеціальних акумуляторів. Це істотно зменшує вартість системи, а також дозволяє зменшити рахунки за електроенергію.

4. Вбудований зарядний пристрій. Такі інвертори можуть використовувати енергію від мережі або генератора для зарядження акумуляторної батареї. Одночасно вони можуть передавати енергію від цих джерел безпосередньо в навантаження. Високоякісні інвертори можуть задавати або динамічно змінювати зарядний струм для уникнення перевантаження генератора. Вони також мають багатостадійні зарядні пристрої, що забезпечують безпечний повний заряд акумуляторної батареї, необхідний для збільшення терміну їхнього використання.

Паралельне з'єднання: деякі інвертори можуть бути з'єднані паралельно для збільшення потужності [14].

Можна виділити такі два види використання мережевих інверторів (рис. 7.7).

Комерційна станція.

За отримання технічних умов на підімкнення блок-станції до мережі та підписання договору з місцевою енергопостачальною організацією на постачання електроенергії, можливий продаж електроенергії за підвищеним коефіцієнтом.

За будовою така станція складається з сонячних батарей, одного або більше мережевих інверторів (без резервування) та вузла обліку.

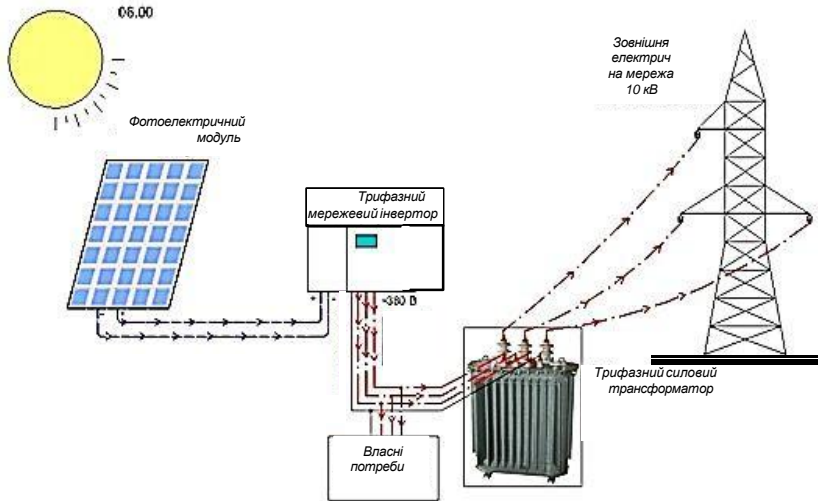


Рисунок 7.7 – Сонячна електростанція

Для станцій невеликої потужності генерація буде відбуватися в мережу 380 В. Якщо потрібна велика потужність, то кілька таких блоків встановлюються паралельно. Залежно від потужності станція через підвищувальний трансформатор може бути підімкнена до мереж 6–10 кВ. На поточний момент окупність такої станції становить близько 5–7 років. Станції великої потужності (від 1 МВт) у разі використання китайських комплектуючих можна окупити за 3 роки.

Економія електроенергії.

Така система містить усі ті самі сонячні батареї і мережеві інвертори (без резервування), але генерує енергію для «внутрішніх» потреб, тому вузол обліку тут не обов'язковий. Станція під'єднана до внутрішньої мережі підприємства (або приватного господарства) і генерує енергію безпосередньо в навантаження. Отже, завдяки додатковому джерелу генерації знижується споживання від мережі. Таке рішення актуальне для підприємств із постійним високим денним споживанням. Так само воно дозволяє компенсувати піки споживаної потужності [13].

Вибір інвертора за потужністю

У питанні вибору потужності інвертора дуже багато нюансів.

Діє правило: підсумовується все плановане навантаження за потужністю і помножується на два.

Наприклад, загальне навантаження складає:

4 лампи по 60 Вт + пральна машина 800 Вт + ноутбук 80 Вт + холодильник 100 Вт + телевізор 50 Вт.

Здавалося б, максимальне споживання становить $240 + 800 + 80 + 100 + 50 = 1\,270$ Вт і достатньо взяти інвертор на 1 300–1 500 Вт.

Проте, як вже зазначалося вище, різні навантаження ведуть себе по-різному, особливо у пускових режимах. Наприклад, стартовий струм холодильника може досягати й десятикратного значення, а значить він зажадає 1 кВт потужності в момент вмикання. А якщо в цей час буде ввімкнене світло та пральна машина, то інвертор просто аварійно відімкнеться.

Отже, потужність інвертора має бути такою, щоб забезпечувати дворазовий запас споживання ваших звичайних приладів або десятикратний для запуску двигунів [17].

Як приклад, наведемо дані деяких сонячних інверторів.

Сонячні інвертори Huawei SUN2000-12KTL [18] (рис. 7.8) максимально збільшують енерговироблення на електростанціях, розташованих на дахах, схилах і на рівні землі.



Рисунок 7.8 – Сонячний інвертор Huawei SUN2000-12KTL

З технічної точки зору це мережеві інвертори, призначені для підключення до трифазної зовнішньої мережі. Інтелектуальний постринговий моніторинг і виявлення несправностей по ланцюжкам послідовно з'єднаних панелей скорочують час локалізації неполадок. Трирівнева топологія транзисторів (IGBT) забезпечує максимальну ефективність перетворення енергії на рівні 98,7 %. За результатами тестування PHOTON цим інверторам присвоєна категорія A +/A +. Кожен інвертор має до трьох каналів MPPT (відстеження точки оптимальної потужності) для конкретного середовища.

Природне охолодження без зовнішніх вентиляторів підвищує надійність інверторів за експлуатації поза приміщеннями.

Технічні параметри сонячного інвертора Huawei SUN2000-12KTL

Максимальна ефективність	98,5 %
Максимальна вхідна потужність	13 700 Вт
Максимальна вхідна напруга	1 000 В
Максимальний вхідний струм	36 А (2 по 18 А)
Діапазон напруги МРР	320~800 В
Номінальна вхідна напруга	620 В
Максимальна кількість входів	4
Кількість МРРТ	2
Номінальна потужність	12 000 Вт
Номінальна вихідна напруга	$3 \times 230/400 \text{ В} + \text{N} + \text{PE}$
	$3 \times 220/380 \text{ В} + \text{N} + \text{PE}$
Вага	40 кг

Ціна для продажу 2315 €

Сонячний інвертор SMA FLX PRO 17 [19] (рис. 7.9) – мережевий трифазний інвертор. Він є ідеальним рішенням для малих і середніх сонячних установок. Цей інвертор має високу продуктивність, гнучкість у конструкції та інтегроване управління потужністю. Нова спрощена концепція установки інвертора дозволяє легко ввести його в експлуатацію, забезпечити зручну ергономіку й необмежений доступ до місця установки.



