

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

В.І. Сенько, К.В. Трубіцин, В.І. Чибеліс

ІНВЕРТОРИ І ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ЧАСТОТИ

Навчальний посібник

Київ
Видавництво Ліра-К
2020

УДК 621.314.632
С31

Друкується

*за рішенням Вченої ради Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
протокол № 7 від 25 червня 2018 р.*

Рецензенти:

В.Ф. Резцов, член-кореспондент НАН України, доктор технічних наук, професор

О.М. Юрченко, доктор технічних наук, старший науковий співробітник

Сенько В.І., Трубіцин К.В., Чибеліс В.І.

С31 Інвертори і перетворювачі частоти : навч. посіб — Київ : Видавництво Ліра-К, 2020. — 300 с.

ISBN 978-617-7844-11-1

У посібнику розглянуто результати досліджень залежних і автономних інверторів і перетворювачів частоти.

Матеріал супроводжується прикладами розрахунків основних силових схем інверторів.

Для фахівців, які займаються розробкою і дослідженням силових напівпровідникових перетворювачів електроенергії, аспірантів і студентів відповідних спеціальностей.

УДК 621.314.632

ISBN 978-617-7844-11-1

© Сенько В.І., Трубіцин К.В.,
Чибеліс В.І., 2020

© Видавництво Ліра-К, 2020

ЗМІСТ

Передмова	5
Вступ	7
Розділ 1. ЗАЛЕЖНІ ІНВЕРТОРИ	
1.1. Загальні відомості	10
1.2. Однофазний однопівперіодний інвертор	12
1.3. Однофазний інвертор з середньою точкою	16
1.4. Трифазний інвертор з середньою точкою	21
1.5. Трифазний мостовий інвертор.....	25
1.6. Коефіцієнт потужності інвертора.....	26
1.7. Аварійні режими роботи інверторів	28
1.8. Реверсивні перетворювачі постійного струму	31
Приклади	37
Розділ 2. АВТОНОМНІ ІНВЕРТОРИ	
2.1. Загальні відомості	41
2.2. Автономні інвертори струму	44
2.2.1. Інвертори струму на неповністю керованих вентилях	44
2.2.2. Інвертори струму на повністю керованих вентилях.....	71
2.3. Автономні резонансні інвертори	75
2.3.1. Резонансні інвертори без зворотних діодів.....	75
2.3.2. Резонансні інвертори зі зворотними діодами	94
2.4. Автономні інвертори напруги	105
2.4.1. Інвертори напруги на повністю керованих вентилях	106
2.4.2. Інвертори напруги з однополярним струмом	190
2.4.3. Інвертори напруги на неповністю керованих вентелях	193
Приклади	200
Розділ 3. ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ЧАСТОТИ	
3.1. Перетворювачі частоти з проміжною ланкою постійного струму (напруги)	233

3.2. Перетворювачі частоти з безпосереднім зв'язком.....	235
3.2.1. Перетворювачі частоти з безпосереднім зв'язком на не повністю керованих вентилях (тиристорах)	235
3.2.2. Перетворювачі частоти з безпосереднім зв'язком на повністю керованих вентилях.....	262
3.2.3. Підвищувальні перетворювачі частоти з безпосереднім зв'язком на повністю керованих вентелях.....	292
Список літератури	295

ПЕРЕДМОВА

Використання електричної енергії в різних областях техніки пов'язано з оптимальними умовами її генерації, передачі та розподілу. Для найбільш ефективного використання електричної енергії різні споживачі вимагають споживання її з нестандартними параметрами: регульованими частотою та напругою, іншим числом фаз ніж у джерел енергії. Тому між джерелом енергії та споживачем необхідні перетворювачі електроенергії.

Створення напівпровідникових приладів великої потужності, які працюють в ключових режимах, мають повну керованість і високу швидкодію, дозволило дискретно керувати потоками електричної енергії великої потужності на підвищених частотах за потрібними законами. Пристрої, побудовані на цих приладах, застосовуються в різних областях техніки і мають при передачі та споживанні електроенергії нові функціональні можливості, менші втрати електроенергії, дозволяють підвищити її якість, а також успішно вирішувати екологічні питання.

Повсюдне розповсюдження пристроїв силової електроніки в енергоємних областях (електропривод, електротехнології) вимагає підготовки спеціалістів з силової електроніки. Проте сучасної літератури з основ силової електроніки, орієнтованої на підготовку інженерно-технічних працівників електроенергетичних, електро-технічних, електромеханічних і електронних спеціальностей, розробників та дослідників самих пристроїв силової електроніки в Україні не достатньо. З метою поліпшення ситуації в цій царині і була написана ця книга.

