

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**

**Український державний морський технічний університет  
імені адмірала Макарова**

**С.В. Драган**

**Джерела живлення для зварювання  
плавленням**

Рекомендовано Міністерством освіти і науки України  
як навчальний посібник для студентів  
технічних вузів і університетів

Миколаїв  
УДМТУ  
2002

УДК 621.791.7(075.8)

ББК 34.641

Д 72

*Рекомендовано Міністерством освіти і науки України як навчальний посібник, лист № 14/18.2 – 708 від 24.05.2001 р.*

*Рецензенти:*

доктор технічних наук, професор Юрій Михайлович Лебедєв;

доктор технічних наук, професор Юрій Пантілейович Кондратенко

**Драган С.В.**

Д 72 Джерела живлення для зварювання плавленням: Навчальний посібник. – Миколаїв: УДМТУ, 2002. – 320 с., з іл.

ISBN 5-87848-073-5

Розглянуто електричні характеристики зварювальної дуги та енергетичної системи "джерело живлення – дуга – ванна", їх взаємозв'язок.

Наведено теоретичні основи конструкції зварювальних джерел постійного і змінного струму.

Розглянуто основні типи сучасних джерел живлення для зварювання плавленням та споріднених технологій, наведено рекомендації щодо раціонального вибору джерел для заданих способів зварювання.

Посібник призначений для студентів, що навчаються за напрямом 0923 "Зварювання" та може використовуватися студентами напрямів 1002 "Кораблі та океанотехніка", 0905 "Енергетика", 0922 "Інженерна механіка".

УДК 621.791.7(075.8)

ББК 34.641

ISBN 5-87848-073-5

© Драган С.В., 2002

© Видавництво УДМТУ, 2002

## ВСТУП

Зварювання – це технологічний процес отримання нероз’ємних з’єднань як металевих, так і не металевих виробів. Зварювання за видами поділяється на зварювання тиском та зварювання плавленням. Найбільш поширене електричне зварювання плавленням, у якому провідне місце посідає дугове зварювання. Фізичний процес дугового зварювання ґрунтується на проходженні електричного струму великої густини через газовий проміжок. Цей процес вперше був описаний російським вченим В.В.Петровим у 1803 р.\*<sup>1)</sup> і отримав назву дугового розряду.

Дуговий розряд збуджується та підтримується енергією, що створюється джерелом живлення постійного або змінного струму. Конструкція та параметри джерела залежать від його технологічного призначення. Протягом історії зварювання створено багато різноманітних джерел живлення: від простих трансформаторів, генераторів та випрямлячів до досить складних сучасних джерел зварювального струму з застосуванням інверторної техніки та комп’ютерного керування.

Джерела живлення дуги можуть експлуатуватися як самостійний вид обладнання, так і у складі зварювальних установок та комплексів. Однополюсьове джерело живлення може використовуватися для ручного дугового зварювання покритим електродом, для механізованого зварювання плавким електродом в середовищі захисного газу або порошковим дротом, для механізованого (автоматичного) зварювання під флюсом.

---

\*<sup>1)</sup>Свої досліди з дугою В.В.Петров описав у книзі "Известие о гальвани-вольтовских опытах, которые производил профессор физики Василий Петров посредством огромной наипаче батареи, состоящей иногда из 4200 медных и цинковых кружков, и находящейся при Санкт-Петербургской Медико-Хирургической Академии". – С.Пб.,1803.

Якщо на одному робочому місці виникає необхідність зварювання різними способами, застосовують більш складні універсальні джерела живлення.

Сучасна концентрація виробництва приводить до того, що на багатьох суднобудівних, машинобудівних підприємствах, у будівництві має місце зосередження великої кількості зварювальних постів на обмеженій площі або на різних рівнях відносно поверхні землі. У цих випадках доцільна організація багатопостових систем живлення зварювальним струмом з використанням особливого типу джерел живлення – багатопостових або шляхом паралельного підключення однопостових джерел.

Перелічені вище джерела об'єднані в групу джерел загальнопромислового призначення. Суттєво відрізняються від них за конструкцією так звані спеціалізовані зварювальні джерела живлення для зварювання неплавким електродом у захисному газі, імпульсно-дугового зварювання, для плазмового зварювання та різання, електронно-променевого зварювання, струмом високої частоти, електрошлакового тощо.

Мета цього посібника – викладення та систематизація найбільш важливих питань щодо теоретичних основ будови джерел живлення для зварювання плавленням, принципів електричних схем та конструкції типових джерел, методів регулювання вихідних параметрів, визначення областей найбільш ефективного використання джерел.

При складанні даного посібника автор врахував, що "Джерела живлення для зварювання" – базова нормативна дисципліна освітньо-професійної програми підготовки бакалаврів з напрямку "Зварювання", а також те, що загальні відомості про це обладнання для зварювання розглядаються при вивченні технологічних дисциплін напрямів "Кораблі та океанотехніка", "Енергетика", "Інженерна механіка".

Навчальний посібник складається з 10 глав та додатку. Перша глава присвячена електричним властивостям зварювальної дуги, яка є основним видом навантаження джерела живлення; глави 2–9 – теорії, конструкції та методам регулювання джерел живлення різного призначення; глава 10 – техніці безпеки та охороні праці при експлуатації зварювальних джерел живлення. У додатку наведено головні технічні характеристики сучасних джерел живлення вітчизняного та закордонного виробництва.



Посібник написаний відповідно до навчальної програми дисципліни "Джерела живлення для зварювання", тому в кінці розділів надано приклади практичного використання основних понять та теоретичних відомостей, а також питання для самоконтролю знань, які є складовими частинами комплексного контрольного завдання з дисципліни.

Матеріали посібника можуть бути використані також у практичній роботі інженерно-технічними працівниками зварювального виробництва.

Автор висловлює подяку професору Ю.М. Лебедєву та професору Ю.П. Кондратенку за цінні поради та зауваження при підготовці рукопису.

## ЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЗВАРЮВАЛЬНОЇ ДУГИ

Зварювальною дугою називається потужний електричний розряд у сильно іонізованій суміші газів і парів різноманітних матеріалів, що звичайно протікає при атмосферному тиску. Гази і пари при низьких температурах складаються з нейтральних молекул і атомів, тобто на відміну від металевих провідників, не містять вільних електронів. Тому газовий проміжок, у якому виникає потужний дуговий розряд, має бути іонізованим – містити електрони та іони. Для іонізації газової молекули або атому їм необхідно надати енергію іонізації, тобто енергію виділення з нейтрального атома або молекули одного електрона з утворенням позитивного іона.

### 1.1. Збудження дугового розряду

Виникнення (збудження) зварювальної дуги можливо здійснити двома способами: 1) розсувом двох струмонесучих попередньо замкнених електродів; 2) як розвиток дугового розряду з нестійкого перехідного іскрового розряду.

Розряд при струмах силою  $10^{-1} \dots 10^3$  А об'єднаний загальною назвою – дуговий розряд (рис.1.1).

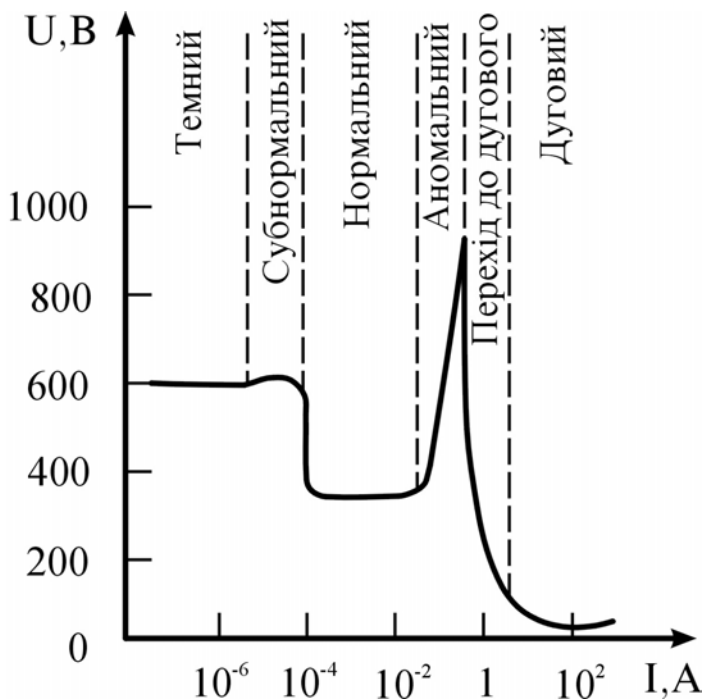


Рис.1.1. Статична вольт-амперна характеристика електричного розряду

Механізм збудження дуги після короткого замикання пояснюється тим, що зімкнення реальних твердих тіл при невеликому тиску здійснюється, як відомо, невеликою кількістю мікрориступів. Струм, який проходить крізь них, створює високу густину, викликає швидкий нагрів та випаровування контактних містків. У цих місцях метал підніжжя вис-

тупів розігрівається до температури кипіння, що на деяких металах приводить до термоелектронної емісії. При розведенні кінців електродів у цих умовах напруженість електричного поля достатня для потужної електро-статичної емісії електронів з поверхні катода і появи у розрядному проміжку вільних електронів. Зіткнення електронів з атомами газу викликає їх іонізацію, розмноження носіїв струму та подальший розвиток розряду. Для збудження дугового розряду таким способом достатня напруга на кінцях електродів 50...100 В.

Перехід іскрового розряду в дуговий відбувається в газі між електродами при атмосферному тиску під дією напруги, яка спроможна викликати пробій проміжку, тобто іонізацію газового атома або молекули.

При збудженні дуги високою напругою її розвиток проходить стадії іскрового, темного та жевріючого розрядів, що переходять по мірі зростання струму в дуговий. Прикладене до електродів високочастотне поле також приводить до збільшення кількості актів іонізації на кожен заряд.

Електричне поле високої частоти та напруги створюється спеціальним пристроєм – осцилятором. Докладно роботу осцилятора буде розглянуто у главі 6.

Для стійкого збудження дуги способом пробою розрядного проміжку треба мати напругу 3...5 кВ.

## **1.2. Процеси у зварювальній дузі постійного струму.**

### **Розподіл потенціалу вздовж дуги**

При розгляді фізичного процесу дугового зварювання використовують просту каналову модель, згідно з якою зварювальну дугу постійного струму зображують у вигляді циліндра, який складається з трьох ділянок (рис.1.2,*a*) і спирається своєю нижньою основою на виріб. За зовнішніми ознаками зварювальну дугу практично неможливо розділити на будь-які конкретні зони, тому що весь розрядний проміжок між електродом та виробом являє собою світний іонізований газ.

Незважаючи на це, в контактних областях електрод – іонізований газ – виріб знаходяться проміжні шари газу, температура яких значно нижче за

температуру іонізованого газу. Тому умовно дуговий проміжок зображують трьома ділянками: катодна область, стовп дуги та анодна область.

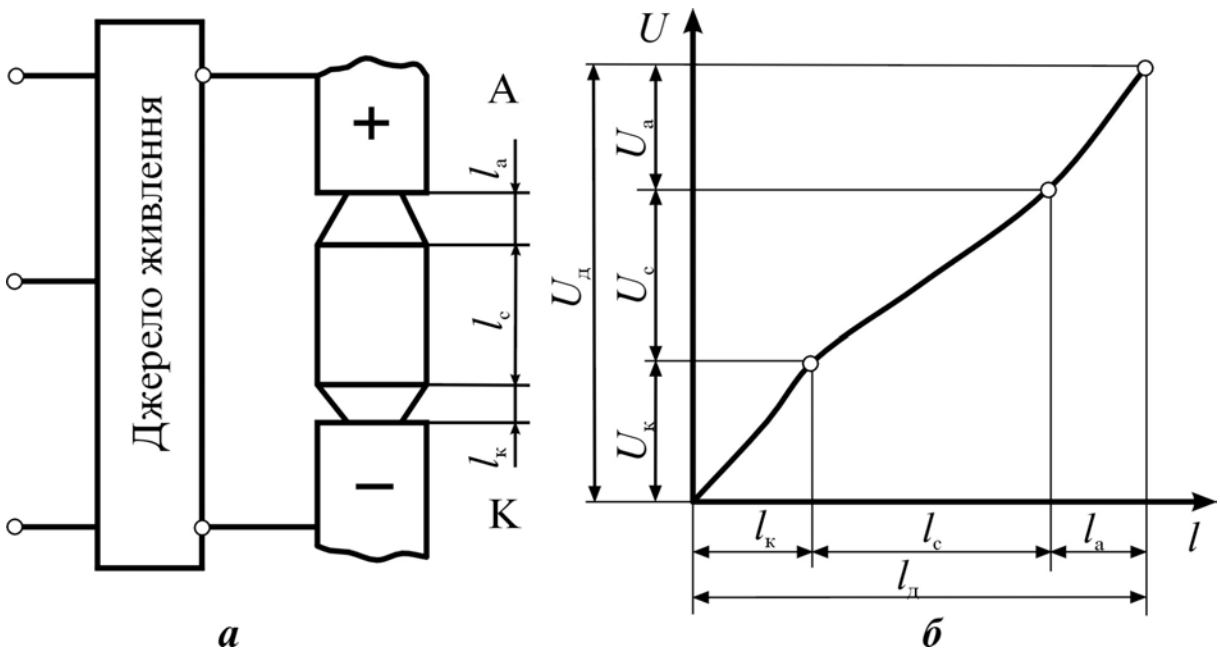


Рис.1.2. Схема розподілу дугового проміжку на ділянки (а) та спад потенціалу в них (б)

У приелектродних областях на поверхнях катода та анода виникають активні плями. Активна пляма катода є джерелом вільних електронів, а активна пляма анода – місцем нейтралізації електронів. Через активні плями катода і анода проходить весь зварювальний струм, тому вони є найбільш розігрітими.

*Катодна область.* Поблизу катода зварювальної дуги має місце складна сукупність процесів, завдяки чому струм із відносно холодного катода проходить у гарячу плазму. Струм може переноситися електронами емісії та іонами плазми стовпа дуги. Через велику рухомість електронів поблизу катода створюється некомпенсований об'ємний заряд, що забезпечує катодне падіння потенціалу  $U_k$  (рис.1.2,б). Катодне падіння потенціалу  $U_k$  при зміні струму в широкому діапазоні змінюється мало. Воно залежить від захисного середовища та матеріалу електрода, з якого виникає розряд. Значення катодного падіння потенціалу важко заміряти, тому можна приймати його узагальнене значення для дуги, що горить у повітрі, згідно з табл 1.1.

Довжина катодної області складає  $l_k = 10^{-6} \dots 10^{-7}$  м і дорівнює довжині вільного пробігу електрона; напруженість електричного поля у цій області найбільша і досягає  $E_k = 1,5 \cdot 10^8$  В/м. В катодній області здійснюється прискорення електронів, емітованих із катода і іонів, що рухаються до катода. Внаслідок малої енергії електронів співударяння тут носять головним чином пружний характер, і тому ця область розряду практично не випромінює. Характерним для цієї області є також надлишковий позитивний об'ємний заряд, викликаний тим, що швидкі електрони залишають її скоріше, ніж повільні позитивні іони.

Таблиця 1.1. Катодний потенціал елементів

Елемент	Fe	Cu	Al	C
Значення $U_k$ , В	15	13	13,5	9

*Стовп дуги.* Основний об'єм дугового розряду займає стовп дуги – область, у якій електричне поле слабке. Швидкі електрони, які потрапляють із катодної області до стовпа дуги, у щільному газі швидко передають свою енергію важким частинкам – іонам, атомам, молекулам. Стовп дуги вважається квазінейтральним тому, що у кожному перерізі стовпа є однакова кількість негативно і позитивно заряджених частинок. При русі заряджених та нейтральних частинок у стовпі дуги відбувається їх співудар, що викликає іонізацію стовпа дуги. Ступінь іонізації газу дуже мала і визначається температурою стовпа дуги, потенціалами іонізації та збудження компонентів газової суміші і парів, що знаходяться у дуговому проміжку.

Завдяки високій температурі газу у стовпі дуги (6000...8000 °С) головне значення має термічна іонізація. Одночасно у стовпі дуги проходить протилежний іонізації процес – рекомбінація, яка супроводжується електромагнітним випромінюванням у широкому діапазоні частот коливань: від інфрачервоного до ультрафіолетового.

Під дією поздовжнього електричного поля у стовпі дуги заряджені частинки отримують спрямовану швидкість. Через те, що іони важчі від електронів, швидкість їх руху незначна, і тому іонним струмом можна не-

хтувати. Струм у стовпі дуги обумовлений головним чином рухом електронів, тобто подібний до струму у металевих провідниках.

Стовп дуги характеризується падінням потенціалу  $U_c$ , опором  $R_c$  та довжиною  $l_c$ . Падіння потенціалу стовпа дуги суттєво залежить від сили зварювального струму  $I_d$ , захисного середовища, матеріалу електродів і може змінюватися у широких межах:  $U_c = 6...40$  В. Довжина стовпа дуги складає від одного до декількох десятків міліметрів, напруженість електричного поля у цій області  $E_c \approx (2...5) \cdot 10^3$  В/м.

Падіння потенціалу у стовпі дуги приблизно можна визначити за формулою

$$U_c = I_d R_c, \quad (1.1)$$

де  $R_c = \frac{l_c}{S\gamma}$  – опір стовпа дуги в сталому стані. Тут  $S$  – площа перерізу дуги (приблизно переріз електрода);  $\gamma$  – питома електропровідність газового проміжку.

*Анодна область.* Анодна область, як і катодна, характеризується різким збільшенням напруженості поля. Тут часто спостерігається звуження струмового шнура. Анод не емітує іони і, відповідно, струм поблизу нього переноситься тільки електронами. Позитивні іони спрямовуються під дією поля в бік стовпа дуги і поблизу анода виникає область негативного об'ємного заряду.

Довжина анодної області співмірна катодній, а анодне спадання потенціалів практично не залежить від струму і складає  $U_a = 2...4$  В. Напруженість електричного поля в анодній області досягає  $E_a = 10^7$  В/м.

Обмеження площі поперечного перерізу стовпа дуги приводить до зниження площі активної плями анода, зони її переміщення і, як наслідок, – до збільшення концентрації енергії та температури анодної області дуги. Зварювальна дуга з обмеженою площею поперечного перерізу стовпа дуги називається стисненою.

Під час горіння дуги поблизу активних плям катода й анода внаслідок випаровування металу електрода та виробу виникають потоки іонізованого газу, так звані плазмові. Вони підтримують перпендикулярний напрям стовпа дуги відносно поверхні активних плям катода й анода та визначають при зварюванні глибину проплавлення виробу і висоту валика шва. Активні плями хаотично переміщуються по поверхні катода й анода, що приводить до хаотичного переміщення у просторі плазмових потоків. Під час горіння дуги це збільшує анізотропію дугового проміжку.

Таким чином, внаслідок різних фізичних процесів в областях зварювальної дуги розподіл потенціалу вздовж неї нерівномірний, і тому дуга є нелінійним елементом електричного зварювального кола.

Сумарне падіння потенціалу в дузі можна розрахувати за формулою

$$U_{\text{д}} = U_{\text{к}} + U_{\text{а}} + U_{\text{с}} \approx U_{\text{к.а}} + I_{\text{д}} \frac{l_{\text{с}}}{S\gamma}. \quad (1.2)$$

Напруга в дузі зростає прямо пропорційно її довжині. Для зварювальної дуги при плавкому електроді характерно  $U_{\text{к}} > U_{\text{а}}$  та  $U_{\text{к.а}} > U_{\text{с}}$ . Тепло, що виділяється у приелектродних областях, витрачається на нагрівання та плавлення електрода і виробу.

Кожен спосіб зварювання характеризується своїм значенням напруги в дузі, а в цілому вона може змінюватися у межах  $U_{\text{д}} = 12 \dots 52 \text{ В}$ .

Залежності  $U_{\text{д}}$  від матеріалів електродів, захисного середовища, сили струму та опору дуги дозволяють визначити параметри зварювального джерела живлення, які забезпечують стійке горіння дуги та якісне формування шва.

### 1.3. Статичні вольт-амперні характеристики зварювальної дуги

При будь-якому способі зварювання при сталій довжині дуги напруга в ній певним чином залежить від сили струму. За довжину дуги звичайно приймають довжину стовпа дуги, нехтуючи при цьому незначною довжи-

ною приелектродних областей. Залежність напруги в дузі від сили зварювального струму при постійній довжині дуги називають статичною вольт-амперною характеристикою дуги (СХД), тобто це графік функції  $U_{\text{д}} = f(I_{\text{д}})_{I_{\text{д}}=\text{const}}$ . Внаслідок того, що зварювальна дуга є нелінійною ділянкою зварювального кола, для визначення її статичної характеристики використовують поняття динамічного (диференціального) опору:

$$R_{\text{диф}} = \lim_{\Delta I_{\text{д}} \rightarrow 0} \frac{\Delta U_{\text{д}}}{\Delta I_{\text{д}}} = \frac{dU_{\text{д}}}{dI_{\text{д}}} \approx m_R \operatorname{tg} \beta, \quad (1.3)$$

де  $m_R = \frac{M_{\text{н}}}{M_{\text{с}}}$  – відношення масштабів напруги і струму на графіку вольт-амперної характеристики;  $\beta$  – кут нахилу дотичної у даній точці вольт-амперної характеристики до осі струмів. Залежно від значення диференціального опору за умови, що інші параметри дуги не змінюються, існують три форми СХД: спадна, жорстка та зростаюча (рис.1.3).

Спадну вольт-амперну характеристику (рис.1.3,*а*) мають дуги, що вільно горять у повітрі або в аргоні при силі зварювального струму до 80...100 А (густині струму 5...25 А/мм<sup>2</sup>). Зниження напруги в дузі при збільшенні зварювального струму пояснюється тим, що оскільки падіння потенціалу в приелектродних областях майже не залежить від зварювального струму, то сумарна напруга в дузі визначається падінням потенціалу в стовпі дуги. В дузі, що вільно горить у повітрі, при збільшенні струму більш інтенсивно протікає іонізація, зростає провідність стовпа дуги та площа його поперечного перерізу. В зварювальній дузі, що вільно горить у середовищі аргону, збільшення провідності стовпа дуги супроводжується інтенсивною іонізацією захисного газу зі зростанням його температури. На ділянці спадної СХД динамічний опір – величина від'ємна, тобто

$$R_{\text{диф}} < 0, \text{ або } \frac{dU_{\text{д}}}{dI_{\text{д}}} < 0.$$

Жорстку вольт-амперну характеристику (рис.1.3,*б*) мають зварювальні дуги при струмах у діапазоні 80...400 А (густині струму 30...125 А/мм<sup>2</sup>).



Напруга в дузі у цьому випадку визначається сумарним падінням потенціалу в приелектродних областях та стовпі дуги, площа поперечного перерізу якого зростає пропорційно збільшенню зварювального струму; провідність дугового проміжку при цьому не змінюється. На ділянці жорсткої СХД динамічний опір дорівнює нулю, тобто

$$R_{\text{диф}} = 0, \text{ або } \frac{dU_{\text{д}}}{dI_{\text{д}}} = 0.$$

Зростаючу вольт-амперну характеристику (рис.1.3,б) мають дуги при струмах вище 400 А (густині струму більше 150 А/мм<sup>2</sup>). Напруга в дузі в цьому випадку збільшується не за рахунок зростання площі поперечного

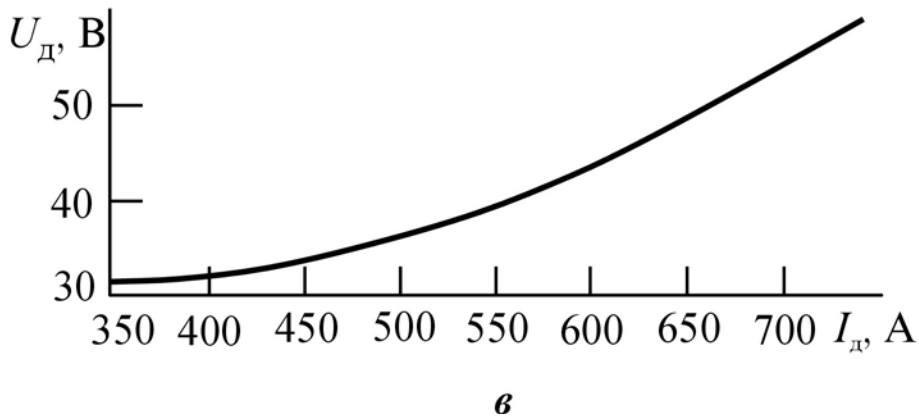
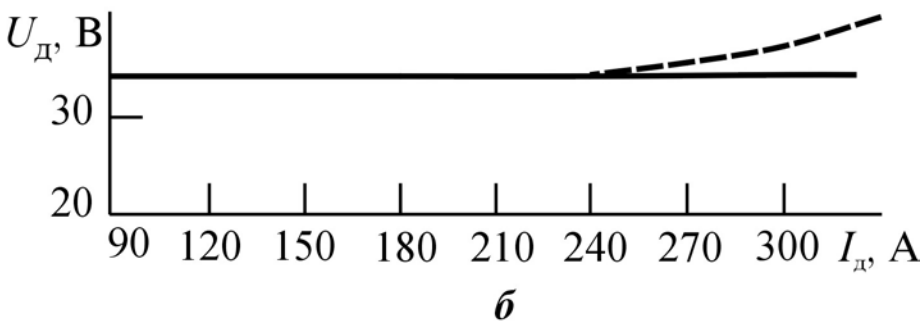
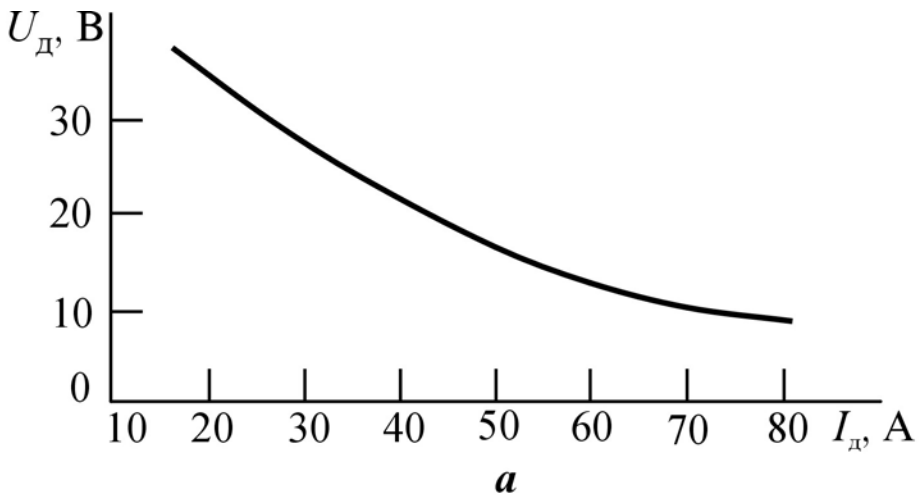


Рис. 1.3. Статичні вольт-амперні характеристики дуги

перерізу активної плями катода, яка займає весь торець електрода, а внаслідок збільшення концентрації зарядів у ній. Це приводить до інтенсивного спаду потенціалу в приелектродній області катода, яке є складовою частиною напруги в дузі. В області зростаючої СХД динамічний опір – величина додатня, тобто

$$R_{\text{диф}} > 0, \text{ або } \frac{dU_{\text{д}}}{dI_{\text{д}}} > 0.$$

При збільшенні довжини дуги, згідно з рівнянням (1.2), статична характеристика дуги, незалежно від її форми, еквідистантно переміщується уверх.

В загальному вигляді характер зміни напруги в дузі можна пояснити за допомогою рівняння (1.2) тому, що залежності  $U_{\text{д}} = f(I_{\text{д}})$  аналогічні одній із ділянок СХД, наведеній на рис.1.4. Кожна з ділянок цієї узагальненої СХД характерна для певного способу дугового зварювання.

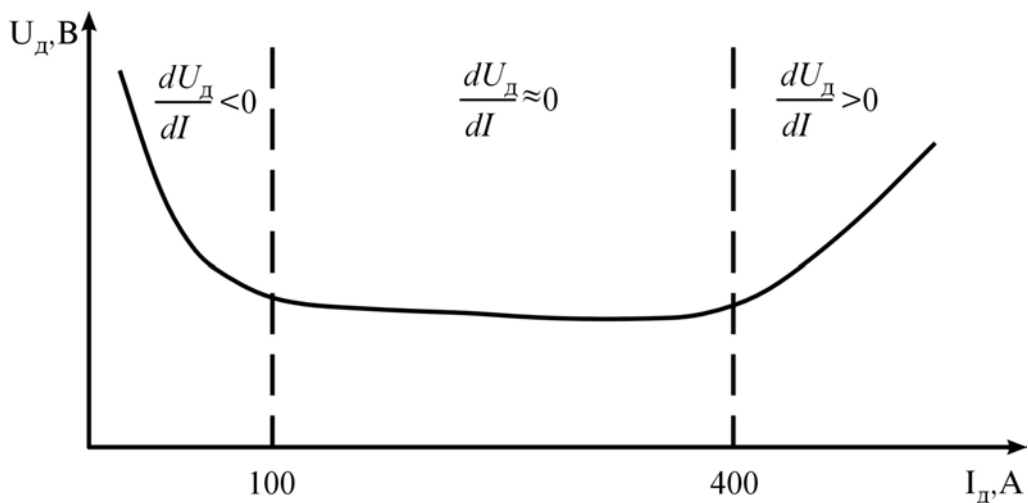


Рис. 1.4. Узагальнена статична вольт-амперна характеристика дуги

Так, зварювання покритими електродами та вольфрамовим електродом виконують із застосуванням невеликої густини струму, тому СХД для цих способів зварювання – спадна. При ручному дуговому зварюванні на форсованих режимах СХД – жорстка. Напруга в дузі змінюється у межах  $U_{\text{д}} = 12...30$  В.

При зварюванні під флюсом дротом малого діаметра та при великих зварювальних струмах вольт-амперна характеристика дуги пологозростаюча  $U_{\text{д}} = 25...40$  В.

При зварюванні плавким електродом у середовищі двоокису вуглецю, механізованому та автоматичному зварюванні самозахисним та порошковим дротом у газовому середовищі ( $U_d = 25...35$  В), а також при зварюванні неплавким електродом у середовищі аргону стисненою дугою – СХД зростаюча.

Статична вольт-амперна характеристика дуги описує зварювальний процес у сталому режимі. Для описання зварювального процесу у реальному масштабі часу використовують залежність миттєвих значень напруги в дузі від зварювального струму. Така залежність називається динамічною вольт-амперною характеристикою дуги (ДХД). Форма цієї характеристики визначається властивостями джерела живлення, від яких залежить стійкість зварювального процесу при живленні дуги як постійним, так і змінним струмом.

Електричні властивості джерела живлення при роботі у статичному режимі відображаються його зовнішньою характеристикою (ЗХДЖ), яка показує залежність напруги на вихідних клеммах джерела від сили зварювального струму. Вона описується

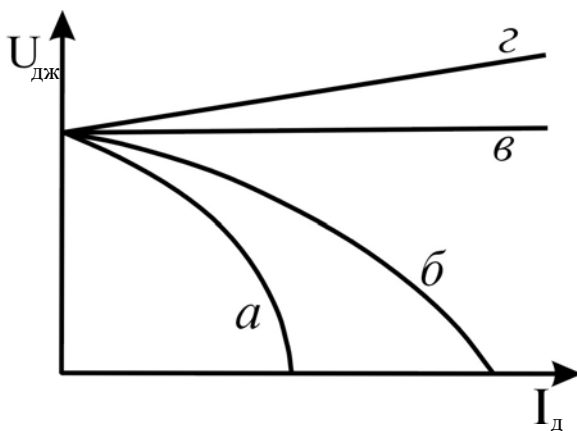


Рис. 1.5. Зовнішні характеристики зварювальних джерел живлення

функцією  $U_{дж} = f(I_d)$ .

Зовнішня вольт-амперна характеристика джерела може бути круто спадною (а), полого спадною (б), жорсткою (в) та зростаючою (г) (рис.1.5). Жорсткою ЗХДЖ називається така вольт-амперна характеристика, у якій спад напруги у робочому діапазоні зварювальних струмів не перевищує 0,04 В/А.

Динамічна характеристика джерела живлення – це залежність між миттєвими значеннями вихідної напруги та струму навантаження при постійній у дану мить часу нарузі живильної мережі, тобто  $U_{вих} = f(i_H)_{U_M = const}$ . Динамічна характеристика показує реакцію джерела живлення на характер та швидкість протікання перехідних процесів, що виникають в енергетичній системі "джерело живлення – дуга – ванна" при дії зовнішніх збурень (зміні напруги живильної мережі, напруги в дузі або зварювального струму, а також при переході з

одного сталого режиму до іншого). Чим менше час перехідного процесу, тим кращі динамічні властивості джерела живлення.

#### 1.4. Стійкість енергетичної системи "джерело живлення – дуга – ванна"

Зварювальна дуга, ванна розплавленого металу та джерело живлення утворюють взаємопов'язану енергетичну систему ДЖ – Д – В, кінцева мета якої – отримання якісного зварного з'єднання з встановленими параметрами шва: глибиною провару, шириною та висотою валика.

Енергетична система ДЖ – Д – В може знаходитися у двох станах роботи:

1. Стала рівновага, або робота у статичному режимі, коли параметри дуги та джерела живлення протягом достатньо тривалого часу не змінюють своїх величин.

2. Нестала рівновага, або робота в перехідному режимі, коли параметри дуги та джерела живлення змінюють свої величини під дією зовнішнього впливу на систему або в результаті коливань будь-якого її параметра.

При роботі енергетичної системи ДЖ – Д – В виділяють три основні етапи:

1. Виникнення (збудження) зварювальної дуги.
2. Зварювання (виконання зварного шва).
3. Закінчення зварювання (заварювання кратера в кінці шва).

Розглянемо стійкість системи під час зварювання.

У стані стійкої рівноваги дуговий розряд відбувається безперервно протягом тривалого часу при заданих значеннях  $I_d$  та  $U_d$ . Для стабільного горіння дуги необхідна рівність струму і напруги дуги струмові і напрузі джерела живлення:

$$I_d = I_{дж}; \quad U_d = U_{дж}. \quad (1.4)$$

Це означає, що статичні вольт-амперні характеристики дуги  $U_d = f(I_d)$  та джерела живлення  $U_{дж} = f(I_{дж})$  повинні мати точки перетинання. Для вирішення питання щодо стійкості горіння дуги у точках перетинання характеристик необхідно розглянути умови стійкої роботи енергетичної системи ДЖ – Д – В у разі дії збурень різного роду.

#### 1.4.1. Стійкість системи при малих відхиленнях струму

Для визначення умов статичної стійкості системи проаналізуємо її поведінку при вельми незначних відхиленнях струму  $\Delta I$  від стану рівноваги, що характеризується робочим значенням струму  $I_p$  та напруги  $U_p$  (рис. 1.6).

При розгляді роботи системи ДЖ – Д – В для спрощення аналізу будемо враховувати індуктивність лише зварювального кола.

Рівняння динамічної рівноваги системи має вигляд

$$U_{дж} = U_d + L \frac{dI}{dt}. \quad (1.5)$$

Припустимо, що струм  $I_p$

отримав мале відхилення  $\Delta I$ , поточне значення якого позначимо як  $i$ . Тоді струм у колі буде

$$I = I_p - i. \quad (1.6)$$

Новий стан системи характеризуватиметься такими параметрами: струм  $I_p - i$ ; напруга в дузі  $U_p + \Delta U_d$ ; напруга на вихідних клеммах джерела  $U_p + \Delta U_{дж}$ .