Рисунок 7.9 – Сонячний інвертор SMA FLX PRO 17 (Німеччина)

У нього також є такі корисні властивості.

Висока ефективність.

Максимальний ККД – 98 %, завдяки високій вхідній (з боку сонячних панелей) напрузі 1 000 В постійного струму.

Гнучкість проектування.

Завдяки використанню системи MPPT забезпечується гнучкість у плануванні, реалізації та зборі сонячної енергії. Має оптимальний вихід за часткового затінення і ефективне функціонування за орієнтації панелей схід-захід.

Простий монтаж.

Заново спроектоване настінне кріплення спрощує монтаж.

Дружній користувачеві інтерфейс.

Мультипінксельний екран дозволяє відтворювати інформацію на всіх мовах і відобразити будь-які символи.

Низький рівень шуму.

Підтримується завдяки використанню режимів роботи з мінімальним використанням системи охолодження.

Технічні параметри сонячного інвертора SMA FLX PRO 17

Максимальна постійна потужність	17,6 кВт
Максимальна вхідна напруга	1000 В
Кількість фаз / фази підімкнення	3/3
Діапазон напруги / номінальна вхідна напруга	220/485 – 800 В
Максимальний вхідний струм	12,0 А
Ефективність	98,0 %
Номінальна напруга змінного струму / діапазон	230/400 В
Частота змінного струму / діапазон	50 Гц (плюс/мінус 5 Гц)
Номінальна частота живлення / напруга мережі	50 Гц / 230 В
Кількість незалежних MPP входів / рядків на вхід MPP	3/3 (SUNCLIX)
Рівень шуму	55 дБ
Розміри (Ш / В / Г)	500 мм × 667 мм × 233 мм
Вага	39 кг
Ступінь захисту (відповідно до IEC 60529)	Р65
Ціна для продажу	2 989 €.

Узгодження потужності інвертора та сонячних панелей

Номінальна потужність на стороні змінного струму АС визначає максимальну потужність споживачів, які можуть бути підключені до інвертора або максимальний обсяг енергії, який може бути підключений до мережі. Цей параметр завжди вказується у технічному паспорті. Інвертор для оптимальної ефективності повинен працювати якомога ближче до номінальної потужності. Ефективність перетворення може

становити до 98%, залежно від моделі. Якщо сила струму, що генерується, від сонячних панелей падає, наприклад, у похмурий день, коли сонячна інтенсивність не перевищує 200 Вт/м², ефективність інвертора різко падає.

Потужність по постійному струму DC, як правило, не фіксована і визначається на підставі вихідної потужності. Оптимальний діапазон потужності масиву сонячних панелей становить від 80 до 120% номінальної вихідної потужності інвертора. Виробники інверторів зазвичай рекомендують трохи “перевантажувати” інвертор по стороні постійного струму, оскільки потужність сонячних панелей завжди визначається для умов STC, які рідко досягаються на практиці. Випромінювання з потужністю 1000 Вт/м² протягом усього року становить від кількох днів до кількох годин, що становить всього 1-2% від загального часу сонячної активності. В час, що залишився, потужність сонячного випромінювання не перевищує 800-900 Вт/м². Це означає, що 98% часу сонячна станція працює максимум на 80-90% від їхньої номінальної продуктивності.

Крім того, потужність сонячних модулів зменшується з часом експлуатації, це пов'язано з ефектом деградації кремнієвих фотоелементів. Цей процес йде досить повільно, але вже в перший рік роботи продуктивність знижується в середньому на 1-2 відсотки. З цього випливає, що сонячні панелі вкрай рідко досягають номінальної потужності відносно умов STC, яку надає завод-виробник.

Технічні параметри FRONIUS SYMO (10.0-3-M, 12.5-3-M, 15.0-3-M)

Загальні параметри		10.0-3-M	12.5-3-M	15.0-3-M
Розміри (висота x ширина x глибина)	мм	725 x 510 x 225		
Вага	кг	35.4 / 38.4	35.4 / 38.4	41.96 / 44.96
Ступінь захисту		IP 66		IP 66
Клас захисту		1		1
		DC	AC	DC
Захист від перенапруги (DC / AC)		2	3	2
Споживання в нічний час	Вт	<1		<1
Тип інвертора		Безтрансформаторний		
Охолодження		Активне охолодження		
Встановлення		Внутрішнє і зовнішнє		
Температура навколишнього середовища	°C	-25 - +60		-25 - +60
Дозволена вологість (без конденсації)	%	0 - 100		0 - 100
		(необмежений / обмежений діапазон напруги)		
Максимальна висота встановлення	м	2,000/3,400	2,000/3,400	2,000/3,400
Тип DC підключення	мм2	6x DC+ та 6x DC гвинтові затискачі 2.5 - 16 mm2		
Тип AC підключення	мм2	5-роз. AC гвинтові затискачі 2.5 - 16mm2		
Сертифікати		IEC 62109-1/-2, IEC 62116, IEC 61727, VDE 0126-1-1A1, VDE AR-N 4105, G98/1, G99/1, AS/NZS 4777.2, UNE 208007-1, CEI 0-21, CEI 0-16, NRS 097-2-1, TOR Elzvieri Tur A, VDE AR-N 4110, EN 50549-1/-2, IEC 61683, IEC60068, IEC 63027 2023		
Країна виробник		Austria		

Рисунок 7.10 – Технічні характеристики інвертора – загальні дані

Технічні параметри FRONIUS SYMO (10.0-3-M, 12.5-3-M, 15.0-3-M)

Вихідні параметри		10.0-3-M		12.5-3-M		15.0-3-M	
АС номінальна потужність ($P_{ac,r}$)	Вт	10,000		12,500		15,000	
АС номінальна вихідна потужність ($P_{ac,r}$)	ВА	10,000		12,500		15,000	
		380 VAC	400 VAC	380 VAC	400 VAC	380 VAC	400 VAC
АС номінальний струм ($I_{ac, nom}$)	А	15.2	14.4	18.9	18	22.7	21.7
Номінальна напруга мережі (voltage range)		3-NPE 400 V / 230 V or 3-NPE 380 V / 220 V (+20 % / -30 %)					
Номінальна частота (діапазон частоти)	Hz	50 / 60 (45 - 65)		50 / 60 (45 - 65)		50 / 60 (45 - 65)	
Коефіцієнт нелінійності	%	< 1.75		< 2.0		< 1.5	
Коефіцієнт потужності ($\cos \phi_{ac,r}$)		0-1 ind. / cap.					

