

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

М.Я. Острроверхов, В.І. Сенько, В.І. Чибеліс

ІМПУЛЬСНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ СТАБІЛІЗОВАНОЇ НАПРУГИ

Навчальний посібник

Київ
Видавництво Ліра-К
2019

УДК 621.314.632

О-771

Друкується

*за рішенням Вченої ради Національного технічного університету
України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
протокол № 6 від 27.05.2019 р.*

Рецензенти:

В.Ф. Резцов, член-кореспондент НАН України, доктор технічних наук, професор, заст. директора з наук.роботи, Інститут відновлювальної енергетики НАН України;

О.М. Юрченко, доктор технічних наук, старший науковий співробітник, Інститут електродинаміки НАН України

М.Я. Островерхов, В.І. Сенько, В.І. Чибеліс

О-771 Імпульсні перетворювачі стабілізованої напруги : навч. посіб. — Київ : Видавництво Ліра-К, 2019. — 248 с.

ISBN 978-617-7844-10-4

У навчальному посібнику розглянуто результати досліджень імпульсних перетворювачів стабілізованої напруги.

Матеріал супроводжується прикладами розрахунків основних силових схем імпульсних перетворювачів постійної і змінної напруги.

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

УДК 621.314.632

ISBN 978-617-7844-10-4

© Островерхов М.Я., Сенько В.І.,
Чибеліс В.І., 2019

© Видавництво Ліра-К, 2019

ЗМІСТ

Передмова.....	5
Вступ.....	7
Розділ 1. ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ПОСТІЙНОЇ НАПРУГИ В ПОСТІЙНУ	
1.1. Загальні відомості.....	9
1.2. Нереверсивні імпульсні перетворювачі постійної напруги в постійну на повністю керованих вентилях без гальванічного розв'язання між входом і виходом.....	14
1.2.1. Нереверсивні знижувальні імпульсні перетворювачі постійної напруги (<i>Buck Converter</i>)	15
1.2.2. Нереверсивні підвищувальні імпульсні перетворювачі постійної напруги (<i>Boost Converter</i>)	47
1.2.3. Нереверсивні підвищувально-знижувальні імпульсні перетворювачі постійної напруги (<i>Buck-Boost Converter</i>)	56
1.2.4. Квадратичні перетворювачі постійної напруги	66
1.2.5. Безіндуктивні перетворювачі постійної напруги.....	68
1.2.6. Перетворювачі, які забезпечують на виході дві напруги різної полярності	71
1.2.7. Перетворювачі з частковою модуляцією вхідної напруги	73
1.2.8. Багатофазні ІППН	76
1.2.9. Нереверсивні квазірезонансні перетворювачі постійної напруги	79
1.2.10. Нереверсивні імпульсні перетворювачі постійної напруги з двостороннім обміном енергією	91
1.3. Імпульсні перетворювачі постійної напруги в постійну на повністю керованих вентилях з гальванічним розв'язанням між входом і виходом	94
1.3.1. Однотактний перетворювач постійної напруги зі зворотним ввімкненням випрямного діода і незалежним збудженням.....	96
1.3.2. Однотактний перетворювач постійної напруги зі зворотним ввімкненням випрямного діода і самозбудженням	106
1.3.3. Однотактний перетворювач постійної напруги з прямим ввімкненням випрямного діода	112
1.3.4. Однотактний перетворювач постійної напруги з передачею енергії в імпульсі та паузі.....	122
1.3.5. Двотактні імпульсні перетворювачі постійної напруги.....	125

1.3.6. Характерні особливості імпульсних перетворювачів постійної напруги на повністю керованих вентилях	134
1.4. Реверсивні імпульсні перетворювачі постійної напруги в постійну на повністю керованих вентилях	141
1.5. Імпульсні перетворювачі постійної напруги на не повністю керованих вентилях (тиристорах)	144
Приклади	156

Розділ 2. РЕГУЛЯТОРИ ЗМІННОЇ НАПРУГИ

2.1. Загальні відомості.....	182
2.2. Регулятори з фазовим способом регулювання вихідної напруги	187
2.3. Регулятори з вольтододатком	198
2.4. Регулятори з широтно-імпульсним способом регулювання вихідної напруги	202
2.5. Регулятори з високочастотним обміном енергією між накопичувальними елементами	207
Приклади	210