Посібник «Інвертори і перетворювачі частоти» призначена для інженерно-технічних працівників, які займаються розробкою та проектуванням пристроїв силової електроніки, а також для студентів вищих навчальних закладів, що навчаються за напрямками «Електронні пристрої та системи», «Електротехніка та електротехнології» та «Електромеханіка».

У посібнику викладення теоретичного матеріалу супроводжується типовими задачами з розв'язаннями. Така побудова книги повинна сприяти більш активному засвоєнню та закріпленню теоретичного матеріалу та прищеплюванню вмінь і навичок розрахунку та аналізу електронних пристроїв.

У списку літератури наведені використані та рекомендовані для подальшого вивчення книги.

Авторський колектив при підготовці цього посібника використав багаторічний досвід науково-дослідної та методичної роботи в Національному технічному університеті «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського».

Велику вдячність автори виражають члену-кореспонденту НАН України, доктору технічних наук, професору Резцову В.Ф. (Інститут відновлювальної енергетики НАН України) і доктору технічних наук, старшому науковому співробітнику Юрченку О.М. (Інститут електродинаміки НАН України) за уважне рецензування рукопису та рекомендації щодо поліпшення його розділів, які були ураховані при доопрацюванні рукопису.

ВСТУП

Електрична енергія існує в різному вигляді: змінного струму з частотою 50 Гц (країни СНД, Західна Європа) або 60 Гц (США, Канада, частина країн центральної та Південної Америки та ін), змінного струму підвищеної частоти (400, 800, 1200 Гц та вище, автономні системи електропостачання), постійного струму (акумулятори, сонячні та теплові елементи, МГД- генератори). Це в основному визначається різноманітністю і специфікою споживачів електроенергії.

Для більш ефективного використання електричної енергії різні споживачі вимагають використання електричної енергії з нестандартними параметрами: частотою, регульованою напругою, іншим числом фаз.

У розвинутих країнах близько 40 % електроенергії, що виробляється, перед споживанням зазнає перетворення.

Прогрес більшості областей сучасної техніки нерозривно пов'язаний з успіхами силової електроніки. Силова електроніка охоплює методи та засоби, які забезпечують регулювання параметрів електричної енергії за допомогою електронних вентилів: некерованих (діодів) і керованих (транзисторів, тиристорів). Зміна параметрів електричної енергії з високим коефіцієнтом корисної дії (ККД) здійснюється без значних втрат як у статичному, так і динамічному режимах завдяки силовим вентилям з повним керуванням, малим часом вмикання та вимикання, керуванням малопотужними сигналами (див. том 1).

Розвиток силової електроніки весь час націлений на зменшення габаритів і маси пристроїв, на підвищення надійності та ефективності за рахунок поліпшення характеристик приладів силової електроніки — силових вентилів — і зменшення вартості виробництва.

У наш час силові перетворювальні пристрої широко використовують у кольоровій металургії та хімічній промисловості, на залізничному та міському транспортах, для живлення контактних мереж гірничорудного та інших видів промислового транспорту, у різних галузях промисловості: для регульованих електроприводів, збудження електричних машин, для зарядження акумуляторів, електрозварювання, гальванотехніки, електроерозійної обробки металів, пристроїв електротермії, для високовольтних ліній електропередач постійного струму, у джерелах вторинного електроживлення електронної апаратури та ін.

Основним областями застосування пристроїв силової електроніки, в яких вони дають найбільший економічний ефект, зараз є: засоби регулювання виробності технологічних кіл ТЕС і ГЕС (скорочення енерго-

споживання на власні потреби, що призводить до зниження собівартості 1 кВт·год); промисловий електропривод, який керується за допомогою напівпровідникового перетворювача електроенергії; комунальне господарство, вуличне освітлення натрієвими лампами високого тиску з електронною пускорегулювальною апаратурою, освітлення громадських приміщень компактними люмінесцентними лампами з електронним баластом; підвищення ефективності джерел вторинного електроживлення за рахунок використання імпульсних способів перетворення електроенергії; автомобільна електроніка (системи гальмування, керування двигуном, система стартер-генератор); побутова техніка (кондиціонери, холодильники, пральні машини, індукційні пічі, пирососи, світильники).

Всі можливі види перетворювачів електричної енергії поділяються на базові пристрої:

1. Випрямлячі, які перетворюють змінний струм у постійний (*AC-DC — Alternative Current - Direct Current*).