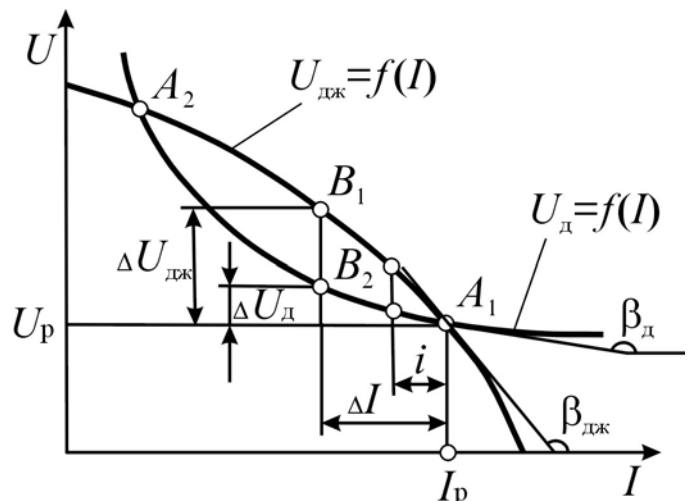


Рис. 1.6. Статичні вольт-амперні характеристики дуги та джерела живлення при зміні струму  $I$

Тоді рівняння (1.5) можна записати у вигляді

$$U_p + \Delta U_{дж} = U_p + \Delta U_d + L \frac{d(I_p - i)}{dt}. \quad (1.7)$$

Добавки напруг  $\Delta U_{дж}$  та  $\Delta U_d$  за умови лінеаризації функції  $U_d = f(I_d)$  і  $U_{дж} = f(I_{дж})$  на ділянках  $A_1B_1$  та  $A_1B_2$  (а це припустимо при незначних відхиленнях струму  $\Delta I$ ) виразимо через відповідні динамічні опори дуги та джерела живлення [див. (1.3)]. Для цього проведемо допоміжні дотичні у точці  $A_1$  до кривих СХД та ЗХДЖ, які відсікають кути  $\beta_d$  та  $\beta_{дж}$  з віссю струмів  $I$ . Тоді

$$\begin{aligned} \Delta U_{дж} &= itg(180^\circ - \beta_{дж}) = -itg\beta_{дж} = -i \frac{dU_{дж}}{dI}; \\ \Delta U_d &= itg(180^\circ - \beta_d) = -itg\beta_d = -i \frac{dU_d}{dI}. \end{aligned} \quad (1.8)$$

Відповідно рівняння (1.7) перетворюється до вигляду

$$-i \frac{dU_{дж}}{dI} = -i \frac{dU_d}{dI} - L \frac{di}{dt} \quad (1.9)$$

або

$$L \frac{di}{dt} + \left( \frac{dU_d}{dI} - \frac{dU_{дж}}{dI} \right) i = 0. \quad (1.10)$$

Введемо позначення:  $\frac{dU_d}{dI} - \frac{dU_{дж}}{dI} = k_{ст}$  – коефіцієнт стійкості енергетичної системи ДЖ – Д – В. Тоді, розділивши рівняння (1.10) почленно на  $L$ , з урахуванням введеного позначення будемо мати:

$$\frac{di}{dt} + \frac{k_{ст}}{L} i = 0. \quad (1.11)$$

Рішенням цього лінійного однорідного диференціального рівняння з постійними коефіцієнтами є

$$i = Ce^{-\frac{k_{ст}}{L}t} . \quad (1.12)$$

Постійну  $C$  знайдемо за умови, що при  $t = 0$  кінцеве значення  $i = \Delta I$ .

Таким чином,

$$i = \Delta I e^{-\frac{k_{ст}}{L}t} . \quad (1.13)$$

Із отриманого рівняння витікає: система буде стійка, якщо мале відхилення  $\Delta I$  від заданого режиму  $I_p$  з часом буде зменшуватися, наближаючись до нуля при  $k_{ст} > 0$ . Відомо, що  $L$  завжди більше за нуль.

Таким чином, можна сформулювати головну умову стійкості енергетичної системи ДЖ – Д – В: система стійка, якщо різниця динамічних опорів дуги та джерела живлення у робочій точці – величина додатня.

Виконання умови  $k_{ст} > 0$  залежить від відповідності форми зовнішньої характеристики джерела живлення формі зовнішньої характеристики дуги. Вибір форми ЗХДЖ визначається формою СХД. Покажемо це на прикладах шляхом аналізу процесів у системі ДЖ – Д – В при різних сполученнях форми ЗХДЖ та СХД (рис. 1.7).

Якщо під час горіння дуги у точці  $A$  виникло зменшення струму ( $I_{Amin} < I_A$ ), то для підтримки дугового розряду згідно зі статичною вольт-амперною характеристикою дуги необхідна більш висока напруга. Її величина стає більшою, ніж може дати джерело при цьому ж струмі ( $-\Delta U_{дж}$ ). У зв'язку з цим станеться подальше довільне зниження сили струму ( $I_A \rightarrow 0$ ), та дуга згасне. Таким чином, у точці  $A$  дуга стабільно горіти не може.

У точці  $B$  при зниженні сили струму напруга джерела виявляється більшою ( $\Delta U_{дж}$ ), ніж це потрібно для горіння дуги за СХД. Завдяки цьому

станеться довільне збільшення струму ( $I_{B \min} > I_B$ ), і процес горіння повернеться у точку  $B$ .

Зростання струму у точці  $B$  призведе до збільшення напруги, потрібної для горіння дуги. Джерело живлення при цих значеннях струму дуги дає меншу напругу ( $-\Delta U_{\text{дж}}$ ). Це викличе довільне зниження сили струму ( $I_{B \max} \rightarrow I_B$ ), та горіння дуги знову переміститься у точку  $B$ . Отже, точки  $B$  перетинання вольт-амперних характеристик є точками стійкої роботи енергетичної системи ДЖ – Д – В.

Аналіз варіантів сполучення СХД та ЗХДЖ, наведених на рис.1.7, дає змогу зробити такі основні висновки:

1. Якщо статична вольт-амперна характеристика дуги спадна

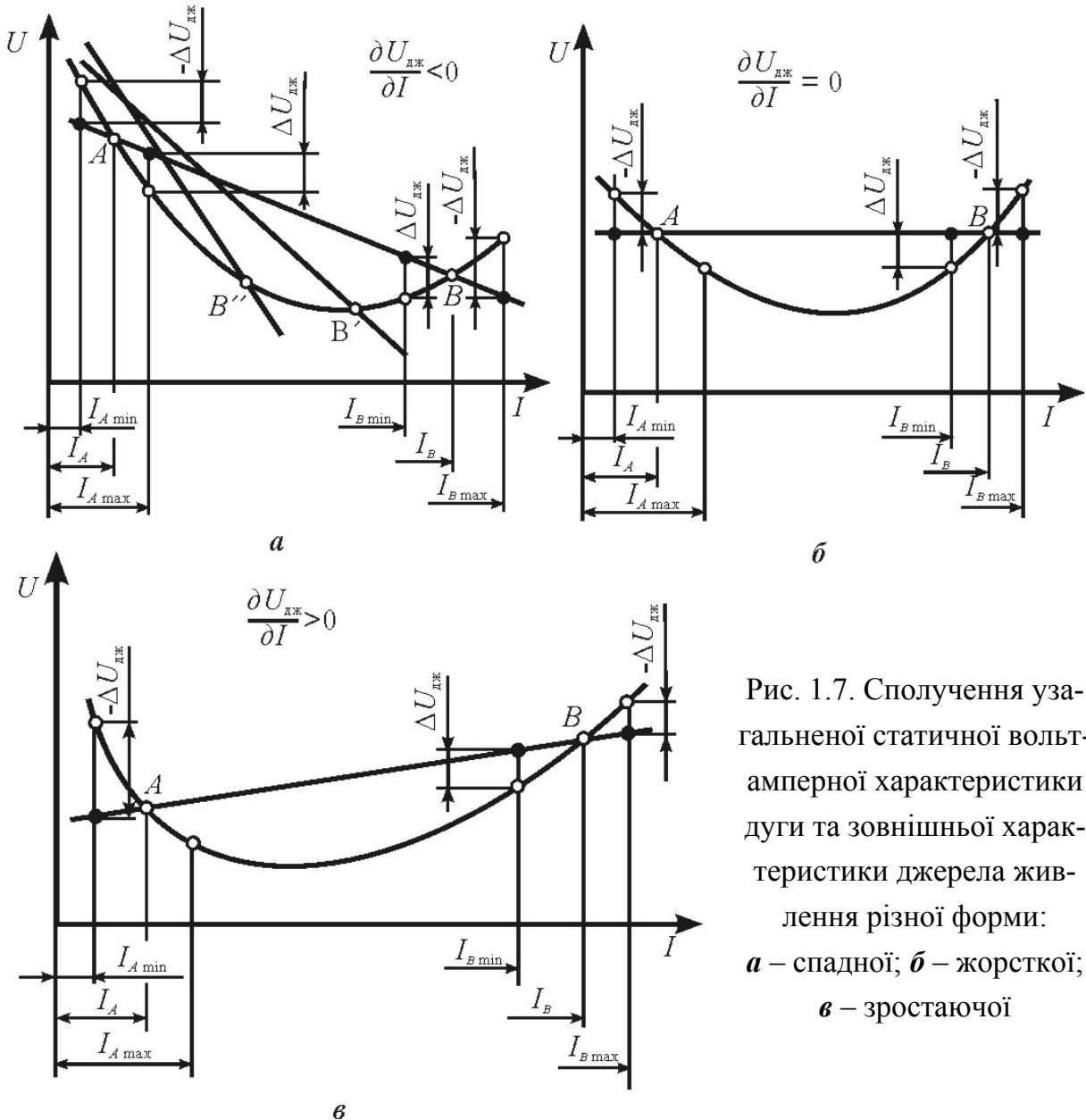


Рис. 1.7. Сполучення узагальненої статичної вольт-амперної характеристики дуги та зовнішньої характеристики джерела живлення різної форми:  
**a** – спадної; **б** – жорсткої;  
**в** – зростаючої



$\left(\frac{dU_{\text{д}}}{dI} < 0\right)$ , то для стійкої роботи системи ДЖ – Д – В потрібні джерела живлення тільки зі спадними зовнішніми вольт-амперними характеристиками  $\left(\frac{dU_{\text{дж}}}{dI} < 0\right)$ , причому крутість спадання зовнішньої характеристики джерела у робочій точці повинна бути більшою (див. рис.1.7,*a*, точка *B''*).

2. Якщо статична вольт-амперна характеристика дуги жорстка  $\left(\frac{dU_{\text{д}}}{dI} = 0\right)$ , то стійку роботу системи і в цьому випадку забезпечить джерело живлення також зі спадною зовнішньою характеристикою  $\left(\frac{dU_{\text{дж}}}{dI} < 0\right)$ , але крутість її спадання може бути будь-якою (див.рис.1.7,*a*, точка *B'*).

3. Для стійкої роботи системи при наявності дуги зі зростаючою вольт-амперною характеристикою  $\left(\frac{dU_{\text{д}}}{dI} > 0\right)$  принципово можна застосовувати джерела живлення з будь-якою формою зовнішньої характеристики (див. рис.1.7, точка *B*). Винятком є джерела зі зростаючою зовнішньою характеристикою. Крутість підйому їх характеристики повинна бути меншою за крутість підйому СХД (рис. 1.7,*в*).

4. Джерела живлення зі спадними вольт-амперними характеристиками принципово підходять до багатьох способів дугового зварювання.

5. Джерела живлення з жорсткими та зростаючими вольт-амперними характеристиками мають обмежене застосування і можуть бути використані лише для зварювання дугами зі зростаючою СХД.

#### **1.4.2. Стійкість системи при відхиленнях довжини дуги**

Під час зварювання покритими електродами та неплавким вольфрамовим електродом часто змінюється довжина дуги. При ручному дуговому зварюванні ці зміни пов'язані з виконанням швів у важкодоступних місцях та кваліфікацією зварника. При зварюванні вольфрамовим електродом подовження дуги можливе через його оплавлення.

Коливання довжини дуги при означених способах зварювання не повинні приводити до значних коливань сили зварювального струму. Якщо

це станеться, то якість отриманого зварного шва буде різною на різних ділянках, тобто будуть змінюватися насамперед розміри зварювальної ванни та шва.

Властивість зварювальної дуги підтримувати задану глибину проплавлення металу при коливаннях її довжини у відомих межах називається еластичністю дуги. Критерієм еластичності може служити найбільша довжина дуги  $l_{d\max}$ , до якої дугу можна розтягувати без обриву. Коли довжина дуги збільшується, зварювальний струм, як правило, зменшується. Для кожного способу зварювання, для певного діаметра та матеріалу електрода і захисного середовища існує деяке найменше значення  $l_{d\min}$ , при якому дуговий розряд стає нестійким.

Розглянемо поведінку енергетичної системи ДЖ – Д – В при коливанні довжини дуги  $l_d$  за таких умов (рис. 1.8):

$$\frac{dU_d}{dI} < 0; k_{ст} > 0; \frac{dU_{дж}}{dI} < 0 \quad \text{при } l_{d2} > l_{d1}.$$

При збільшенні довжини дуги до  $l_{d2}$  статична вольт-амперна характеристика переміститься уверх і

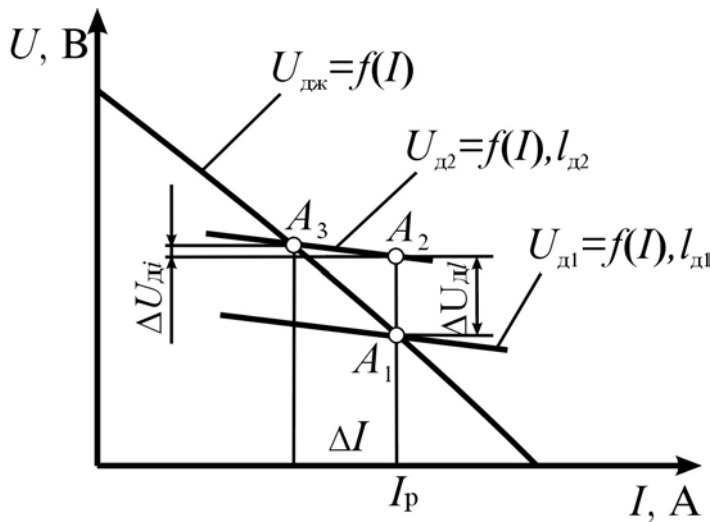


Рис. 1.8. Статичні вольт-амперні характеристики дуги та джерела живлення при зміні довжини дуги  $l_d$

буде описуватися функцією  $U_{d2} = f(I)$ . За умови малих відхилень  $l_d$ ,  $U_d$  та  $l_d$  припустимо вважати ділянки вольт-амперних характеристик дуги та джерела живлення прямолінійними.

При збільшенні  $l_d$  до  $l_{d2}$  (приріст  $-\Delta l$ ) при  $I_p = \text{const}$  напруга  $U_d$  зростає на величину  $\Delta U_{dl}$ . Виразимо приріст

$$U_d \text{ через динамічну характеристику дуги, тобто } \Delta U_{dl} = \Delta l \frac{dU_d}{dl}.$$

При збільшенні  $l_d$  струм дуги зменшується на величину  $\Delta I_d$ , а напруга

в дузі  $U_d$  при  $l_{d2} = \text{const}$  зростає на величину  $\Delta U_{di}$ , яку виразимо через диференціальний опір дуги:  $\Delta U_{di} = \Delta I \frac{dU_d}{dI}$ .

Тоді зміна  $U_d$  буде:

$$\Delta U_d = \Delta U_{dl} + \Delta U_{di} = \Delta I \frac{dU_d}{dI} + \Delta I \frac{dU_d}{dI}. \quad (1.14)$$

Приріст напруги в дузі  $\Delta U_d$  дорівнює приросту напруги на клемх джерела живлення  $\Delta U_{дж}$ , тобто  $\Delta U_d = \Delta U_{дж}$ . Виразимо приріст  $\Delta U_{дж}$  через динамічний опір джерела живлення:  $\Delta U_{дж} = \Delta I \frac{dU_{дж}}{dI}$ .

Після підстановки значення  $\Delta U_{дж}$  у рівняння (1.14) матимемо

$$\Delta I \frac{dU_{дж}}{dI} = \Delta I \frac{dU_d}{dI} + \Delta I \frac{dU_d}{dI}. \quad (1.15)$$

Після перетворення одержимо:

$$-\Delta I \frac{dU_d}{dI} = \Delta I \left( \frac{dU_d}{dI} - \frac{dU_{дж}}{dI} \right) = \Delta I k_{ст}. \quad (1.16)$$

Остаточно

$$-\Delta I \frac{dU_d}{dI} = \Delta I k_{ст}. \quad (1.17)$$

Із рівняння (1.17) можна зробити такі висновки:

1. Зміни довжини дуги та зварювального струму мають протилежні знаки, тобто при зростанні  $l_d$  величина  $I_d$  зменшується і навпаки.

2. Абсолютна величина відхилення  $\Delta I = -\frac{\Delta l}{k_{ст}} \frac{dU_d}{dI}$  тим менша, чим більше  $k_{ст}$ , тобто еластичність дуги підвищується зі зростанням  $k_{ст}$ .

3. Стійкість системи ДЖ – Д – В залежить від форми зовнішньої вольт-амперної характеристики джерела живлення.

Останній висновок пояснимо на прикладах.

Зварювання покритими електродами та вольфрамовим електродом виконується з використанням струму невеликої густини. Статична вольт-амперна характеристика дуги має спадну форму  $\left( \frac{dU_d}{dI} < 0 \right)$ , тому для стійкої роботи енергетичної системи ДЖ – Д – В потрібні джерела живлення тіль-

ки зі спадними вольт-амперними характеристиками. Найменша зміна струму забезпечується при застосуванні джерела з крутоспадними вольт-амперними характеристиками (рис. 1.9,а). У цьому випадку  $\Delta I_{1к} < \Delta I_{1п}$ ;  $\Delta I_{2к} < \Delta I_{2п}$ , де  $\Delta I_{к}$  та  $\Delta I_{п}$  – зміна струму відповідно при крутоспадній та пологоспадній вольт-амперній характеристиці джерела.

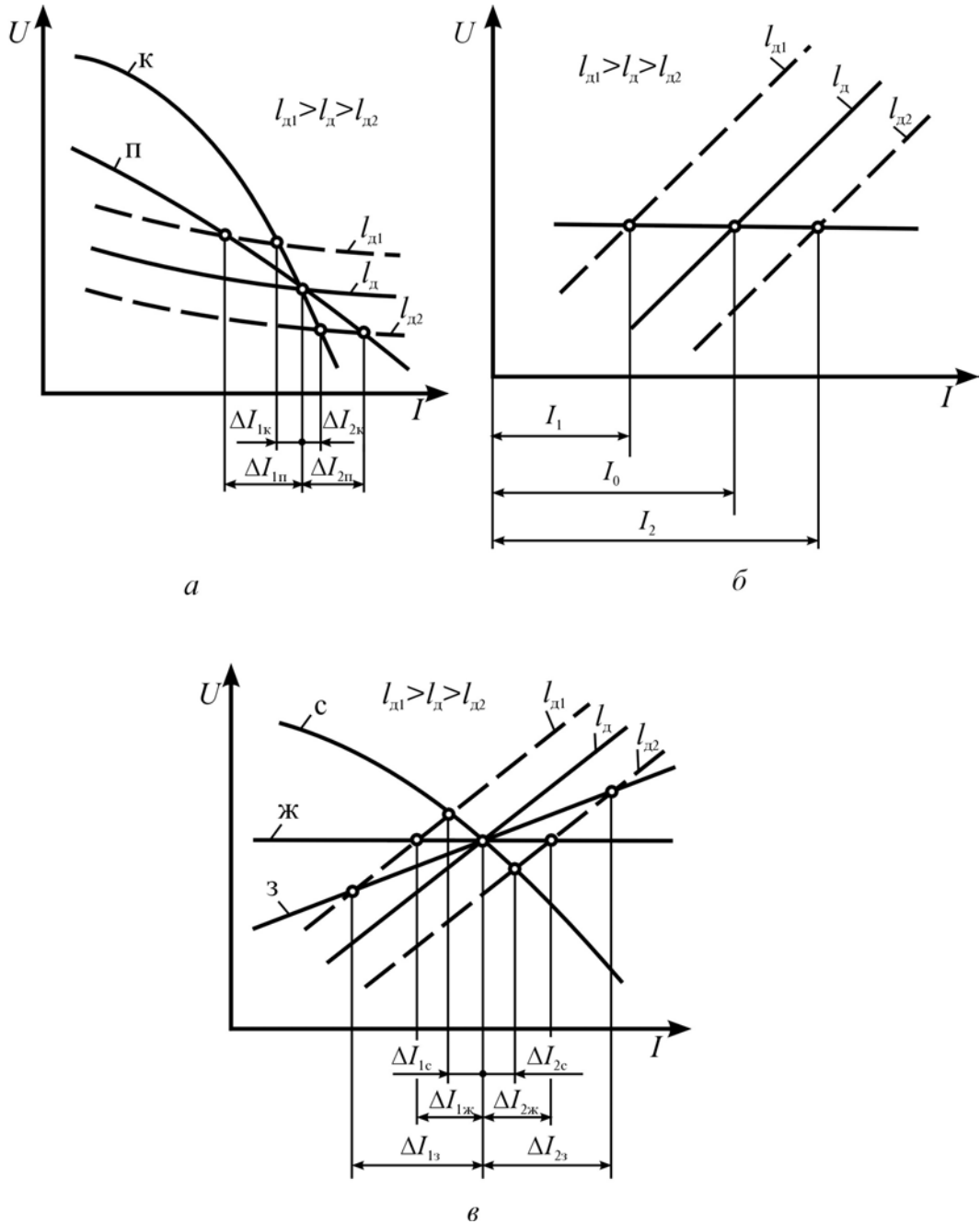


Рис. 1.9. Вплив форми статичної характеристики дуги (СХД) та зовнішньої характеристики джерела живлення (ЗХДЖ) на коливання

зварювального струму при зміні довжини дуги:

**а** – крутоспадна (к) та пологоспадна (п) ЗХДЖ; **б** – жорстка (ж) ЗХДЖ;

**в** – спадна (с), жорстка (ж) та зростаюча (з) ЗХДЖ

При механізованому зварюванні плавким електродом під флюсом та у середовищі захисних газів автоматична підтримка основних параметрів режиму – сили струму та напруги – забезпечується шляхом використання процесу саморегулювання дуги. Суть процесу: швидкість плавлення електродного дроту змінюється пропорційно зміні довжини дуги. Швидкість подачі електрода в дугу при цьому залишається постійною.

В сталому режимі для заданої довжини дуги  $l_d$  (рис. 1.9,б) швидкість подачі електродного дроту дорівнює швидкості його плавлення в дузі. Якщо довжина дуги зменшується ( $l_{d2} < l_d$ ), зварювальний струм зростає ( $I_2 > I_0$ ), швидкість плавлення дроту також збільшується, внаслідок чого довжина відновлюється ( $l_{d2} \rightarrow l_d$ ). При перевищенні встановленої довжини дуги ( $l_{d1} > l_d$ ) спостерігатиметься зворотний процес, тобто зварювальний струм зменшується ( $I_1 < I_0$ ), швидкість плавлення дроту також впаде і довжина дуги скоротиться ( $l_{d1} \rightarrow l_d$ ).

Саморегулювання дуги протікає досить ефективно при зварюванні струмом великої густини і тим активніше, чим більша зміна сили струму при коливаннях довжини дуги.

При механізованому та автоматичному зварюванні самозахисним порошковим дротом, а також у середовищі захисних газів або під флюсом тонким дротом СХД – зростаюча (див. рис. 1.3,в). Для цих способів зварювання принципово підходять джерела живлення з будь-якою формою ЗХДЖ. Але найбільша зміна зварювального струму при коливаннях довжини дуги, яка потрібна для активізації процесу саморегулювання, відбуватиметься при застосуванні джерела живлення зі зростаючою вольт-амперною характеристикою (рис. 1.9,в):  $\Delta I_{1з} > \Delta I_{1ж} > \Delta I_{1с}$ ;  $\Delta I_{2з} > \Delta I_{2ж} > \Delta I_{2с}$ . На практиці у цих випадках застосовують джерела живлення з пологоспадними та жорсткими вольт-амперними характеристиками.

### 1.4.3. Стійкість системи при коливаннях напруги живильної мережі

Згідно з вимогами до якості електричної енергії, що використовується зварювальними установками, відхилення напруги мережі припустимі у межах  $\pm 5\%$  від номінальної величини напруги  $U_m$ . Зміна  $U_m$  приводить до зміни параметрів зварювального джерела живлення: напруги холостого ходу  $U_0$ , положення зовнішньої вольт-амперної характеристики, зварювального струму  $I$  (рис. 1.10,а,б).

Зміна положення зовнішньої вольт-амперної характеристики джерела приводить до зміни струму зварювання на величину  $\Delta I_1$  при зменшенні  $U_M$ , та на величину  $\Delta I_2$  при зростанні  $U_M$ . Такі відхилення можуть призвести до зміни якості зварювання. Для підтримки стабільної якості зварного з'єднання потрібно володіти способами відновлення заданого режиму зварювання, уміти застосовувати спеціальні пристрої, що автоматично змінюють  $U_0$  при коливаннях  $U_M$ .

Наприклад, у зварювальних трансформаторах за допомогою регулятора автоматично змінюється індуктивний опір так, що нова характеристика  $U_{дж2} = f(I)$  зі зміненим нахилом проходить через раніше встановлену робочу точку (рис.1.10,в).

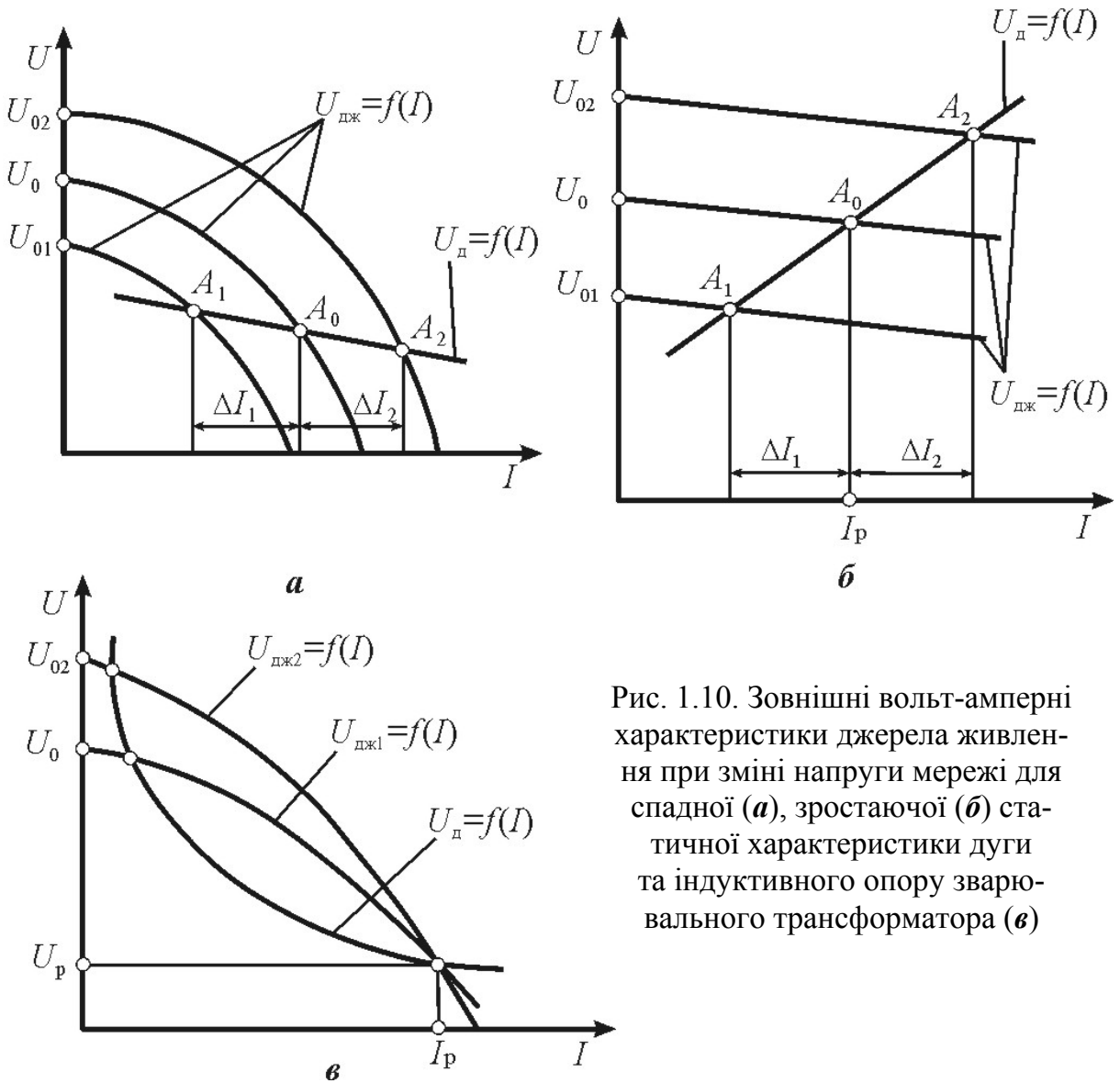


Рис. 1.10. Зовнішні вольт-амперні характеристики джерела живлення при зміні напруги мережі для спадної (а), зростаючої (б) статичної характеристики дуги та індуктивного опору зварювального трансформатора (в)

## 1.5. Особливості дуги, що живиться однофазним змінним струмом

Розглянуті у розд. 1.2 процеси характерні для уніполярних дуг, тобто таких дуг, в яких напрям струму не змінюється. Дуга змінного струму, в якій напрям струму з бігом часу змінюється і, відповідно, один і той самий електрод навперемінно є то катодом, то анодом, характеризується низкою особливостей. У зварювальній техніці використовують здебільшого дуги промислової частоти (50...60 Гц), іноді зварювання виконують струмом підвищеної частоти (400...500 Гц); останнім часом, у зв'язку з широким розповсюдженням нового типу джерел живлення з електронним регулюванням використовуються зварювальні дуги з більш високою частотою.

При живленні дуги від джерела з синусоїдальною напругою струм і напруга в дузі періодично змінюють свою величину і напрям. У моменти переходу струму через нуль та зміни полярності на початку і в кінці кожного півперіоду температура дугового проміжку знижується, внаслідок чого відбувається його деіонізація та зменшується електропровідність. Деіонізація приводить до охолодження активних плям, яке особливо значне на зварюваному виробі через його велику масу.

Повторне збудження на початку кожного півперіоду може статися тільки при підвищеній напрузі, яка називається напругою повторного збудження дуги  $U_3$ , котра більша за напругу горіння дуги  $U_d$  (рис. 1.11).

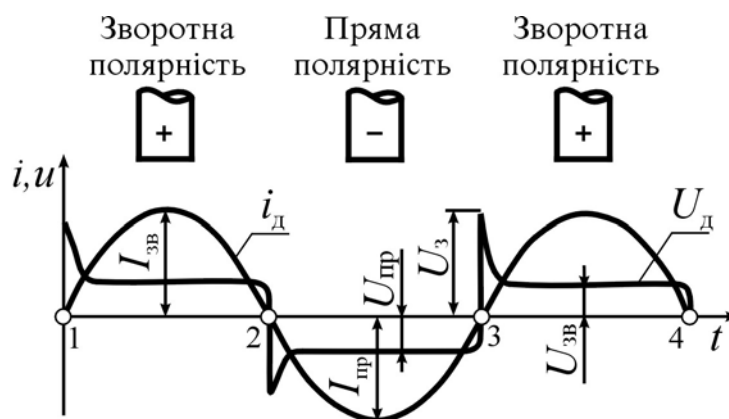


Рис. 1.11. Зміна струму й напруги в дузі при зварюванні однофазним змінним струмом

Необхідно, щоб у момент повторного збудження дуги напруга холостого ходу джерела живлення була більшою за  $U_3$ . Якщо ця умова не виконується, то повторне збудження на початку півперіоду неможливе.

Розглянемо електричну схему зварювальної дуги змінного струму (рис. 1.12). Джерелом живлення в даній схемі є однофазний знижувальний трансформатор  $T$  з жорсткою зовнішньою характеристикою. Послідовно з вторинною обмоткою трансформатора у коло дуги послідовно ввімкнуті активний  $R$  та індуктивний  $X_L$  опори. Резистор  $R$  призначений для регулювання сили зварювального струму та формування спадної зовнішньої характеристики джерела живлення. На виході електричної схеми ввімкнуті електрод  $E$  та виріб  $B$ .

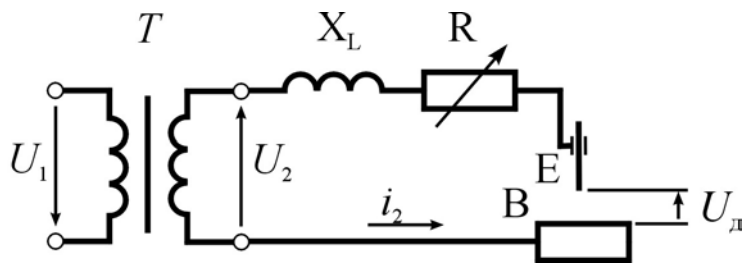


Рис. 1.12. Схема живлення дуги змінним струмом

**Вунадок 1.** Зварювальне коло містить лише активний опір  $R$  ( $X_L \approx 0$ ). При цьому зсув фази між струмом та напругою дорівнює нулю ( $\varphi_2 = 0$ ). Зміну миттєвих значень напруги вторинної обмотки трансформатора  $U_2$ , напруги в дузі  $U_d$  й струму  $i_2$ , що протікає через зварювальне коло, показано на рис.1.13,*a*.

У негативному півперіоді в момент часу  $t = t_{зг}$  згасання дуги напруга  $U_2$  спадає до напруги згасання  $U_{зг}$ . Значення ж її недостатньо для створення необхідних умов існування зварювальної дуги, тобто струм  $i_2$  і напруга в дузі спадають до значення, близького до нуля, при цьому спостерігається погасання дуги. Такий стан продовжується до часу  $t = t_3$  збудження дуги у позитивному півперіоді. Інтервал часу від  $t = t_{зг}$  до  $t = t_3$  називається часом перерви  $t_n$  в горінні зварювальної дуги. У цей інтервал часу струм  $i_2$ , що протікає через зварювальний контур, не дорівнює нулю. Це пояснюється тим, що у дуговому проміжку у дану мить активна пляма катода ще спроможна випромінювати електрони, а також наявністю плазмових потоків у стовпі дуги. У дуговому проміжку протягом часу  $t_n$  існує жевріючий розряд, а не дуговий.



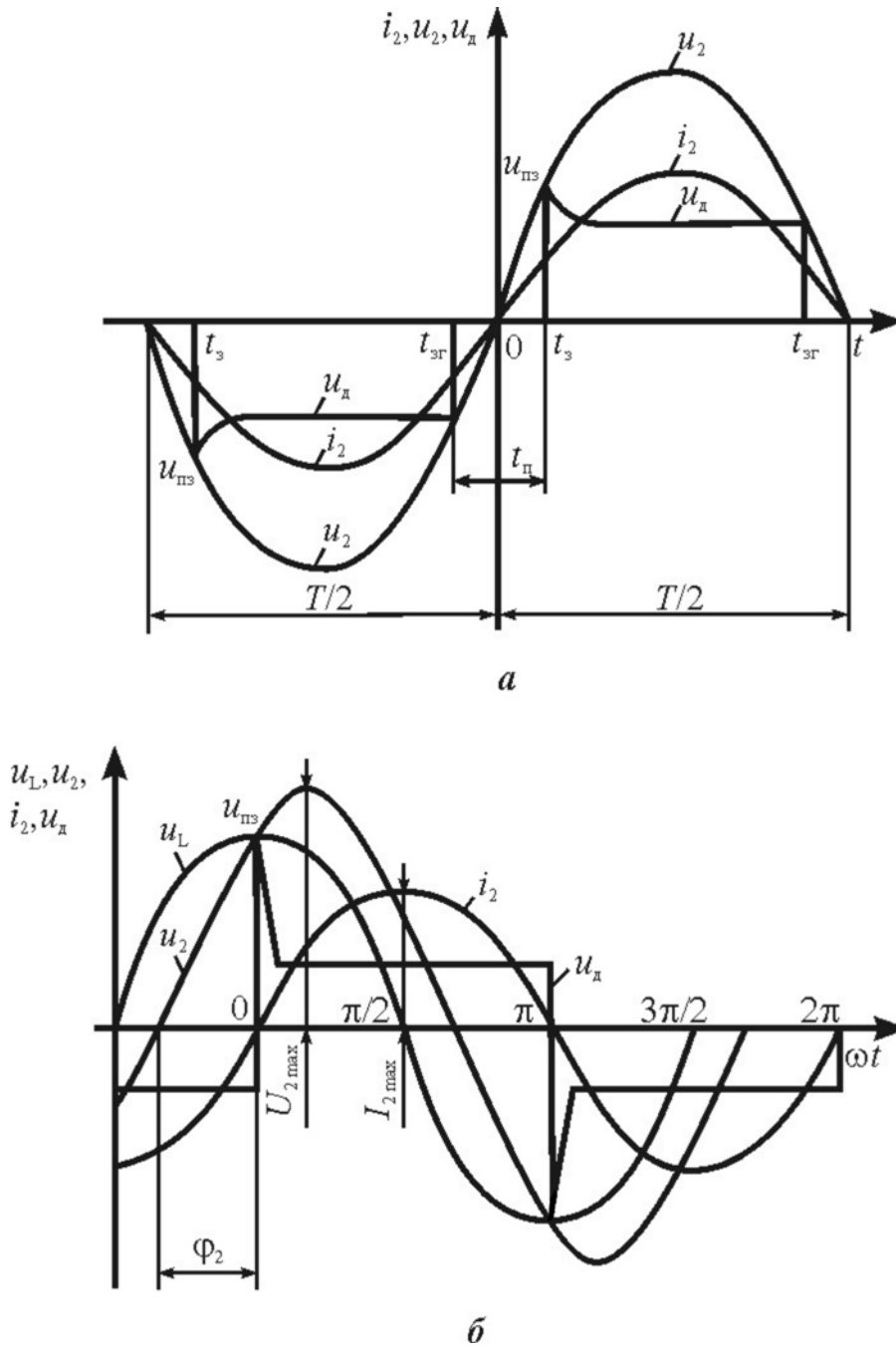


Рис. 1.13. Зміна миттєвих значень  $u_2$ ,  $u_a$ ,  $u_L$ ,  $i_2$  у зварювальному колі при вмиканні активного (а) та індуктивного (б) опорів

У момент часу  $t = t_3$  напруга  $U_2$  досягає необхідного значення напруги повторного збудження дуги  $U_3$  і у дуговому проміжку утворюється напруженість електричного поля така, при якій розпочинається інтенсивне зарядження вільних електронів, що приводить до відновлення дугового розряду. Внаслідок того, що протягом часу  $t_n$  дуговий розряд відсутній, зварювальне коло розімкнуте. Розрахуємо час  $t_n$  перерви у горінні дуги.