Розділ 3. КОМПЕНСАТОРИ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ ТА АКТИВНІ ФІЛЬТРИ

3.1. Компенсатори реактивної потужності.....	219
3.1.1. Реактори, керовані тиристорами.....	219
3.1.2. Конденсатори, комутовані тиристорами.....	225
3.1.3. Конденсаторно-реакторні компенсатори реактивної потужності	227
3.1.4. Компенсатори з вентильним джерелом реактивної напруги	228
3.2. Активні фільтри — компенсатори потужності спотворення.....	230
Список літератури	241

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 джерела енергії. Для цього застосовують різноманітні 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 (електротехнології, електропривод) вимагає підготовки спеціалістів з силової електроніки. Проте сучасної літератури з основ силової електроніки, орієнтованої на підготовку інженерно-технічних працівників електроенергетичних, електротехнічних, 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 «Імпульсні перетворювачі постійної і змінної напруги» 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», «Електроенергетика, електротехніка 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, прищеплюванню вмій та 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 імені 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 враховані при доопрацюванні рукопису.

ВСТУП

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

Значна частина електроенергії, що виробляється, перед споживанням зазнає перетворення або комутації. Це забезпечується пристроями силової електроніки.

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 ключів: некерованих (діодів) і керованих (транзисторів, тиристорів). Повністю керовані силові ключі нового покоління крім поліпшення загальних техніко-економічних характеристик (ККД і надійності) здатні керувати на підвищених частотах великими потоками потужності практично за будь-яким законом модуляції електричних імпульсів при мінімальних потужностях, витрачених на керування. Зміна параметрів електричної енергії здійснюється без значних втрат як у статичному, так і динамічному режимах.

У наш час до найбільш суттєвих результатів, отриманих за рахунок використання приладів нового покоління, можна віднести наступні:

- забезпечення роботи перетворювачів змінного/постійного струму у чотирьох квадрантах комплексної площини параметрів змінного струму;
- отримання струмів і напруг потрібної форми з регулюванням їх амплітуди, фази і частоти у широких діапазонах;
- фільтрацію вищих гармонік струму (напруги) несинусоїдальної форми;
- регулювання амплітудно-частотних характеристик фільтро-компенсувальних пристроїв;
- усунення короткочасних відхилень струму (напруги) від допустимих значень;
- швидкодіючий захист електронних пристроїв в аварійних режимах;

- забезпечення можливості більш повного використання досягнень інформаційних технологій, а також швидкодіючих контролерів з метою розширення можливостей керування об'єктом.

Найбільш поширеною областю споживання електроенергії є електропривод. Імпульсна модуляція і цифрові засоби керування дозволяють перевести керування асинхронним двигуном на принципово новий рівень, при якому можливо керування як швидкості, так і моменту асинхронного двигуна, наближаючи його за властивостями керуваності до двигуна постійного струму. Ефективне керування асинхронним двигуном дозволяє отримати великий економічний ефект від енергозбереження за рахунок оптимального керування. Наразі зростає роль електромобілів, використання яких суттєво знижує рівень забруднення навколишнього середовища.

ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ПОСТІЙНОЇ НАПРУГИ В ПОСТІЙНУ

1.1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

Вентильні перетворювачі з виходом на постійному струмі одержують на вході електроенергію від джерела змінної напруги, в якості якого звичайно використовують синхронні генератори. У той же час є багато первинних джерел електроенергії постійної напруги (сонячні батареї, термоелектрогенератори, паливні елементи, які використовують енергію хімічних реакцій, акумуляторні батареї, електромашинні генератори постійної напруги). Для перетворення постійної напруги одного рівня в постійну напругу іншого рівня, її стабілізації або (та) регулювання потрібні перетворювачі постійної напруги в постійну (ППН), які ще називають *регуляторами*.