Рисунок 7.11 – Технічні характеристики інвертора – вихідні дані

Технічні параметри FRONIUS SYMO (10.0-3-M, 12.5-3-M, 15.0-3-M)

Вхідні параметри		10.0-3-M		12.5-3-M		15.0-3-M	
Кількість трекерів MPP		2		2		2	
		MPPT1	MPPT2	MPPT1	MPPT2	MPPT1	MPPT2
Мак. вхідний струм ($I_{dc, max}$)	А	27.0	16.5	27.0	16.5	33.0	27.0
Мак. вхідний струм на контролер ($I_{dc, max, MPPT 1+2}$)	А	43.5		43.5		51.0	
		MPPT1	MPPT2	MPPT1	MPPT2	MPPT1	MPPT2
Мак. струм короткого замикання масиву MPPT1/MPPT2 ($I_{sc, pv} / 2$)	А	55.7	34	55.7	34	68	55.7
Мінімальна - максимальна вихідна напруга ($U_{dc, min} - U_{dc, max}$)	В	200 - 1000		200 - 1000		200 - 1000	
Стартова напруга ($U_{dc, start}$)	В	200		200		200	
Робочий MPP діапазон напруги	В	200 - 800		200 - 800		200 - 800	
MPP діапазон напруг (при номін. потуж.) ($U_{mpp, min} - U_{mpp, max}$)	В	270 - 800		320 - 800		320 - 800	
		MPPT1	MPPT2	MPPT1	MPPT2	MPPT1	MPPT2
Кількість DC підключень		3	3	3	3	3	3
Макс. потужність фотомодулів ($I_{dc, max}$)	Вт peak	15,000		18,800		22,500	

Рисунок 7.12 – Технічні характеристики інвертора – вхідні дані (для прикладу розрахунків вибираємо інвертор Fronius SYMO 10.0-3-M)

Технічні характеристики інвертора

Робочий діапазон інвертора знаходиться між значеннями напруги старту $U_{dc, min}$ та максимальною напругою $U_{dc, max}$. Як тільки напруга постійного струму з боку сонячних батарей досягає значення $U_{dc, start}$, перетворювач активується та починає пошук точки максимальної потужності MPP. Якщо ця точка знаходиться між $U_{dc, min}$ та $U_{dc, start}$, інвертор запуститься та почне працювати. Поки напруга не перевищує мінімального значення діапазону MPPT $U_{mpp, min} - U_{mpp, max}$, інвертор працює з неповною потужністю. Найвища ефективність перетворювача досягається з напругою V_{nom} , тому конфігурація ланцюгів сонячних батарей повинна видавати напругу, близьку до U_{nom} інвертора.

Графік роботи інвертора сонячної електростанції

Кожен інвертор має діапазон напруги МРРТ, вказаний у технічному паспорті. Цей параметр визначає, за якої напруги на вході постійного струму інвертора буде виявлено максимальну точку потужності алгоритмом МРР. Іншим важливим параметром є мінімальна напруга перемикання інвертора. Це значення напруги PV-модулів, у яких інвертор запускається і починає генерувати енергію. У нашому випадку (таблиця вище) діапазон МРРТ становить 200-800 В, а мінімальна напруга – 200 В.

Обидва значення визначають структуру підключення сонячних панелей у стрінг (ланцюг), їх кількість та спосіб з'єднання (послідовний, паралельний, паралельно-послідовний). Кожна панель у стрінгу генерує певну напругу та струм залежно від миттєвого освітлення та відповідає вольт-амперній характеристиці. Сонячні панелі, підключені одна до одної, залежно від схеми (послідовно, паралельно), додають напругу або струм. У будь-якому випадку ця сума не може перевищувати допустимі значення для обраної моделі інвертора на стороні постійного струму.

Наприклад розглянемо, як розраховується кількість панелей в стрінг відповідно до технічних параметрів інвертора. Для розрахунків вибираємо панелі потужністю 450 Вт, від компанії LG з характеристиками нижче.



Рисунок 7.13 – Технічні характеристики сонячної панелі LG450N2W-E6

Серед цих параметрів найважливішим для нас буде:

- максимальна потужність- $P_{\text{мрр}}$ [Вт];
- допуск потужності – $\pm DP_{\text{мрр}}$ [%] (Power tolerance);
- напруга холостого ходу – U_{oc} [В];

- струм короткого замикання – I_{sc} [A];
- напруга при максимальній потужності – U_{mp} [B];
- струм при максимальній потужності – I_{mp} [A];
- робоча температура модуля в номінальних умовах – NOCT [°C] (зазвичай біля $43 \div 48$ °C);
- температурні коефіцієнти для: I_{sc} , U_{oc} , P_{mp} , – α_T , β_T , γ_T [%/°C].

Температурні коефіцієнти дозволяють розрахувати напругу та потужність, що генеруються сонячною панеллю в граничних умовах, з постійним значенням сонячної радіації. В Україні панелі можуть працювати в температурному діапазоні від -25 до +70 °C, тому для таких граничних умов проводяться розрахунки.

7.5 Варіанти виконання вітроустановок

Вітряні установки мають два основних варіанта виконання: автономні та підключені до зовнішньої мережі. Автономні застосовуються тоді, коли будинок або офіс повністю відключені від зовнішньої мережі і ВЕУ генерує всю необхідну електроенергію.

Підключені до зовнішньої електромережі установки живлять потрібних споживачів та одночасно видають надлишки енергії у зовнішню мережу. Таким чином, якщо у звітний період часу, якщо спожити енергії менше, ніж виробила ВЕУ, то енергопостачальна організація теоретично повинна компенсувати цю різницю [30].

Приведемо декілька популярних схем роботи вітрогенераторних систем із споживачем. Це всього лише деякі приклади, тому можливі і інші схеми роботи. В кожному випадку складається індивідуальний проект, який здатний вирішити поставлене перед нами завдання.