Збудження дуги кожного півперіоду відбувається, як показано вище, за умови

$$U_3 = U_{2\max} \sin \omega t_3, \quad (1.18)$$

де  $U_{2\max}$  – амплітудне значення напруги джерела живлення, В;  
 $\omega = 2\pi f$  – кутова частота, рад/с ( $f$  – частота змінного струму, Гц).

Звідси

$$t_3 = \frac{1}{2\pi f} \arcsin \frac{U_3}{U_{2\max}}. \quad (1.19)$$

Погасання дуги відбувається, коли

$$U_d = U_{2\max} \sin(\pi - \omega t_{3r}) = U_{2\max} \sin \omega t_{3r}. \quad (1.20)$$

Час погасання дуги

$$t_{3r} = \frac{1}{2\pi f} \arcsin \frac{U_d}{U_{2\max}}. \quad (1.21)$$

Загальний час перерви в горінні дуги

$$t_{\Pi} = t_3 + t_{3r} = \frac{1}{2\pi f} \left( \arcsin \frac{U_3}{U_{2\max}} + \arcsin \frac{U_d}{U_{2\max}} \right). \quad (1.22)$$

Таким чином, якщо у зварювальне коло увімкнутий лише активний опір  $R$ , дуга змінного струму горить із перервами.

Скоротити час перерви  $t_{\Pi}$  можна різними шляхами: підвищенням напруги холостого ходу трансформатора, підвищенням частоти змінного струму, зниженням напруги повторного збудження та горіння дуги, вмиканням у зварювальне коло індуктивного опору та батареї конденсаторів.

Підвищення напруги холостого ходу трансформатора  $U_0$  сприяє зростанню стійкості горіння дуги тому, що  $U_0 = U_{2\max} \sqrt{2}$ . Найменше значення  $U_0$  можна розрахувати за формулою

$$U_0 \geq \frac{U_d}{\sqrt{2}} \sqrt{\left( \frac{U_3}{U_d} \right)^2 + \left( \frac{\pi}{2} \right)^2}. \quad (1.23)$$

У більшості трансформаторів для дугового зварювання приймають  $\frac{U_0}{U_d} = 1,8 \dots 2,5$ . Але з підвищенням  $U_0$  знижуються техніко-економічні

показники джерела та зростає небезпека поразки обслуговуючого персоналу електричним струмом. Тому, згідно з ГОСТ 12.2.007.8-75, встановлені припустимі значення  $U_0$ : 80 В – для джерел живлення змінного струму для ручного дугового зварювання; 140 В – для джерел живлення змінного струму для автоматичного дугового зварювання.

Час перерви горіння дуги скорочується при підвищенні частоти напруги живлення. З підвищенням частоти при рівних інших умовах зменшуються розміри та маса трансформатора, а також зростає індуктивний опір його обмоток. При підвищенні частоти напруги в дузі у 5...9 разів порівняно з напругою мережі дуга бринить з високою тональністю, що призводить до швидкої втомлюваності зварника. Крім того, джерела живлення з підвищеною частотою струму відрізняються складністю конструкції та високою вартістю.

При введенні у зварювальні дуги хімічних елементів з низьким потенціалом іонізації зменшується напруга повторного збудження дуги та поліпшуються умови її горіння. Такі елементи входять до складу покриттів електродів для ручного дугового зварювання або у флюси для автоматичного зварювання. Наявність в дузі хімічних елементів з низьким потенціалом іонізації сприяє зберіганню провідності розрядного проміжку протягом тривалого часу після погасання дуги. Для скорочення часу перерви горіння зварювальної дуги найбільше поширений метод збільшення індуктивного опору обмоток трансформатора або додаткового включення у зварювальне коло котушки індуктивності.

**Випадок 2.** Зварювальне коло містить активний  $R$  та індуктивний  $X_L$  опори (див. рис. 1.12). У цьому випадку між струмом та напругою джерела з'являється кут зсуву фаз ( $\varphi_2 \neq 0$ ). Відповідно до кривих струму та напруги (рис. 1.13, б) повторне миттєве збудження дуги можливе, якщо при переході струму  $i_2$  через нуль напруга джерела  $u_2$  буде рівною або більшою за напругу повторного збудження дуги  $U_3$ , тобто  $u_2 = U_{2\max} \sin \varphi_2 \geq U_3$ . Зміни значень  $u_2$ ,  $i_2$ ,  $u_d$  та спад напруги на індуктивному опорі  $u_L$  справедливі за умови, що зварювальна дуга замінена активним опором  $R_d$ . Відповідну векторну діаграму наведено на рис. 1.14.

При певному значенні кута зсуву фаз  $\varphi_2$  горіння дуги протягом всього півперіоду може бути безперервним ( $t_{\text{п}} = 0$ ). Напряга в дузі у будь-який момент часу описується рівнянням

$$U_{2\text{max}} \sin(\omega t + \varphi_2) = U_{\text{д}} + L \frac{di}{dt}, \quad (1.24)$$

де  $L$  – індуктивність зварювального кола, Гн.

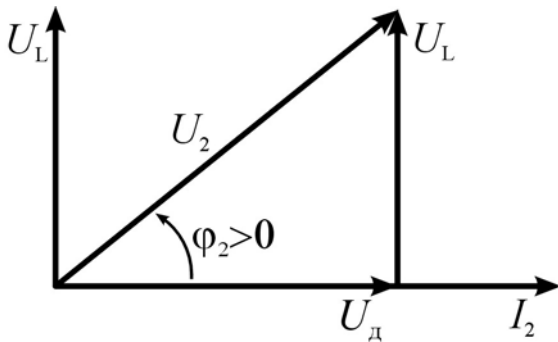


Рис. 1.14. Векторна діаграма напруг при вмиканні у зварювальне коло індуктивного опору

При зміні полярності, коли струм переходить через нуль, напруга в дузі змінюється стрибкоподібно.

Безперервне горіння дуги забезпечується, якщо  $\varphi = 53 \dots 57$  ел. градусів та відношення  $\frac{X_L}{R + R_{\text{д}}} \geq 5$ . Таким

чином, наявність індуктивного опору у колі дуги є обов'язковою для всіх джерел змінного струму.

Стійкість горіння зварювальної дуги може бути особливо великою при наявності поряд з індуктивним опором  $X_L$  у зварювальному контурі ємнісного опору  $X_C$ . При  $X_L > X_C$   $U_2 = U_{2\text{max}} \sin(\omega t + \varphi_2)$ . При  $X_L < X_C$   $U_2 = U_{2\text{max}} \sin(\omega t - \varphi_2)$ . Чим більше  $U_c$ , тим при меншому значенні  $U_2 = U_{2\text{max}} \sin \varphi_2$  дуга збуджується після переходу  $i_2$  через нуль. Наявність у колі дуги змінного струму поряд з індуктивністю ще й ємності (при їх певно визначених значеннях) дає змогу суттєво знизити необхідну напругу холостого ходу джерела живлення.

Для підвищення стійкості горіння зварювальної дуги широко використовують допоміжні пристрої – імпульсні стабілізатори (генератори імпульсів напруги), розглянуті у гл. 6.

Особливістю дуги змінного струму є також її випрямна дія. В міру того, як збільшується різниця між теплофізичними властивостями електродів, більш чітко визначається відмінність форми кривої струму від форми кривої напруги дуги. При різних теплофізичних властивостях між електродами під час зварювання змінним струмом (особливо алюмінію та його сплавів вольфрамовим електродом) виникає нерівність струмів прямої  $I_{\text{пр}}$  та зворотної  $I_{\text{зв}}$  полярності, що призводить до появи так званої постійної

складової струму  $I_0$  (рис.1.15), струм дуги стає періодичною несинусоїдальною функцією часу, яка може бути розкладена у ряд Фур'є:

$$i_d = I_0 + I_{1\max} \sin(\omega t + \psi_1) + I_{2\max} \sin(\omega t + \psi_2) + \dots + I_{n\max} \sin(\omega t + \psi_n), \quad (1.25)$$

де  $I_0$  – постійна складова струму;  $I_{1\max}, I_{2\max}, \dots, I_{n\max}$  – амплітуди основних та вищих гармонік струму;  $\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_n$  – початкові фази відповідних гармонік.

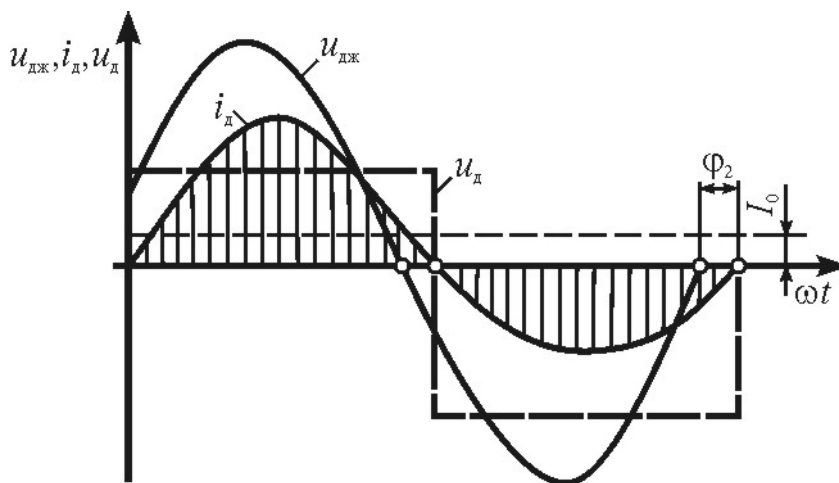


Рис 1.15. Утворення постійної складової струму при горінні дуги між вольфрамовим електродом і виробом із алюмінію

У півперіоди, коли катодна пляма розміщується на вольфрамовому електроді (пряма полярність), завдяки потужній термоелектронній емісії катода утворюються сприятливі умови для збудження і горіння дуги при низькій напрузі. У півперіоди, коли катодна пляма знаходиться на виробі, що зварюється (зворотна полярність), термоелектронна емісія утруднена і тому потрібна більш висока напруга збудження дуги. Горіння дуги протікає також при більш високій напрузі, ніж у попередній півперіод. Якщо зварювання виконується на малих струмах, то збудження дуги у півперіоди зворотної полярності взагалі може не відбутися. У цьому випадку дуга стає випрямним вентиляем, стабільність її горіння різко знижується.

При зниженні сили струму в півперіоди зворотної полярності утруднюється катодне очищення зварюваних крайок та поверхні ванни від оксидних плівок, наслідком чого є погіршення формування шва та зниження його якості.

Постійна складова зварювального струму також погіршує роботу зварювального трансформатора, тому що створює постійне підмагнічування його магнітопроводу. В результаті цього знижується потужність, що віддається дузі, та коефіцієнт потужності ( $\cos \varphi$ ) джерела живлення.

Для усунення постійної складової у зварювальне коло послідовно з вторинною обмоткою трансформатора включають батарею конденсаторів, напівпровідниковий випрямляч або застосовують спеціальні схемні рішення джерела.

## 1.6. Трифазна зварювальна дуга

Трифазною зварювальною дугою умовно називаються три окремі дуги, які горять у спільному плавильному просторі або у спільній газовій порожнині. Якщо ця умова не виконується, то маємо різні схеми живлення дуг, а не трифазну зварювальну дугу.

Зварювання трифазною дугою звичайно виконується двома електродами ( $E_1$  та  $E_2$ ), що ввімкнуті у фази А і В джерела живлення; фаза С підключається до виробу (В) (рис. 1.16,*a*). Дуга Д1, що горить між електродами, називається незалежною дугою або дугою непрямої дії, а дуги Д2 та Д3 – між електродами та виробом – прямої дії.

При трифазному зварюванні струми в електродах утворюють симетричну систему (рис. 1.16,*б*)

$$\left. \begin{aligned} i_a &= I_{\max} \sin \omega t ; \\ i_b &= I_{\max} \sin \left( \omega t + \frac{2}{3} \pi \right) ; \\ i_c &= I_{\max} \sin \left( \omega t + \frac{4}{3} \pi \right) \end{aligned} \right\} \quad (1.26)$$

для якої дійсні такі умови:

$$\left. \begin{aligned} i_a + i_b + i_c &= 0 ; \\ u_{ab} + u_{bc} + u_{ac} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (1.27)$$

Послідовність та тривалість горіння кожної з дуг залежать від послідовності чергування фаз і параметрів зварювального кола. Для спрощення аналізу будемо вважати, що всі дуги горять при однаковому струмі, тобто  $i_a = i_b = i_c$ . Очевидно, що в кожний момент горить не менше однієї та не бі-

льше двох дуг, тому що на торцях електродів не можуть одночасно існувати анодна та катодна плями. Внаслідок одночасного горіння двох дуг стійкість трифазної дуги вище однофазної; крім того, значно полегшені умови повторного збудження тому, що безперервно зберігається достатньо висока температура активних плям і дуговий проміжок є постійно іонізованим.

При зварюванні трифазною дугою можна значно знизити напругу холостого ходу  $U_0$  трансформатора та індуктивність зварювального кола. Адже повторні збудження дуг після погасання у кінці півперіоду відбуваються при малих піках напруги збудження. Для звичайних режимів зварювання трифазною дугою  $\frac{U_0}{U_d} \approx 1,1 \dots 1,25$ .

зварювання трифазною дугою  $\frac{U_0}{U_d} \approx 1,1 \dots 1,25$ .

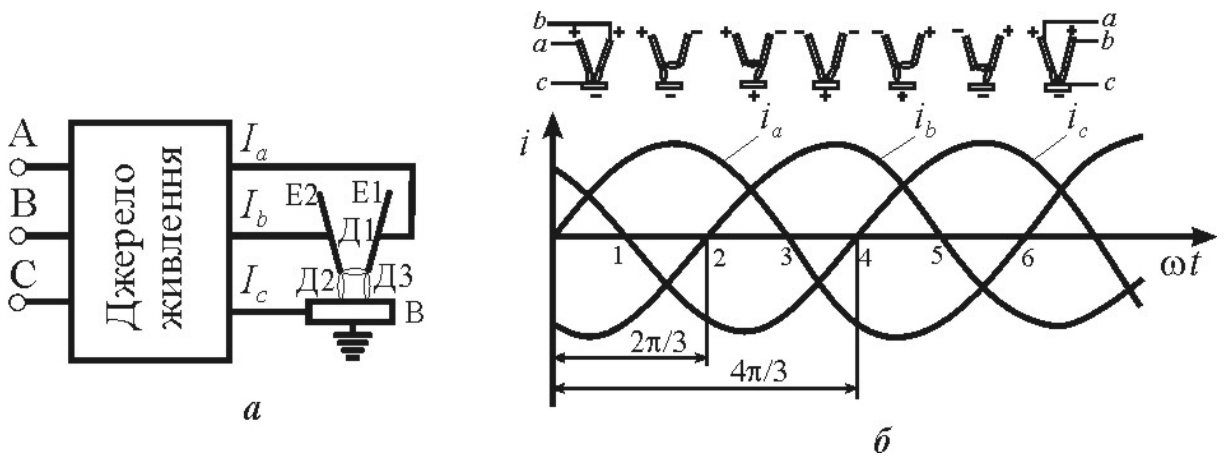


Рис. 1.16. Схема живлення (а) та послідовність горіння і зміни струмів (б) трифазної зварювальної дуги

### 1.7. Класифікація та загальна характеристика зварювальних джерел живлення

Вибір джерела живлення для певного зварювального процесу здійснюється за його технічними експлуатаційними характеристиками, а також сервісними можливостями. Джерела живлення, згідно з діючими стандартами, характеризуються низкою параметрів, які досягаються при роботі на сталих режимах. До сталих режимів відносять роботу джерел при холос-

тому ході, робочому навантаженні та короткому замиканні. Основними технічними характеристиками джерел живлення є:

напруга холостого ходу  $U_0$ ;

номінальна сила зварювального струму  $I_H$ ;

номінальна робоча напруга  $U_H$ ;

діапазон регулювання зварювального струму і робочої напруги;

тривалість роботи у зварювальному циклі ПН %, ПВ %;

коефіцієнт корисної дії  $\eta$ ;

коефіцієнт потужності  $\cos \varphi$ .

Номінальними називаються значення струму, напруги та потужності, на які розраховано джерело живлення, при роботі у заданому режимі без перегріву вище встановленої температури. Номінальні параметри вказують у паспорті або наносять на щиток джерела живлення.

Напруга  $U_0$  значною мірою визначає умови початкового та повторно-го збудження дуги і регулюється на клеммах джерела живлення при відсутності навантаження у зварювальному колі. Напруга холостого ходу повинна бути достатньою для легкого збудження дуги, оскільки чим вище  $U_0$ , тим легше збуджується дуга. Залежно від умов зварювання, захисного середовища, складу електродного покриття, флюсу і т. ін. необхідне значення  $U_0$  знаходиться у межах 30...120 В. Спеціалізовані установки (наприклад, для плазмових технологій) можуть мати і більш високу напругу холостого ходу.

Номінальний струм  $I_H$  визначає розрахункове значення зварювального струму джерела живлення. Номінальні струми джерел живлення дуги відповідають параметричному ряду, встановленому для джерел електричного струму: 50, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 1000, 1250, 1600, 2000, 2400, 3150, 5000 А. Джерела живлення для ручного дугового зварювання виготовляють на струми 125...500 А, для механізованого зварювання – на струми 315...1000 А, для автоматичного – на струми 500...2000 А, багатопостові джерела мають номінальний струм 1000...5000 А.

Номінальна робоча напруга  $U_H$  відображує напругу на клеммах джерела під навантаженням. Для кожного джерела  $U_H$  перебуває у певній залеж-



ності від  $I_n$ . Поточному значенню зварювального струму відповідає певне значення робочої напруги. Наприклад:

при ручному дуговому зварюванні покритими електродами при живленні від трансформатора (згідно з вимогами ГОСТ 95-77Е)

$$U_2 = 20 + 0,04I_2;$$

для трансформаторів на номінальний струм 1000 А (ГОСТ 7012-77)

$$U_2 = 19 + 0,037I_2;$$

для трансформаторів на номінальний струм 2000 А (ГОСТ 7012-77)

$$U_2 = 13 + 0,0315I_2.$$

Діапазон регулювання зварювального струму та відповідні йому межі регулювання робочої напруги вказують найменші та найбільші значення вихідних параметрів джерела живлення, які можуть бути використані для зварювання. У більшості випадків за максимальний струм приймають номінальний.

Межі регулювання зварювального струму оцінюються відношенням максимального значення струму до мінімального. Цей показник називається кратністю регулювання струму:  $k_i = \frac{I_{\max}}{I_{\min}}$ . Для більшості джерел живлення його значення перевищує три.

Регулювання сили зварювального струму виконується двома способами: ступеневим та плавним (або їх комбінацією) і зводиться до зміни напруги холостого ходу  $U_0$  та повного опору  $Z$  джерела. Якщо збільшити напругу  $U_0$  (рис. 1.17,а), то зовнішня вольт-амперна характеристика джерела живлення (ЗХДЖ) переміститься праворуч і перетинатиметься зі статичною характеристикою дуги (СХД) при більших струмах. Якщо збільшити повний опір джерела  $Z$ , що відповідає переміщенню ЗХДЖ уліво (рис. 1.17,б), то енергія, що віддається джерелом дузі, зменшиться і струм знизиться.

Джерела живлення зі спадними ЗХДЖ працюють у режимі регуляторів зварювального струму, а з жорсткими ЗХДЖ – як регулятори напруги. В останньому випадку значення зварювального струму визначається швидкістю подачі електродного дроту автоматом чи напівавтоматом, а джерело задає напругу в дузі та забезпечує саморегулювання довжини дуги.

Під час роботи джерела живлення виникає нагрівання окремих вузлів його конструкції внаслідок проходження струму по струмонесучих провід-

никах, а також через гістерезис та вихрові струми в осерді трансформатора. Припустимі температури нагріву для окремих частин джерел живлення встановлені вимогами ГОСТ 304-82Е та ГОСТ 95-77Е: осердя трансформатора – 90 °С; обмотки трансформатора – 90...105 °С; магнітопровід генератора – 70 °С.

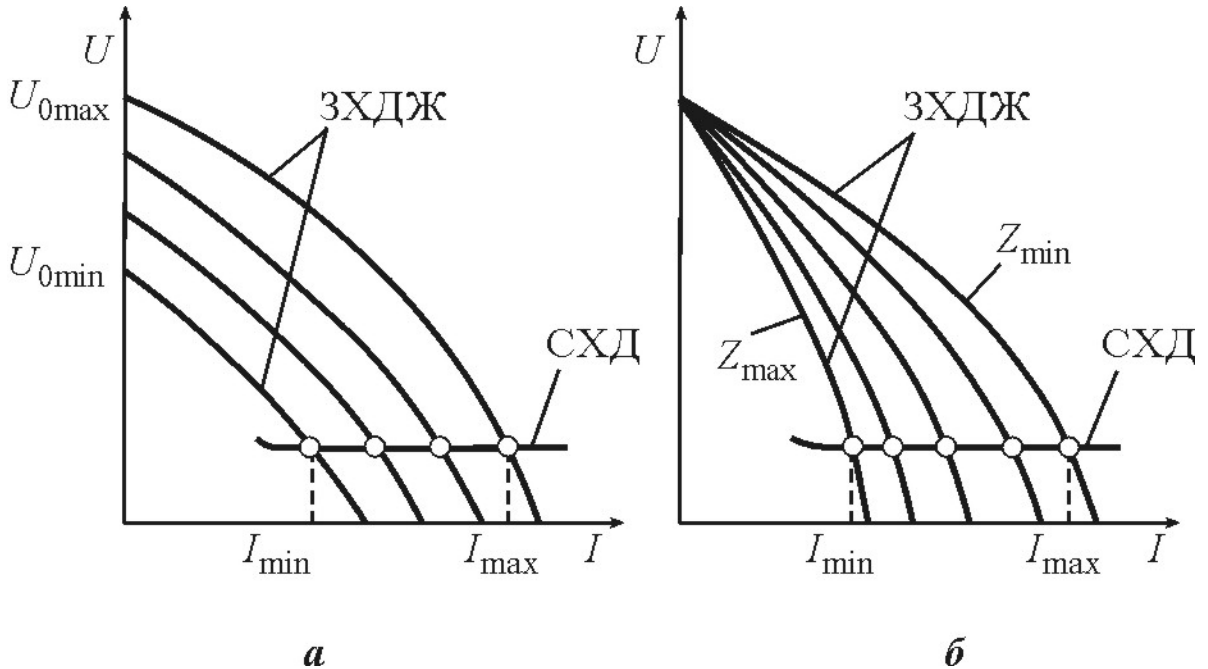


Рис. 1.17. Принципи регулювання зварювального струму в джерелах живлення: **а** – шляхом зміни напруги холостого ходу  $U_0$ ; **б** – шляхом зміни повного опору джерела живлення  $Z$

Джерела живлення розраховані на певні навантаження, при яких вони працюють без перегріву. Температура перегріву  $T_{\text{п}}$  джерела живлення – це різниця між температурою джерела живлення  $T$  і температурою навколишнього середовища  $T_0$ , тобто  $T_{\text{п}} = T - T_0$ .

Тривалість роботи джерела при заданій потужності визначає можливість його перегріву. Розрізняють три режими роботи: тривалий, переміжний та повторно-короткочасний.

У тривалому режимі джерело живлення працює під навантаженням довгий час при сталій температурі  $T_c$ . В такому режимі працюють джерела живлення для автоматичного зварювання. Вихідна потужність джерела  $P_{\text{вих}}$  при цьому є незмінною, а його температура (рис. 1.18,**а**) прямує до значення  $T_{\text{п.с}}$  за експоненціальним законом:

$$T = T_0 + T_{\text{п.с}}(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}), \quad (1.28)$$

де  $T_{п.с}$  – стала температура перегріву джерела живлення  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t$  – час роботи джерела, хв;  $\tau$  – постійна часу нагрівання, хв.

Постійна  $\tau$  характеризує швидкість зростання температури джерела та температури перегріву і визначається точкою перетинання дотичної, проведеної до експоненти, з прямою сталої температури джерела живлення. За час  $t = \tau$  температура перегріву складає 63 % сталої температури  $T_c$ .

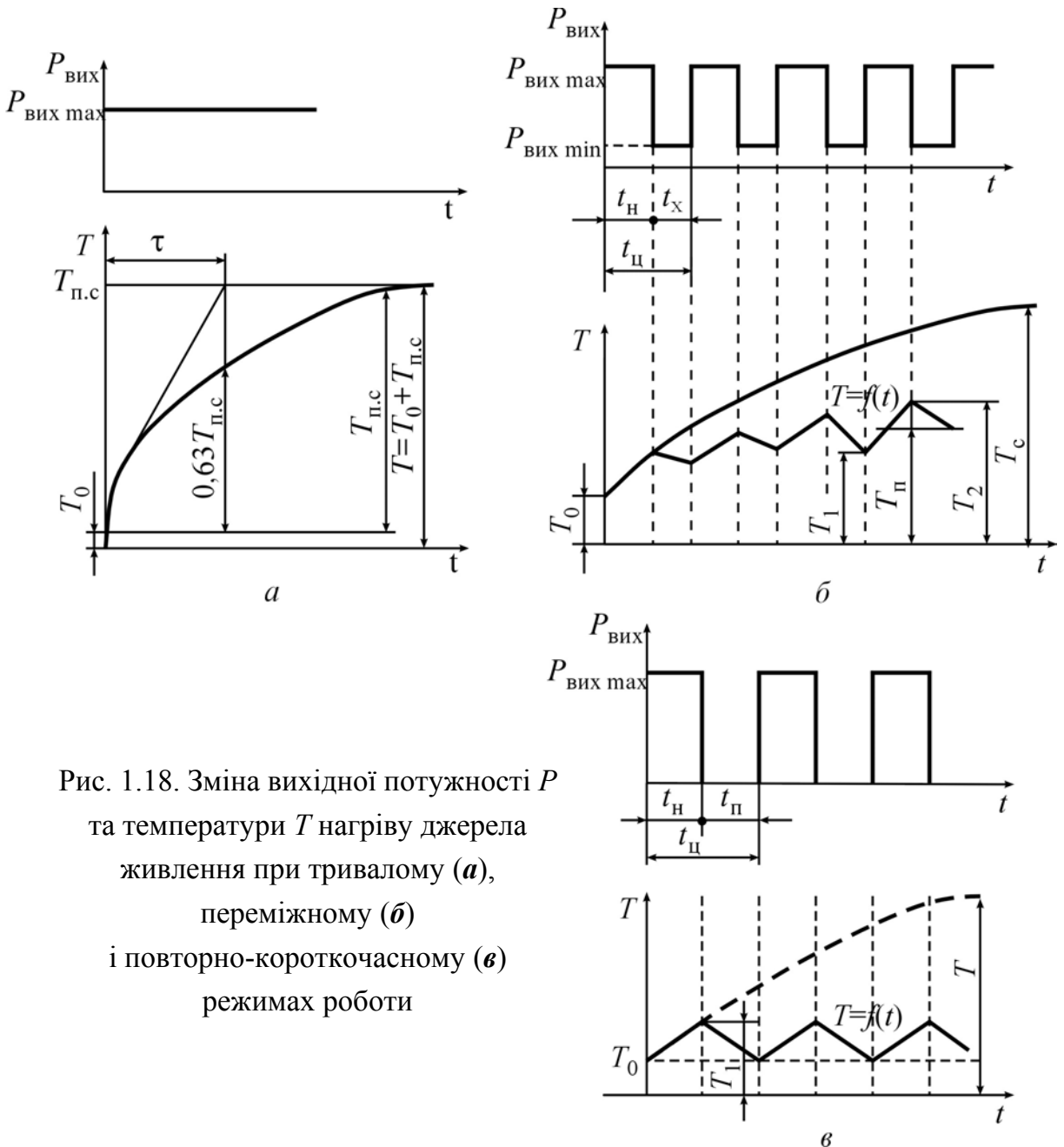


Рис. 1.18. Зміна вихідної потужності  $P$  та температури  $T$  нагріву джерела живлення при тривалому (а), переміжному (б) і повторно-короткочасному (в) режимах роботи

Переміжний режим відрізняється від тривалого тим, що джерело живлення, яке постійно ввімкнуте у мережу, періодично відмикається від навантаження, тобто режим навантаження протягом часу  $t_н$  чергується з режимом холостого ходу протягом часу  $t_х$ . Цей режим використовується у

зварювальних установках для механізованого та ручного дугового зварювання. Характеристикою переміжного режиму є відносна тривалість навантаження

$$\text{ПН}\% = \frac{t_{\text{н}}}{t_{\text{н}} + t_{\text{х}}} 100 \% = \frac{t_{\text{н}}}{t_{\text{ц}}} 100 \%, \quad (1.29)$$

де  $t_{\text{ц}}$  – тривалість циклу роботи джерела, хв;  $t_{\text{ц}} = t_{\text{н}} + t_{\text{х}}$ .

Тривалість циклу роботи джерела живлення для ручного дугового зварювання приймають рівною 5 хв, а для механізованого зварювання 10 хв. Наприклад, при ПН 60 % джерело для механізованого зварювання у середовищі двоокису вуглецю увімкнуте на навантаження протягом 6 хв, а у режимі холостого ходу перебуває протягом 4 хв.

При роботі у переміжному режимі вихідна потужність джерела має циклічний характер, тобто змінюється від  $P_{\text{вих min}}$  до  $P_{\text{вих max}}$  (рис.1.18,б). При такому режимі температура джерела за час  $t_{\text{н}}$  не встигає досягти стабільної температури  $T = T_0 + T_{\text{п.с}}$ , а за час  $t_{\text{х}}$  – знизитися до температури  $T_0$ . По закінченні часу роботи джерела живлення його температура  $T$  коливається між деяким максимальним  $T_2$  та мінімальним  $T_1$  значеннями. Середнє значення цих температур  $T_{\text{п}}$  відповідає значенню вихідної потужності, що віддається джерелом живлення навантаженню.

Повторно-короткочасний режим характеризується також циклічністю зміни вихідної потужності джерела, але її значення змінюється від нуля до  $P_{\text{вих max}}$ , тобто під час пауз джерело відключається від мережі (рис.1.18,в). Показником цього режиму є відносна тривалість вмикання:

$$\text{ПВ}\% = \frac{t_{\text{н}}}{t_{\text{н}} + t_{\text{п}}} 100 \% = \frac{t_{\text{н}}}{t_{\text{ц}}} 100 \%, \quad (1.30)$$

де  $t_{\text{п}}$  – час паузи, хв.

Температура при такому режимі роботи зростає за законом більш крутої експоненти, ніж при переміжному, через проходження пускового струму під час вмикання джерела живлення у мережу та до навантаження, але під час пауз температура може знижуватися до  $T_0$ . Повторно-короткочасний режим роботи використовується в усіх напівавтоматах та частково у зварювальних автоматах, найчастіше з ПВ 60 %.

Якщо величина ПН% (або ПВ%) відрізняється від номінальної (ПН<sub>н</sub>%, ПН<sub>н</sub>%), то припустимий струм навантаження коригують згідно з формулою

$$I = I_n \sqrt{\frac{\text{ПН}_n \%}{\text{ПН} \%}} = I_n \sqrt{\frac{\text{ПВ}_n \%}{\text{ПВ} \%}}. \quad (1.31)$$

Коефіцієнт корисної дії  $\eta_{\text{дж}}$  характеризує втрати енергії у самому джерелі живлення:

$$\eta_{\text{дж}} = \frac{P_{\text{д}}}{P_{\text{м}}} 100 \%, \quad (1.31)$$

де  $P_{\text{д}}$  – потужність дуги, Вт;  $P_{\text{м}}$  – потужність, яку споживає джерело з мережі, Вт.

Для різноманітних джерел живлення дуги  $\eta_{\text{дж}}$  знаходиться у широких межах і складає 45...98 %.

Коефіцієнт потужності  $\cos \varphi$ , який показує, яку частку всієї потужності, що виробляє джерело, складає активна потужність, є характеристикою зварювальних трансформаторів. Ці джерела належать до електротехнічних установок з низьким коефіцієнтом потужності ( $\cos \varphi = 0,48 \dots 0,88$ ). Підвищити  $\cos \varphi$  трансформатора, наприклад, для ручного зварювання, можна шляхом вмикання паралельно первинній обмотці косинусного конденсатора відповідної потужності.

Джерела живлення класифікують за родом струму (постійний або змінний) та способом регулювання (рис. 1.19).

Джерелами змінного синусоїдального струму служать зварювальні трансформатори. Для створення змінного струму заданої форми (наприклад, прямокутної) є джерела зі спеціальним керуванням. Джерела змінного струму широко використовують для ручного дугового зварювання та механізованого зварювання під флюсом (табл. 1.2). Для зварювання легких сплавів у середовищі аргону випускають спеціальні установки.

Для живлення зварювальної дуги постійним струмом застосовують випрямлячі, електромашинні перетворювачі та агрегати. Найбільше розповсюджені зварювальні випрямлячі. Вони мають істотні переваги перед електромашинними перетворювачами (високий ККД, широкий діапазон регулювання струму та напруги, можливість автоматичного керування та програмування процесу зварювання і т. ін.). Випрямлячі випускають зі спадними, жорсткими та універсальними зовнішніми вольт-амперними характеристиками.