Найбільш простим способом регулювання напруги є реостатне регулювання. Воно може застосовуватися як при змінній, так і постійній напрузі мережі. При такому способі регулювання між первинним джерелом електричної енергії та навантаженням вмикають регульований активний опір. При зміні величини цього опору відбувається перерозподіл напруги джерела живлення між регульованим опором і навантаженням. В якості активного опору можна використовувати транзистор, що працює в активному режимі. Головним недоліком цього способу регулювання є значні втрати енергії на регульованому опорі й відповідно невисокий ККД. Якщо регульований опір змінюється плавно, напруга на навантаженні також буде змінюватися плавно. Таке регулювання називається *безперервним*.

Для одержання високого ККД використовуються імпульсні методи перетворення та регулювання постійної напруги (ІППН). В основі принципу дії ІППН лежить ключовий режим роботи регулюючого напівпровідникового приладу, за допомогою якого здійснюється

періодичне підключення напруги джерела U_d до вихідного кола перетворювача (рис. 1.1,а). У результаті на виході формуються імпульси напруги (рис. 1.1,б). Малий спад напруги на регулюючому приладі у ввімкненому стані та малий струм у вимкненому стані обумовлює високий ККД перетворювачів даного типу.

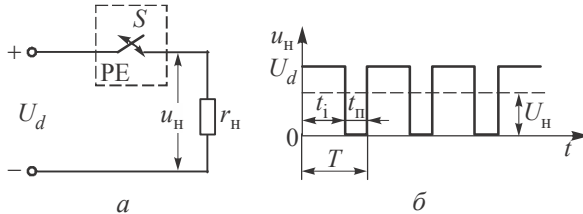


Рис. 1.1

На базі ІППН виконуються високоекономічні вторинні джерела електроживлення електронної апаратури, а також різного призначення регулятори та стабілізатори постійної напруги. Широку область застосування ІППН являє електропривод постійного струму (ЕПС), в якому за допомогою перетворювача здійснюється керування частотою обертання двигуна постійного струму (ДПС). Діапазон використання за потужністю складає: сотні Вт – одиниці кВт (прецизійне верстатобудування та машинобудування), десятки – сотні кВт (загальнопромисловий та тяговий електропривод).

Живильною напругою ІППН також можуть правити допоміжна внутрішньозаводська мережа постійного струму, контактна мережа постійного струму міського, приміського або магістрального електротранспорту. За допомогою ІППН достатньо ефективно вирішується задача керування постійною напругою і при первинній живильній мережі змінного струму. У цьому випадку потрібне попереднє перетворення змінної напруги в постійну здійснюється за допомогою некерованого випрямляча.

Регулювання напруги на навантаженні можна здійснити шляхом зміни параметрів вихідних імпульсів t_i , t_n , T і f , де t_i – тривалість вихідних імпульсів (тривалість відкритого стану ключа); t_n – тривалість

паузи між імпульсами (тривалість закритого стану ключа); T – період повторення імпульсів, f – частота прямування імпульсів (рис. 1.1,б).

Найбільшого поширення набули наступні способи імпульсного регулювання.

Широтно-імпульсне регулювання (ШІР), при якому змінюється тривалість (ширина) імпульсів ($t_i = \text{var}$), а період їх повторення залишається постійним ($T = \text{const}$). При цьому середнє значення напруги на навантаженні

$$U_H = \frac{1}{T} \int_0^{t_i} U_d dt = \frac{U_d t_i}{T} = U_d \gamma, \quad (1.1, a)$$

де $\gamma = t_i / T$ – коефіцієнт заповнення імпульсів.

Змінюючи плавно γ від 0 до 1, можна плавно регулювати U_H від 0 до U_d .

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

При цьому можливі такі випадки: а) $t_i = \text{const}$, $t_n = \text{var}$; б) $t_n = \text{const}$, $t_i = \text{var}$; в) $t_i = \text{var}$, $t_n = \text{var}$.

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

Для випадку а) середнє значення напруги на навантаженні

$$U_H = \frac{U_d t_i}{T} = U_d t_i f. \quad (1.2, a)$$

При цьому способі регулювання максимальнє значення напруги на навантаженні $U_{H \max} \rightarrow U_d$, коли частота прямування імпульсів наближається до свого максимального значення $f_{\max} \rightarrow 1/t_i$. Мінімальнє значення $U_{d \min} \rightarrow 0$, коли $f \rightarrow 0$.