2. Інвертори, які перетворюють постійний струм у змінний (*DC-AC*).

3. Перетворювачі частоти, які перетворюють змінний струм однієї частоти у змінний струм іншої частоти, можливо і з іншим числом фаз (*AC-AC*).

4. Регулятори постійного струму (електронні трансформатори), які перетворюють постійний струм однієї напруги у постійний струм іншої напруги (*DC- DC*).

5. Регулятори змінної напруги, які перетворюють змінну напругу в регульовану змінну напругу тієї ж частоти.

6. Перетворювачі числа фаз, які перетворюють змінний струм з одним числом фаз у змінний струм тієї ж частоти з іншим числом фаз.

7. Помножувачі частоти, які перетворюють змінний струм однієї частоти у змінний струм іншої частоти, яка відрізняється у фіксоване число раз M від вхідної частоти.

8. Регульовані джерела реактивної (неактивної) потужності (ДРП), які дозволяють вводити в систему електропостачання додаткові (до реактивних потужностей споживачів) реактивні потужності зсуву, спотворення, несиметрії з метою компенсації відповідних потужностей неякісних споживачів і поліпшення таким чином якості електроенергії в системі електропостачання. Можливі два варіанти підмикання ДРП до мережі: до вузла (поперечна компенсація за рахунок задання додаткового струму у вузлі мережі) та між вузлами (поздовжня компенсація за рахунок задання додаткової напруги між вузлами мережі). Залежно від

виду, способу ввімкнення та алгоритму керування ДРП може виконувати функції компенсатора реактивної потужності зсуву, регулятора напруги у вузлі, активного фільтра (шляхом введення в мережу напруги або струму зі спектром, зворотним спектру збудження нормального режиму мережі).

Наведені вище базові пристрої характеризуються однократністю перетворення електроенергії. Для розширення властивостей перетворювачів електроенергії їх можна конструювати з базових, створюючи структури, які характеризуються багатократним (дво-, трикратним) перетворенням виду електроенергії на її шляху від входу до виходу перетворювача. Наприклад, випрямлення без регулювання, потім перетворення напруги, знову випрямлення без регулювання та ін.

РОЗДІЛ 1

ЗАЛЕЖНІ ІНВЕРТОРИ

1.1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

Пристрої перетворення змінного струму в постійний (випрямні пристрої) характеризуються передачею активної потужності з живильної мережі змінного струму в коло постійного струму — коло навантаження. У таких пристроях дуже часто потрібна рекуперація (зміна напрямку передачі) енергії з кола постійного у коло змінного струму. Це виникає у тих випадках, коли випрямний пристрій живить якірне коло машини постійного струму в системі електропривода транспортного засобу або вантажопідйомного механізму. При русі транспорту під ухил або вантажопідйомного механізму вниз (з вантажем) машина постійного струму переходить з режиму двигуна в генераторний за рахунок механічної енергії, що підводиться від виконавчого механізму. Цю енергію можна корисно використати, перетворивши в електричну та повернувши через вентильний перетворювач у мережу змінного струму. У перетворювачі при цьому відбувається зміна напрямку потоку активної потужності на протилежний, яка зветься *інвертуванням*. Процес перетворення енергії постійного струму в енергію змінного при наявності мережі змінного струму, створеної іншим джерелом енергії змінного струму, звать *залежним інвертуванням*. В електроенергетиці цей процес має місце у передачах електроенергії постійним струмом.

Зміна напрямку потоку активної потужності у колі постійного струму при збереженні незмінним його напрямку через перетворювач через наявність вентилів у ньому можлива тільки при зміні полярності напруги на виході перетворювача. Ця зміна забезпечується у відповідності з рівнянням регульовальної характеристики керованого вентильного перетворювача при роботі його на активно-індуктивне навантаження при кутах керування $\alpha > 90^\circ$

$$U_{d\alpha} = f(\alpha)|_{U_1=\text{const}} = U_0 \cos\alpha ,$$

де

$$U_{d0} = \frac{m_i}{\pi} E_{2m} \sin \frac{\pi}{m_i} \text{ — середнє значення випрямленої напруги не-}$$

керованого випрямляча;

m_{Π} — пульсність випрямляча (періодичність випрямленої напруги), яка визначає число пульсацій випрямленої напруги за період напруги живлення;

E_{2m} — амплітудне значення фазної електрорушійної сили ЕРС синусоїдальної форми $e_2 = E_{2m} \sin \vartheta$ вторинної обмотки трансформатора,

$\vartheta = \omega_1 t$, $\omega_1 = 2\pi f_1$ — колова частота напруги живильної мережі,
 f_1 — частота напруги живильної мережі.