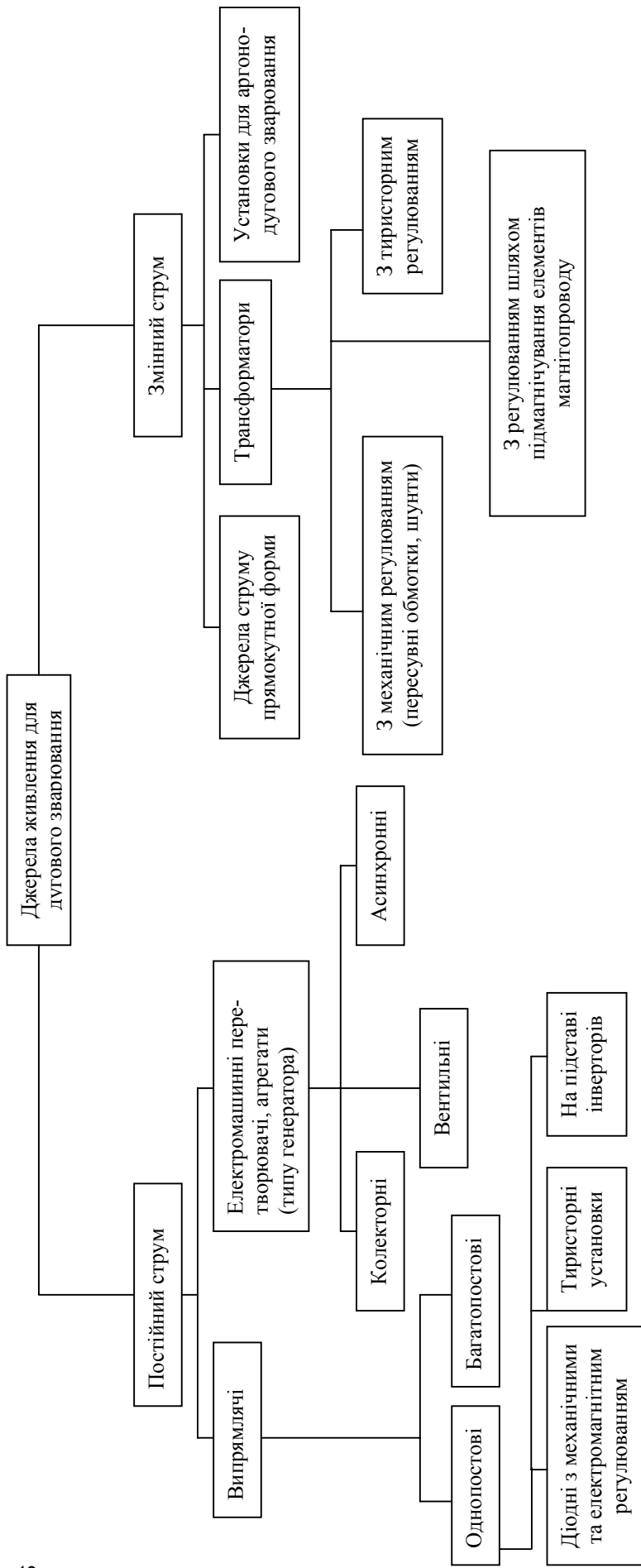


Рис. 1.19. Класифікація джерел живлення дуги для зварювання плавленням

У спеціалізованих установках для зварювання постійним струмом основу складають випрямлячі, обладнані допоміжними пристроями та регуляторами (у тому числі і транзисторними), що суттєво розширюють їх технологічні можливості. Наприклад, установки для зварювання неплавким електродом у захисному газі обладнані осциляторами, імпульсними стабілізаторами, пристроями виходу джерела на заданий режим та зварювання кратера шва.

Електромашинні джерела живлення, головним вузлом яких є зварювальні генератори, розділяються залежно від типу приводу та конструктивного виконання на перетворювачі з колекторним генератором та приводним електродвигуном (нині промисловістю практично не випускаються) або двигуном внутрішнього згоряння (агрегати), вентильні зварювальні генератори постійного струму, а також перетворювачі на базі асинхронних генераторів.

Для зварювальних джерел живлення, які випускаються державними підприємствами, прийняте стандартне умовне позначення (табл.1.3), яке складається з буквеної та цифрової частин, що містять інформацію про призначення даного джерела, номінальний струм, кліматичне виконання тощо.

4 **Таблиця 1.2. Характеристики та області застосування джерел живлення для дугового зварювання**

Тип	Форма ЗХДЖ	Спосіб регулювання	Род струму при зварюванні				роботизованому
			ручному дуговому	неплавким електродом в інертних газах	плавким електродом у захисних газах	під флюсом	
Трансформатор, випрямляч зі ступеневим регулюванням	С	Механічний	Постійний	Постійний	–	Постійний	–
	Ж		Змінний	Змінний	Постійний	Змінний	–
Трансформатор, випрямляч (пересувні котушки, магнітні шунти)	С		Постійний	Постійний	–	Постійний	–
Трансформатор з підмагніченим шунтом, випрямляч з дроселем насичення	С	Електромагнітний	Постійний	Постійний	Постійний	Постійний	–
	ПС		Змінний	–	Постійний	Змінний	–
Генератор	С ПС		Постійний	Постійний	–	–	–
Тиристорний	С	Електронний	Постійний	Постійний	Постійний	Постійний	Постійний
	ПС		Змінний	–	Постійний	Змінний	Постійний
Транзисторний	С		Постійний	Постійний	Постійний	Постійний	Постійний
	ПС	–	–	Постійний	–	–	Постійний
Інверторний	С		Постійний	Постійний	Постійний	Постійний	Постійний
	Ж	–	–	Постійний	–	–	Постійний
Джерело з прямокутною формою струму	С		Змінний	Постійний	Постійний	Змінний	Постійний
	ПС	–	–	Змінний	Змінний	Змінний	Постійний

Примітка. С – спадна; ПС – положоспадна; Ж – жорстка.



Структуру умовного позначення різних джерел живлення наведено у дод.1.

**Таблиця 1.3. Стандарти на умовні позначення джерел живлення для дугового зварювання**

Тип джерела живлення	Державний стандарт
Агрегати	ГОСТ 2402-82Е
Перетворювачі	ГОСТ 7237-82Е
Трансформатори для автоматичного зварювання під флюсом	ГОСТ 7012-77
Трансформатори для ручного дугового зварювання	ГОСТ 95-77Е
Випрямлячі	ГОСТ 13821-77Е
Установки для зварювання неплавким (вольфрамовим) електродом	ТУ 539.073-78 ТУ 739.302-82

Нижче наведені приклади позначення деяких джерел живлення.

ТДФЖ-1002У3 – трансформатор для дугового зварювання під флюсом, з жорсткою зовнішньою характеристикою, номінальний струм 1000 А, реєстраційний номер розробки 02, кліматичне виконання У, категорія розміщення 3.

ПД-502У2 – перетворювач для дугового зварювання покритими електродами, номінальний струм 500 А, реєстраційний номер розробки 02, кліматичне виконання У, категорія розміщення 2.

ВДГМ-1602У3 – випрямляч для дугового зварювання у середовищі захисних газів, багатопостовий, номінальний струм 1600 А, реєстраційний номер розробки 02, кліматичне виконання У, категорія розміщення 3.

### **Контрольні питання**

1. Які процеси у зварювальній дузі постійного струму обумовлюють її поведінку як нелінійного елемента електричного кола?

2. Які фактори впливають на форму статичної вольт-амперної характеристики дуги?

3. Який показник визначає стійкість енергетичної системи "джерело живлення – дуга – ванна"? Якими заходами забезпечується стійкість системи при дії у зварювальному контурі збурень різного роду?

4. В чому полягають особливості горіння дуги змінного струму?

5. Якими параметрами характеризуються зварювальні джерела живлення?

## *Глава 2*

### **ЗВАРЮВАЛЬНІ ТРАНСФОРМАТОРИ**

Головним вузлом сучасних джерел живлення змінного зварювального струму є спеціальний, як правило, однофазний зварювальний трансформатор тієї або іншої конструкції. Для живлення трифазної дуги використовують спеціальні трифазні трансформатори або два однофазних трансформатори. Застосовуються також зварювальні автотрансформатори, призначені для підключення однофазних зварювальних трансформаторів до трифазної мережі.

Зварювальним трансформатором називається статичний електромагнітний апарат, призначений для перетворення первинної системи змінного струму у вторинну, що має знижену напругу та великі струми, без зміни їх частоти. Крім того, трансформатор самостійно або у комплексі з додатковими пристроями забезпечує формування потрібних статичних зовнішніх характеристик та регулювання зварювального струму.

Конструкції зварювальних трансформаторів дуже різноманітні. Залежно від способу регулювання струму їх можна розділити на три групи пристроїв: 1) з механічним регулюванням; 2) з електромагнітним регулюванням; 3) з електронним (тиристорним) регулюванням.

Для ручного дугового зварювання застосовують головним чином трансформатори з механічним регулюванням (див.табл. 1.2). Діапазон номінальних струмів трансформаторів для ручного дугового зварювання 120...500 А. Трансформатори випускаються за ГОСТ 95-77Е.

Для зварювання під шаром флюсу застосовують трансформатори з електромагнітним та тиристорним регулюванням, які дозволяють забезпечити стабілізацію режиму при коливаннях напруги мережі та нескладне дистанційне регулювання.

Живлення кожної зварювальної дуги при багатодуговому зварюванні здійснюється від самостійного однофазного джерела, що дає змогу виконувати незалежне регулювання режиму кожної дуги. Для рівномірного навантаження мережі при тридуговому зварюванні джерела вмикають у різні фази, а при дводуговому – за двофазною симетричною схемою.

Діапазон номінальних струмів трансформаторів для зварювання під флюсом 1000...2000 А. Трансформатори випускаються за ГОСТ 7012-77.

До складу трансформатора звичайно входять дві (або більше) електрично не пов'язаних поміж собою обмотки, розміщені на замкнутому сталевому осерді. Для зменшення втрат на вихрові струми магнітопроводи виготовляються з листової електротехнічної сталі. У сучасних вітчизняних зварювальних трансформаторах здебільшого для осердя використовується холоднокатана анізотропна рулонна сталь, що містить 2,8...3,8 % кремнію, марок 3404, 3405 товщиною 0,35 мм та 3414 товщиною 0,35 і 0,5 мм з терmostійким електроізоляційним покриттям.

Наявність кремнію сприяє зниженню втрат на вихрові струми і одночасно підвищує магнітну проникність сталі. Магнітні властивості деяких марок електротехнічної сталі наведені у табл. 2.1.

**Таблиця 2.1. Магнітні властивості легованої електротехнічної сталі (ГОСТ 21427-83)**

Сталь	Товщина листа, мм	Питомі втрати потужності $P_{1,5/50}$ , Вт/кг	Індукція, Тл, при напруженості поля $H$ , кА/м, не менше	
			2,5	30
Гарячекатана ізотропна				
1311	0,50	6,1	1,48	1,95
1411	0,50	4,4	1,46	1,94
1511	0,50	3,5	1,46	1,90
Холоднокатана ізотропна				
2011	0,65	9,0	1,60	2,02
2111	0,65	10,0	1,58	2,0
2211	0,65	7,0	1,56	1,96
2311	0,65	5,8	1,52	1,96
2411	0,50	3,6	1,49	1,96
Холоднокатана анізотропна				
3411	0,50	2,45	1,75	–
3416	0,28	0,89	1,9	–

Наведене у таблиці цифрове маркування електротехнічної сталі відповідає прийнятому в Україні і Росії та розшифровується наступним чином. Перша цифра визначає структуру та вид прокату: 1 – гарячекатана

ізотропна; 2 – холоднокатана ізотропна; 3 – холоднокатана анізотропна з кристалічною структурою. Друга цифра в марці визначає вміст кремнію: 0 – вміст < 0,4 %; 1 – 0,4...0,8 %; 2 – 0,8...1,8 %; 3 – 1,8...2,8 %; 4 – 2,8...3,8 %; 5 – 3,8...4,8 %. Третя цифра визначає втрати на гістерезис та теплові втрати при певному значенні індукції  $B$  та частоти струму  $f$ . Наприклад, при третій цифрі 1 питомі втрати сталі 1311 при  $B = 1,5$  Тл та частоті  $f = 50$  Гц складають  $P_{1,5/50} = 6,1$  кВт/кг. Четверта цифра – код числового значення параметра, що нормується. Чим більша ця цифра, тим менші питомі втрати  $P_{1,5/50}$ .

Із співставлення сталей 1411, 2411, 3411 (див.табл. 2.1) витікає: при однаковій товщині листа та хімічному складі найбільші втрати має гарячекатана ізотропна сталь, а найменші – холоднокатана анізотропна.

Для сучасних високочастотних зварювальних джерел живлення використовують трансформатори, осердя яких виготовляються з матеріалів з надзвичайно високим електроопором. До таких матеріалів, які зберігають високу магнітну проникність у широкому діапазоні частот, належать ферити (не змішувати з феритом у сплавах заліза). Ферити являють собою магнітну кераміку, що отримана спіканням та містить  $Fe_2O_3$  і оксиди таких металів, як  $MnO$ ,  $MgO$ ,  $ZnO$  та  $LiO_2$ . Фактично ферити є напівпровідниками, їх опір струму на 6...12 порядків перевищує електроопір заліза. Завдяки цьому навіть при високих струмах вони мають незначні втрати від вихрових струмів.

За характером будови магнітного кола відрізняють трансформатори броньового та стрижневого типу (рис. 2.1), за характером будови обмоток – трансформатори з циліндричними та дисковими обмотками. Найбільше розповсюдження мають зварювальні трансформатори зі стрижневими магнітопроводами як з циліндричними, так і з дисковими обмотками. Трансформатори працюють з повітряним природним або примусовим охолодженням.

Трансформатори з циліндричними обмотками (рис. 2.1,*а*), в яких первинна 1 та вторинна 2 обмотки намотуються концентрично одна поверх другої, належать до групи трансформаторів з мінімальним, або нормальним, електромагнітним розсіюванням і є повними аналогами силових повітряних трансформаторів ідентичної потужності.

Трансформатори з дисковими обмотками (рис. 2.1,*б*), у яких первинна 1 та вторинна 2 обмотки рознесені одна відносно другої, належать до групи спеціальних зварювальних трансформаторів з підвищеним, або розвиненим, електромагнітним розсіюванням.

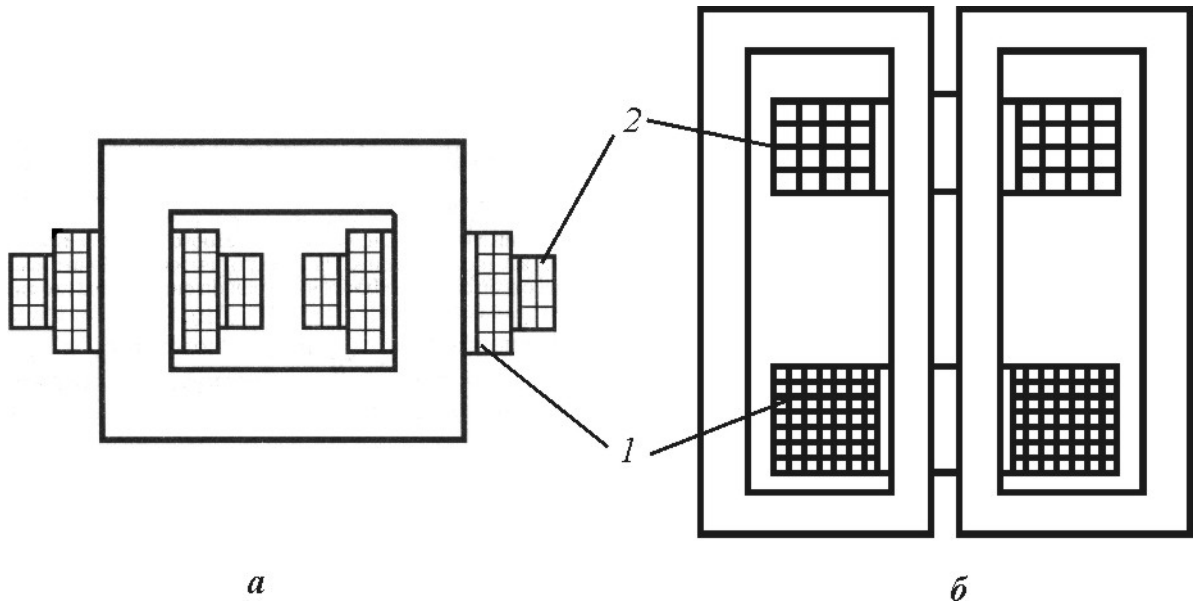


Рис. 2.1. Конструкції зварювальних трансформаторів:  
*a* – стрижневого типу з циліндричними обмотками;  
*б* – броневого типу з дисковими обмотками

## 2.1. Елементи теорії зварювального трансформатора

В основу роботи зварювального трансформатора покладений принцип електромагнітної взаємодії двох контурів, що нерухомі один відносно другого. Для посилення електромагнітного зв'язку поміж первинною  $W_1$  та вторинною  $W_2$  обмотками служить осердя.

Розглянемо роботу однофазного зварювального трансформатора на прикладі трансформатора стрижневого типу з дисковими обмотками і з підвищеним електромагнітним розсіюванням (рис. 2.2,*а*).

При проходженні струму по обмотках виникають магнітні потоки. Основна частина магнітних потоків, що утворюються намагнічувальною силою первинної та вторинної обмоток, замикається через стрижень магнітопроводу  $\Phi_T$  і забезпечує передачу потужності від первинної обмотки до вторинної (рис. 2.2,*б*). Друга частина магнітних потоків замикається через повітря і утворює потоки розсіювання  $\Phi_{p1}$  та  $\Phi_{p2}$ . Потоки

розсіювання наводять у трансформаторі реактивну ЕРС, яка визначає індуктивний опір трансформатора  $X_T$ . Внаслідок наявності  $X_T$  забезпечується стійке горіння дуги та можливість отримання крутоспадної зовнішньої характеристики джерела і його настроювання на заданий режим роботи.

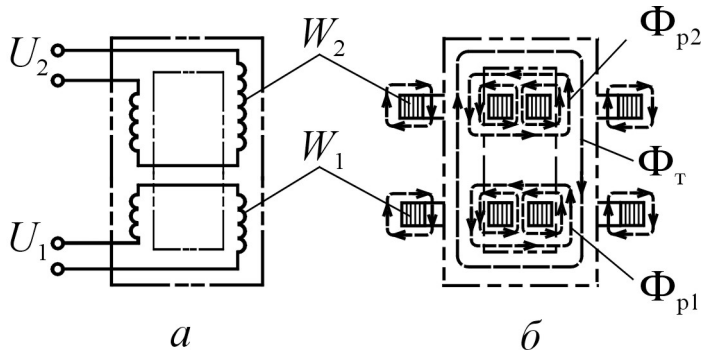


Рис. 2.2. Конструкція (а) та електромагнітна схема (б) зварювального трансформатора з розвиненим (збільшеним) електромагнітним розсіюванням

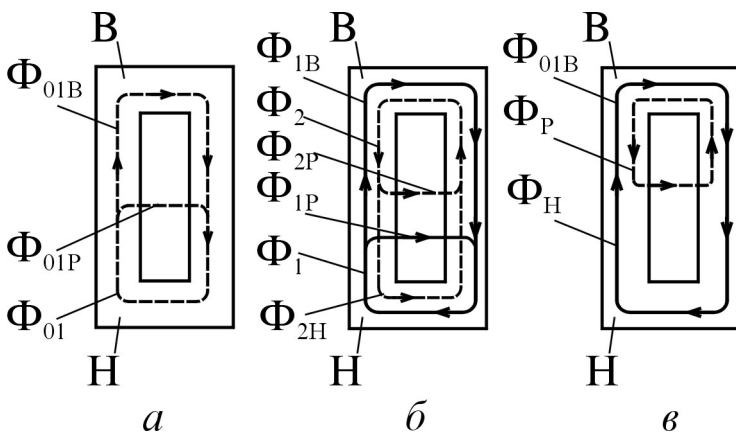


Рис. 2.3. Розподіл магнітних потоків у трансформаторі в режимах: а – холостого ходу, б, в – навантаження

жується прикладеною напругою  $U_1$ :

$$E_1 = 4,44W_1f \Phi_{01} \cdot 10^{-8} \approx U_1, \quad (2.1)$$

де  $W_1$  – число витків первинної обмотки трансформатора;  $f$  – частота змінного струму, Гц;  $\Phi_{01}$  – магнітний потік, Вб.

Магнітний потік  $\Phi_{01B}$  у витках вторинної обмотки наводить ЕРС  $E_2$ , яка дорівнює напрузі холостого ходу:

Визначимо рівняння, що описують роботу трансформатора при сталих режимах.

*Холостий хід.* Параметри режиму:  $I_2 = 0$ ;  $U_2 = U_0$ . Магнітний потік  $\Phi_{01}$  у трансформаторі утворюється намагнічувальною силою первинної обмотки (рис. 2.3,а).

Переважна частина магнітного потоку  $\Phi_{01}$  замикається по магнітопроводу та взаємодіє з обмотками  $W_1$  та  $W_2$ . Незначна частина цього потоку замикається через повітря і утворює потік розсіювання  $\Phi_{01P}$  (спільний потік).

Магнітний потік  $\Phi_{01}$  у витках первинної обмотки наводить ЕРС  $E_1$ , яка, головним чином, зрівноважується

$$E_2 = 4,44W_2f \Phi_{01B} \cdot 10^{-8} \approx U_0, \quad (2.2)$$

де  $W_2$  – число витків вторинної обмотки трансформатора.

ЕРС  $E_2$  наводиться лише частиною потоку  $\Phi_{01}$ , що замикається через верхнє ярмо  $B$  магнітопроводу. Цю частину потоку можна виразити через коефіцієнт магнітного зв'язку первинної обмотки з вторинною  $k_{\mu 1-2}$ :

$$\Phi_{01B} = \Phi_{01}k_{\mu 1-2}. \quad (2.3)$$

Коефіцієнт магнітного зв'язку розраховується як відношення магнітних потоків  $\Phi_{01}$ ,  $\Phi_{01B}$  та  $\Phi_{01P}$ :

$$k_{\mu 1-2} = \frac{\Phi_{01B}}{\Phi_{01}} = \frac{\Phi_{01B}}{\Phi_{01B} + \Phi_{01P}}. \quad (2.4)$$

Тоді ЕРС вторинної обмотки з урахуванням (2.3)

$$E_2 = 4,44W_2f \Phi_{01}k_{\mu 1-2} \cdot 10^{-8} = U_0. \quad (2.5)$$

Коефіцієнт трансформації трансформатора

$$n = \frac{E_1}{E_2} = \frac{W_1}{W_2k_{\mu 1-2}} = \frac{U_1}{U_0}. \quad (2.6)$$

Звідси напруга холостого ходу

$$U_0 = U_1 \frac{W_2k_{\mu 1-2}}{W_1}. \quad (2.7)$$

В трансформаторах з розвиненим магнітним розсіюванням ( $k_{\mu 1-2} < 1$ ) при зміні розсіювання значення  $U_0$  змінюється мало і, як правило, ця зміна складає 3...5 В.

Режим навантаження ( $I_2 = I_d; U_2 = U_d$ ). У цьому режимі струм протікає по первинній та вторинній обмотках трансформатора. Намагнічувальна сила обмоток наводить у магнітопроводі потоки  $\Phi_1$  та  $\Phi_2$ . Частина цих потоків розсіюється з утворенням потоків розсіювання  $\Phi_{p1}$  та  $\Phi_{p2}$  (рис.2.3,б).

В нижньому ярмі Н магнітопроводу утворюється сумарний магнітний потік  $\Phi_H$ :

$$\dot{\Phi}_H = \dot{\Phi}_1 + \dot{\Phi}_{2H}. \quad (2.8)$$

При незмінній первинній напрузі  $U_1$  потік  $\Phi_H$  залишається практично постійним. Будь-яка його зміна приводить до зниження або зростання струму у первинній обмотці. Завдяки цьому потік  $\Phi_H$  відновлюється. Таким чином,  $\dot{\Phi}_H \approx \dot{\Phi}_{01} \approx \text{const}$ .

ЕРС, що наводиться потоком  $\Phi_H$  у первинній обмотці, визначається рівнянням (2.1).

У верхньому ярмі В магнітопроводу утворюється сумарний магнітний потік  $\Phi_B$ :

$$\dot{\Phi}_B = \dot{\Phi}_2 + \dot{\Phi}_{1B} = \dot{\Phi}_2 + \dot{\Phi}_1 k_{\mu 1-2}. \quad (2.9)$$

Визначимо  $\Phi_1$  із рівняння (2.8):

$$\dot{\Phi}_1 = \dot{\Phi}_H - \dot{\Phi}_{2H} = \dot{\Phi}_H - \dot{\Phi}_2 k_{\mu 2-1}, \quad (2.10)$$

де  $k_{\mu 2-1}$  – коефіцієнт магнітного зв'язку вторинної обмотки з первинною.

Після підстановки  $\Phi_1$  у рівняння (2.9) одержимо

$$\dot{\Phi}_B = \dot{\Phi}_2 + \left( \dot{\Phi}_H - \dot{\Phi}_2 k_{\mu 2-1} \right) k_{\mu 1-2}.$$

Приймаючи  $k_{\mu 1-2} \approx k_{\mu 2-1} = k_\mu$ , матимемо

$$\dot{\Phi}_B = \dot{\Phi}_2 + \dot{\Phi}_H k_\mu - \dot{\Phi}_2 k_\mu^2,$$

або

$$\dot{\Phi}_B = \dot{\Phi}_{01B} + \dot{\Phi}_2 (1 - k_\mu^2). \quad (2.11)$$



Позначимо  $1 - k_\mu^2 = \sigma$  ( $\sigma$  – коефіцієнт розсіювання). Після підстановки значення  $\sigma$  у рівняння (2.11) одержимо:

$$\dot{\Phi}_B = \dot{\Phi}_{01B} + \dot{\Phi}_2 \sigma. \quad (2.12)$$

Позначимо  $\dot{\Phi}_2 \sigma = \dot{\Phi}_p$  ( $\dot{\Phi}_p$  – сумарний потік розсіювання у трансформаторі); тоді  $\dot{\Phi}_B = \dot{\Phi}_{01B} + \dot{\Phi}_p$  (рис. 2.3, в). Потік  $\dot{\Phi}_{01B}$  наводить у вторинній обмотці трансформатора основну ЕРС

$$E_{20} = 4,44 W_2 f \dot{\Phi}_{01a} \cdot 10^{-8}. \quad (2.13)$$

Потік  $\dot{\Phi}_p$  наводить у вторинній обмотці реактивну ЕРС

$$E_{2p} = 4,44 W_2 f \dot{\Phi}_p \cdot 10^{-8}. \quad (2.14)$$

Сумарна ЕРС трансформатора

$$\dot{E}_2 = \dot{E}_{20} + \dot{E}_{2p}. \quad (2.15)$$

При робочому навантаженні ЕРС трансформатора зрівноважується падінням напруги в дузі та реактивною ЕРС:

$$\dot{E}_2 = \dot{U}_d + \dot{E}_{2p}, \quad (2.16)$$

де  $\dot{E}_{2p} = I_2 X_T$  (тут  $X_T$  – індуктивний опір трансформатора у режимі навантаження,  $X_T = \frac{\omega W_2^2}{R_\mu} \sigma$ ). У цій формулі  $\omega$  – кутова частота змінного струму;

$R_\mu$  – опір кола на шляху потоків розсіювання).

Рівняння роботи трансформатора можна одержати також із спрощеної еквівалентної схеми заміщення та векторної діаграми (рис. 2.4).

При складанні схеми заміщення параметри первинного кола приводять до відповідних еквівалентних параметрів вторинного кола згідно з співвідношеннями:

$$U'_1 = U_1 \frac{W_1}{W_2}; \quad I'_1 = I_1 \frac{W_1}{W_2}; \quad X'_1 = X_1 \left( \frac{W_1}{W_2} \right)^2; \quad R'_1 = R_1 \left( \frac{W_1}{W_2} \right)^2.$$

Індексом "штрих" позначені приведені параметри первинної обмотки. Тоді сумарні індуктивний та активний опори схеми заміщення трансформатора будуть:  $X_T = X'_1 + X_2$ ;  $R_T = R'_1 + R_2$ .

Залежність напруги в дузі від струму у векторній формі:

$$\dot{U}_д = \dot{U}_0 - j\dot{I}_2 X_T - \dot{I}_2 R_T = \dot{U}_0 - \dot{I}_2 Z_e, \quad (2.17)$$

де  $Z_e = \sqrt{X_T^2 + R_T^2}$  – повний опір еквівалентної схеми заміщення трансформатора. Рівняння (2.17) є рівнянням зовнішньої вольт-амперної характеристики трансформатора.

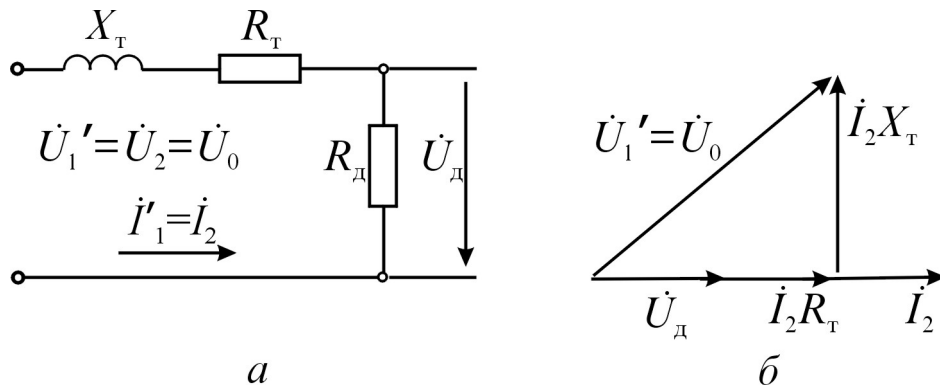


Рис. 2.4. Спрощена схема заміщення (а) та векторна діаграма (б) трансформатора з розвиненим магнітним розсіюванням

Напруга в дузі згідно з векторною діаграмою

$$U_д = \sqrt{U_0^2 - (I_2 X_T)^2} - I_2 R_T.$$

Якщо знехтувати малою величиною  $R_T$  (це припустимо тому, що обмотки трансформатора виготовляють із міді або алюмінію), то отримаємо

$$U_д \approx \sqrt{U_0^2 - (I_2 X_T)^2}, \quad (2.18)$$

звідки

$$I_2 = I_д \approx \frac{\sqrt{U_0^2 - U_д^2}}{X_T}. \quad (2.19)$$

Рівняння (2.19) відображує способи регулювання зварювального струму трансформатора: ступінчастий – зміною величини  $U_0$ , плавний – зміною величини  $X_T$ .

*Коротке замикання* ( $U_d = 0$ ;  $I_2 = I_{к.з}$ ). При короткому замиканні ЕРС трансформатора зрівноважується реактивною ЕРС

$$\dot{E}_2 = \dot{E}_{2p} = \dot{I}_{к.з} X_T.$$

Із векторної діаграми (див. рис. 2.4) та рівнянь (2.17) та (2.19) виразмо значення струму короткого замикання

$$\text{або} \quad \left. \begin{aligned} \dot{I}_{к.з} &= \frac{\dot{U}_0}{Z_e} \\ I_{к.з} &= \frac{U_0}{X_T} \end{aligned} \right\} \quad (2.20)$$

Рівняння (2.17), (2.18) та (2.20) показують, що трансформатори з розвиненим магнітним розсіюванням мають спадну зовнішню вольт-амперну характеристику тому, що  $Z_e > 0$  ( $X_T > 0$ ). Крутість спадання визначається індуктивним опором трансформатора  $X_T$ .

Якщо трансформатор має нормальне магнітне розсіювання ( $Z_e \approx 0$ ,  $X_T \approx 0$ ), то його зовнішня характеристика – жорстка.

## 2.2. Трансформатори з механічним регулюванням

До трансформаторів з механічним регулюванням належать трансформатори з пересувними обмотками, з рухомими магнітними шунтами та трансформатори, що працюють у комплекті з додатковою котушкою – дроселем.

Трансформатори з пересувними обмотками та з рухомими шунтами належать до групи трансформаторів з розвиненим електромагнітним розсіюванням ( $X_T > 0$ ).

Трансформатори, що працюють у комплекті з дроселями, виконані, як правило, з нормальним розсіюванням.

Головна ознака цієї групи джерел живлення – це наявність рухомих частин. Одночасно ця ознака є й головним недоліком таких трансформаторів. На частини, що пересуваються і за допомогою яких регулюють режим зварювання, діють електромагнітні сили. Вони змінюються за законом пульсації від нуля до максимального значення з подвійною частотою мережі. Величина електромагнітних сил пропорційна квадрату струму і змінюється відповідно до режиму роботи трансформатора. Амплітуда коливань рухомих частин трансформатора залежить від маси цих частин, якості та точності їх складання, жорсткості кріплення та інших факторів. Навіть при ретельній проробці конструкцій та високій якості виготовлення значна вібрація рухомих частин є головною причиною, яка обмежує строк служби таких джерел.

Другий недолік цих джерел – це інерційність регулювання та утрудненість дистанційного та програмного керування тому, що регулювання вихідних параметрів здійснюється вручну або за допомогою сервоприводів.

Але, незважаючи на вказані недоліки, ці трансформатори дуже широко розповсюджені у всьому світі як одне з основних джерел живлення для ручного дугового зварювання покритими електродами через малі витрати активних матеріалів, досить високі енергетичні та зварювальні показники, просту та дешеву конструкцію.

У ряді країн (Японія, Німеччина) такі трансформатори використовуються ще й для автоматичного зварювання під флюсом, але вони замінюються більш удосконаленими конструкціями.

### **2.2.1. Трансформатори з пересувними обмотками**

Трансформатори з пересувними обмотками виконуються з магнітопроводами броньового та стрижневого типів. Обмотки броньового трансформатора бувають циліндричними або дисковими, обмотки стрижневого трансформатора, як правило, – тільки дисковими.

Розвинене магнітне розсіювання таких трансформаторів досягається

за рахунок розміщення первинної 1 та вторинної 2 обмоток (див. рис. 2.1, б, 2.2, а) вздовж стрижнів магнітопроводу на деякій відстані одна від одної.

Одна з обмоток трансформатора (часто первинна) закріплена біля одного з ярем (верхнього або нижнього), друга – пересувається за допомогою ходового гвинта. Індуктивний опір трансформатора і, відповідно, зварювальний струм змінюються при зміні відстані між обмотками. Якщо обмотки повністю зсунуті, то магнітне розсіювання та індуктивний опір трансформатора – найменші, а зварювальний струм – найбільший.

Для трансформаторів з пересувними обмотками характерна деяка залежність напруги холостого ходу від відстані між обмотками. При розсуванні обмоток внаслідок зростання потоку розсіювання, що замикається через повітря у вікні між стрижнями, напруга холостого ходу знижується на 3...6 % відносно значення, отриманого при зсунутих обмотках.

Індуктивний опір трансформатора залежно від відстані між обмотками змінюється за лінійним законом і тому зварювальний струм змінюється

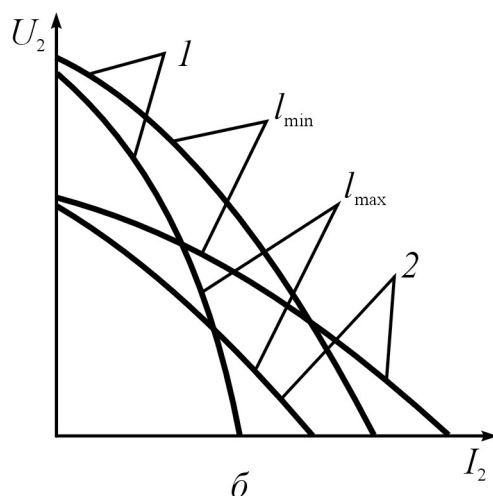
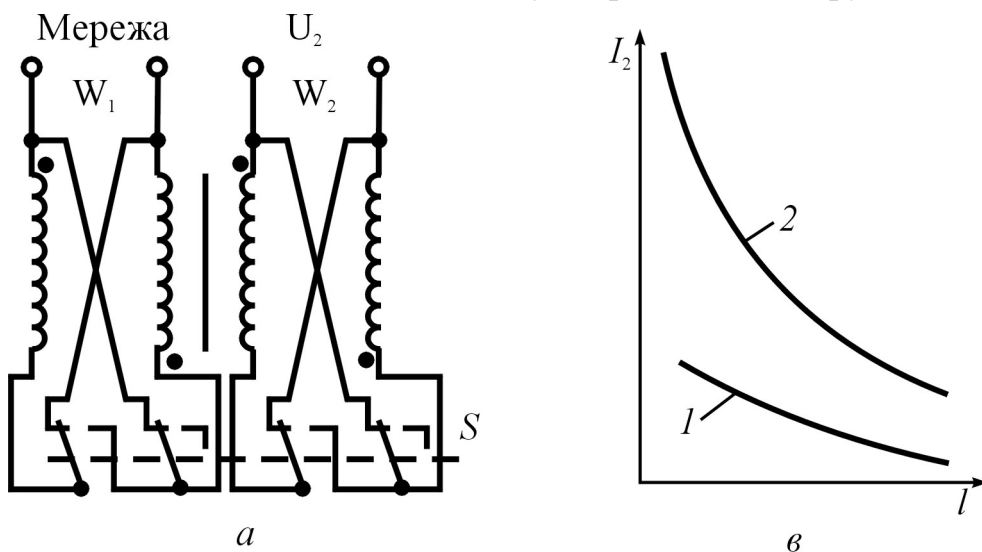


Рис. 2.5. Схема трансформатора з пересувними обмотками (а), його зовнішні (б) та регульовальні (в) характеристики:  
1-діапазон малих струмів;  
2-діапазон великих струмів

обернено пропорційно відстані між обмотками. При надмірному розсуванні обмоток ефективність регулювання струму знижується при одночасному зростанні маси магнітопроводу. Тому великий діапазон плавного регулювання в трансформаторах з пересувними обмотками недоцільний.