Для випадку б) середнє значення напруги на навантаженні

$$U_H = \frac{U_d (T - t_n)}{T} = U_d (1 - t_n f). \quad (1.3, a)$$

При цьому способі регулювання максимальне значення напруги на навантаженні $U_{н\max} \rightarrow U_d$ при $f \rightarrow 0$, а мінімальне значення напруги $U_{н\min} \rightarrow 0$, коли частота прямування імпульсів наближаються до свого максимального значення $f_{\max} \rightarrow 1/t_п$.

Рівняння регулювальних характеристик, які визначають степінь регулювання середнього значення вихідної напруги для розглянутих вище способів регулювання, згідно виразів (1.1,а)...(1.3,а) мають вигляд:

$$\text{ШПР} - \quad C_p = \frac{U_n}{U_d} = \gamma = t_i^* , \quad (1.4,а)$$

де $t_i^* = t_i/T$ – відносна тривалість імпульсу;

$$\text{ЧПР} - а - \quad C_p = f^* , \quad (1.5,а)$$

де $f^* = f/f_{\max}$ – відносна частота імпульсів, $f_{\max} = 1/t_i$;

$$\text{ЧПР} - б - \quad C_p = (1 - f^*) , \quad (1.6,а)$$

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

Залежності (1.4,а)...(1.6,а) дозволяють для заданої напруги на навантаженні U_n визначити величину степеня регулювання, або для заданого степеня регулювання – середнє значення напруги U_n .

При роботі ІППН у режимі *стабілізації* напруги середнє значення напруги на навантаженні U_n залишається постійним, а напруга джерела живлення U_d змінюється. Очевидно, що при будь-якому способі регулювання мінімальна напруга джерела живлення не може бути менше напруги на навантаженні ($U_{d\min} = U_n$). Визначимо залежність степеня регулювання від *коефіцієнта перевищення напруги* $K = U_d/U_{d\min} = U_d/U_n$ для різних видів імпульсного регулювання.

Для ШПР $U_n = U_d t_i / T$. Отже, $t_i / T = U_n / U_d$. Або у відносних одиницях

$$C_p = t_i^* = 1/K . \quad (1.7,а)$$

Для частотно-імпульсного регулювання з постійною тривалістю імпульсу (ЧІР – а) $U_n = U_d t_i f = U_d f^*$. Отже,

$$1 \quad C_p = f^* = 1/K. \quad (1.8,a)$$

Для частотно-імпульсного регулювання з постійною тривалістю паузи (ЧІР – б) $U_n = U_d (1 - t_n f) = U_d (1 - f^*)$. Отже,

$$C_p = f^* = (K-1)/K. \quad (1.9,a)$$

Вирази (1.7,a) ... (1.9,a) дозволяють визначити величину степеня регулювання при зміні напруги живлення ІППН U_d .

Комбіноване регулювання, при якому одночасно змінюються всі параметри імпульсів t_i , t_n , $T(f)$, для регулювання напруги практично не застосовується, тому що в даному випадку система керування повинна одночасно регулювати два параметра ($T = t_i + t_n$). При цьому вихідна напруга U_n є функцією двох змінних, і такий регулятор може мати безліч регулювальних характеристик.

Залежно від типу напівпровідникових приладів (ключів), які застосовуються в силовій частині, розрізняють: а) ІППН на повністю керованих вентилях [транзисторах і запірних (двоопераційних) тиристорах]; б) ІППН на неповністю керованих вентилях (тиристорах).

І ті, й інші поділяються на нереверсивні та реверсивні.

Нереверсивні ІППН перетворюють постійну вхідну напругу в імпульсну з постійною амплітудою та полярністю, але з різною тривалістю.

Реверсивні ІППН перетворюють постійну вхідну напругу або в змінну з різною за період тривалістю дії позитивної і негативної напруги на навантаженні, або в імпульсну з постійною амплітудою імпульсів різної тривалості та полярності. В якості реверсивних перетворювачів зазвичай використовують мостові схеми.

Нереверсивні ІППН можна поділити на дві великі групи – паралельні та послідовні.

У послідовних ІППН робочий ventиль вмикається послідовно з навантаженням. Характерною особливістю послідовних ІППН є

неможливість одержання напруги на виході вище напруги джерела живлення.