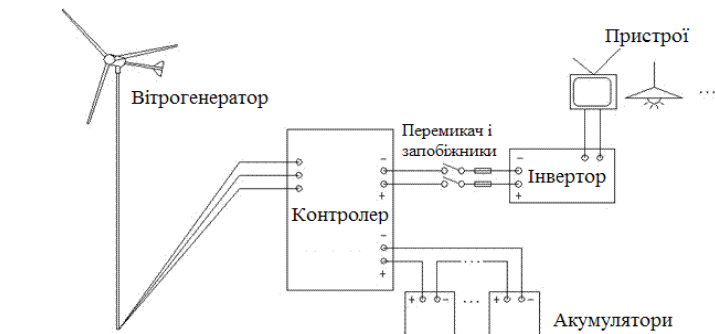


Рисунок 7.14 – Автономне забезпечення об'єкта (з акумуляторними батареями)

Об'єкт живиться тільки від вітроенергетичної установки.

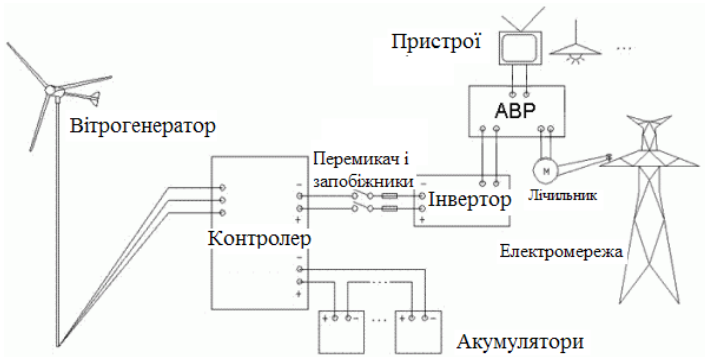


Рисунок 7.15 – Вітрогенератор (з акумуляторами) і комутація з мережею

АВР дозволяє перемкнути живлення об'єкта за відсутності вітру і повному розряді акумуляторів на електромережу. Ця ж схема може використовуватися і навпаки – вітрогенератор як резервне джерело живлення. У цьому випадку АВР перемикає на акумуляторні батареї вітрогенератора при відсутності живлення від електромережі.

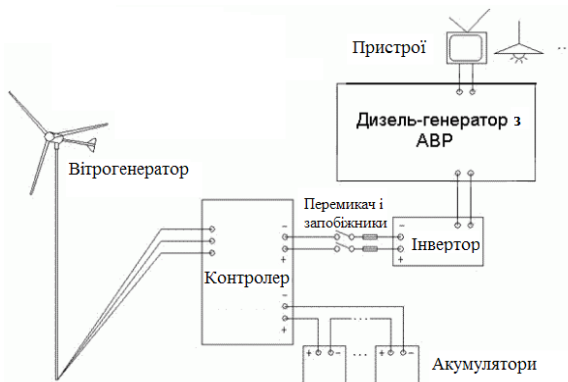


Рисунок 7.16 – Вітрогенератор (з акумуляторами) і резервний дизель- (бензо-) генератор

У разі відсутності вітру та при розряді акумуляторної батареї відбувається автоматичний запуск резервного дизель-генератора.

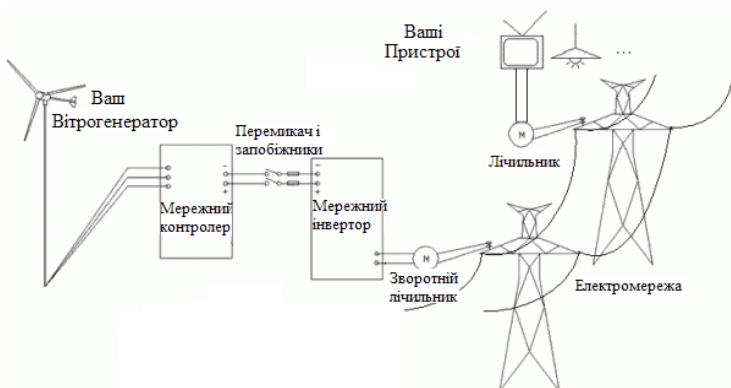


Рисунок 7.17 – Вітрогенератор (без акумуляторів) і комутація з мережею

Суспільна електромережа використовується замість акумуляторної батареї – в неї вирушає вся вироблена електроенергія і з неї споживається. Ви платите лише за різницю між виробленою і спожитою електроенергією. Така схема роботи поки-що не дозволена в Україні і в багатьох інших країнах.

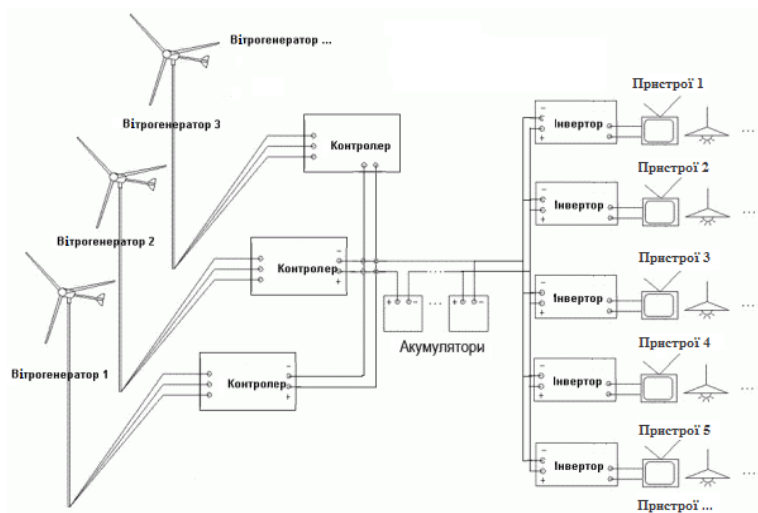


Рисунок 7.18 – Збільшення продуктивності системи

Можливо встановити два і більше генератора, інвертора і комплекту акумуляторів для збільшення потужності системи [33].

Основні схеми включення ВЕУ

Основними параметрами, які повинні бути розглянуті при виборі структури та схем вітроенергетичних установок, призначених для перетворення енергії вітру в електричну енергію, є: вид виробленої електроенергії (змінна напруга змінної або постійної частоти; постійна напруга); частота обертання вітродвигуна (постійна, близька до постійної, змінна); характер використання вироблюваної електричної енергії (застосування акумуляторних батарей, акумулювання за допомогою інших способів, видача електроенергії в мережу змінного струму енергосистеми). В даний час розроблено і застосовується значна кількість схем для перетворення енергії вітру в електричну енергію постійної або змінної напруги за допомогою електричних генераторів постійного струму і відповідно асинхронних або синхронних генераторів. В найпростішому випадку система використовується з електрогенератором постійного струму – отримується постійна напруга в мережі при різній швидкості вітру завдяки регулюванню збудження.