Для розширення меж регулювання струму при обмеженні маси магнітопроводу застосовується плавно-ступеневе регулювання шляхом одночасного перемикавання числа витків первинної та вторинної обмоток із збереженням постійного коефіцієнта трансформації або з деяким його зниженням у діапазоні малих струмів.

Типова електрична схема трансформатора з пересувними обмотками, його зовнішні вольт-амперні характеристики та регульовальна характеристика  $I_2 = f(I)$  наведені на рис. 2.5. Необхідною умовою плавно-ступінчастого регулювання струму є стикування між двома діапазонами струму (ГОСТ 95-77Е припускає невеликий розрив струмів при переході з одного діапазона на інший – не більше 7,5 %).

Трансформатори з пересувними обмотками (серій ТД та ТДМ) випускаються в країнах СНД, головним чином у Росії та Узбекистані. Вони розраховані на номінальний струм 315, 400 та 500 А. Трансформатори ТД-102 і ТД-306 (рис.2.6,*а*) переносні, ТДМ-317, ТДМ-401-1, ТДМ-503

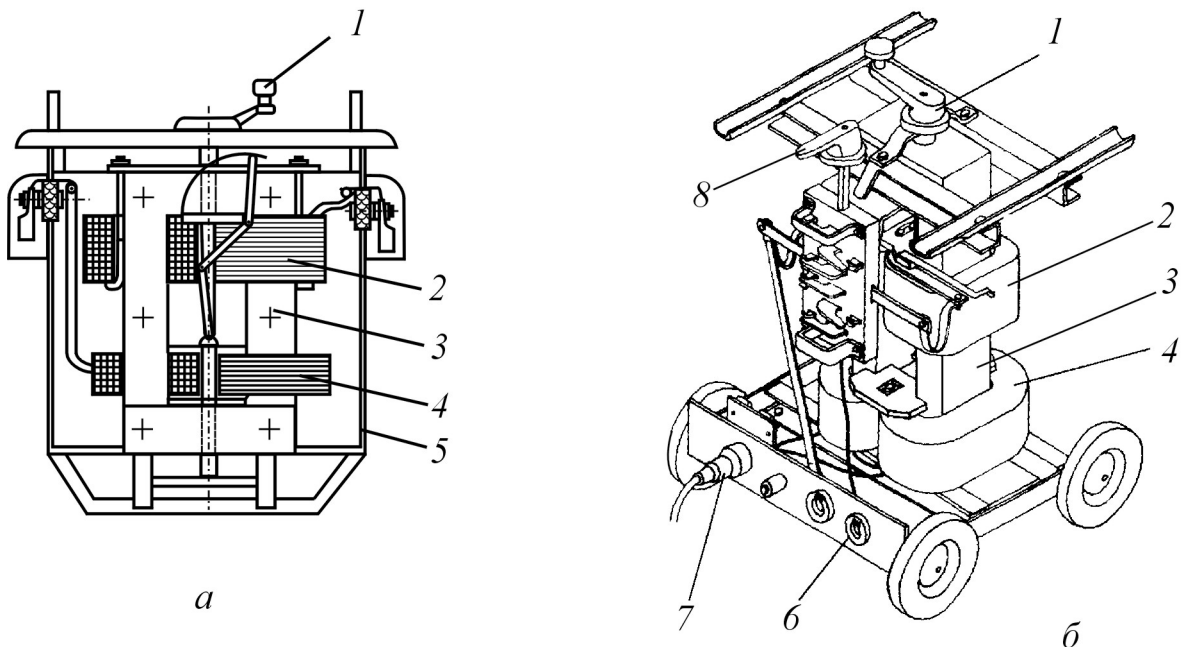


Рис. 2.6. Трансформатори з пересувними обмотками:

*а* – ТД-102; *б* – ТДМ-503 (без кожуху); 1 – рукоятка механізму пересування вторинної обмотки; 2 – вторинна обмотка; 3 – осердя; 4 – первинна обмотка; 5 – кожух; 6 – штирьовий рознімач для підключення зварювального кабелю; 7 – рознімач для підключення до мережі; 8 – перемикач діапазонів струму

(рис. 2.6,б) – пересувні, а також їх модифікації ТДМ-317-1, ТДМ-401-1, ТДМ-503-1 укомплектовані пристроєм зниження напруги холостого ходу, а ТДМ-503-2, крім того, – пристроєм підвищення коефіцієнта потужності. В Україні трансформатори ТДМ-121 випускає ВАТ "Фірма "СЭЛМА", ТДМ-259 – АТ "Каховський завод електрозварювального обладнання". Технічні характеристики трансформаторів з пересувними обмотками наведені у дод. 2 (див. табл. 2.1).

### 2.2.2. Трансформатори з рухомими магнітними шунтами

Трансформатори з розвиненим магнітним розсіюванням та рухомими магнітними шунтами виготовляються на магнітопроводах стрижневого типу і мають дискові обмотки.

Обмотки трансформатора (рис. 2.7,а,б) розміщені симетрично на двох стрижнях магнітопроводу 3. У каналі між первинною 1 та вторинною 2

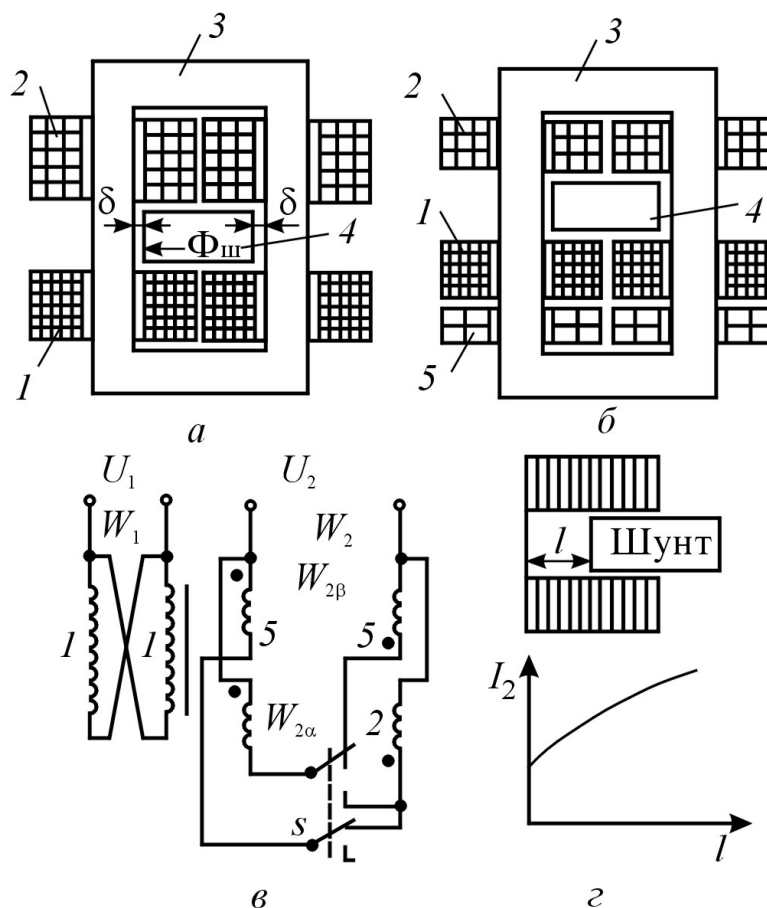


Рис. 2.7. Конструкції трансформаторів з рухомими магнітними шунтами (а, б), схема з'єднання обмоток (в) та регульовальна характеристика (з)

обмотками розташований рухомий магнітний шунт 4. Виведення або введення шунта у вікно осердя здійснюється за допомогою гвинтового механізму. Шунт може складатися з двох частин, тоді ходовий гвинт має два види нарізки: правозахідну та лівозахідну, що забезпечує при його обертанні симетричне пересування частин шунта.

Можливі два варіанти взаємного розташування первинної та вторинної обмоток відносно шунта, а саме: повне або часткове рознесення котушок. При повному рознесенні первинна та вторинна обмотки розміщені по різних сторонах шунта (див.рис.2.7,*а*). При частковому рознесенні (див.рис.2.7,*б*) вторинна обмотка складається з двох секцій – основної 2 з числом витків  $W_{2\alpha}$  та додаткової 5 з числом витків  $W_{2\beta}$ , причому котушки додаткової обмотки розміщені в зоні первинної обмотки та мають з нею добрий електромагнітний зв'язок.

Трансформатори з повністю рознесеними обмотками є економічними, якщо виконані на струми до 200...250 А. Для подальшого збільшення струму доводиться скорочувати число витків первинної та вторинної обмотки, а це порушує оптимальне співвідношення витрат обмоткових матеріалів і сталі, зростає маса трансформатора.

Додаткові витки вторинної обмотки незначно збільшують індуктивний опір трансформатора та дозволяють створити оптимальну за масою і межами регулювання конструкцію.

В трансформаторах з частковим рознесенням обмоток для отримання двох діапазонів регулювання змінюють ступінь рознесення обмоток. При повному рознесенні обмоток одержують діапазон малих струмів. При переході до діапазону великих струмів вмикається обмотка з числом витків  $W_{2\beta}$  та вимикається частина обмотки  $W_{2\alpha}$ .

Найбільш раціональна схема з'єднання котушок обмоток наведена на рис.2.7,*в*. Діапазону великих струмів відповідає паралельне з'єднання котушок вторинної обмотки. При переході на діапазон малих струмів додаткові котушки 5 вимикаються, а основні котушки 2 вмикаються послідовно. При цьому зростає напруга холостого ходу. При переході з одного діапазону струмів до іншого в трансформаторі з шунтом немає потреби у перемиканні витків первинної обмотки, що підвищує надійність роботи джерела.

Плавне регулювання струму в трансформаторах з шунтом здійснюється шляхом пересування магнітного шунта вручну або за допомогою серво-



приводу. При повністю введеному у вікно осердя шунті потоки розсіювання та індуктивний опір трансформатора максимальні, а зварювальний струм – мінімальний. При висуванні шунта індуктивний опір зменшується і зварювальний струм зростає (рис. 2.7,з).

В міру висування шунта з вікна магнітопроводу зростає його вібрація, викликана дією осьових електромагнітних зусиль. Для зниження вібрації встановлюють додаткові пружини або застосовують більш тугі напрямні, по яких пересувається шунт. Вібрація значно зменшується, коли шунт зібраний з двох частин. В цьому випадку осьові зусилля спрямовані назустріч один одному.

Трансформатори з рухомими шунтами в Україні випускає Дослідний завод електрозварювального обладнання ІЕЗ імені Патона. Найбільш поширеними марками таких джерел живлення є трансформатори СТШ-250, СТШ-500 (рис. 2.8,а), а також СТШ-500-80, що обладнаний пристроєм для вимикання первинної напруги через 0,5...1 с після закінчення зварювання. Також трансформатори з шунтами випускає ВАТ "Фірма СЭЛМА" (ТДМ-180, ТДМ-403, ТДМ-250, ТДМ-505 та інші).

До даної групи трансформаторів можна умовно віднести трансформатори з регулюванням струму шляхом намотування зварювального кабелю поверх захисного кожуха (рис. 2.8,б). Намотуючи кабель навколо кожуха (до чотирьох витків в той чи протилежний бік) можна плавно регулювати струм у межах однієї ступені. Ступінчасте регулювання струму забезпечується за

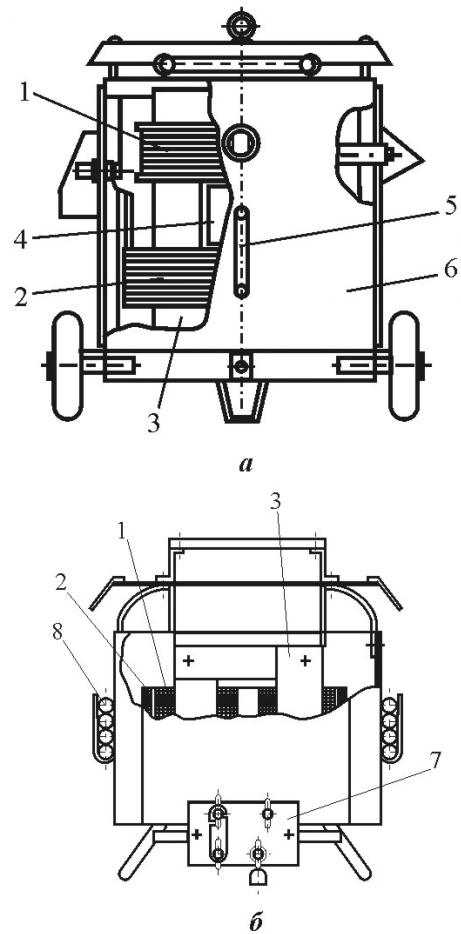


Рис. 2.8. Трансформатори з рухомим шунтом СТШ-500 (а) та з регулюванням намоткою зварювального кабелю ТСМ-250 (б):

- 1 – первинна обмотка;
- 2 – вторинна обмотка;
- 3 – магнітопровід; 4 – магнітний шунт; 5 – рукоятка ходового гвинта; 6 – кожух; 7 – дошка затискачів; 8 – зварювальний кабель

допомогою двох додаткових обмоток при їх відповідному або зустрічному вмиканні з вторинною обмоткою. При відповідному вмиканні струм збільшується, при зустрічному – зменшується. Технічні характеристики трансформаторів наведені у дод.2 (див.табл. 2.1).

### 2.2.3. Трансформатори з дроселями з повітряним зазором

Дроселі вмикаються послідовно з дугою у вторинне коло силового трансформатора. Трансформатор, що працює у комплекті з дроселем, є звичайним знижувальним силовим трансформатором з малим (або нормальним) магнітним розсіюванням та має жорстку зовнішню вольт-амперну характеристику. Хоча сьогодні такі джерела живлення не випускаються, але вони ще використовуються на виробництві, головним чином для автоматичного зварювання під флюсом.

Дросель виконує три функції: по-перше, наявність котушки індуктивності у зварювальному колі підвищує стійкість горіння дуги, по-друге, через падіння напруги на індуктивному опорі дроселя формується спадна характеристика джерела і, по-третє, за допомогою дроселя можна регулювати зварювальний струм.

Принципово існує можливість регулювати струм зварювання через регулювання індуктивного опору дроселя двома способами: ступінчасто – зміною числа витків і плавно – зміною величини повітряного зазору в магнітопроводі дроселя. У практиці використовується другий спосіб.

Дросель з зазором, що регулюється, виконується на власному магнітопроводі або спільно з трансформатором на загальній магнітній системі. Трансформатор (рис.2.9) містить первинну обмотку 1, вторинну обмотку 2, магнітопровід 3, обмотку дроселя 4 та рухомий пакет дроселя 5. Обмотка дроселя  $W_{др}$  (рис.2.9,б) ввімкнута зустрічно з вторинною обмоткою трансформатора  $W_2$ . При навантаженні потік обмотки дроселя  $\Phi_{др}$  у середньому ярмі спрямований назустріч потоку  $\Phi_T$  трансформатора. Індукція та втрати у середньому ярмі при такому з'єднанні знижуються, що дає змогу зменшити його переріз порівняно із нижнім ярмом.

Регулювання струму у трансформаторі здійснюється рухомим пакетом джерела. При збільшенні повітряного зазору  $\delta$  індуктивний опір трансформатора знижується і зварювальний струм зростає. Це пояснюється та-

ким чином. Індуктивний опір дроселя  $X_{др} = \frac{\omega W_{др}^2}{R_{\mu}}$ , де  $R_{\mu}$  – опір кола на шляху магнітного потоку дроселя;  $R_{\mu} = \sum_{k=1}^n \frac{l_k}{S_k \mu_k}$ , де  $l_k$ ,  $S_k$ ,  $\mu_k$  – довжина, площа перерізу та магнітна проникність  $k$ -ї ділянки магнітного кола,  $n$  – кількість ділянок на шляху магнітного потоку. Однією із ділянок є повітряний проміжок  $\delta$ , тому при його збільшенні зростає  $R_{\mu}$ , а  $X_{др}$  – відповідно знижується. Згідно з рівнянням (2.19), при цьому зварювальний струм зростає.

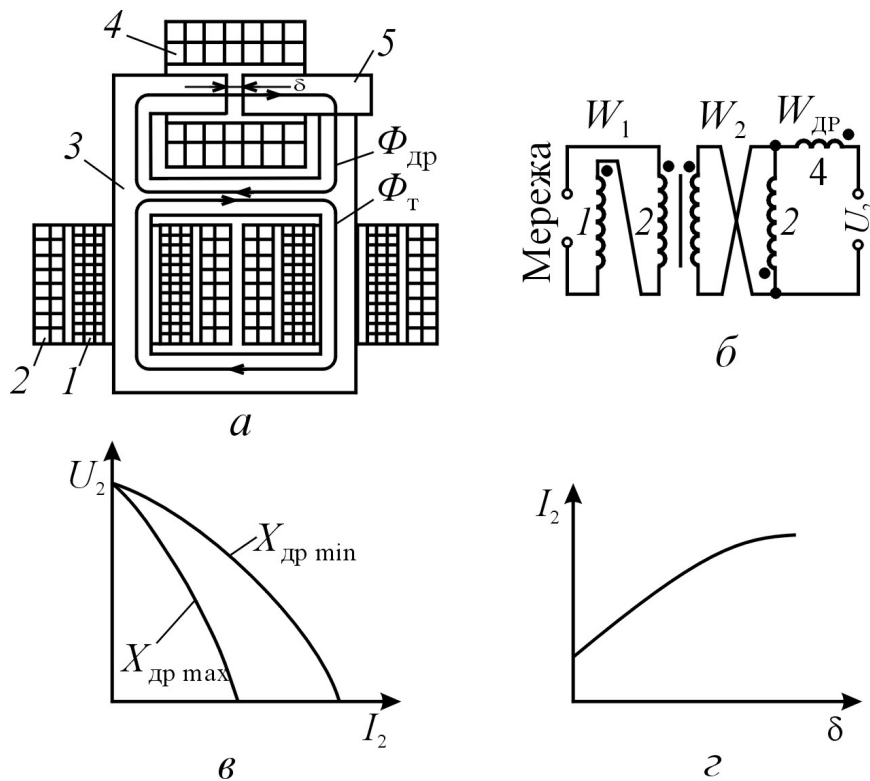


Рис. 2.9. Конструкція (а), електрична схема (б), зовнішні (в) та регульовальна (г) характеристики трансформатора з повітряним зазором

В результаті дії електромагнітних сил рухомий пакет дроселя схильний до вібрації, особливо при малому зазорі  $\delta$ . Вібрація скорочує строк служби механізму пересування пакета, а також порушення ізоляції обмоток. З цього приводу, а також внаслідок того, що такі трансформатори за масою поступаються трансформаторам з пересувними обмотками та рухомими шунтами, випуск їх у всьому світі закінчено.

### 2.3. Трансформатори з магнітним регулюванням

До цієї групи джерел живлення належать трансформатори з нормальним магнітним розсіюванням, які працюють у комплекті з дроселями насичення (ДН), та трансформатори з розвиненим магнітним розсіюванням, що регулюються підмагнічуванням нерухомого шунта (ТРПШ).

Ці джерела живлення мають низку істотних переваг перед розглянутими раніше. Перша перевага – відсутність рухомих частин і, як наслідок, висока надійність та довговічність. Друга – відносно мала інерційність регулювання та простота дистанційного керування. Третя перевага (відноситься до джерел з ДН) – можливість отримання дуже широких меж регулювання струму та прямокутної форми кривої струму.

До недоліків цих пристроїв можна віднести великі витрати активних матеріалів та низькі енергетичні показники.

Дроселі насичення дістають розповсюдження в універсальних джерелах живлення закордонного виробництва для аргонодугового зварювання змінним та постійним струмом. ТРПШ також застосовуються як джерела живлення для аргонодугового зварювання і, окрім того, для автоматичного зварювання під флюсом. Але останнім часом джерела живлення з магнітним регулюванням все більше витісняються сучасними економічними тиристорними системами.

На рис.2.10,*a* наведено схему джерела живлення, що складається з трансформатора Т з нормальним магнітним розсіюванням та з дроселем насичення (ДН) у зварювальному колі. На двох магнітопроводах ДН розташовані робочі обмотки з числами витків  $W_{1p}$  та  $W_{2p}$ ; робочі обмотки увімкнуті послідовно з вторинною обмоткою трансформатора. Обмотка керування джерела з числом витків  $W_k$  охоплює одночасно обидва магнітопроводи. Робочі обмотки увімкнені зустрічно-послідовно для того, щоб ЕРС основної частоти, які наводяться в обмотці керування, взаємно компенсувалися. Але при наявності струму керування в обмотці керування наводиться ЕРС подвійної частоти з амплітудою  $E_{2\omega max} = U_{20 max} \frac{W_k}{W_p}$ , де

$W_p = W_{1p} + W_{2p}$ . Дросель (ДН) працює у режимі примусового намагнічення, тобто гармонічна складова струму, що виникає під дією ЕРС  $E_{2\omega max}$  повністю (або частково) заглушена за рахунок уведення в коло керування дроселя додаткового індуктивного опору (дросель  $L$  на рис.2.10,*a*). В "ідеальних" ДН, що виконані на магнітопроводі з прямокутною кривою

намагнічування, у якого відсутнє розсіювання обмоток та активні втрати, а гармонічна складова струму керування повністю заглушена, крива струму навантаження має прямокутну форму.

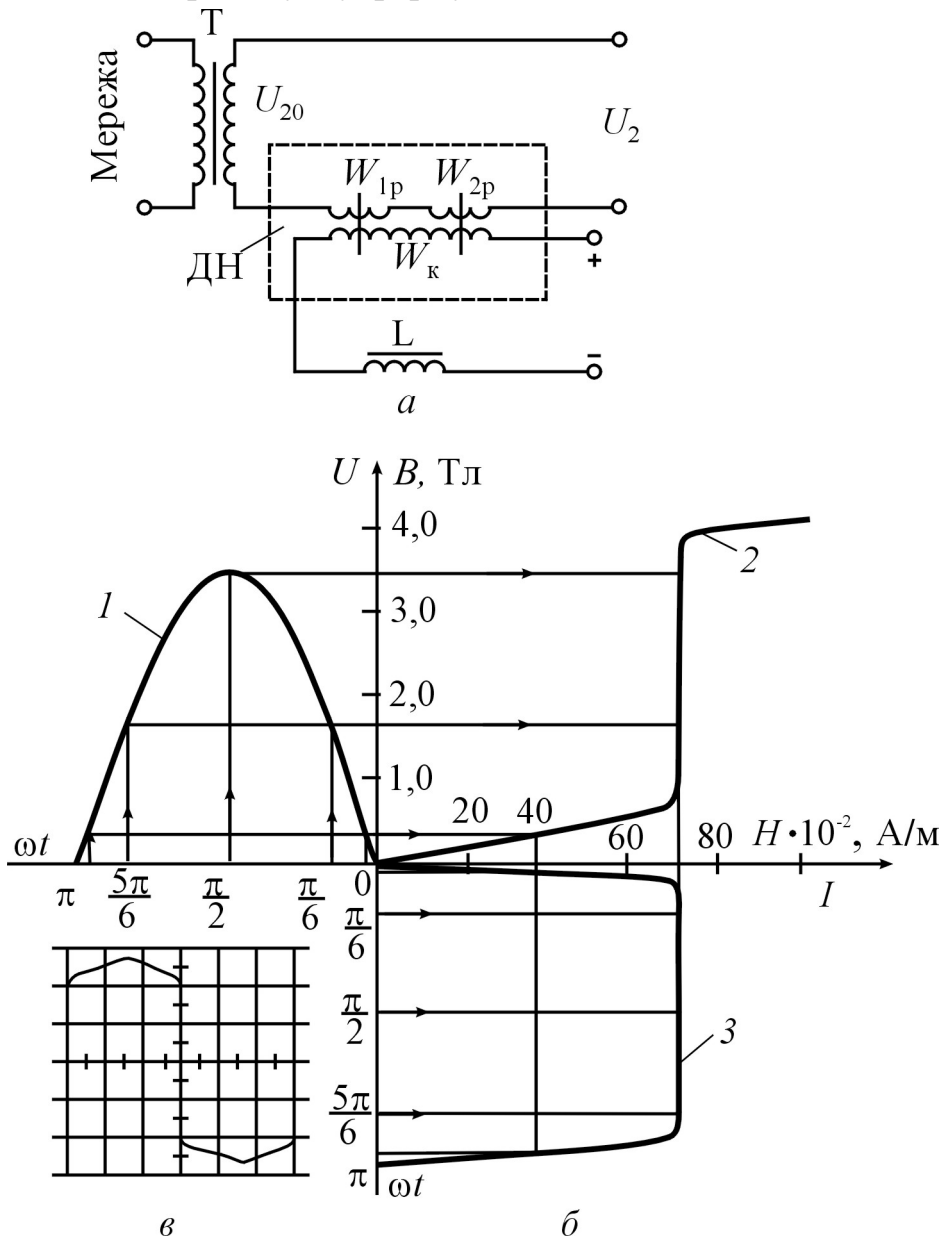


Рис. 2.10. Схема трансформатора з дроселем насичування ДН (а), побудова кривої струму в робочому колі ДН (б) та осцилограма струму навантаження (в)

В джерелах живлення з реальними ДН, що працюють у режимі примусового намагнічування, отримання сприятливої для зварювання прямокутної форми кривої струму пов'язано з істотними додатковими витратами активних матеріалів на виготовлення дроселя  $L$ . Тому такі джерела знаходять обмежене застосування – тільки для спеціальних цілей.

Спрощену побудову кривої струму (для режиму короткого замикання) у колі з реальним ДН, що працює у режимі примусового намагнічування, наведено на рис.2.10,*б*.

Якщо до зварювального кола докласти синусоїдальну напругу (крива 1), то, зв'язавши її з кривою намагнічування (крива 2), можна графічним способом побудувати криву струму 3 у робочому колі ДН. Криві струму в обидва півперіоди повністю симетричні тому, що кожного півперіоду магнітний стан магнітопроводів взаємно змінюється. Підтвердженням цьому служить осцилограма струму навантаження (рис.2.10,*в*).

Джерела живлення з прямокутною формою кривої струму доцільні для застосування в установках для аргонодугового зварювання, де вимоги до форми струму вельми жорсткі. Такі джерела живлення випускаються в Україні, країнах СНД та далекого зарубіжжя і розглянуті в гл.6.

Для ручного та автоматичного зварювання плавким електродом трансформатори з дроселями насичення промислового значення не набули. Це пов'язано, поряд зі збільшеними витратами матеріалів, ще й з великою інерційністю зміни зварювального струму.

Трансформатори, що регулюються підмагнічуванням шунта, ще недавно були дуже розповсюдженим типом джерела живлення для автоматичного зварювання під флюсом. Магнітна система трансформатора (рис.2.11,*а,б*) складається з двох замкнених магнітопроводів, один з яких перпендикулярно вставлений у другий. Внутрішній магнітопровід *б* являє собою магнітний шунт. Силкові обмотки трансформатора розташовані симетрично на обох стрижнях зовнішнього, головного, магнітопроводу 3. Трансформатор виконаний з частковим рознесенням силових обмоток. Вторинна обмотка складається з основної обмотки з числом витків  $W_{2\alpha}$  (катушки 4,5) та додаткової обмотки з числом витків  $W_{2\beta}$  (катушки 1), причому додаткова обмотка розміщена з одного боку шунта разом із первинною обмоткою  $W_1$  (катушки 2). Катушки первинної та вторинної обмоток на двох стрижнях з'єднані поміж собою паралельно.

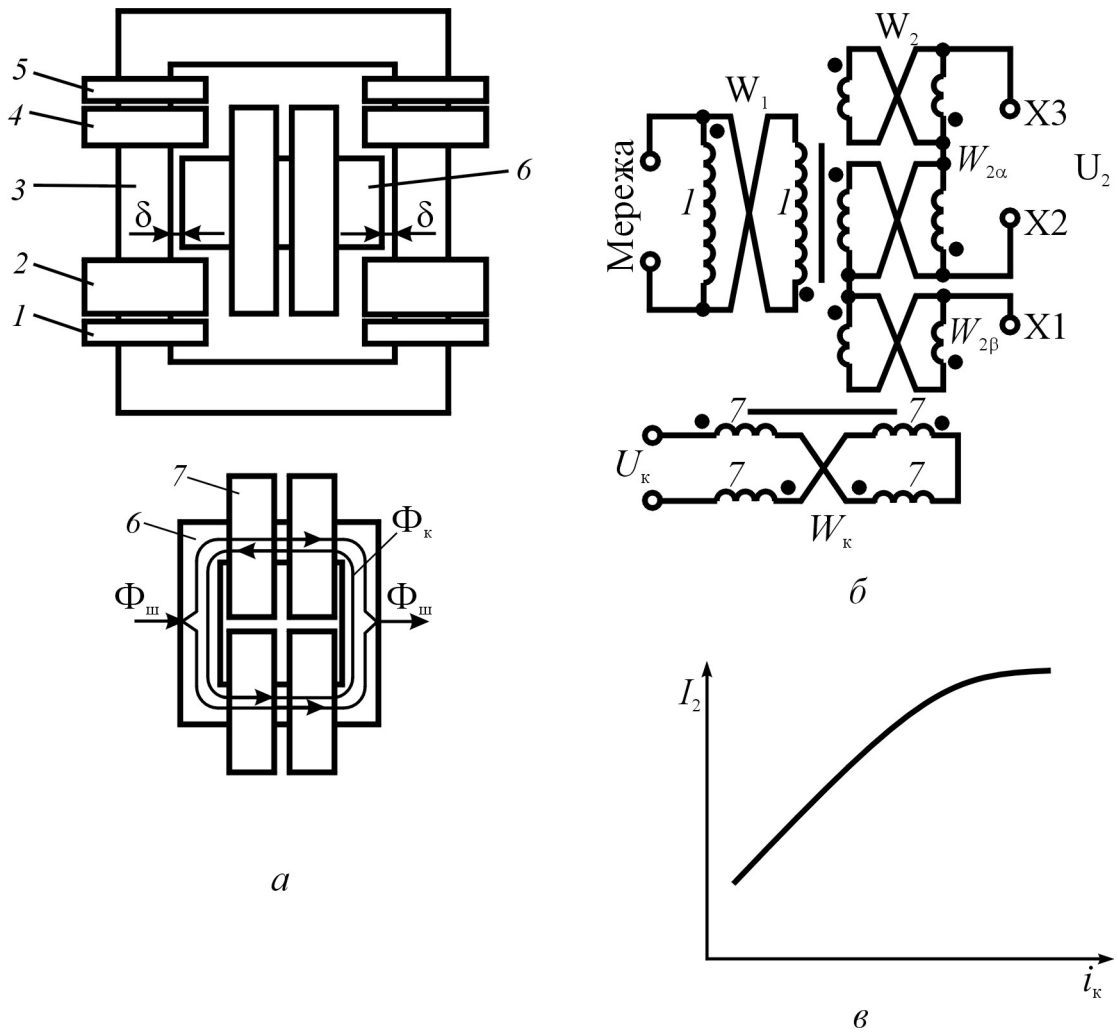


Рис. 2.11. Конструкція (а), схема з'єднання обмоток (б) та регульовальна характеристика (в) трансформатора з підмагніченим шунтом

Обмотка керування виконана секціонованою: чотири котушки 7 обмотки керування  $W_k$  увімкнуті зустрічно-послідовно відносно ЕРС основної частоти, що наводиться в них потоком шунта  $\Phi_{ш}$ . Потік  $\Phi_k$ , який створюється постійним струмом в обмотках керування, замикається крізь шунт.

Між головним магнітопроводом та шунтом є повітряний зазор  $\delta$ .

Трансформатор забезпечує два способи регулювання струму: ступінчасто – шляхом перемикання витків вторинної обмотки, плавно – зміною струму керування в обмотці керування шунта.

В діапазоні малих струмів навантаження підключається до затискачів Х2 та Х3, а в діапазоні великих струмів – до затискачів Х1; Х2. При переході з діапазону малих струмів до діапазону великих струмів частина витків обмотки  $W_{2\alpha}$  вимикається (котушки 5) і вмикається стільки ж витків обмотки  $W_{2\beta}$  (котушки 1).

У межах кожного діапазону зварювальний струм плавно регулюється через зміну індуктивного опору трансформатора. Наприклад, при збільшенні струму керування  $i_k$  (див.рис.2.11,в) в обмотці шунта зростає постійний потік підмагнічування  $\Phi_k$ , зменшуються потоки розсіювання  $\Phi_{ш}$ , та індуктивний опір трансформатора  $X_T$  і, згідно з (2.19), – зварювальний струм зростає.

До середини 80-х років в СРСР за схемою (рис.2.11,б) випускалися й ще перебувають у промисловій експлуатації у країнах СНД трансформатори для автоматичного зварювання серії ТДФ: ТДФ-1001, ТДФ-1601 (рис.2.12,а), ТДФ-2001. Трансформатори виготовлені як стаціонарні джерела живлення і розраховані на тривалий режим роботи з примусовим повітряним охолодженням. Трансформатори складаються з силового трансформатора  $T$  (рис.2.12,б) з магнітною комутацією, навантаженням якого є зварювальна дуга, стабілізованого регулятора струму СРС та блока допоміжної і захисної апаратури БДЗА.

До складу регулятора СРС входять: блок тиристорного регулятора струму (ТРС), блок фазового керування тиристорами (БФК) та керуючий блок (БК). Сигнал керування, що задається резистором, з виходу БК подається до БФК. Тут формуються імпульси напруги, синхронізовані з частотою напруги мережі, які відкривають тиристори блока ТРС. Тиристорний регулятор струму забезпечує плавне регулювання зварювального струму та стабілізацію робочої напруги при відхиленнях напруги мережі в діапазоні  $(-10\dots+5)\% U_{ном}$ .

Технічні характеристики трансформаторів серії ТДФ наведені у дод.2 (див.табл.2.1).



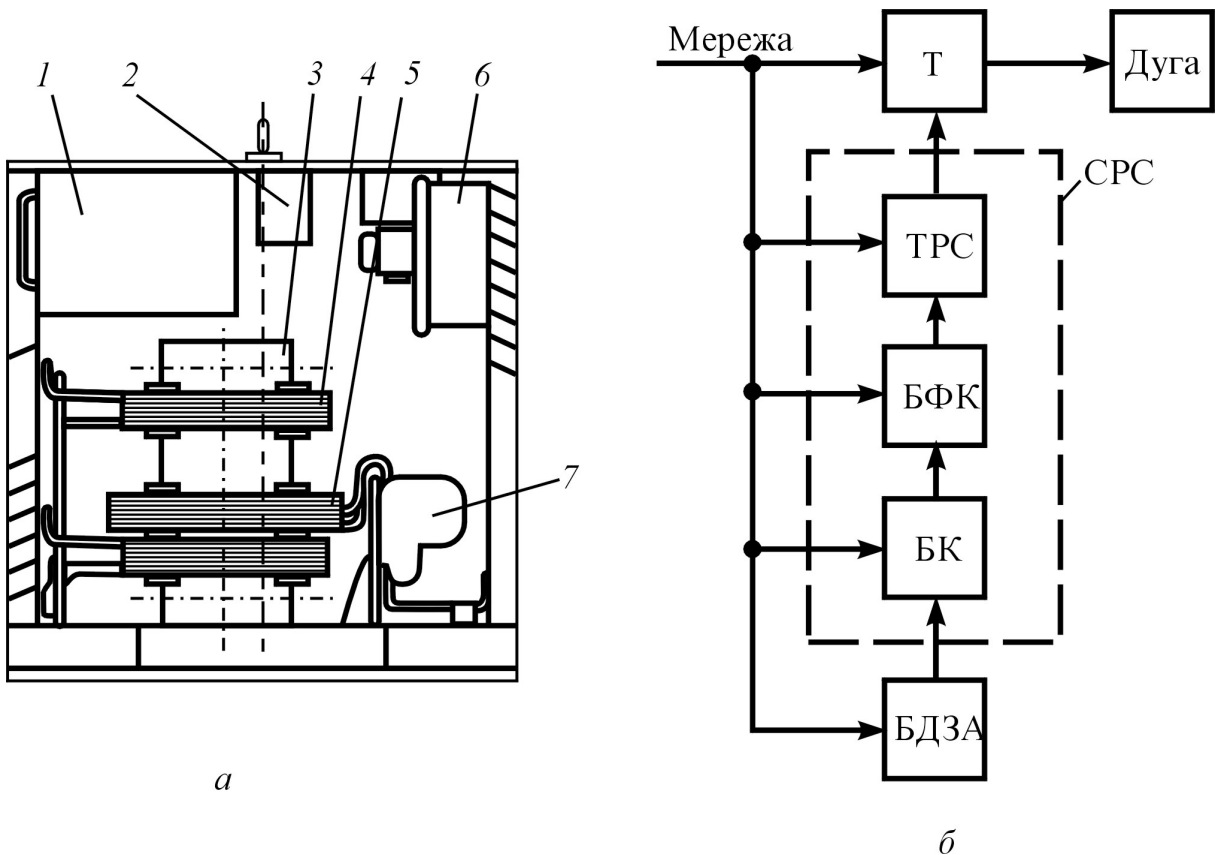


Рис. 2.12. Конструкція (а) та структурна схема (б) трансформатора ТДФ-1601: 1 – блок керування; 2 – блок вентилів; 3 – магнітопровід; 4,5 – первинна та вторинна обмотки; 6 – вентилятор; 7 – контактор

У зв'язку з удосконаленням силової напівпровідникової техніки магнітні регулятори (дроселі насичення та керовані шунти сьогодні практично повністю витіснені тиристорними регуляторами, які дають змогу найбільш просто та економічно вирішувати завдання стабілізації, програмування та дистанційного регулювання режиму зварювання, формування потрібних зовнішніх характеристик, обмеження постійної складової зварювального струму.