У паралельних ППН робочий вентиль або накопичувальний дросель вмикається паралельно навантаженню. Характерною особливістю паралельних ППН є можливість одержання напруги на навантаженні, яка перевищує за величиною напругу джерела живлення.

Пристрої з імпульсним методом регулювання постійної напруги мають такі переваги в порівнянні з безперервним регулюванням:

- 1) високий ККД;
- 2) ефективне використання параметрів регулюючого елемента, який може працювати в режимах, близьких до максимально допустимих значень струму й напруги;
- 3) кращі масогабаритні показники (завдяки високому ККД силових ключів втрати потужності незначні, тому немає потреби в радіаторах для розсіювання тепла);
- 4) менша чутливість до зміни температури навколишнього середовища, оскільки регулюючим фактором є тривалість імпульсу, а не опір регулюючого елемента.

У той же час імпульсні регулятори не позбавлені таких недоліків, як:

- 1) необхідність застосування фільтрів;
- 2) менша швидкодія, пов'язана із застосуванням фільтрів;
- 3) виникнення при роботі електромагнітних завад, пов'язаних з великими швидкостями зміни струму й напруги в елементах регулятора.

1.2. ІМПУЛЬСНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ПОСТІЙНОЇ НАПРУГИ В ПОСТІЙНУ НА ПОВНІСТЮ КЕРОВАНИХ ВЕНТИЛЯХ БЕЗ ГАЛЬВАНІЧНОГО РОЗВ'ЯЗАННЯ МІЖ ВХОДОМ І ВИХОДОМ

За характером задач, які повинні вирішуватися ППН, всі схеми поділяються на три типи:

- знижувальні, для яких $U_n \leq U_d$;

- підвищувальні, для яких $U_H \geq U_d$;
- полярно-інвертувальні, які здійснюють зміну полярності вихідної напруги відносно спільної для входу й виходу точки з'єднання (вихідна напруга регулюється як вище, так і нижче вхідної).

1.2.1. Нереверсивні знижувальні імпульсні перетворювачі постійної напруги (*Buck Converter*)

На рис. 1.2 наведені схема ШПН (а), а також алгоритм перемикання транзистора та часові діаграми струмів і напруг при активно-індуктивному навантаженні (б) (дросель L_ϕ є або згладжувальним дроселем, або індуктивністю навантаження – обмоткою збудження двигуна постійного струму).

Коли транзистор VT відкритий (інтервал $0 \dots t_1$), від джерела живлення споживається енергія (шлях струму i_{H1} показаний суцільною лінією). При закритті транзистора VT (інтервал $t_1 \dots T$) струм навантаження за рахунок ЕРС самоіндукції зберігає свій попередній напрямок, замикаючись через зворотний діод VD (шлях струму i_{H2} показаний штриховою лінією). Діаграми побудовані при

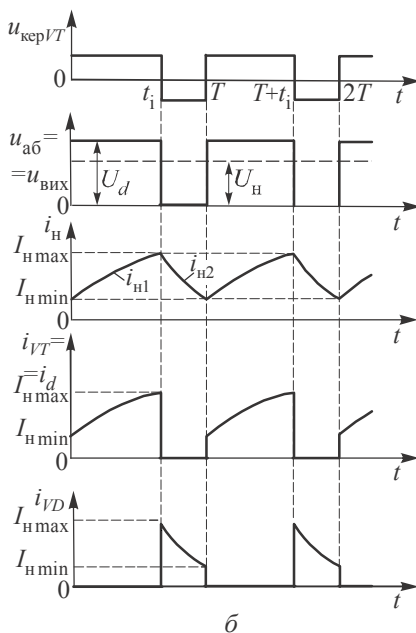
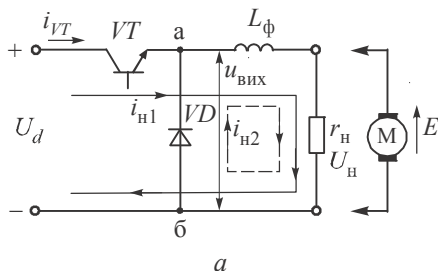


Рис. 1.2