Генерування постійного струму даний час здійснюється в практично тільки на малих ВЕУ потужністю не більше 10...20 кВт. У цьому випадку не потрібна постійна частота обертання вітродвигуна і зазвичай застосовуються акумуляторні батареї. У сучасних ВЕУ перетворення енергії вітру здійснюється в основному тільки в схемах з генеруванням змінного струму. Наприклад, акумулювання енергії у вигляді теплоти з використанням її для опалення приміщень може бути здійснено при застосуванні ВЕУ змінної напруги з частотою, що змінюється або ВЕУ постійної напруги. Частота обертання вітродвигуна в цьому випадку не обов'язково повинна бути постійною. Застосування випрямних пристроїв дає можливість отримати постійну напругу, яка може бути використана безпосередньо або ж після його інвертування в змінну напругу постійної частоти.

Мінливість вітру і сильна залежність потужності ВЕУ від швидкості вітру ускладнюють забезпечення високої якості електроенергії та надійності електропостачання споживачів в автономному режимі роботи ВЕУ. Кількість годин використання генеруючої потужності ВЕУ залежить від середньорічної швидкості вітру і лежить в межах 2...4 тис. год на рік. Найбільш сприятливі для роботи ВЕУ осінньо-зимовий і ранній весняний періоди року, що в цілому збігається з умовами зміни електричного та теплового навантажень об'єктів автономного енергопостачання.

В даний час визнано, що великомасштабне отримання електричної енергії за рахунок використання енергії вітру має здійснюватися у вигляді змінної напруги постійної частоти для можливості подачі електроенергії, що виробляється в мережі існуючих енергосистем. Можливі технологічні схеми ефективного отримання електричної енергії за рахунок енергії вітру при паралельній роботі ВЕУ з енергосистемою, представлені на рис. 7.19.

Зусилля зі створення ВЕУ великої потужності значною мірою пов'язані з використанням вітродвигуна з постійною частотою обертання, сполученого з синхронним генератором або, при використанні асинхронного генератора, забезпечення обертання вітродвигуна з частотою, близькою до постійної.

Останнім часом привертає увагу інший підхід узгодження роботи ВЕУ з енергосистемою, який полягає в тому, щоб дати можливість вітродвигуну обертатися зі змінною оптимальною частотою, регульованою відповідно до зміни швидкості вітру, і з застосуванням спеціальних генеруючих систем забезпечувати отримання змінної напруги постійної частоти, що відповідає частоті напруги енергосистеми.

Методи отримання змінної напруги постійної частоти при змінній частоті обертання вала вітродвигуна в загальному випадку зводяться до диференціальних і недиференціальних груп. Диференціальні методи реалізуються в системах ВЕУ з синхронними генераторами за допомогою механічних пристроїв, що забезпечують отримання постійної частоти обертання генераторів (редуктори зі змінним передавальним відношенням, пристрої з гідравлічною передачею потужності і т.п.), а також за допомогою електричних пристроїв, що компенсують зміну частоти обертання за допомогою живлення обмотки збудження напругою з частотою, рівній різниці частоти обертання ротора генератора і частоти напруги енергосистеми, на яку працює генератор. Недиференціальні методи можуть бути реалізовані через статичні пристрої зміни частоти за схемою перетворення: змінна напруга – постійна напруга – змінна напруга.

Складність практичної реалізації таких схем полягає в необхідності мати в системі ланку (в силовому колі або в системі управління вітродвигуном), що забезпечує узгодження частоти і рівня напруги ВЕУ з цими ж параметрами в точці підключення до енергосистеми.

Існує безліч схем підключення ВЕУ до енергосистеми, основні відмінності яких складаються в конструкції і типу генераторів, а також наявності і типу перетворювальних пристроїв. На рис. 7.19 показано

схеми прямого підключення до енергосистеми ВЕУ з синхронним генератором (рис. 7.19, *а*) і асинхронним (рис.7.19, *б*) генератором з короткозамкненим ротором, підключеними до вітродвигуна через мультиплікатор (редуктор) n . Для реалізації таких схем паралельної роботи ВЕУ з мережею енергосистеми необхідною умовою є постійне підтримання синхронної швидкості обертання ротора СГ і надсинхронної швидкості – для АГ.

У разі паралельної роботи декількох ВЕУ з синхронними генераторами, частота обертання валів генераторів може підтримуватися стабільним шляхом наступних можливих варіантів підключення:

- кожен генератор має власний пристрій синхронізації;
- пристрої автоматичної синхронізації синхронізують генератори між собою у групах, а потім відбувається синхронізація груп з мережею;
- пристрої автоматичної синхронізації синхронізують генератори між собою в групі, потім синхронізуються групи, а з мережею синхронізація відбувається безпосередньо на головній підвищувальній підстанції.

Очевидно, що перший варіант найбільш повно відповідає експлуатаційним вимогам і дозволяє встановлювати мінімальну кількість синхронізуючих пристроїв. У цьому випадку будь-який з генераторів може підключатися до мережі незалежно від інших.

Застосування асинхронних генераторів дозволяє виключити з головної схеми ВЕС синхронізуючі пристрої. Однак у цьому випадку власнику ВЕС доводиться або розплачуватися з мережевою компанією за реактивну потужність, споживану установками з мережі. На рис.7.19, *б* в схемі застосований асинхронний генератор (АГ) класичної конструкції, що має короткозамкнений ротор. У асинхронному генераторі швидкість обертання ротора повинна бути вище синхронної швидкості та ковзання є негативним, але за абсолютним значенням приблизно однаковим з двигуном – 3...8 %. Розглянута схема характеризується сталістю швидкості обертання вітроколеса, що не є оптимальним з точки зору використання енергії вітру.

Для підвищення ефективності використання вітру пізніше стали використовувати ступеневе (зазвичай двоступеневе) регулювання швидкості. Для чого в статорі генератора закладається дві обмотки з різною кількістю пар полюсів. При низькій швидкості вітру, для збереження оптимальної швидкохідності застосовується низька швидкість обертання вітроколеса і в генераторі включається обмотка з найбільшим числом пар полюсів. Другий спосіб підключення ВЕУ до

енергосистеми, на відміну від попереднього способу, передбачає послідовне перетворення електроенергії перед подачею її в енергосистему за допомогою випрямлячів і інверторів, що не вимагає застосування систем підтримки сталості і синхронізації швидкості генераторів ВЕУ (рис. 7.19).