## 2.4. Тиристорні трансформатори

Тиристорні трансформатори (ТТ) – це група джерел живлення зварювальної дуги, в основу якої покладений спосіб фазового регулювання струму. Головною частиною ТТ є тиристорний фазорегулятор (ФР), що

працює у комплекті з силовим трансформатором. Фазорегулятор складається з двох зустрічно-паралельно з'єднаних тиристорів та системи керування фазою їх відкриття (СФК).

Спосіб фазового регулювання змінного струму ґрунтується на перетворенні синусоїдального струму у знаковмінні імпульси, амплітуда та тривалість яких визначається кутом (фазою) відкриття тиристорів. Незважаючи на переривистий характер подавання зварювального струму, ТТ забезпечують (за допомогою спеціальних пристроїв) достатньо високу стабільність горіння дуги та дають змогу реалізувати такі переваги фазового регулювання струму:

- знизити масу та спростити конструкцію силового трансформатора і всього джерела в цілому;

- сформувати ЗХДЖ потрібного вигляду;

- стабілізувати режими зварювання при збуреннях різного характеру;

- керувати постійною складовою зварювального струму;

- автоматизувати, програмувати та модулювати режими зварювання;

- автоматично знижувати вихідну напругу джерела при холостому ході.

Відмітною ознакою ТТ є наявність силового трансформатора з розвиненим електромагнітним розсіюванням або додаткового дроселя у зварювальному колі.

Силові схеми ТТ поділяють за двома основними ознаками: способом забезпечення безперервності процесу зварювання та місцем встановлення тиристорного фазорегулятора – у первинному або вторинному колі.

За першою ознакою ТТ поділяють на дві групи. В трансформаторах однієї групи зварювальний струм  $i_2$  (рис.2.13,**a**) переривистий. Тривалість протікання струму  $\theta$  визначається кутом відкриття силових тиристорів  $\varphi$ , котрий тут є також кутом зсуву між струмом  $i_2$  та напругою холостого ходу трансформатора  $U_{20}$ . У більшості ТТ фазовий кут  $\varphi$  змінюється у межах 60...120 ел. град.

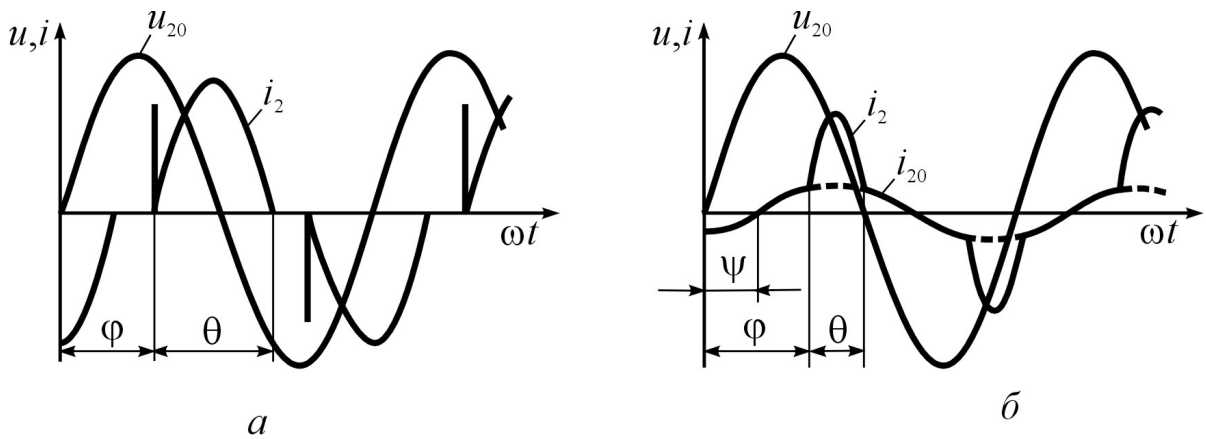


Рис. 2.13. Діаграми напруг і струмів тиристорного трансформатора з імпульсною стабілізацією (а) та з колом підживлення (б)

Для надійного повторного збудження застосовано імпульсну стабілізацію горіння дуги. У момент  $\varphi$  закінчення безструмової паузи до дуги прикладається стабілізуючий імпульс струму. Амплітуда струму стабілізуючого імпульсу дорівнює 60...80 А, тривалість – 20...100 мс. Тиристорний фазорегулятор поєднує функції керування значенням струму та комутуючого елемента імпульсного стабілізатора горіння дуги.

В трансформаторах іншої групи стабільність процесу зварювання забезпечена безперервністю струму, що протікає через дугу (рис.2.13,б). Для заповнення безструмових пауз в інтервалі непровідності тиристорів застосоване спеціальне коло, що називається колом підживлення дуги, через яке проходить мінімально потрібний для стійкого процесу зварювання струм (струм підживлення  $i_{20}$ ). Зсув фази між струмом  $i_{20}$  та напругою  $U_{20}$  у цьому випадку визначається кутом  $\psi$ , який залежить від співвідношення напруги дуги та кола підживлення:

$$\cos \psi = \frac{\pi U_{\text{д}}}{2U'_{20\text{max}}}, \quad (2.21)$$

де  $U'_{20\text{max}}$  – амплітудне значення напруги кола підживлення.

Для забезпечення стабільного горіння дуги достатня сила струму підживлення залежно від способу зварювання складає: 10...15 А – для аргонодугового зварювання неплавким електродом алюмінієвих сплавів при наявності імпульсного стабілізатора дуги та напрузі холостого ходу близько 70 В; 10...15 А – для ручного дугового зварювання покритими електродами; 20...30 А – для автоматичного зварювання під флюсом. Мале значення струму підживлення дає змогу використовувати для підвищення

стабільності горіння дуги методи, які традиційно вважалися не вигідними за енергетичними та масогабаритними показниками: збільшення напруги холостого ходу джерела, формування прямокутної хвилі струму підживлення тощо.

У промислових зварювальних установках ширшого застосування дістали ТТ з перервистим регулюванням струму та імпульсною стабілізацією. Адаже вони потребують менших витрат активних матеріалів, а відносно мала швидкість наростання струму підживлення при зміні полярності в трансформаторах з колом підживлення погіршує технологічні властивості джерел.

Розміщення тиристорного фазорегулятора у первинному або вторинному колі трансформатора істотно впливає на конструкцію ТТ. В усіх випадках, коли немає потреби керувати значенням постійної складової зварювального струму, тиристири вмикають у відносно слабкострумове коло первинної обмотки трансформатора. Крім зниження габаритів ФР і втрат у тиристорах, це дає змогу зменшити або усунути втрати холостого ходу трансформатора та забезпечує оперативне відключення його від мережі. Але в трансформаторах з колом підживлення при цьому звужується діапазон регулювання зварювального струму, підвищуються вимоги до симетрії імпульсів керування тиристорами, до надійності та електричної міцності кіл керування.

Розглянемо типові силові схеми ТТ з перервистим живленням дуги та з колом підживлення.

У схемах на рис.2.14 коло підживлення відсутнє і струм дуги має переривистий характер. В тиристорних трансформаторах, побудованих за схемою на рис.2.14,*a*, паралельно первинній обмотці силового трансформатора ввімкнуте коло, в яке входять конденсатори та додаткова імпульсна обмотка трансформатора, причому додаткова обмотка розміщена у зоні вторинної обмотки силового трансформатора (наприклад, намотана поверх неї) для забезпечення достатнього магнітного зв'язку між цими двома обмотками. При відкритті будь-якого з тиристорів конденсатор заряджається до поточного значення напруги мережі. Зарядний струм конденсатора проходить через додаткову обмотку, трансформується у вторинне коло силового трансформатора і викликає у дуговому проміжку імпульс напруги, достатній для повторного збудження дуги. Після закінчення часу

провідності тиристора дуга погасає, конденсатор розряджається на первинну обмотку силового трансформатора.

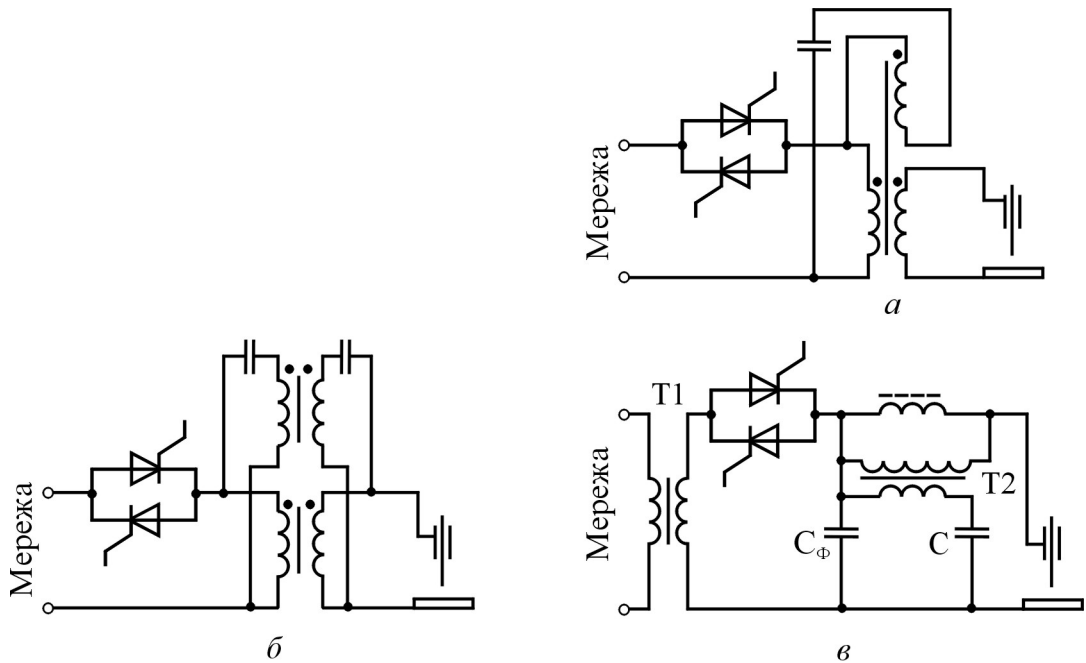


Рис. 2.14. Схеми трансформаторів з імпульсною стабілізацією

У наступний півперіод напруги мережі вмикається другий тиристор ФР, конденсатор заряджається у зворотному напрямі, його зарядний струм викликає стабілізуючий імпульс у міжелектродному проміжку та повторне збудження дуги.

Іншим варіантом побудови ТТ з імпульсною стабілізацією є схема з застосуванням окремого імпульсного трансформатора (рис.2.14,б). Вторинна обмотка цього трансформатора ввімкнута через роздільний конденсатор паралельно вторинній обмотці силового трансформатора.

Принцип імпульсної стабілізації дуги переривистого змінного струму реалізується також при встановленні тиристорного фазорегулятора у вторинне коло зварювального трансформатора (рис.2.14,в). Генератор високовольних імпульсів, що забезпечує первісне запалювання та повторне збудження дуги, працює наступним чином. У момент відкриття тиристора струм конденсатора С наводить у вторинній обмотці високовольного трансформатора Т2 імпульс високої напруги, достатній для пробою

міжелектродного проміжку. Конденсатор  $C_{\phi}$  захищає джерело живлення від перенапруг.

На рис.2.15,*a* наведені типові зовнішні характеристики ТТ з імпульсною стабілізацією.

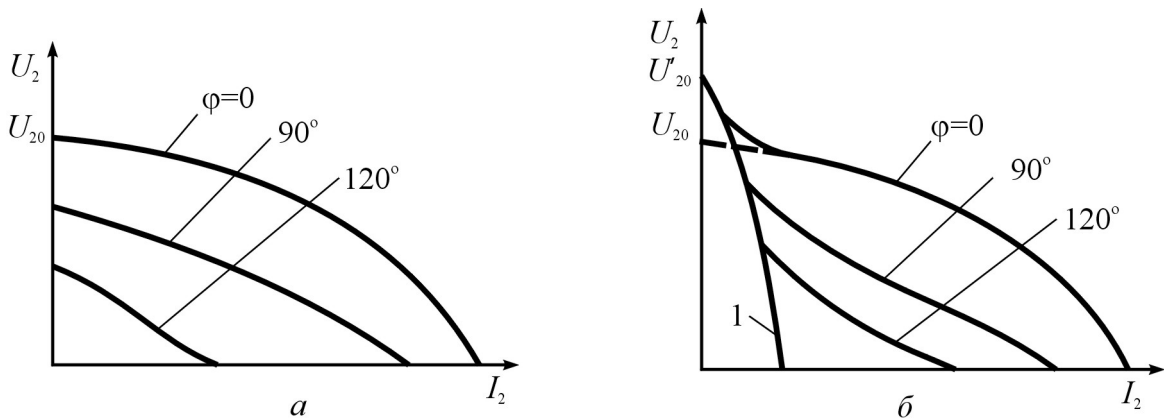


Рис. 2.15. Зовнішні вольт-амперні характеристики трансформаторів з імпульсною стабілізацією (*a*) та з колом підживлення (*б*)

Трансформатори з колом підживлення також виконуються за різними силовими схемами. На рис.2.16 наведені спрощені схеми ТТ з колом підживлення і тиристорами у зварювальному колі, а на рис.2.17 – з підживленням та фазорегулятором у колі первинної обмотки силового трансформатора. У схемі на рис.2.16,*a* тиристри шунтовані дроселем, індуктивність якого  $L_2$  на порядок вище за індуктивність розсіювання  $L_1$  силового трансформатора Т1. Схеми ТТ (рис.2.16,*б,в*) дозволяють підвищити напругу холостого ходу джерела без помітного збільшення його встановленої потужності. У коло підживлення введена додаткова обмотка силового трансформатора Т1. В схемі на рис.2.16,*б* додаткова обмотка ввімкнута послідовно і відповідно з основною вторинною обмоткою Т1, а в схемі на рис.2.16,*в* додаткова обмотка та дросель підживлення ввімкнуті паралельно навантаженню джерела.

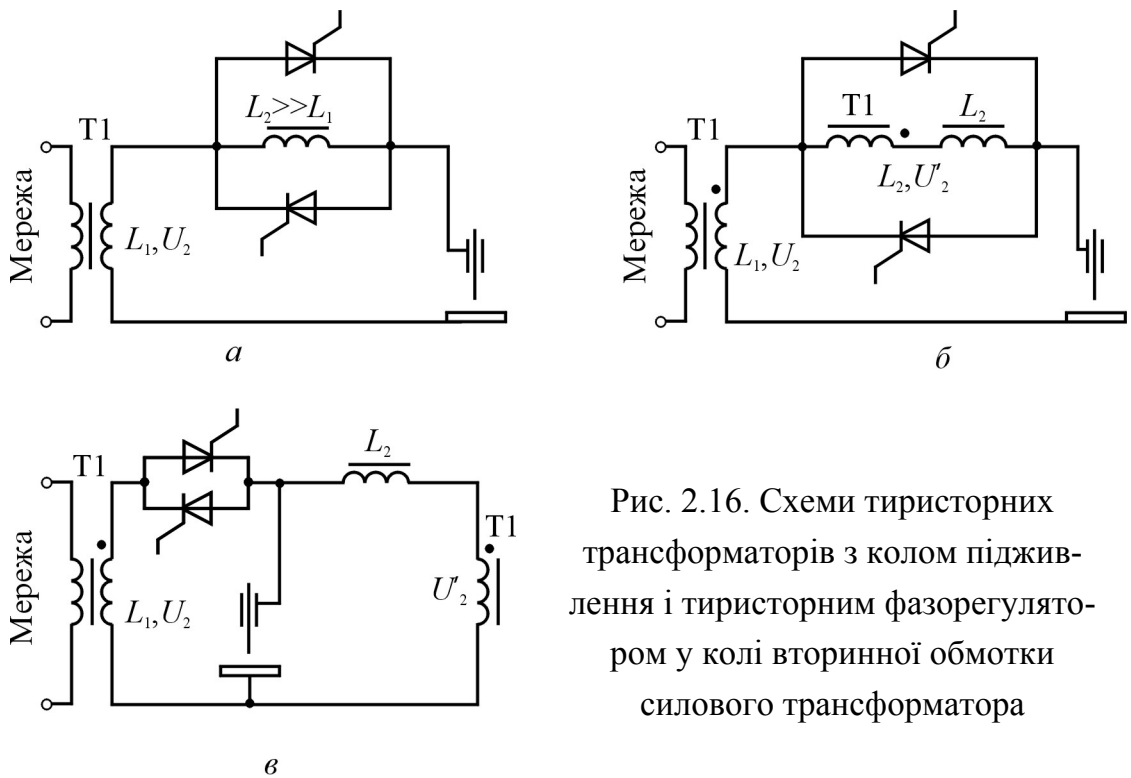


Рис. 2.16. Схеми тиристорних трансформаторів з колом підживлення і тиристорним фазорегулятором у колі вторинної обмотки силового трансформатора

Напруга кола паралельного підживлення  $U'_{20}$  більша за напругу  $U_{20}$ , що виключає можливість відкриття тиристорів у режимі холостого ходу трансформатора; під час зварювання основне та підживлююче кола розв'язані падінням напруги в дузі.

Безпосереднє шунтування тиристорів дроселем у трансформаторах з колом підживлення, якщо тиристорний фазорегулятор встановлений у колі первинної обмотки силового трансформатора, приводить до зниження напруги на первинній обмотці трансформатора в інтервали непровідності тиристорів. Наслідком цього є погіршення стійкості горіння дуги, тому для усунення цього недоліку використовують схему з допоміжним трансформатором (рис.2.17,*а*) або автотрансформаторну схему з дроселем (рис.2.17,*б*).

Типові зовнішні вольт-амперні характеристики ТТ з колом підживлення наведено на рис.2.15,*б*. Крива 1 є зовнішньою характеристикою кола підживлення.

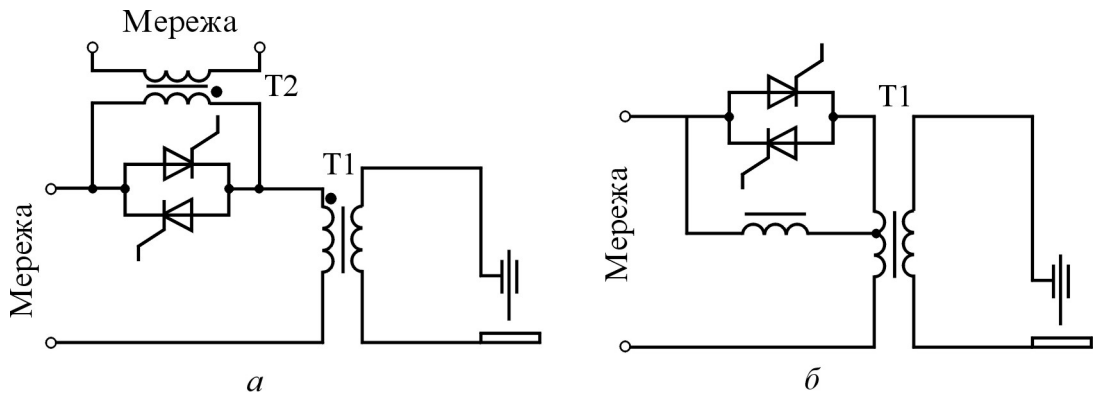


Рис. 2.17. Схеми тиристорних трансформаторів з колом підживлення і тиристорним фазорегулятором у колі первинної обмотки силового трансформатора

Для тиристорних трансформаторів характерні деякі особливості технологічних властивостей, пов'язані з подачею у зварювальне коло знакозмінних імпульсів струму.

Так, підвищення густини струму в електроді при зварюванні від ТТ та більш різке зростання струму сприяють дрібнокраплинному перенесенню металу, при цьому зменшується вигоряння легувальних домішок та перегрівання виробу.

При зварюванні знакозмінними імпульсами у 1,5...2,0 рази скорочується зона термічного впливу, зменшується зернистість, підвищуються міцність та пластичність металу шва.

Але більш крутий фронт зростання півхвилі струму негативно впливає на стійкість обмазки покритого електрода та зносостійкість вольфрамового електрода; для зварювання слід використовувати електроди більшого діаметра.

При автоматичному зварюванні під флюсом на стандартних режимах через підвищену довжину дуги має місце тенденція до пороутворення у швах, що примушує виконувати трансформатори з розбиванням повного діапазону регулювання струму на ступені, рекомендувати зварювання на знижених на 10...15 % значеннях діючої напруги дуги. Для створення діапазону малих струмів застосовують, наприклад, реакторну обмотку, що встановлена у вікні трансформатора у площині, паралельній його стрижням. Реакторна обмотка вмикається послідовно та відповідно з первинною обмоткою або послідовно та зустрічно із вторинною обмоткою трансфор-



матора. Зворотнє вмикання реакторної обмотки викликає збільшення струму короткого замикання і тому недоцільно.

З тиристорних трансформаторів, що нині випускаються серійно у країнах СНД, можна відзначити ТДЭ-101, ТДЭ-251, ТДЭ-402 (з пристроєм обмеження напруги холостого ходу) – для ручного дугового зварювання покритими електродами та ТДФЖ-1002 і ТДФЖ-2002 – для автоматичного зварювання під флюсом. Технічні характеристики цих джерел живлення наведені у дод.2 (див.табл.2.1).

## 2.5. Система фазового керування тиристорних трансформаторів

Система фазового керування (СФК) ТТ здійснює фазове регулювання миттєвого, діючого та середнього значень напруги навантаження, а також забезпечує формування потрібної форми зовнішньої вольт-амперної характеристики джерела. Блок фазового керування (БФК) складається з двох пристроїв: фазозсувного (ФП) і вихідного (ВП). Фазозсувний пристрій здійснює прив'язку СФК до мережі змінного струму, від якої живиться ТТ, та забезпечує формування керуючих імпульсів і зміну їх фази відносно напруги мережі. Для керування двома протифазними тиристорами фазорегулятора (ФР) звичайно використовується один ФП. Імпульси з ФП до силових тиристорів ФР надходять не безпосередньо, а через вихідний підсилювальний пристрій, який остаточно формує імпульси з параметрами, що забезпечують гарантоване вмикання будь-якого тиристора даного типу у певній силовій схемі ТТ.

В цілому СФК повинна бути надійною, перешкодостійкою, мати швидкодію, забезпечувати потрібний діапазон зміни фази імпульсів, їх симетрію в обидва півперіоди, необхідні їх параметри – амплітуду й тривалість.

Розглянемо роботу як окремих типових блоків СФК, так і в цілому систему автоматичного регулювання в тиристорних трансформаторах, до складу якої входить БФК.

*Фазозсувний пристрій.* Принцип дії ФП (рис.2.18,*a*) ґрунтується на заряді конденсатора СЗ до певного рівня з наступним його розрядом на первинну обмотку імпульсного трансформатора Т1. Зарядне коло живить-

ся трапецеїдальною випрямленою напругою, що знімається зі стабілітрона VD5, увімкненого на виході випрямного мосту VD1...VD4. На вході випрямного мосту встановлений фільтр (C1, C2, R1, R2), який зменшує вплив викривлень напруги мережі на роботу ФП.

Конденсатор C3 заряджається колекторним струмом транзистора VT2, який увімкнений за схемою стабілізатора струму. Струм колектора  $i_k$  та напруга  $U_{C3}$  на конденсаторі дорівнюють:

$$i_k = \frac{U_{BX}}{R_4}; \quad (2.22)$$

$$U_{C3} = \frac{1}{C_3} \int i_k dt = \frac{U_{BX}}{R_4 C_3} t, \quad (2.23)$$

де  $U_{BX}$  – сигнал керування на вході ФП.

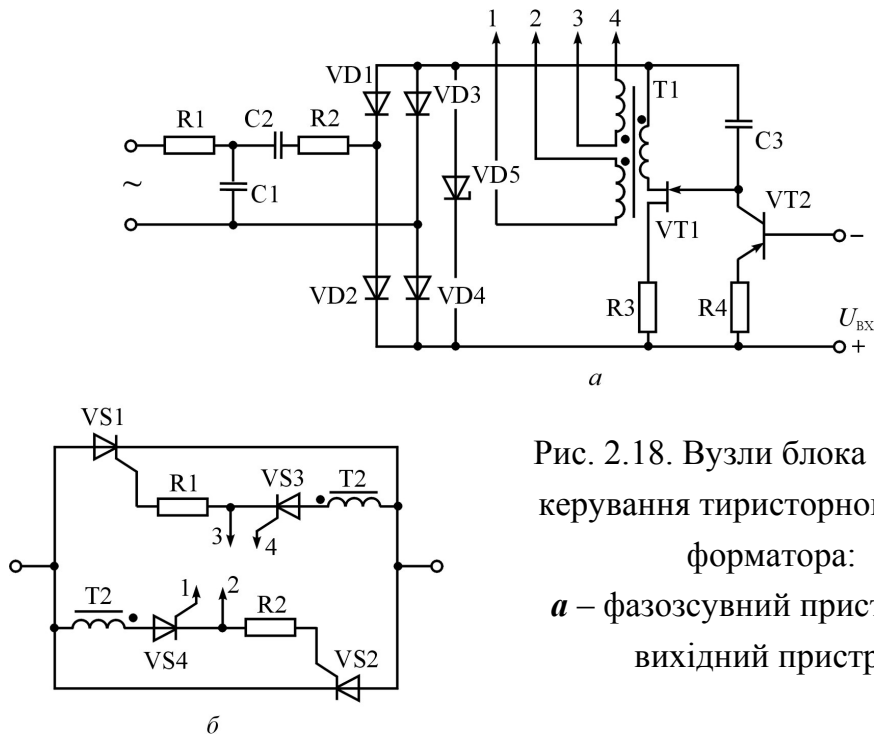


Рис. 2.18. Вузли блока фазового керування тиристорного трансформатора:  
**а** – фазозсувний пристрій; **б** – вихідний пристрій

Заряд конденсатора C3 здійснюється до того часу, поки напруга на ньому не досягне значення  $U_{C3} = K_{\Pi} U_1$ , де  $U_1$  – напруга живлення схеми (напруга стабілізації стабілітрона VD5);  $K_{\Pi} = 0,65 - 0,9$  – коефіцієнт перемикання одноперехідного транзистора VT1. Після цього транзистор VT1 відкривається і конденсатор C3 розряджається на первинну обмотку імпульсного трансформатора T1. Імпульси, що утворюються, тривалістю

до 10 мкс поступають через вторинні обмотки трансформатора Т1 до вихідного пристрою (затискачі 1...4).

Після розряду конденсатора С3 транзистор VT1 запирається і конденсатор С3 знову починає заряджатися. Такий процес утворення пилкоподібної напруги закінчується в кінці півперіоду живильної напруги при спаданні трапецеїдальної напруги стабілітрона VD5 до нуля та відновлюється на початку наступного півперіоду. При нульовому значенні живильної напруги конденсатор С3 повністю розряджається. Завдяки цьому забезпечується синхронізація роботи ФП з напругою живильної мережі та незалежність моменту початку його роботи у кожному наступному півперіоді від закінчення її у попередньому півперіоді.

*Вихідний пристрій.* Для формування та підсилення імпульсів керування силовими тиристорами часто використовують напругу допоміжного трансформатора Т2 (рис.2.18,б). Малопотужний тиристор VS3 (VS4) є комутатором у колі, до якого входять обмотка трансформатора Т2, струмообмежувальний резистор R1 (R2) та керуючий перехід силового тиристора VS1 (VS2). Тиристри VS1 та VS2 утворюють фазорегулятор ТТ. Тиристри VS3 та VS4 увімкнуті у протифазні кола, і тому, незважаючи на те, що імпульси на їх вмикання із ФП потраплять в обидва півперіоди, кожен з них відкривається тільки у півперіод, коли анодна напруга на ньому позитивна. Кут вмикання тиристорів VS3 (VS4) є характеристикою керування ФП і залежить від значення  $U_{вх}$  :

$$\varphi = \omega t = \frac{2\pi f R_4 C_3 K_{\Pi} U_1}{U_{вх}}. \quad (2.24)$$

Цей кут одночасно визначає зсув фаз між напругою холостого ходу  $U_{20}$  та струмом  $i_2$  ТТ (див. рис.2.13), а також величину індуктивного опору трансформатора  $X_T = tg\varphi \cdot \sum R$ , де  $\sum R$  – сумарний активний опір зварювального кола.

Роботу БФК можна проілюструвати діаграмою напруг (рис.2.19). Трапецеїдальна напруга живлення ФП  $U_1$  формується з синусоїдальної випрямленої напруги. Пілкоподібна напруга  $U_2$  характеризує заряд конденсатора СЗ.

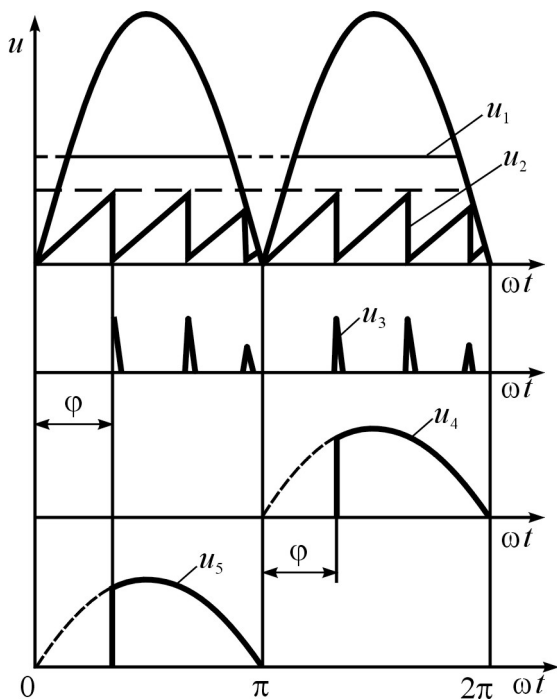


Рис. 2.19. Діаграма напруг на елементах БФК

Створені при розряді конденсатора імпульси напруги  $U_3$  на вторинних обмотках трансформатора ФП керують моментами спрацювання (кут  $\varphi$ ) малопотужних тиристорів ВП VS3 та VS4. Імпульси напруги  $U_4$  та  $U_5$ , що керуються протифазними силовими тиристорами ФР, надходять з обмоток допоміжного трансформатора Т2 через тиристири VS3 та VS4. Тривалість імпульсів керування дорівнює  $\pi - \varphi$ .

Якщо кут вмикання тиристорів в СФК задавати вручну та не змінювати у процесі навантаження, то ТТ буде працювати на природних зовнішніх вольт-амперних характеристиках (див.

рис.2.15). Але часто виникає потреба у формуванні іншої форми ЗХДЖ. Наприклад, при роботі ТТ у комплекті з автоматичною голівкою для зварювання під флюсом з постійною швидкістю подачі електродного дроту (принцип саморегулювання дуги) трансформатор повинен мати жорстку (пологоспадну) зовнішню характеристику. Оптимальна крутість характеристики складає  $(5 \dots 10) \cdot 10^{-3}$  В/А.

В установках для аргонодугового зварювання алюмінієвих сплавів вольфрамовим електродом для стабілізації зварювального струму потрібні вертикальні, або "штикові", зовнішні характеристики з крутістю 2...5 В/А. В трансформаторах для ручного дугового зварювання покритими електродами нахил ЗХДЖ складає 0,15...0,30 В/А.

Для формування заданих зовнішніх характеристик, а також для стабілізації режиму зварювання в ТТ застосовують системи автоматичного регулювання (САР) з використанням як регулюючого органа тиристорного

фазорегулятора. В трансформаторах з жорсткою ВАХ регулюючий параметр – напруга дуги, а зварювальний струм є головною збурюючою дією системи автоматичного регулювання; в трансформаторах зі спадною ВАХ головне збурення системи (коливання довжини дуги) безпосередньо пов'язане з напругою в дузі, а регулюючий параметр – зварювальний струм. До додаткових збурень, що впливають на роботу САР, належать коливання напруги мережі та зміна параметрів самої системи внаслідок, наприклад, нагріву її елементів.

В ТТ використовують здебільшого замкнені САР, тобто системи, які реагують на зміну самого параметра, що регулюється. Структурну схему ТТ з такою САР наведено на рис.2.20. Силовий трансформатор СТ з фазорегулятором ФР у первинному (або вторинному) колі підключені до навантаження – зварювальної дуги.

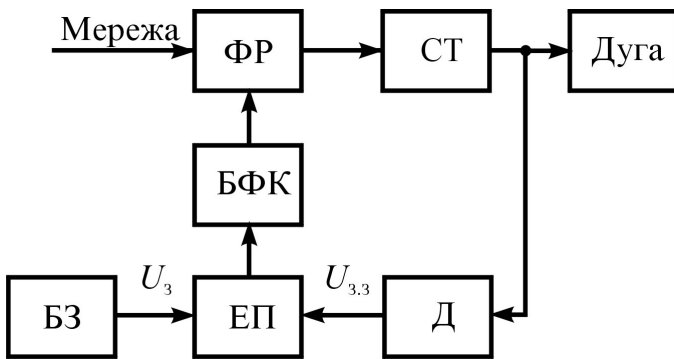


Рис. 2.20. Структурна схема тиристорного трансформатора

Фазорегулятор з'єднаний з блоком імпульсно-фазового керування (БФК). До входу БФК з елемента порівняння ЕП подається різниця сигналів  $U_3 - U_{3.3}$  з блока завдання БЗ та датчика зворотного зв'язку Д. Елементом порівняння є транзистор або операційний

підсилювач, який входить до складу БФК. Шляхом збільшення коефіцієнта підсилення системи (відношення напруги на виході ФР до напруги на вході БФК) можна одержати практично горизонтальну або вертикальну ЗХДЖ, причому в першому випадку напруга в дузі, а в другому зварювальний струм не залежать як від головних, так і від додаткових збурень. Для формування зовнішніх характеристик проміжної крутості використовують спеціальні засоби для порівняння сигналів  $U_3$  та  $U_{3.3}$ .

Блок завдання (БЗ) призначений для формування сигналу параметра, що регулюється. Напруга на виході БЗ може бути постійною, змінюватися

під дією головних або додаткових збурень, а також змінюватися з часом за певним законом або програмою. В останньому випадку БЗ є програматором зварювального режиму. У деяких зварювальних установках функції програматора виконує ЕОМ, що керує декількома трансформаторами.

Найважливішою ланкою САР є датчик сигналу зворотного зв'язку за параметром, що регулюється.

Датчиком сигналу зворотного зв'язку за зварювальним струмом у ТТ зі спадними ВАХ часто служить трансформатор струму, первинною обмоткою якого є зварювальний кабель. Трансформатор струму виконується на стрижневому або тороїдальному магнітопроводі.