При цьому зсується крива струму у первинній обмотці трансформатора, а отже, і його перша гармоніка на кут $\varphi_{(1)} = \alpha$. Тоді у відповідності з відомим виразом для визначення коефіцієнта потужності випрямляча

$$\lambda = \frac{U_1 I_{1(1)} \cos \varphi_{(1)}}{U_1 \sqrt{I_{1(1)}^2 + \dots + I_{1(q)}^2 + \dots}} = v \cos \varphi_{(1)},$$

де

$$v = \frac{I_{1(1)}}{\sqrt{I_{1(1)}^2 + \dots + I_{1(q)}^2 + \dots}} \text{ — коефіцієнт спотворення струму,}$$

$\varphi_{(1)}$ — кут зсуву фаз між напругою живильної мережі та першою гармонічною складовою струму первинної обмотки; при $\varphi_{(1)} > 90^\circ$ зміниться і знак активної потужності у колі змінного струму вентилячного перетворювача, тобто дійсно буде відбуватися віддача потужності в мережу змінного струму, а не її споживання з мережі, як у випадку режиму керованого випрямлення.

При інвертуванні джерело постійної напруги працює як генератор електричної енергії, у якого напрямок електрорушійної сили ЕРС і струму співпадають, а навантаження (мережа змінного струму) — як споживач, у якого напрямок ЕРС і струму зустрічні, тобто напруга на вторинній обмотці трансформатора та анодний струм тиристорів мають

різний напрямком.

Таким чином, вентильний перетворювач (керований випрямляч) може працювати в двох режимах — режимі керованого випрямлення та режимі залежного інвертування. У тих випадках, коли режим залежного інвертування є єдиним (тривалим), такий перетворювач постійної напруги у змінну, частота, форма та величина якої визначені іншою існуючою мережею, називають *залежним інвертором* або *інвертором, введеним мережею*.

Призначення залежного інвертора в цьому випадку зводиться до постачання додаткової активної потужності в існуючу систему змінної напруги. До появи режиму залежного інвертування у вентильному перетворювачі приводить робота його на обмотки магнітних систем (обмотки збудження електричних машин, електромагнітів). У тих випадках, коли треба швидко та ефективно вивести накопичену енергію з обмоток шляхом скиду з них струму, полярність напруги на обмотках треба змінити на зворотну, що забезпечується збільшенням кута керування α за 90° . У момент спаду струму до нуля режим залежного інвертування припиняється, тому що зникає джерело тимчасової енергії у колі постійного струму.

Таким чином, керовані випрямлячі та залежні інвертори мають однакові схеми перетворення.

1.2. ОДНОФАЗНИЙ ОДНОПІВПЕРІОДНИЙ ІНВЕРТОР

Схема найпростішого однофазного залежного інвертора (рис. 1.1,*a*) аналогічна схемі однопівперіодного випрямляча, що працює на навантаження у вигляді двигуна постійного струму. Інвертор складається з генератора постійної напруги з ЕРС E_d , тиристора VS , дроселя L_d і вихідного трансформатора TV . Первинна обмотка трансформатора w_1 підімкнена до мережі змінного струму з генератором змінної напруги e_m . На вторинній обмотці w_2 наводиться змінна напруга, яка може бути зображена без урахування втрат в інверторі у вигляді джерела змінної ЕРС e_2 (на рис. 1.1,*a* зображена пунктиром). Таким чином, у інверторі діють дві ідеальні ЕРС: постійна ЕРС E_d , по відношенню до якої

тиристор VS ввімкнений у провідному напрямку, та змінна ЕРС e_2 .

На протязі першого півперіоду (рис. 1.1,б) ЕРС e_2 і E_d співпадають за напрямком, тому, урахувавши наявність тиристора VS у колі, обидва джерела ЕРС можуть працювати тільки як генератори електричної енергії; при цьому споживачем енергії буде дросель L_d . На цьому інтервалі режим інвертування здійснити неможливо. На протязі другого півперіоду ($\pi \dots 2\pi$) ЕРС e_2 і E_d діють зустрічно і в інверторі можливий режим інвертування, коли енергія джерела постійної напруги буде передаватися джерелу змінної ЕРС e_2 (мережі змінного струму). При цьому ЕРС E_d буде співпадати за напрямком зі струмом i у колі, а напрямок ЕРС e_2 — зустрічний струму.