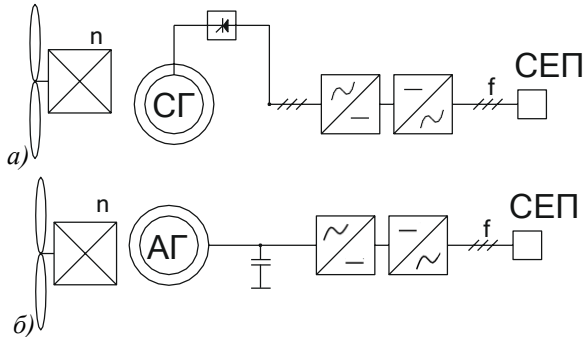


Рисунок 7.19 – Підключення ВЕУ до мережі через випрямляч і інвертор з синхронним (а) та асинхронним (б) генератором

На рис. 7.19, *а* зображена схема підключення на паралельну роботу з енергосистемою ВЕУ з синхронним генератором без пристрою синхронізації. У цій схемі на виході генератора частота струму змінюється в широкому діапазоні відповідно до зміни швидкості вітродвигуна. Далі змінний струм перетворюється у випрямлячі (В) у постійний і двожильним кабелем подається на інвертор (І), що знаходиться внизу у башті ВЕУ, де і перетворюється в змінний струм частотою 50 Гц. Тип інвертора – "ведений мережею", і це означає, що частота на виході інвертора задається фактично існуючою в кожному мить частотою мережі. Відомо, що за допомогою інвертора можна міняти кут між струмом і напругою. Якщо струм "відстає" від напруги, то генератор споживає реактивну потужність, а якщо струм "випереджає" напругу то генератор виробляє поряд з активною і реактивну потужність. Іншими словами, вітроустановка може брати участь у регулюванні напруги мережі в точці приєднання ВЕУ до енергосистеми. Природно, що випрямляч і інвертор в схемі розраховані кожен на повну потужність генератора, що призводить до подорожчання електричної частини ВЕУ.

На рис. 7.19, *б* зображена схема підключення на паралельну роботу з енергосистемою ВЕУ з асинхронним генератором з короткозамкненим ротором. Швидкість вітродвигуна і частота струму

на виході асинхронного генератора також змінюються в широкому діапазоні, а подальше перетворення і видача виробленої ВЕУ електроенергії в енергосистему здійснюється так само, як у схемі рис.7.19, *а*. Так як асинхронний генератор для намагнічування ротора повинен споживати реактивну потужність і за рахунок послідовно включених випрямляча і інвертора, не може отримати її з мережі, в схему на вихід генератора включена конденсаторна батарея, як джерело реактивної потужності.

На рис. 7.20 представлені схеми підключення ВЕУ до енергосистеми, характерною особливістю яких є наявність перетворювача частоти (ПЧ). У цих схемах перетворювачі частоти також розраховуються на повну потужність генератора ВЕУ.

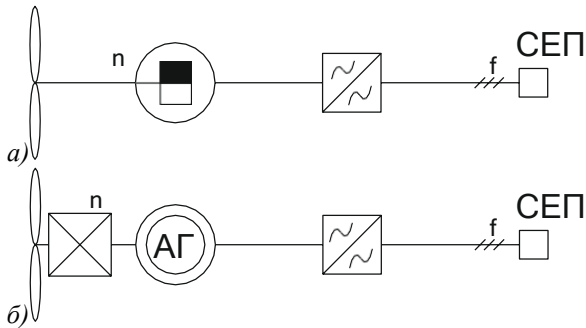


Рисунок 7.20 – Підключення ВЕУ до мережі за допомогою перетворювача частоти з (а) синхронним (без механічної передачі) і (б) асинхронним генератором

На рис. 7.20, *а* як приклад, показана схема підключення до енергосистеми ВЕУ з синхронним генератором і без мультиплікатора. Фірмою Enecon (Німеччина) розроблений тихохідний синхронний багатополосний генератор, що дозволило відмовитися від редуктора і істотно спростити механічну частину ВЕУ. Однак електрична частина істотно ускладнилася за рахунок включення в схему перетворювача частоти, але при цьому придбала додаткові позитивні якості. У таких системах може використовуватися також асинхронний генератор з короткозамкненим ротором (рис. 7.20, *б*). Так, наприклад, при зміні швидкості обертання вітроколеса відповідно змінюється швидкість обертання ротора генератора, що призводить до зміни частоти на виході генератора і вході в перетворювачі. Далі на виході перетворювача частота підтримується рівною частоті мережі (50Гц в Європі і 60 Гц в

США). Схема забезпечує підтримку оптимального значення швидкохідності у великому діапазоні зміни швидкості вітру. Однак це досягнуто ціною збільшення загальної вартості електрообладнання ВЕУ на величину вартості перетворювача частоти.

Контрольні питання до розділу 7

1. Опишіть пристрої для заряду акумуляторних батарей.
2. У чому особливість функціонування контролерів сонячних електростанцій?
3. У чому особливість функціонування контролерів вітрових електростанцій?
4. Який принцип вибору контролерів сонячних електростанцій?
5. Який принцип вибору контролерів вітрових електростанцій?

**СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ТА РЕКОМЕНДОВАНОЇ ДЛЯ
КОРИСТУВАННЯ ЛІТЕРАТУРИ**

1. *World Energy Outlook – 2023*, OECD/IEA, Paris.
2. Кудря С.О. Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії. Підручник. К.: НТУУ КПІ, 2012.
3. Звіт Global Bioenergy Statistics 2021, World Bioenergy Association - worldbioenergy.org
4. Міжнародне Енергетичне Агентство - iea.org
5. <https://dieret.rea.org.ua/uk/biomass-energy.html>
6. Bertani R. Geothermal Power Generation in the World 2010-2014 Update Report. World Geothermal Congress 2015. (19-25 April 2015, Melbourne, Australia).
<https://pangea.stanford.edu/ERE/db/WGC/papers/WGC/2015/01001.pdf>.
7. World Geothermal Congress 2015. Media Portal.
<http://www.geothermalpress.com/>.
8. Geothermal Handbook: Planning and Financing Power Generation. The World Bank. Technical Report 002/12, 72828. Energy Sector Management Assistance Program (ESMAP).
http://documents.worldbank.org/curated/en/396091468330258187/pdf/728280NWP0Box30k0TR0020120Optimize_d.pdf.
9. <http://dspace.nbuiv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/109877/10-Dolinskiy.pdf?sequence>
10. Енергетична стратегія України на період до 2030 року. Схвалена Розпорядженням КМУ №1071 від 24.07.2013.
<http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/n0002120-13/para3#n3>
11. Закон України «Про ринок електричної енергії»
<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2019-19#Text>
12. EU Energy in Figures. Statistical Pocketbook 2014.
13. Матеріали Міжнародної Асоціації централізованого енергопостачання (International District Energy Association)
<http://www.districtenergy.org/blog/2015/07/14/13939/energiewende-2050-targets-schope-2015-chart/>
14. Renewables 2015. Global Status Report
<http://www.ren21.net/status-of-renewables/global-status-report/>
15. IRENA (2014), REmap 2030: A Renewable Energy Roadmap, June 2014.
http://www.irena.org/remap/IRENA_REmap_Report_June_2014.pdf
16. RE-Thinking 2050. A 100% Renewable Energy Vision for the European Union. EREC, 2010.