ТТ, в яких передбачено регулювання постійної складової зварювального струму, мають два датчики струму: у колах тиристорів прямої та зворотної полярності.

Датчики напруги, що використовують для формування жорсткої ВАХ трансформатора, виконані у вигляді резисторних дільників, підключених до вихідних клем ТТ. Якщо довжина зварювального кабелю дуже велика, то має місце різке падіння напруги у зварювальному колі, і точність підтримання заданої напруги в дузі знижується. У цих випадках доцільно брати сигнал зворотного зв'язку безпосередньо зі зварювальної голівки та виробу.

## **2.6. Трансформатори для живлення трифазної дуги**

Висока стабільність процесу автоматичного зварювання трифазною дугою забезпечується лише за умови однакової швидкості плавлення електродів. Цього можна досягти, якщо застосовувати джерела живлення, що мають індуктивні опори у кожній фазі, котрі рівні за величиною та одночасно змінюються. Крутість спадання ЗХДЖ повинна забезпечувати стійке горіння дуги. При цьому обов'язкове виконання умови:

$$\frac{U_0}{U_d} \geq \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{2\pi^2}{9} + \frac{1}{2} \left( \frac{2U_3}{U_d} - 1 \right)^2}. \quad (2.25)$$

Якщо прийняти, що  $U_3 = U_d$ , то, після перетворень, одержимо:

$\frac{U_0}{U_d} \geq 1,17$ , тобто схеми джерел живлення трифазної дуги для зварювання

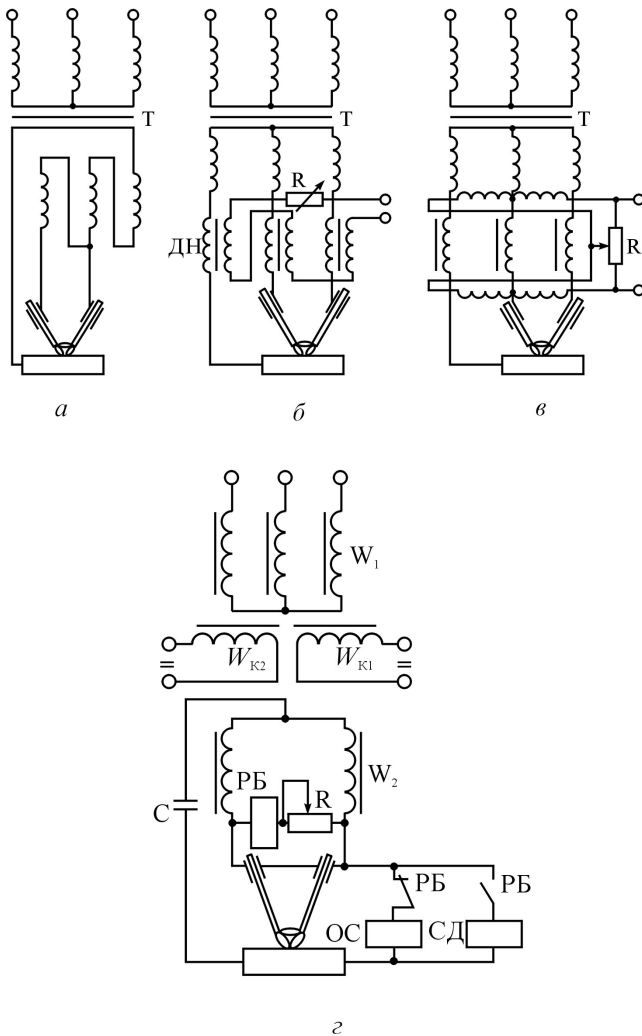


Рис. 2.21. Схеми джерел живлення для зварювання трифазною дугою

плавкими електродами повинні забезпечувати  $U_0 \geq 1,17U_d$  і формувати спадну зовнішню характеристику. Деякі схеми таких джерел живлення наведені на рис.2.21. Трифазні трансформатори з пересувними обмотками (рис.2.21,*а*) мають той самий недолік, що притаманний взагалі трансформаторам з механічним регулюванням – підвищену вібрацію, особливо при зварюванні на великих струмах.

Трансформатори з дроселем насичення (рис.2.21,*б*) хоча й достатньо прості за конструкцією, але не дають змоги регулювати напругу холостого ходу. Найбільш ефективно використання трансформаторів з магнітним регулюванням (рис.2.21,*в*), які забезпечують можливість зміни нахилу ВАХ та напруги холостого ходу.

Умови горіння трифазної дуги при використанні неплавких електродів більш сприятливі тому, що є можливість роздільного регулювання струму

в кожній дузі. У промисловості застосовують джерела живлення трифазної дуги для зварювання неплавкими електродами алюмінію та його сплавів, магнієвих сплавів (рис.2.21,з). Первинна та вторинна обмотки ввімкнуті за схемою відкритого трикутника. Завдяки розвиненому магнітному розсіюванню зовнішня вольт-амперна характеристика джерела круто спадає. Обмотки керування  $W_{к1}$  та  $W_{к2}$  забезпечують плавне регулювання струму в кожній дузі. Конденсаторна батарея С призначена для знищення постійної складової струму, осцилятор ОС з релейним блоком РБ та стабілізатор СД забезпечують початкове запалення та повторне збудження дуги.

## 2.7. Вибір трансформаторів для різних способів зварювання

Для вибору трансформатора для заданого способу дугового зварювання слід, насамперед, визначити статичну вольт-амперну характеристику дуги та розглянути її параметри залежно від режиму зварювання.

Далі, на підставі співставлення технічних вимог до різних трансформаторів, що визначені відповідними стандартами, а також виходячи з умов експлуатації джерела, можна вибрати трансформатор потрібної потужності та заданих електричних параметрів зварювання. При цьому слід приділяти увагу вибору режиму роботи джерела (тривалий, переміжний, повторно-короткочасний), техніко-економічним показникам трансформатора (ККД та  $\cos\phi$ ), а також відповідності його зовнішньої вольт-амперної характеристики статичній характеристиці дуги.

Розглянемо вибір зварювального трансформатора на прикладах.

**Приклад 1.** Вибрати джерело живлення змінного струму для ручного дугового зварювання покритими електродами струмом силою 200 А.

**Рішення.** Для ручного дугового зварювання покритими електродами застосовують трансформатори з пересувними обмотками з круто спадною зовнішньою характеристикою. При такій ЗХДЖ струм короткого замикання дещо більше робочого струму, що не порушує тепловий режим під час виникнення випадкових коротких замикань. Крім того, зварювальний струм змінюється незначно (висока еластичність дуги) при частих змінах довжини дуги, що характерно для ручного дугового зварювання. Для зада-



ної сили струму СХД – жорстка, а це забезпечує при крутоспадній ЗХДЖ стійкість енергетичної системи ДЖ – Д – В. Напруга в зварювальній дузі при ручному дуговому зварюванні знаходиться у межах 20...36 В і встановлюється залежно від конкретних умов та досвіду зварника.

З метою правильного вибору трансформатора треба знати його технічні характеристики (див. табл.2.1, дод.2). Найбільш задовольняють заданим параметрам трансформатори ТД-306, ТДМ-254, ТДМ-317 та ТДЭ-251. Із загального циклу роботи, прийнятого для джерела живлення для ручного дугового зварювання (5 хв) трансформатори ТД-306 та ТДЭ-251 забезпечують роботу протягом 1 хв і паузу тривалістю 4 хв, трансформатор ТДМ-254 – відповідно 1,25 хв і 3,75 хв, а ТДМ-317 – відповідно 3 і 2 хв.

Трансформатор ТДЭ -251 має тиристорний регулятор струму і тому більш широкі технологічні можливості порівняно з трансформаторами ТД-306 та ТДМ-254. Остаточно для роботи у монтажних умовах з режимом короткого навантаження буде ефективним застосування трансформатора ТДЭ-251, а для роботи у стаціонарних умовах, де потрібне більш тривале навантаження джерела живлення дуги, – трансформатора ТДМ-317. Використовувати трансформатори з більшою потужністю немає сенсу через надмірні витрати енергії.

**Приклад 2.** Вибрати джерело живлення змінного струму для автоматичного зварювання під флюсом струмом силою 900 А.

*Рішення.* Для зварювання в автоматичному режимі під флюсом змінним струмом використовують трансформатори з пологоспадною зовнішньою характеристикою, коли статична характеристика дуги – жорстка, а трансформатор з жорсткою ВАХ – якщо СХД зростаюча. Таке узгодження характеристик забезпечує горіння дуги (коефіцієнт стійкості системи

ДЖ – Д – В  $k_{ст} = \frac{dU_{д}}{dI} - \frac{dU_{дж}}{dI} > 0$ ) та високу якість зварювання при коли-

ваннях зварювального струму, що викликані зміною довжини дуги.

Для заданого зварювального струму 900 А СХД – зростаюча, отже, трансформатор має бути з жорсткою ВАХ. Напруга в дузі при автоматичному зварюванні під флюсом знаходиться у межах 32...44 В і залежить від

різних причин (діаметра електрода, сили струму, марки флюсу і т.ін.) у конкретних умовах.

Для автоматичного зварювання при силі струму 900 А формально можна застосувати трансформатор з магнітним регулюванням ТДФ-1001 та тиристорний трансформатор ТДФЖ-1002. Вибираємо трансформатор ТДФЖ-1002 тому, що він відповідає умові: жорстка ВАХ при зростаючій СХД. Залежно від конкретних умов на виході трансформатора за допомогою системи фазового керування слід встановити необхідну напругу, яка забезпечить задану якість зварного з'єднання у тривалому режимі роботи джерела. Застосування трансформатора ТДФЖ-2002 неефективне внаслідок великих енерговитрат.

### **Контрольні питання**

1. Якими рівняннями описуються процеси у зварювальних трансформаторах при роботі у режимі: холостого ходу; навантаження; короткого замикання?
2. Якими способами формуються зовнішні вольт-амперні характеристики зварювальних трансформаторів?
3. За допомогою яких схемних рішень регулюється зварювальний струм у трансформаторах для ручного дугового та автоматичного зварювання?
4. Як забезпечується стабільність горіння дуги при живленні її від тиристорного трансформатора?
5. У чому полягає суть системи автоматичного регулювання вихідними параметрами тиристорного трансформатора?
6. Які особливості мають трансформатори для живлення трифазної дуги?

### Глава 3

## МАШИННІ ДЖЕРЕЛА ЖИВЛЕННЯ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Усі машинні джерела живлення, що містять зварювальні генератори, поділяють за типом приводу на такі групи:

зварювальні агрегати (з приводом від власного двигуна внутрішнього згорання);

зварювальні перетворювачі (з приводом від електричного двигуна);

зварювальні генератори, призначені для з'єднання з приводом основних транспортних засобів, які використовуються споживачем.

З усіх перелічених груп головний обсяг випуску припадає на зварювальні агрегати.

За принципом роботи зварювальні генератори можна поділити так:

колекторні зварювальні генератори постійного струму;

вентильні зварювальні генератори постійного струму;

генератори змінного струму підвищеної частоти.

За призначенням, тобто в залежності від способу зварювання (форми зовнішньої статичної характеристики), зварювальні генератори розподіляються на:

генератори для ручного дугового зварювання та механізованого зварювання під флюсом (з крутоспадними характеристиками);

генератори для механізованого та автоматичного зварювання в середовищі захисних газів (з жорсткими характеристиками);

універсальні генератори, що мають крутоспадні та жорсткі статичні характеристики.

Зварювальні машинні джерела живлення використовують для дугового зварювання та розрізання металів, для роботи у польових умовах або під водою. Зварювальні генератори постійного струму повинні забезпечувати легке збудження та стійке горіння зварювальної дуги, а також належну безпеку електрозварювальних робіт, особливо при зварюванні під водою. Такі вимоги реалізуються завдяки підвищеній напрузі холостого ходу порівняно з робочою, а динамічні властивості – конструкцією генератора. Безпека електрозварювальних робіт, особливо під водою, забезпечується спеціальним пристроєм зниження напруги холостого ходу до безпечного

рівня. Цим пристроєм генератори комплектуються за спеціальними замовленнями.

Головним споживачем електромашинних зварювальних перетворювачів і агрегатів є прокладники трубопроводів, будівельники та монтажники, ремонтники, що працюють в умовах відсутності електропостачання.

Колекторні генератори нині практично не випускають, їх повністю витіснили вентильні генератори індукторного типу. Проте колекторних зварювальних машин різних конструктивних схем (з послідовною обмоткою збудження, поперечного поля, з розщепленими полюсами) з щітковим струмознімачем перебуває в експлуатації ще досить багато. Останнім часом у країнах СНД та зарубіжжя у зв'язку з простотою конструкції випускалися колекторні зварювальні генератори лише з послідовною обмоткою збудження. Тому у даній главі розглянемо саме цей тип генераторів.

### 3.1. Теоретичні основи роботи зварювальних колекторних генераторів

Принцип перетворення у генераторі механічної енергії приводного двигуна в електричну ґрунтується на законі електромагнітної індукції. У рамці провідника, що обертається у постійному магнітному полі, виникає ЕРС. Але ця ЕРС змінюється за напрямом та величиною. Для випрямлення змінної ЕРС в генераторах використовується колекторний пристрій. В колекторному зварювальному генераторі випрямлена ЕРС знімається з колектора щітковим механізмом, закріпленим на статорі.

З теорії машин постійного струму відомо, що ЕРС, яка індукується у якорі генератора, пов'язана з магнітним потоком  $\Phi_r$  між якорем, що обертається, та полюсами таким рівнянням:

$$E_r = c\Phi_r, \quad (3.1)$$

де  $c$  – постійна генератора, що визначається числом пар полюсів, швидкістю обертання якоря, числом активних провідників та пар паралельних кіл обмотки якоря.

Напруга на вихідних клеммах генератора при навантаженні:

$$U_r = E_r - I_r \cdot R_r, \quad (3.2)$$

де  $I_{\Gamma}$  – струм у якірному колі генератора, А;  $R_{\Gamma}$  – внутрішній опір генератора, Ом. У сучасних зварювальних генераторах значення  $R_{\Gamma}$  складає соті та тисячні частки Ома, тому  $U_{\Gamma} \approx E_{\Gamma}$ .

Якщо потік  $\Phi_{\Gamma}$  у повітряному зазорі під полюсами не змінюється при навантаженні, то зовнішня характеристика генератора буде жорсткою. Принцип отримання спадної статичної вольт-амперної характеристики генератора шляхом зменшення сумарного магнітного потоку  $\Phi_{\Gamma}$  при зростанні навантаження є головним практично для всіх типів колекторних генераторів.

За схемними ознаками генератори з послідовною обмоткою збудження можна об'єднати у такі групи:

генератори з намагнічувальною незалежною обмоткою збудження  $W_{\text{H}}$  та послідовною розмагнічувальною (рис.3.1,*а,в*) або підмагнічувальною обмоткою (рис.3.1,*б*);

генератори з паралельною обмоткою збудження (з самозбудженням) та послідовною розмагнічувальною (рис.3.1,*г*).

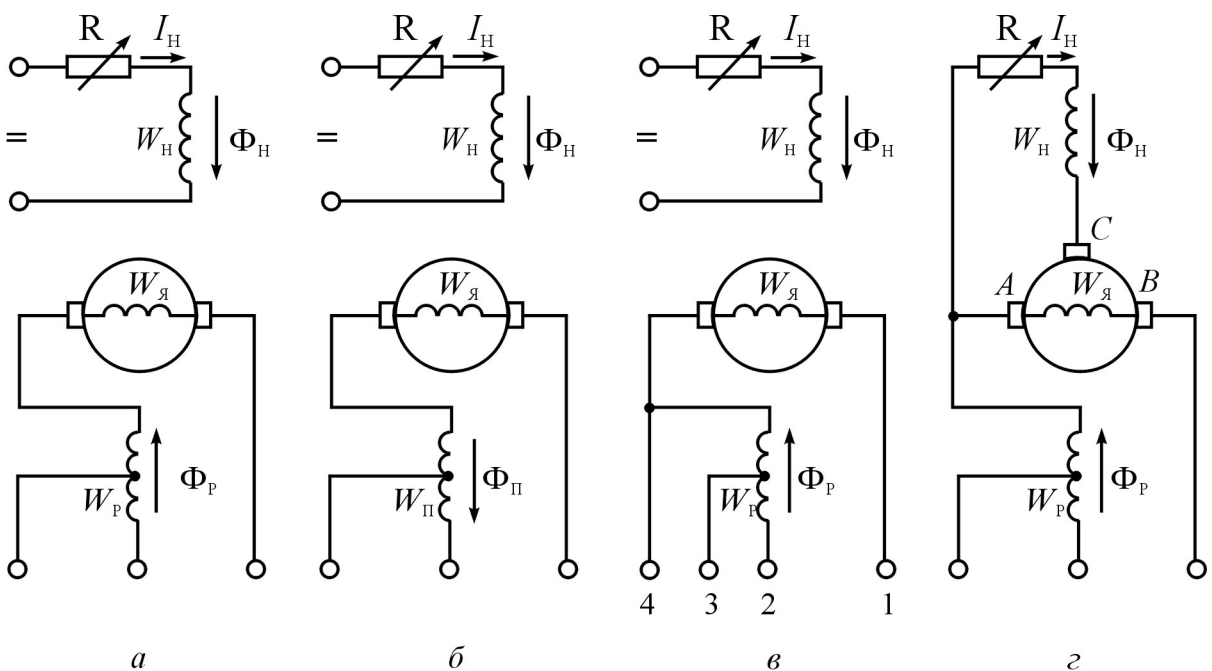


Рис. 3.1. Схеми колекторних зварювальних генераторів

Намагнічувальні обмотки мають велику кількість витків ( $W_{\text{H}} = 200...500$ ); вони виконані з тонкого дроту (діаметром 1,5...2,5 мм) і

розташовані на окремих башмаках корпусу генератора. Намагнічувальний струм  $I_H$  у цих обмотках малий (2...20 А) і регулюється опором R.

При протіканні намагнічувального струму по обмотці  $W_H$  у генераторі наводиться намагнічувальний магнітний потік  $\Phi_H$ :

$$\Phi_H = \frac{I_H W_H}{R_{\mu H}}, \quad (3.3)$$

де  $R_{\mu H}$  – опір магнітного кола на шляху потоку  $\Phi_H$ ;  $I_H$  – струм у намагнічувальній обмотці;  $W_H$  – число витків намагнічувальної обмотки.

При холостому ході потік  $\Phi_H$  визначає ЕРС та напругу генератора

$$E_{0Г} = c\Phi_H = \frac{cI_H W_H}{R_{\mu H}} = U_{0Г}. \quad (3.4)$$

Зміною струму намагнічування здійснюється плавне регулювання напруги холостого ходу і, отже, режиму його роботи при навантаженні. Максимальне значення напруги  $U_{0Г}$  обмежується умовами безпеки роботи зварника і відповідно до ГОСТ 304-82Е не може перевищувати 100 В. Мінімальна напруга холостого ходу деякою мірою визначає стабільність горіння дуги при зварюванні на мінімальних струмах і тому не повинна бути меншою за 45...50 В.

У більшості генераторів для дугового зварювання є і послідовна обмотка збудження. По цій обмотці, яка ввімкнута послідовно з дугою, протікає струм, що дорівнює струму дуги. Як правило, послідовні обмотки збудження, що розташовані на окремих башмаках корпусу генератора, мають невелику кількість витків (3...5), переріз котрих розраховано по номінальному зварювальному струму.

Магнітний потік, що наводиться намагнічувальною силою послідовної обмотки збудження, виникає тільки під час навантаження генератора. Залежно від способу вмикання послідовної обмотки збудження цей потік спрямований зустрічно або відповідно до намагнічувального потоку  $\Phi_H$ .

Зустрічний або розмагнічувальний магнітний потік  $\Phi_p$  наводиться на-магнічувальною силою розмагнічувальної обмотки збудження  $W_p$  (див. рис.3.1,**а,в,г**); відповідний або підмагнічувальний магнітний потік  $\Phi_n$  – підмагнічувальною обмоткою збудження  $W_n$  (див. рис.3.1,**б**).

Послідовна обмотка збудження секціонована. Вмикають або всі витки цієї обмотки, або половину.

В останньому випадку дія магнітного потоку послідовної обмотки значно послаблюється (при зустрічному вмиканні) або посилюється (відповідне вмикання).

При наявності в генераторі послідовної розмагнічувальної обмотки ( $W_p$ ) ЕРС генератора визначається з рівняння

$$E_{\Gamma} = c(\Phi_n - \Phi_p), \quad (3.5)$$

або

$$E_{\Gamma} = c \left( \frac{I_n W_n}{R_{\mu n}} - \frac{I_{\Gamma} W_p}{R_{\mu p}} \right). \quad (3.6)$$

Якщо припустити, що  $R_{\mu n} \approx R_{\mu p}$ , то матимемо

$$E_{\Gamma} = \frac{c}{R_{\mu}} (I_n W_n - I_{\Gamma} W_p). \quad (3.7)$$

Напруга на клеммах генератора при навантаженні

$$U_{\Gamma} = \frac{c}{R_{\mu}} (I_n W_n - I_{\Gamma} W_p) - I_{\Gamma} R_{\Gamma}. \quad (3.8)$$

З наведених рівнянь витікає, що вольт-амперні характеристики генераторів з розмагнічувальними послідовними обмотками збудження будуть крутоспадними (рис.3.2,**а**). При ручному дуговому зварюванні це сприяє обмеженню струму короткого замикання у межах  $I_{к.з} = (1,25 \dots 1,5) I_p$ , де

$I_p$  – робочий струм. При більших значеннях  $I_{к.з}$  можливі пропалини, обсіпання обмазки тощо.

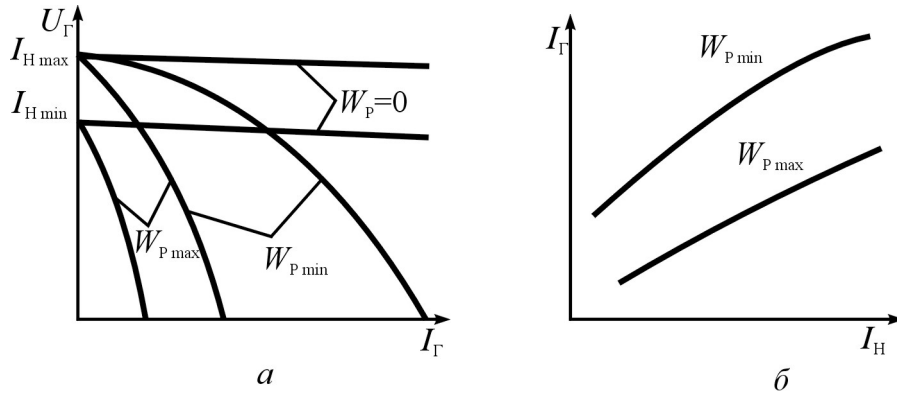


Рис. 3.2. Зовнішні вольт-амперні (а) та регулювальні (б) характеристики генераторів з послідовними розмагнічувальними обмотками збудження

При вимиканні розмагнічувальної обмотки (див. рис.3.1,в – клеми 1–4) вольт-амперна характеристика генератора стає пологоспадною (рис.3.2,а) при  $W_p = 0$ . Рівняння (3.8) у цьому випадку має вигляд

$$U_{\Gamma} = \frac{c}{R_{\mu n}} (I_H W_n - I_{\Gamma} R_{\Gamma}) \approx U_{0\Gamma}. \quad (3.9)$$

Наявність секціонування розмагнічувальної обмотки дає змогу ступінчасто регулювати вихідні параметри генератора. Завдяки цьому зростає кратність регулювання струму генератора. З'являється можливість виконувати зварювання на малих струмах при підвищеній напрузі холостого ходу. Типові регулювальні характеристики генератора з розмагнічувальною обмоткою наведені на рис.3.2,б.

Для генератора з підмагнічувальною послідовною обмоткою збудження  $W_{\Pi}$  (див. рис.3.1,б) рівняння (3.5) та (3.8) відповідно записуються у вигляді

$$E_{\Gamma} = c(\Phi_H + \Phi_{\Pi}); \quad (3.10)$$

$$U_{\Gamma} = \frac{c}{R_{\mu}} (I_H W_n + I_{\Gamma} W_{\Pi}) - I_{\Gamma} R_{\Gamma}. \quad (3.11)$$

Шляхом зміни числа витків підмагнічувальної обмотки регулюють кут нахилу ВАХ генератора (рис.3.3). При мінімальному числі витків  $W_{\Pi}$



генератор має жорстку зовнішню характеристику. У цьому випадку виконуються рівності  $I_{\Gamma}W_{\Pi} \approx I_{\Gamma}R_{\Gamma}$  та  $U_{\Gamma} \approx U_{0\Gamma}$ . При більшому числі витків спостерігається нерівність  $I_{\Gamma}W_{\Pi} > I_{\Gamma}R_{\Gamma}$ . Зовнішня характеристика генератора буде зростаючою.

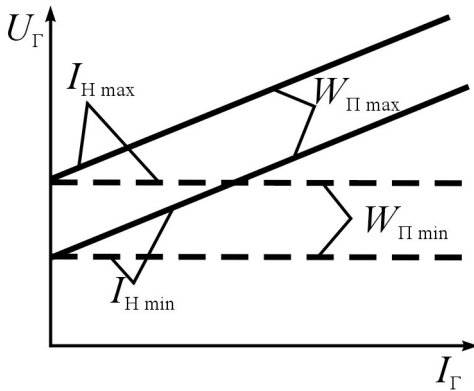


Рис. 3.3. Зовнішні вольт-амперні характеристики генераторів з послідовними підмагнічувальними обмотками збудження

Для живлення намагнічувальної обмотки збудження необхідна постійна напруга, яка не залежить від режиму роботи генератора. Це легко досягається у генераторах з незалежним збудженням шляхом застосування автономного джерела, наприклад, напівпровідникового випрямляча, якщо як електропривод використано електродвигун змінного струму.

Значно складніше отримати постійну напругу для живлення намагнічувальної обмотки у самому генераторі (у генераторах з самозбудженням). З цією метою між основними щітками *A* і *B* (див. рис.3.1,з) на

колекторі встановлюють проміжну щітку *C*. Напруга на щітках *A*, *C* близька до постійної та мало залежить від режиму роботи генератора. Постійність напруги досягається шляхом використання магнітного потоку, що наводиться намагнічувальною силою якірної обмотки  $W_{я}$  або реакції якоря (рис.3.4,а).

Між щітками *A* і *C* діють рівномірно розподілені магнітні потоки: намагнічувальної обмотки  $\Phi_{н}$ , розмагнічувальної обмотки  $\Phi_{р}$  та підмагнічувальної якірної обмотки  $\Phi_{я.н}$ . Реакція якоря послаблює дію розмагнічувального потоку. ЕРС на щітках *A*, *C* визначиться з виразу

$$E_{A,C} = \frac{c}{2}(\Phi_{н} - \Phi_{р} + \Phi_{я.н}). \quad (3.12)$$

Для виконання умови  $E_{A,C} = \text{const}$  необхідно, щоб  $\Phi_{р} \approx \Phi_{я.н}$ . Тоді

$$E_{A,C} = \frac{c}{2R_{\mu}} I_{н} W_{н} = \text{const}.$$

З схеми розподілу магнітних потоків видно, що на ділянці *BC* реакція якоря  $\Phi_{я.р}$  підсилює дію розмагнічувального потоку  $\Phi_{р}$ . При збільшенні навантаження падіння напруги на щітках *B*, *C* різко підсилюється (рис.3.4,б).



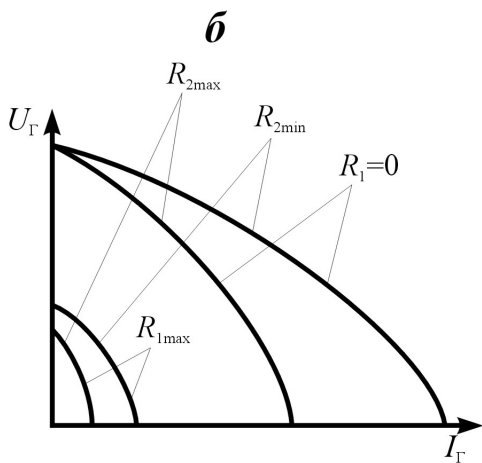
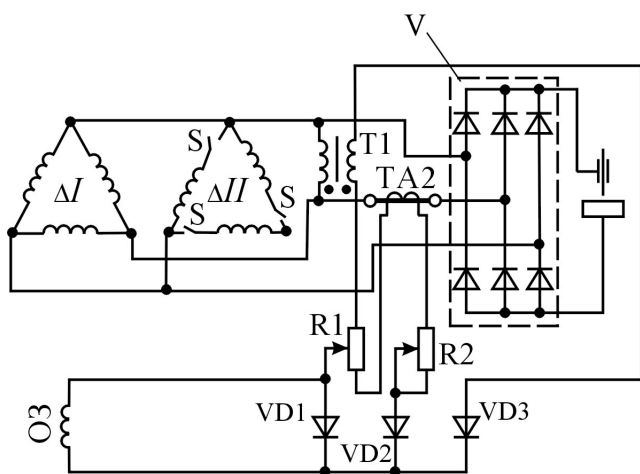
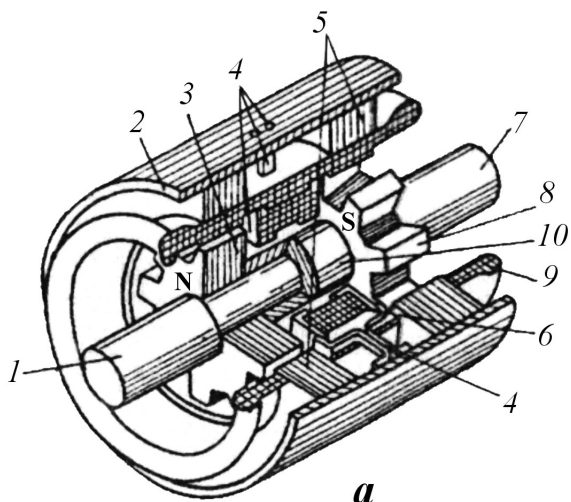


Рис 3.5. Конструкція індукторної машини (а), електрична схема вентильного генератора (б) та його зовнішні вольт-амперні характеристики (в)

рухомо до корпусу генератора 2, що виконаний із магнітом'якого матеріалу, і розташована поміж пакетами ротора. На статорі генератора 5, що також складається із двох пакетів, розміщена трифазна силова обмотка 9.

Зміна магнітного потоку, зчепленого з обмоткою якоря, досягається через періодичну зміну магнітного опору на шляху робочого потоку при обертанні зубчастого ротора. Тому індукція у зазорі ІМ має пульсуючий характер і містить змінну (робочу) та постійну (неробочу) складові. Наявність постійної складової магнітного потоку є головним недоліком ІМ тому, що вона не бере участі у наведенні ЕРС, а тільки завантажує магнітопровід та потребує істотного збільшення його об'єму і маси порівняно із звичайними синхронними машинами. Цей недолік частково компенсується за рахунок підвищеної частоти ЕРС (200...400 Гц), що визначається швидкістю обертання ротора та числом зубців на ньому, яке можна збільшити.

До переваг ІМ слід віднести простоту конструкції ротора, високу надійність, зручність регулювання, підвищену працездатність у складних зовнішніх умовах.

Природні зовнішні вольт-амперні характеристики вентильного генератора спадні, вони формуються за рахунок великого індуктивного опору фаз обмоток статора. При пуску, коли ротор генератора починає обертатися від приводного двигуна, на виводах статорної обмотки ( $\Delta I$  та  $\Delta II$ , рис.3.5,б) з'являється ЕРС близько 7...8 В, завдяки залишковому магнетизмові полюсів ротора. Трансформатор Т1 підвищує цю напругу і через діод VD3 її середнє значення за півперіод подається на клема обмотки збудження ОЗ (у цей час діод VD1 закритий). У наступний півперіод діод VD1 відкритий, і через нього йде струм за рахунок енергії, нагромадженої у магнітному полі ОЗ у попередній півперіод.

Генератор збуджується до напруги холостого ходу, яка настроюється резистором R1. З підвищенням навантаження напруга на фазах статорної обмотки знижується і разом з цим зменшується середнє значення випрямленої за допомогою діода VD3 вторинної напруги трансформатора Т1. При навантаженні одночасно з Т1 обмотку ОЗ через діод VD2 починає живити випрямленим струмом вторинна обмотка трансформатора струму ТА2.

Вентильний генератор має два діапазони регулювання струму (за рахунок вмикання однієї або двох статорних обмоток, рис.3.5,в). Плавне регулювання зварювального струму у межах кожного діапазону та зміна крутості зовнішньої характеристики генератора забезпечується резистором R2.

Останнім часом, у 90-і роки, на світовому ринку зварювального устаткування з'явилися агрегати на базі асинхронних генераторів з тиристорними випрямними блоками. З курсу теоретичних основ електротехніки відомо: якщо ротор асинхронного двигуна обертати з частотою, яка перевищує частоту обертання магнітного потоку статора, то двигун перейде у режим асинхронного генератора. В асинхронному генераторі, що працює на автономне навантаження, реактивна потужність, потрібна для збудження генератора, повинна вироблятися окремим джерелом. Як правило, таким джерелом служить батарея конденсаторів, що вмикаються паралельно з навантаженням генератора. Такі зварювальні агрегати складніші за конструкцією, ніж вентильні генератори, але ця складність компенсується достатньо високими їх експлуатаційними характеристиками.

Тиристорний випрямляч складається за мостовою схемою та вмикається до вихідних клем зварювальної обмотки, яка розміщена на статорі разом з обмоткою збудження. Зовнішні характеристики необхідної форми такого джерела живлення формуються схемою керування силовим тиристорним блоком, що живиться від автономної допоміжної мережі або від силової обмотки з застосуванням фільтруючих пристроїв.

Асинхронні генератори мають певні специфічні особливості, зокрема вони змінюють частоту струму, що генерується, при зміні навантаження внаслідок зміни швидкості магнітного потоку. Стабілізувати частоту можна шляхом зміни частоти обертання приводу. Для зварювального агрегату з приводом від двигуна внутрішнього згоряння це забезпечується просто. Більш важливим завданням є підтримування постійними сили струму та напруги в дузі, яке вирішується за допомогою вихідного силового тиристорного блока та вузла керування ним.

На рис.3.6 наведено блок-схему асинхронного зварювального генератора, розробленого в ІЕЗ імені Є.О.Патона на базі серійного електричного двигуна типу АМУ 200-4 потужністю 30 кВт. На статорі генератора

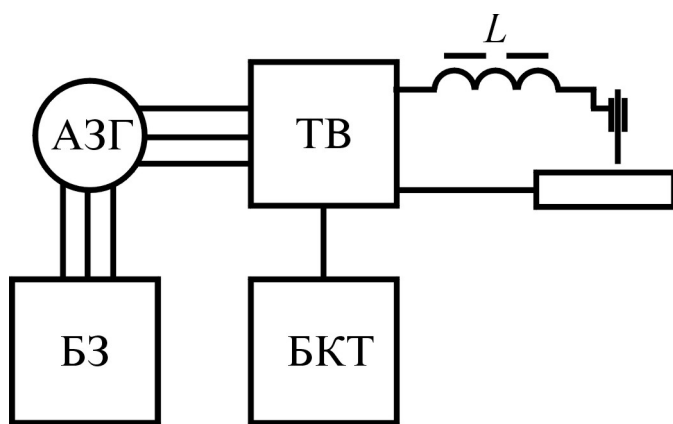


Рис. 3.6. Блок-схема асинхронного зварювального генератора (АЗГ):

БЗ – блок збудження; ТВ – тиристорний випрямляч; БКТ – блок керування тиристорами;  $L$  – стабілізуючий дросель

розміщені дві трифазні гальванічно не пов'язані обмотки: силова та збудження.

Ємнісний блок складається з набору конденсаторів з робочою напругою 400 В, які можуть автоматично перемикатися залежно від режиму роботи генератора.

Тиристорний випрямляч, що ввімкнутий до вихідних застискачів статорної обмотки, є частиною блока формування зовнішньої характеристики генератора.

Блок керування живиться від допоміжної автономної мережі або силової обмотки з використанням фільтруючих пристроїв.