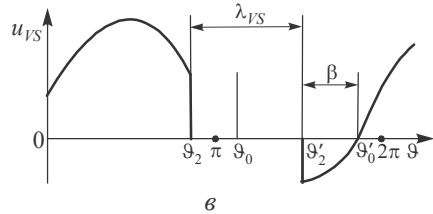
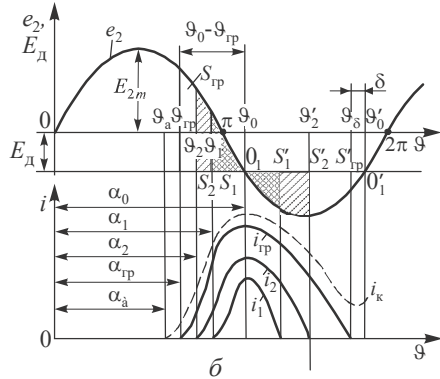
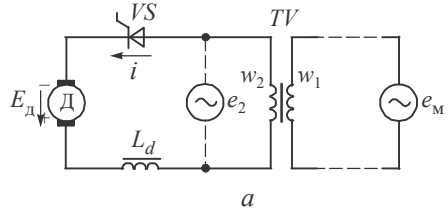


Рис. 1.1

Для здійснення режиму інвертування треба, щоб тиристор VS на протязі більшої частини першого півперіоду, коли ЕРС e_2 і E_d співпадають за напрямком, був надійно вимкнений і вмикався тільки в будь-який момент інтервалу $\vartheta_0 \dots \vartheta_{гр}$ (рис. 1.1,б). При цьому величина ЕРС E_d завжди менша за амплітуду ЕРС E_{2m} . Гранична точка ϑ_0 визначається тим, що тільки до точки 0_1 між анодом і катодом тиристора напруга позитивна і він може бути ввімкнений за допомогою сигналу керування. Друга гранична точка $\vartheta_{гр}$ визначається необхідністю створення визначеного інтервалу часу, який потрібен для відновлення вен-

тильних властивостей тиристора після проходження його струму через нульове значення до моменту появи позитивної напруги між анодом і катодом (до точки $0'_1$). При виконанні цих умов (при виборі кута керування α у діапазоні $\alpha_0 \dots \alpha_{\text{гр}}$) струм у режимі інвертування визначається як результат розв'язання диференціального рівняння

$$E_d + e_2 = x_d \frac{di}{d\vartheta}, \quad (1.1)$$

де $x_d = \omega_M L_d$ — реактивний опір контуру інвертування.

Миттєве значення струму

$$i = \frac{E_d}{\omega_M L_d} (\vartheta - \alpha) + \frac{E_{2m}}{\omega_M L_d} (\cos \alpha - \cos \vartheta). \quad (1.2)$$

На рис. 1.1,б представлена сім'я кривих струму, побудованих при різних значеннях кута керування α . Швидкість зміни струму прямо пропорційна алгебраїчній сумі ЕРС e_2 і E_d . При $E_d + e_2 > 0$ $di/d\vartheta > 0$ і струм зростає, при $E_d + e_2 = 0$ (момент часу ϑ_0) струм досягає максимуму. При $E_d + e_2 < 0$ струм зменшується і тече у колі за рахунок енергії, накопиченій у магнітному полі дроселя L_d .

Якщо вмикання тиристора VS здійснено до моменту часу π (рис. 1.1,б), наприклад, при куті керування $\alpha = \alpha_2$, то на інтервалі $\vartheta_2 \dots \pi$ ЕРС e_2 і E_d ще співпадають за напрямком і обидва джерела ЕРС працюють як генератори, електрична енергія яких перетворюється в енергію магнітного поля дроселя. На інтервалі $\pi \dots \vartheta_0$ джерело ЕРС (мережа змінного струму) працює як споживач електричної енергії, а в дроселі як і раніше відбувається накопичення енергії. З моменту часу ϑ_0 дросель L_d починає віддавати енергію в мережу змінного струму. Режим інвертування спостерігається на протязі інтервалу $\pi \dots \vartheta'_2$, поки струм i_2 в колі інвертора не досягне нульового значення. З моменту часу ϑ'_2 напруга на тиристорі VS стає негативною, зберігаючи негативне значення на протязі інтервалу β (рис. 1.1,в). З моменту часу ϑ'_0 та до наступного моменту подачі керуючого імпульсу на тиристор напруга між анодом та катодом тиристора позитивна (рис. 1.1,в).

Права частина виразу (1.1) визначає миттєве значення напруги на