http://www2.warwick.ac.uk/fac/soc/csgr/green/foresight/energyenvironment/2010_erec_rethinking_2050.pdf

17. World Energy Scenarios. Composing energy futures to 2050. Prepared by World Energy Council, 2013.

<https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2013/09/World-Energy-Scenarios-Composing-energy-futures-to-2050-Full-report.pdf>

18. Енергетичний баланс України за 2019 рік. Експрес-випуск Державної служби статистики України від 28.11.2019 № 510/0/08.4вн-14.

19. Постанова КМУ № 902-р від 01.10.2014 «Про Національний план дій з відновлюваної енергетики на період до 2020 року» <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/902-2014-%D1%80>

20. Energy Strategy 2050 - from coal, oil and gas to green energy (Denmark), 2011. <http://www.efkm.dk/sites/kebmin.dk/files/news/from-coal-oil-and-gas-to-green-energy/Energ%20Strateg%202050%20web.pdf>

21. Кузьмінський Є.В., Колбасов Г.Я., Тевтуль Я.Ю., Голуб Н.Б. Нетрадиційні електрохімічні системи перетворення енергії. Фото-, термо- та біопаливні елементи. – Чернівці: Рута. – 2003. – 95 с.

22. Кузьмінський Є.В., Гвоздяк П.І., Голуб Н.Б. Біопаливні елементи – проблеми і перспективи розвитку. 1. Ферментні паливні елементи // Мікробіологія і біотехнологія. – 2008. – №3. – С. 21–30.

23. Кузьмінський Є.В., Гвоздяк П.І., Голуб Н.Б. Біопаливні елементи – проблеми і перспективи розвитку. 2. Мікробіологія і біотехнологія. – 2009. – №3. – С. 15–30.

24. Кузьмінський Є.В., Щурська К.О. Біоелектрохімічне генерування водню в мікробному паливному елементі. 1. Загальна частина // Відновлювана енергетика. – 2010. – №4(23). – С. 87–97.

25. Кузьмінський Є.В., Голуб Н.Б., Лесько І.О. Електрохімічні аспекти біоенергетики // Відновлювана енергетика. – 2006. – №3. – С. 87–93.

26. Заявка на корисну модель №201006778 "Спосіб отримання електричної енергії за допомогою мікробного паливного елемента" Голуб Н.Б., Кузьмінський Є.В., Андруховець В.М., дата подання 01.06.2010, позитивне рішення від 01.11.2010.

27. O'Hayre R., Cha S-W., Colella W., Prinz V. F. Fuel Cell Fundamentals. – John Wiley & Sons, Hoboken, NJ. – 2009. – 576 p.

28. Васильєв О.Д., Баклан В.Ю., Макордей Ф.В. Керамічні паливні комірки: український досвід // Вісник Одеського національного університету. – 2010. – Хімія. – Т. 15, вип. 3. – С. 98–106.

29. Мельник Л.Г., Карінцева О.І., Сотник І.М. Економіка

енергетики: Навч. посібник. - Суми: ВТД „Університетська книга“, 2006. - 238 с.

30. Renewables 2015. Global Status Report

<http://www.ren21.net/status-of-renewables/global-status-report/>

31. IRENA (2014), REmap 2030: A Renewable Energy Roadmap, June 2014.

http://www.irena.org/remap/IRENA_REmap_Report_June_2014.pdf

32. A Roadmap for moving to a competitive low carbon economy in 2050. COM(2011) 112 final, 8.3.2011 <http://eurlex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:5db26ecc-ba4e-4de2-ae08-dba649109d18.0002.03/D0C1&format=PDF>

39. Денисюк С. П. Технологічні орієнтири реалізації концепції smart grid в електроенергетичних системах/П. Денисюк.//Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2014. – С. 7–20.

40. Technology Roadmap Smart Grids. – Paris: OECD/IEA, 2011. – 52 р.

41. Олійник Ю.С. Управління енергозбереженням та енергоспоживанням на промислових господарських підприємствах/Ю.С. Олійник// Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка: зб. наук. праць – Харків, 2016. - №176 – С. 87-88.

42. Малярєнко В. А. Енергетичні установки. Загальний курс: Навчальний посібник // Харків: ХНАМГ, 2007. – 288с.з іл.

43. Касаткіна І.В., Бойко С.М., Жуков О.А Інтелектуальні системи електропостачання. Навчальний посібник. Warsaw: iScience Sp. z o.o. – 2023. – 151 с.

44. Малярєнко В. А. Конспект лекцій з дисципліни «Технологія виробництва електроенергії» (для студентів 1, 2 курсів денної, 2 курсу заочної форм навчання за напрямом підготовки 6.050701 "Електротехніка та електротехнології" та слухачів другої вищої освіти зі спеціальності „Електротехнічні системи електроспоживання”) / В. А. Малярєнко, С. І. Доценко, І. О. Темнохуд; Харк. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова.– Х. : ХНУМГ, 2014. – 164 с.

45. Основи вітроенергетики: підручник / Г. Півняк, Ф. Шкрабець, О75 Н. Нойбергер, Д. Ципленков ; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Д.: НГУ, 2015. – 335 с. ISBN 978-966-350-526-8

46. Smart Grids and Energy Storage Bottled Sunlight [Електронний ресурс] // Pictures of the Future. – 2014. – Режим доступу до ресурсу: [https://www.siemens.com/innovation/en/home/pictures-of-the-future/energy-and-efficiency/smart-grids-and-energy-storage-bottled-](https://www.siemens.com/innovation/en/home/pictures-of-the-future/energy-and-efficiency/smart-grids-and-energy-storage-bottled)

sunlight.html.

47. World's Largest Fuel Cell Plant Opens in South Korea [Електронний ресурс] // Power. – 2014. – Режим доступу до ресурсу: <http://www.powermag.com/worlds-largest-fuel-cell-plant-opens-in-south-korea/>.

48. SDG&E and Sumitomo unveil largest vanadium redox flow battery in the US [Електронний ресурс] // Energy Storage. – 2017. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.energy-storage.news/news/sdge-and-sumitomo-unveil-largest-vanadium-redox-flow-battery-in-the-us>.

49. A Hybrid Approach to Energy Storage [Електронний ресурс] // Electronic Design. – 2017. – Режим доступу до ресурсу: <http://www.electronicdesign.com/power/hybrid-approach-energy-storage>.

50. Creating renewable energy storage out of hot air [Електронний ресурс] // New atlas. – 2017. – Режим доступу до ресурсу: <https://newatlas.com/ricas-2020-aa-compressed-air-energy-storage/48661/>.

51. Hybrid energy storage systems for renewable energy applications. // ELSEVIER. – 2015. – №73. – С. 103–111.

52. A novel use of the hybrid energy storage system for primary frequency control in a microgrid / [L. Jianwei, Y. Qingqing, Y. Pengfei та ін.]. // ELSEVIER. – 2016. – №103. – С. 82–87.

53. Wenlong J. Battery-supercapacitor hybrid energy storage system in standalone DC microgrids: areview / J. Wenlong, H. Chean, H. Shung. // IEEE. – 2017. – №11. – С. 461–469.

54. Design and new control of DC/DC converters to share energy between supercapacitors and batteries in hybrid vehicles / M. Camara, H. Gualous, F. Gustin, A. Berthon. // IEEE. – 2008. – №57. – С. 2721–2735.

55. Jiang Z. A compact digitally controlled fuel cell/battery hybrid power source / Z. Jiang, R. Dougal. // IEEE. – 2006. – №53. – С. 1094–1104.

56. Hybrid energy storage systems and control strategies for standalone renewable energy power systems / [L. Chong, Y. Wong, R. Rajkumar та ін.]. // ELSEVIER. – 2016. – №66. – С. 174–189.

57. Modelling and Simulation of Standalone PV Systems with Battery-supercapacitor Hybrid Energy Storage System for a Rural Household / W. C. Lee, W. W. Yee, K. R. Rajprasad, I. Dino. // ELSEVIER. – 2016. – №107. – С. 232–236.

58. Нерубацький В. П., Палхтій О. А., Машура А. В., Гордієнко Д. А. Аналіз технічних характеристик акумуляторних батарей і систем заряджання електромобілів Інформаційно – керуючі системи на залізничному транспорті ІКСЗТ, 2019 №6 с. 11-19.

59. В.А. Маляренко, Л.В. Лисак Енергетика, докiлля, енергозбереження. /Пiд заг. ред. проф. В. А. Маляренка, Х.: Рубiкон,

2004. – 368 с.

60. The Future of Hydrogen Seizing today's opportunities, IEA, 2019.

61. Solar Panel Splits Water to Produce Hydrogen, <https://spectrum.ieee.org>, Mar'19.

62. Japan team evaluates battery-assisted low-cost hydrogen production from solar energy, <https://www.greencarcongress.com>, Feb'19.

63. <https://avenston.com/articles/hydrogen-future/>

64. <https://e-auto.in.ua>

65. <https://sp-rent.com.ua/news/358-xcmg-vypuskaet-besplotnyu-elektricheskiy-karernyy-samosval.html>

66. <https://avenston.com/solutions/bess/>

67. <https://doi.org/10.31734/agroengineering2019.23.106>

68. <https://www.railway.supply/uk/akumulyatorna-tyaga-na-zalizniczi/>

69. <https://energyukraine.org/wp-content/uploads/2018/05/Otchet-MGES2.pdf>

70. <https://uhe.gov.ua/diyalnist/gidroenergetika>

71. <http://energetika.in.ua/ua/books/book-5/part-1/section-2/2-4>

72. Денисов Ю.О. Системи перетворювальної техніки. / Ю.О. Денисов. – Чернівці: ЧНТУ, 2014. – 170 с.

73. Denisov Y. et al. Switch operation power losses of quasi-resonant pulse converter with parallel resonant circuit //2016 IEEE 36th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). – IEEE, 2016. – С. 327-332.



Бойко Сергій Миколайович

1987 р. народження.

У 2011 р. закінчив Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, у 2020 р. закінчив Національний авіаційний університет, кандидат технічних наук (2014 р.), доцент (2023 р.).

З 2022 р. доцент кафедри Транспортні технології Національного університету «Запорізька політехніка».

Почесний посол науки ЦЕРН в Україні (2023).

Автор більше 200 науково-методичних праць, у т.ч. 22 патентів та 5 авторських свідоцтв, 11 навчальних посібників та 12 монографій.



Касаткіна Ірина Віталіївна

1951 р. народження.

У 1973 р. закінчила Криворізький орден Трудового Червоного Прапора гірничорудний інститут, кандидат технічних наук (1992 р.), доцент (1993 р.).

З 2011 доцент кафедри Автоматизованих електромеханічних систем в промисловості та транспорті ДВНЗ «Криворізький національний університет».

Автор майже 100 науково-методичних праць.



Городній Олексій Миколайович

1967 р. народження.

У 1992 р. закінчив Чернігівський технологічний інститут, захистив кандидатську дисертацію (2015) в Інституті електродинаміки Національної Академії Наук України. Почесний посол науки ЦЕРН в Україні (2022). Працює на посаді доцента кафедри електроніки, автоматики, робототехніки та мехатроніки Національного університету «Чернігівська політехніка» (2019). Автор більше 150 науково-технічних робіт. Активно проводить наукову роботу з учнями (в рамках МАН) студентами та аспірантами.



Жуков Олексій Анатолійович

1984 р. народження.

Кандидат технічних наук (2011), доцент (2023). Закінчив Вінницький національний технічний університет. Працює на посаді доцента кафедри комп'ютеризовані електромеханічні системи та комплекси Вінницького національного технічного університету.

Автор близько 70 наукових та методичних праць, в т.ч. патентів, навчальних посібників, монографій.

Бойко С.М., Касаткіна І.В., Городній О.М., Жуков О.А.

СИЛОВІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ВІДНОВЛЮВАЛЬНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

Навчальний посібник

Subscribe to print 14/06/2024. Format 60×90/16.

Edition of 300 copies.

Printed by “iScience” Sp. z o. o.

Warsaw, Poland

08-444, str. Grzybowska, 87

info@sciencecentrum.pl, <https://sciencecentrum.pl>



ISBN 978-83-68188-08-0