### 3.3. Динамічні властивості генераторів

Більшість машинних джерел живлення постійного струму використовуються для ручного дугового зварювання та різання, тому розглянуті вище зовнішні статичні характеристики генераторів не у повній мірі дають змогу однозначно визначити ступінь придатності генератора для означеного способу зварювання. Річ у тому, що у процесі зварювання значення напруги і струму безперервно змінюються з великою швидкістю. Це пов'язано з механізмом початкового збудження дуги та процесами перенесення електродного металу у зварювальну ванну під час зварювання, тобто мають місце періодичні короткі замикання дугового проміжку з наступним повторним збудженням дуги. Таким чином, під час зварювання генератор працює у динамічному режимі, що постійно змінюється. Тому стабільність збудження та горіння дуги, а також якість перенесення металу великою мірою визначаються не лише статичними властивостями генератора, а й його динамічними властивостями, тобто якістю перехідних процесів гене-

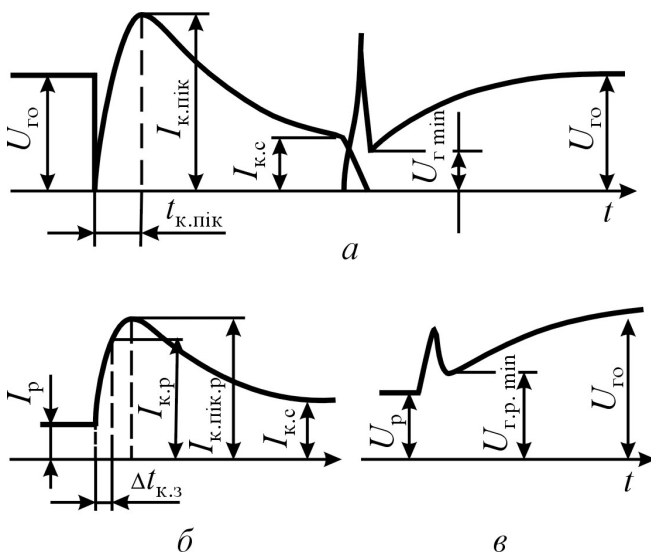


Рис. 3.7. До визначення показників якості перехідних процесів колекторного генератора: **а** – холостий хід – коротке замикання – холостий хід; **б** – робочий режим – коротке замикання; **в** – робочий режим – холостий хід

ратора при наявності збурень у дузі, що швидко змінюються з часом.

Динамічні властивості генераторів визначаються сукупністю показників якості його перехідних процесів, які досліджуються за допомогою осцилограм.

Осцилограми, що дають змогу приблизно судити про динамічні властивості колекторного генератора, показані на рис.3.7. Осцилограма **а** найбільшою мірою близька до процесу початкового збудження дуги, **б** – до короткого замикання дугового проміжку краплею

розплавленого металу (без повторного збудження дуги),  $v$  – до обриву процесу зварювання.

Динамічні властивості генератора оцінюються через екстремальні значення струму та напруги при миттєвій зміні довжини дуги. При цьому, як видно з осцилограм, екстремальні значення струму ( $I_{к.п.ік}, I_{к.п.ік.р}$ ) більші за сталі ( $I_{кс}, I_p$ ), а екстремальні значення напруги ( $U_{г.мін}, U_{г.р.мін}$ ) менше сталого ( $U_{г0}$ ). У грубому наближенні при виборі або розрахунку колекторного генератора для ручного дугового зварювання необхідно, щоб екстремальні значення цих величин прямували до їх сталих значень, тобто

$$\frac{I_{к.п.ік}}{I_{кс}} \rightarrow 1; \quad \frac{I_{к.п.ік.р}}{I_{кс}} \rightarrow 1; \quad \frac{U_{г.мін}}{U_{г0}} \rightarrow 1; \quad \frac{U_{г.р.мін}}{U_{г0}} \rightarrow 1.$$

Головною величиною що характеризує якість перехідних процесів зварювального генератора згідно з ГОСТ 304-82Е є величина  $U_{г.мін}$ . Вона не повинна бути менше 24 В у режимі мінімального струму та 37 В у режимі номінального струму.

Важливим показником динамічних властивостей зварювального генератора є також показник, що визначає струм короткого замикання  $I_{к.р}$  у момент обриву краплі  $t_{к.з}$ . Цей показник характеризується середньою швидкістю наростання струму короткого замикання:

$$V_p = \frac{I_{к.р} - I_p}{\Delta t_{к.з}} \text{ А/с}, \quad (3.13)$$

де  $I_{к.р}$  – струм короткого замикання після закінчення часу, приблизно рівного тривалості короткого замикання дугового проміжку краплею розплавленого металу. Ця тривалість може бути від тисячних до сотих часток секунди.

Величина  $I_{к.р}$  впливає на розбризування металу при зварюванні. Чим більша ця величина, за інших рівних умов, тим більше розбризування металу. Тому зниження  $I_{к.р}$  в колекторних генераторах – це ефективний шлях усунення підвищеного розбризування металу при зварюванні, особливо в генераторах з жорсткими зовнішніми характеристиками.

Зварювальні властивості вентильних генераторів, як і колекторних, залежать від характеристик перехідних процесів, що відбуваються в електричній машині під час зварювання. При живленні зварювальної дуги від вентильного генератора характер протікання перехідних процесів, обумовлених зміною довжини дуги, залежить насамперед від частоти струму яко-ря та від внутрішніх параметрів генератора. Встановлено, що у разі засто-сування трифазних обмоток якоря добрі зварювальні властивості набува-ються при частотах якоря  $f = 150 \dots 400$  Гц. Випрямлений струм короткого замикання досягає свого пікового значення  $I_{к.пик}$  приблизно через половину періоду, тобто через час  $t = \frac{1}{2f}$  від початку короткого замикання. Тому

підвищення частоти струму якоря наче прискорює перехідний процес та приводить до того, що при зварюванні крапля розплавленого металу відривається вже при роботі генератора на спадній частині кривої випрям-леного струму короткого замикання (рис.3.8). Струм  $I_{відр}$  у момент

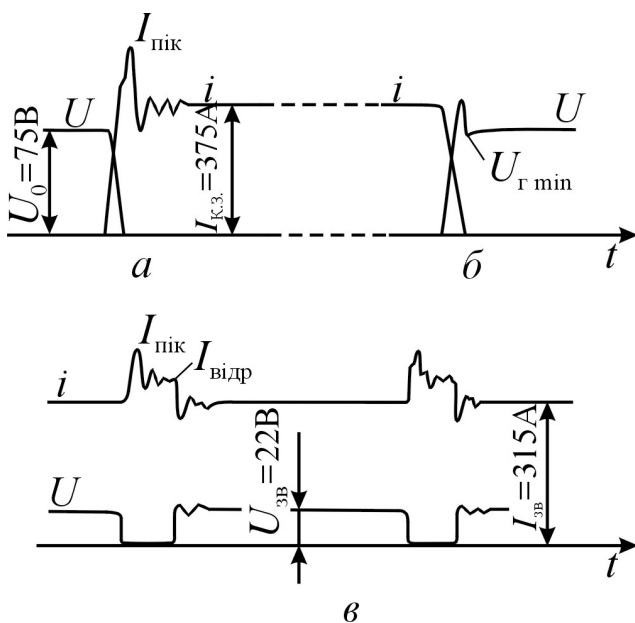


Рис. 3.8. Криві миттєвих значень струму та напруги під час перехідних процесів у вентильному генераторі:

- а** – холостий хід – коротке замикання;
- б** – коротке замикання – холостий хід;
- в** – робочий режим зварювання

відриву краплі стає значно менше за своє максимальне значення  $I_{к.пик}$ . Це дає змогу істотно зменшити розбризування елек-тродного металу при зварюванні від вентильного генератора.

Важливе значення для якості зварювання та стабіль-ності горіння дуги має процес відновлення напруги холостого ходу після обриву короткого замикання. Процес відновлення напруги залежить від інер-ційності кола збудження і тому в індукторних машинах про-довжується порівняно довго (0,25...1,5 с). У цьому випадку швидкість зростання напруги після обриву короткого зами-



кання менше, ніж швидкість процесів, що протікають у зварювальному колі. Тому для вентильних генераторів стабільність повторного збудження дуги характеризується значенням напруги, що з'являється на клеммах генератора у момент обриву короткого замикання  $U_{Г\ min}$  (рис.3.8,б).

Оскільки відрив краплі при зварюванні, як правило, відбувається при значеннях струму, більших за робочі, значення напруги  $U_{Г\ min}$  при зварюванні від вентильного генератора завжди задовольняє умові  $U_{Г\ min} = 20 + 0,04I$  (у вольтах) і процес горіння дуги відзначається високою стабільністю.

Внаслідок сприятливих перехідних процесів вентильні генератори відзначаються добрими зварювальними властивостями, у тому числі невеликими втратами електродного металу (малим розбризкуванням), стабільним горінням та еластичністю дуги.

### **3.4. Загальна характеристика типових промислових зварювальних машинних джерел живлення постійного струму**

Зварювальний перетворювач являє собою електромашинну установку, що складається з приводного електродвигуна та зварювального генератора.

Як привод у перетворювачів використовують короткозамкнені асинхронні трифазні електродвигуни, які у більшості випадків мають фазні обмотки, з'єднані зіркою, та розраховані на лінійну напругу 380 В. Перетворювачі призначені для роботи як у закритих приміщеннях, так і на відкритому повітрі.

Зварювальні агрегати належать до категорії пересувних енергетичних установок, що пристосовані для роботи у польових умовах незалежно від тимчасового або постійного розміщення на транспортному засобі.

За типом приводного двигуна агрегати поділяються на агрегати з бензиновими або дизельними двигунами, за способом охолодження – з повітряним та рідинним охолодженням.

Режим роботи двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ) у зварювальних агрегатах – стаціонарний, тобто такий, за якого частота обертання ротору підтримується постійною. Автоматичний регулятор, що забезпечує

постійну частоту обертання, є однією з основних складових частин зварювального агрегату.

Ще одна особливість, характерна для умов роботи ДВЗ у зварювальному агрегаті, – це значна частка часу роботи у режимі холостого ходу, особливо при виконанні зварювальних робіт на монтажі конструкцій, їх ремонті або будівництві споруд. Приводами зварювальних агрегатів здебільшого служать автомобільні або тракторні двигуни.

Асинхронні генератори, як правило, розраховані на промислову частоту. Це дає змогу (крім електрично не пов'язаних зварювальних обмоток та обмоток збудження) розмістити на статорі генератора додаткові обмотки для отримання трифазної напруги 220/380 В, що використовується для живлення електроінструменту або освітлювальних пристроїв невеликої потужності.

### **3.4.1. Зварювальні перетворювачі і агрегати з колекторними генераторами**

*Перетворювачі типів ПСО-300-2, ПСО-315М та ПД-502* призначені для живлення постійним струмом одного зварювального поста при ручному дуговому зварюванні, наплавленні та різанні покритими електродами, а також для живлення зварювальних кіл автоматів та напівавтоматів при дуговому зварюванні під флюсом.

Зварювальні перетворювачі ПСО-300, ПСО-315М та ПД-502 конструктивно подібні (рис.3.9,*а*) і відрізняються типом генератора (дод.2, табл.2.2).

Генератори ГСО-300 та ГСО-300М – чотириполюсні колекторні машини з самозбудженням та послідовною розмагнічувальною обмоткою, а генератор ГД-502 має незалежне збудження. Обмотка збудження ГД-502 живиться від мережі змінного трифазного струму через індуктивно-ємнісний перетворювач напруги. Зовнішні характеристики генераторів – крутоспадні.

Регулювання зварювального струму генераторів здійснюється реостатом (плавна настройка) та підключенням зварювального кабелю до

відповідного затискача дошки затискачів низької напруги (груба настройка).

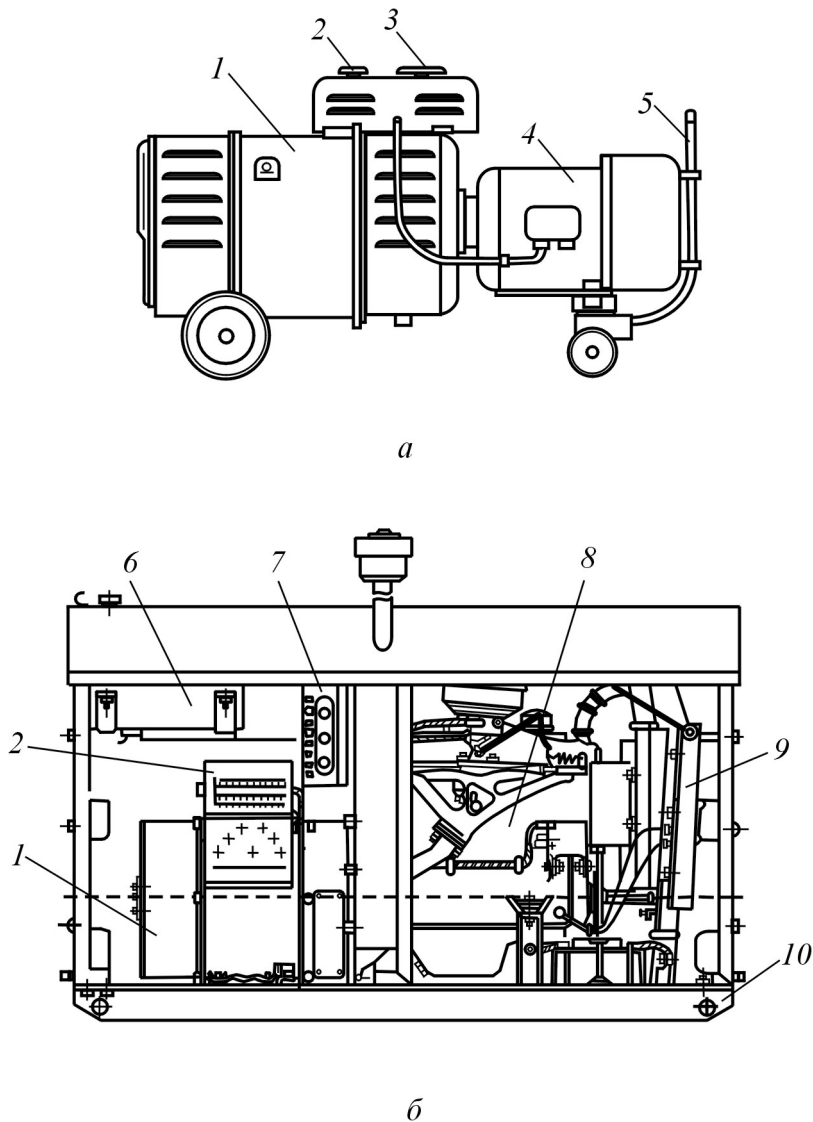


Рис. 3.9. Загальний вигляд перетворювача ПСО-315 М (а) та зварювального агрегату АДБ-311 (б):

1 – зварювальний генератор; 2 – реостат регулювання; 3 – вмикач електродвигуна; 4 – електродвигун; 5 – транспортувальна ручка; 6 – паливний бак; 7 – пульт керування; 8 – бензиновий двигун; 9 – радіатор охолодження; 10 – рама

*Перетворювач типу ПСГ-500-1* призначений для живлення постійним струмом одного поста дугового механізованого та автоматичного зварювання у середовищі захисних газів плавким електродом з постійною швидкістю подачі при струмі 60...500 А (див. дод.2, табл.2.2).

Зовнішньо перетворювач подібний до перетворювачів ПСО-300-2 та ПД-502. Зварювальний генератор ПСГ-500-1 являє собою також чотирипо-

люсну машину з самозбудженням. Обмотка самозбудження розміщена на всіх головних полюсах і живиться від щіток генератора. Зовнішні вольт-амперні характеристики генератора – жорсткі, з нахилом не більше  $\pm 0,04$  В/А у робочому діапазоні струмів, чим забезпечується автоматичне зварювання. Надійне самозбудження при мінімальних напругах холостого ходу забезпечується парою головних полюсів, які мають більш насичені осердя (з вирізами у середній частині). Регулювання напруги генератора здійснюється реостатом, увімкнутим у коло котушок збудження, розташованих на ненасичених полюсних осердях.

*Зварювальні агрегати АСБ-300-7, АДБ-309, ПАС-400, АДБ-311* (рис.3.9,б). В агрегатах генератор та бензиновий двигун з'єднані у силовий блок, змонтований на загальній рамі. Двигунова та генераторна частини розділені між собою поперечною перегородкою, яка забезпечує нормальний тепловий режим роботи генератора.

Зварювальні генератори ГСО-300-5, ГД-303 та ГД-305 (див. дод.2, табл.2.2) однотипні за конструкцією і є однопостовими зварювальними чотириполюсними генераторами постійного струму з послідовною розмагнічувальною обмоткою, з самозбудженням. Зовнішні характеристики генераторів – крутоспадні. Зварювальний генератор СГП-3 за принципом роботи належить до типу генераторів ГСО-300.

Зварювальний струм регулюється реостатом, змонтованим на корпусі генератора ГСО-300-5, а в генераторах ГД-303 та ГД-305 – виносним. Реостат увімкнений у коло намагнічувальної (шунтової) обмотки збудження. Генератори ГД-303, ГД-305 мають розширені межі регулювання струму (5 діапазонів, три з яких є додатковими). Додаткові діапазони утворюються шляхом вмикання у коло якоря відповідних баластних опорів, що встановлені на корпусі генератора.

*У зварювальних генераторах АД-303, АДД-3112* генератор з'єднується з дизельним двигуном повітряного охолодження за допомогою фланця, розподільна перегородка між генераторним та дизельними відсіками відсутня.

Зварювальні генератори агрегатів за принципом роботи та конструктивним виконанням є типовими представниками колекторних генераторів серії ГСО-300. Генератор ГСО-300-12 має два, ГД-3120 – три діапазони ре-

гулювання струму. Додатковий діапазон малих струмів створюється шляхом вмикання у коло якоря баластного опору.

*Зварювальні агрегати АСД-3-1, АСДП-500* (рис.3.10). Агрегати мають

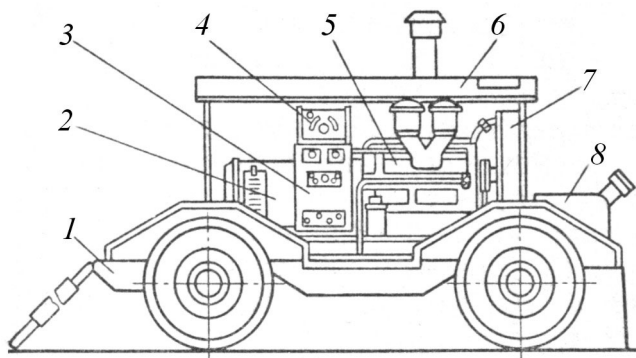


Рис. 3.10. Загальний вигляд зварювального агрегату АСДП-500:

1 – причеп; 2 – зварювальний генератор; 3 – пульт керування; 4 – реостат регулювання зварювального струму; 5 – дизель; 6 – кришка капоту; 7 – радіатор охолодження; 8 – паливний бак

однакову конструкцію агрегатної частини. Відрізняються тим, що АСД-3-1 має рамне виконання, а АСДП-500 – виконаний на автомобільному двовісному низькорамному причепі.

В агрегатах зварювальний генератор приводиться в обертання дизельним двотактовим чотирициліндровим двигуном рідинного охолодження. Двигун з генератором встановлені жорстко на раму агрегату.

### 3.4.2. Зварювальні перетворювачі і агрегати з вентильними генераторами

*Перетворювачі типу ПД-305* (рис.3.11) складаються з генератора ГД-312 (див. дод.2, табл.2.2) та електродвигуна, які розташовані на спільній рамі та захищені від непогоди металевою кришкою і спеціальними шторками. Для приводу індуктора генератора застосований трифазний асинхронний двигун, вал якого з'єднаний з валом генератора за допомогою еластичної муфти.

Регулювання струму зварювання здійснюється ступенево (дві ступені 40...180 та 160...350 А) рукояткою на коробці керування і плавно дистанційно реостатом, підключеним до коробки керування за допомогою кабелю.

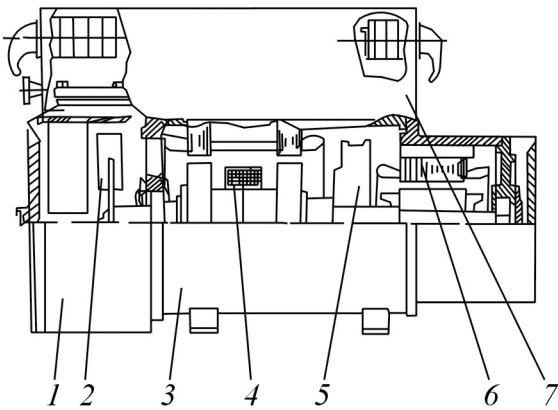


Рис. 3.11. Зварювальний перетворювач ПД-305: 1 – вентиляльний блок; 2 – вентилятор; 3 – індукторний генератор; 4 – обмотка збудження; 5 – центробіжний вентилятор; 6 – електродвигун; 7 – коробка керування

*Зварювальні агрегати АДБ-318 та АДБ-3120.* В агрегатах вентиляльний зварювальний генератор приводиться в дію бензиновим двигуном. Двигун і генератор з'єднані фланцем; двигуно-генераторний блок закріплений на спільній рамі.

Вентильні генератори типу ГД-312 в агрегаті АДБ-318 та ГД-314 в агрегаті АДБ-3120 (дод.2, табл.2.2) конструктивно являють собою двопакетні індукторні генератори підвищеної частоти з випрямним пристроєм та апаратурою керування.

Дистанційне регулювання зварювального струму здійснюється реостатом, підключеним до коробки керування. Генератор ГД-314 порівняно з генератором ГД-312 має розширені межі регулювання струму.

*Зварювальний агрегат типу АДД-4001С* складається з дизельного двигуна, який обертає ротор генератора постійного струму. Керування зварювальним струмом здійснюється як місцево, так і дистанційно за допомогою виносного пульта. Регулювання струму – плавно-ступінчасте. Агрегат може розміщуватися на рамі або на шасі.

*Агрегат АДД-502* відрізняється від попередньо розглянутих тим, що може забезпечувати роботу двох постів ручного дугового зварювання або одного поста механізованого зварювання під флюсом, головним чином при будівництві магістральних трубопроводів. В агрегаті дизельний двигун повітряного охолодження та двопостовий вентиляльний зварювальний генератор за допомогою фланцю утворюють спільний силовий блок, закріплений на рамі. Вентильний генератор складається з двох самостійних однопостових двопакетних індукторних генераторів трифазного струму, змонтованих в одному корпусі на однім валу, та вентиляльних блоків.

Регулювання зварювального струму здійснюється дистанційними реостатами, загальне керування агрегатом та контроль за його роботою – з пульта керування, розташованого на передній стінці агрегату.

Зварювальні агрегати серії АДД та АДБ з вентильними генераторами випускають у Литві (АТ "Велга"), у Росії (АТ "Искра"). В Україні агрегати АДД-4001С виробляють ВАТ "Фірма СЭЛМА" та Електромеханічний завод (м. Ніжин).

### **3.4.3. Агрегати на базі асинхронних, безщіткових генераторів**

*Агрегати 170SB/H та 250SD/ES* (табл.2.2) належать до зварювальних агрегатів з генераторами трифазного (400 В) або однофазного (230 В) струму для ручного дугового зварювання електродами основного типу. Генератори забезпечують оптимальну напругу збудження дуги та достатньо високу якість зварювання. Приводом агрегату 170SB/H служить бензиновий двигун типу HONDA-GX270, а агрегату 250SD/ES – дизель типу RUGGERINI ECD MD190. Агрегати оснащені автоматичними запобіжними термовимикачами та системами аварійного вимикання при аваріях в електричному колі.

*Агрегати 400S-DD 500DZ, 600DPW* призначені для зварювання у важких умовах при будівництві та ремонті трубопроводів з використанням електродів з целюлозним покриттям. Можуть одночасно використовуватися і як генератори струму. Налаштування та регулювання режиму зварювання – дистанційні. Генератори мають систему автоматичної установки форми зовнішньої характеристики, яка забезпечує надійне збудження зварювальної дуги та стабільну роботу у широкому діапазоні струмів. Приводами генераторів служать дизелі типу DEUTZ або PERKINS.

### **Контрольні питання**

1. Які типи машинних джерел живлення використовують для електродугового зварювання?
2. Як формуються зовнішні вольт-амперні характеристики колекторного зварювального генератора; вентильного генератора?
3. Якими показниками оцінюють динамічні властивості зварювальних генераторів?
4. Якими конструктивними особливостями характеризуються машинні джерела живлення залежно від умов застосування?

## Глава 4

### ВИПРЯМЛЯЧІ ДЛЯ ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ

Зварювальні випрямлячі – це статичні перетворювачі змінного струму трифазної мережі у напругу постійного струму, яка використовується для зварювання.

Зварювальні випрямлячі мають значні переваги перед електромашинними перетворювачами: високі зварювальні якості за рахунок підвищення стабільності горіння дуги та зменшення розбризкування металу; високий ККД і знижені втрати холостого ходу, що особливо важливо для джерел живлення з невеликим показником ПН (ПВ); широкі межі регулювання струму і напруги; можливість автоматизації та програмування параметрів зварювального процесу; відсутність частин, що обертаються, та необхідності у фундаментах для установки, менша маса і габарити; безшумність у роботі. Завдяки прогресу в галузі виробництва напівпровідникових вентилів (тиристорів), розрахованих на значні напруги і струми, стало можливим розробляти та виготовляти різні типи випрямлячів для дугових способів зварювання та споріднених технологій.

Однопостові та багатопостові випрямлячі сьогодні застосовують практично для будь-яких видів дугового зварювання. Зварювальні випрямлячі випускаються на струми силою від одиниць до тисяч ампер. Регулювання вихідних параметрів може бути ступеневим та плавним. Найпоширенішим способом регулювання напруги випрямляча, завдяки своїй простоті, є зміна числа витків первинних обмоток трансформатора за допомогою перемикачів. Але при цьому зростає розрахункова потужність трансформатора, знижується коефіцієнт його використання при зварюванні на максимальних струмах через виключення з роботи частини первинної обмотки.

Плавне регулювання напруги забезпечується вмиканням дроселів насичення з внутрішнім зворотним зв'язком, застосуванням реактивних подільників напруги, які підключаються до частини вторинної обмотки трансформатора, або тиристорним регулятором.



## 4.1. Принциповий склад зварювального випрямляча

Випрямлячі для дугового зварювання складаються взагалі з кількох блоків та пристроїв (рис.4.1): силового трансформатора 1, випрямного блока 2, стабілізуючого дроселя 3, пускової, захисної та вимірювальної 4 і регулювальної 5 апаратури. Спеціалізовані випрямлячі містять низку інших елементів, які полегшують ведення процесу зварювання

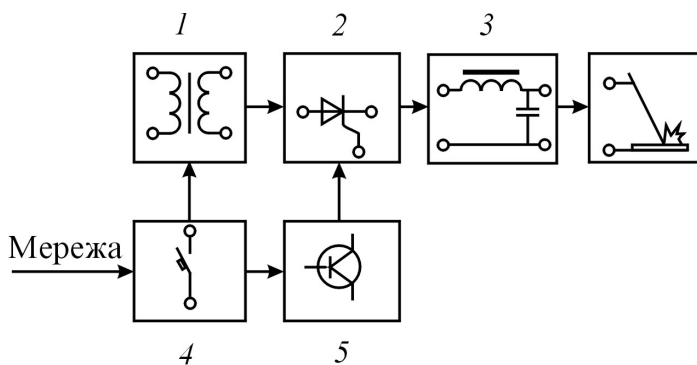


Рис. 4.1. Загальна блок-схема випрямляча

### *Силовий трансформатор.*

Найбільш доцільним у випрямлячах для дугового зварювання стало використання трифазного струму. Тому для живлення випрямних блоків, як правило, застосовують знижувальні трифазні трансформатори. Для малопотужних зварювальних випрямлячів побутового призначення застосовують однофа-

зні силові трансформатори.

Зовнішня вольт-амперна характеристика багатьох випрямлячів визначається ВАХ трансформатора. У випрямлячах з жорсткою зовнішньою характеристикою застосовують трансформатори з малим (нормальним) електромагнітним розсіюванням. У випрямлячах із крутоспадними характеристиками – трансформатори з підвищеним електромагнітним розсіюванням або з малим розсіюванням у комбінації з дроселями.

За принципом дії силові трансформатори, що живлять випрямний блок, подібні до раніше розглянутих однофазних зварювальних трансформаторів. Тому засоби формування зовнішньої характеристики випрямляча та регулювання зварювального струму також принципово подібні до розглянутих у гл.2. Але у формуванні ВАХ випрямляча може брати участь і випрямний блок, якщо він зібраний на тиристорах. Наприклад, для формування спадної ВАХ випрямляча з потрібною крутістю, використовують схему керування тиристорами зі зворотним зв'язком.

*Випрямний блок.* Головний вузол випрямляча – випрямний блок – являє собою набір напівпровідникових вентилів, увімкнутих за певною схемою. У випрямних блоках катодні та анодні групи зібрані з окремих вентилів шляхом їх паралельного та послідовного вмикання. Число паралельно увімкнутих вентилів визначається середнім значенням випрямленого струму у плечі та припустимим номінальним середнім значенням струму у вентилі. Як силові вентиля використовують кремнієві діоди або тиристори.

Переважає більшість випрямлячів як зі спадними, так і з жорсткими зовнішніми характеристиками випускається з живленням від трифазної мережі і, відповідно, з застосуванням трифазних та шестифазних схем випрямлення. В однофазних випрямлячах, побудованих за традиційними схемами, для отримання стійкого горіння дуги сумарна розрахункова потужність трансформаторів і дроселів повинна бути значно вище вихідної потужності випрямляча. Тому у зварювальній техніці розповсюджені переважно багатофазні випрямлячі.

Багатофазне випрямлення забезпечує рівномірне навантаження живильної мережі, краще використання вентилів, активних матеріалів трансформатора та дроселів, а також меншу пульсацію вихідної напруги і струму, що дуже важливо для випрямлячів з тиристорним регулюванням.

З усього різноманіття можливих варіантів схем випрямлення широкого розповсюдження у зварювальній техніці дістали такі відомі схеми, як трифазна мостова та шестифазна. Із шестифазних схем застосовуються подвійна трифазна зі зрівнювальним реактором, кільцева та проста шестифазна схема з нульовою точкою. Робота вказаних схем та їх порівняльні характеристики будуть розглянуті далі, у цій главі. Тут відзначимо, що застосування шестифазних схем випрямлення пов'язане з прагненням до покращення використання вентилів за струмом (можливе майже у два рази), незважаючи на ускладнення конструкції трансформатора, введення в окремих схемах зрівнювального реактора та використання діодів і тиристорів більш високого класу.

*Стабілізувальний дросель.* Напруга, що має місце на виході з випрямного блока, характеризується певним рівнем пульсації, тобто наявністю змінної складової. Ця складова напруги негативно впливає на динамічні властивості випрямляча, особливо при зварюванні з частими короткими

замиканнями дугового проміжку. Стабілізація вихідної напруги при зварюванні з КЗ сприяє зменшенню розбризкування електродного металу, підвищенню якості зварювання.

Для послаблення дії змінної складової випрямленої напруги між випрямним блоком і навантаженням вмикають згладжувальний фільтр. Найбільш поширені фільтри типів L та LC. При використанні випрямляча з жорсткою ВАХ у зварювальне коло вмикають стабілізувальний дросель з індуктивністю  $L = (2 \dots 5) \cdot 10^{-4}$  Гн. Це дає змогу обмежити струм короткого замикання у перехідних процесах, що викликані переносом електродного металу через дугу і, як наслідок, знизити розбризкування металу.

При зварюванні покритими електродами збільшення до певної межі індуктивності зварювального контуру також сприяє зниженню розбризкування електродного металу. Але у діодних трифазних випрямлячах, які мають силовий трансформатор з розвиненим електромагнітним розсіюванням, вводити дросель у зварювальне коло непотрібно. Дроселі обов'язкові у тиристорних випрямлячах, де вони виконують роль не тільки обмежувача струму КЗ, а й засобу згладжування струму зварювання.

Стабілізувальні дроселі виконуються зі ступінчастим та плавним регулюванням індуктивності. Для запобігання насиченню магнітопроводу дроселя його осердя часто має повітряний проміжок.

*Пускорегульовальна та захисна апаратура.* У простих за конструкцією випрямлячах пускорегульовальні пристрої також достатньо прості. Сучасні випрямлячі як багатофункціональні електротехнічні установки мають досить складну пускорегульовальну апаратуру. До її складу можна віднести пристрої для пуску випрямляча та збудження зварювальної дуги і регульовальні пристрої для настройки джерела на необхідний режим роботи за зварювальним струмом; переривники, наприклад мультівібратори, і т.ін.

До захисної апаратури випрямлячів належать пристрої, що забезпечують роботу вентилів під час виникнення перевантажень за напругою та струмом. Деякий ефект проти перевантаження вентилів дає застосування примусового повітряного охолодження випрямного блока. Тому в більшості джерел пуску випрямляча передує вмикання вентилятора повітряного охолодження.

## 4.2. Умови роботи напівпровідникових вентилів у зварювальних випрямлячах

У зварювальних випрямлячах використовуються такі силові кремнієві вентиля: некеровані вентиля – діоди та керовані вентиля – тиристори. Напівпровідникові діоди характеризуються наступними основними параметрами: середнім та максимальним значенням прямого струму  $I_{a\text{ сер}}, I_{a\text{ max}}$ , величиною спаду напруги у вентилі  $\Delta U_a$ ; максимальним припустимим значенням зворотної напруги  $U_{в.прп}$ ; припустимою температурою переходу приладу  $T_{п\text{ max}}$ .

Поряд з цим мають значення інші показники, що характеризують роботу вентилів: довговічність, ККД тощо. Властивості вентиля тим вищі, чим менше внутрішнє падіння напруги у вентилі ( $\Delta U_a$ ).

Кремнієві вентиля мають малі габарити та високі значення зворотної напруги (800...1200 В). Припустима температура нагріву для діодів  $T_{п\text{ max}} = 140...150\text{ }^\circ\text{C}$ . До недоліків кремнієвих вентилів слід віднести невисоку спроможність протистояти короткочасному перевантаженню. Навіть при невеликих перевантаженнях час роботи кремнієвого діода обчислюється частками секунди.

Кремнієві тиристори характеризуються такими ж параметрами, що й діоди. Але їм притаманні й специфічні параметри: напруга перемикаання  $U_{п}$ ; мінімальне значення струму вмикання  $I_{в}$  (або струму керування  $I_{к}$ ).

Тиристори мають більш високі значення падіння напруги у прямому напрямі. Тому припустимі навантажувальні струми в цих приладах менше, ніж у подібних діодах. Припустима температура при роботі тиристорів  $T_{п\text{ max}} = 100...125\text{ }^\circ\text{C}$ . Чутливість їх до перевантажень така ж, як і у кремнієвих діодів.

Випрямний блок джерел живлення працює у важких умовах, постійно підлягаючи змінній дії електричних, теплових та механічних факторів. Перевантаження прямими струмами, що протікають через напівпровідниковий діод, виникають під час збудження дуги або при замиканні дугового проміжку краплею розплавленого металу і перевищують його номінальне значення у 1,5...2,0 рази.

При зварюванні неплавким електродом у середовищі захисного газу зварювальна дуга збуджується імпульсом струму, який у 4...8 разів переви-

щує номінальне значення зварювального струму. У зв'язку з такими перевантаженнями напівпровідникові вентиля повинні легко витримувати перевантаження за струмом та мати радіатор для відведення виділяемого тепла.

Перевантаження за зворотною напругою на діоді виникають під час перехідних процесів (вмикання-вимикання силового трансформатора), при обриві зварювального струму та повторному збудженні дуги.

Якщо розрахункове значення струму, що протікає через діод, перевищує припустиме значення  $I_{a \max}$ , то діоди вмикають паралельно з додатковими резисторами  $R_{\text{дод}}$ . Опір цих резисторів має бути більше у 5...10 разів опору діода у прямому напрямі (рис.4.2,*а*). При перевищенні зворотної напруги на діоді їх слід вмикати послідовно (рис.4.2,*б*) у необхідній кількості. Для вирівнювання зворотних опорів діодів паралельно їм вмикають шунтувальні резистори  $R_{\text{ш}}$ , опір яких повинен бути значно менше зворотних опорів напівпровідникових вентилів. Як правило,  $R_{\text{ш}} = (0,1 \dots 0,2) R_{\text{зв}}$ .

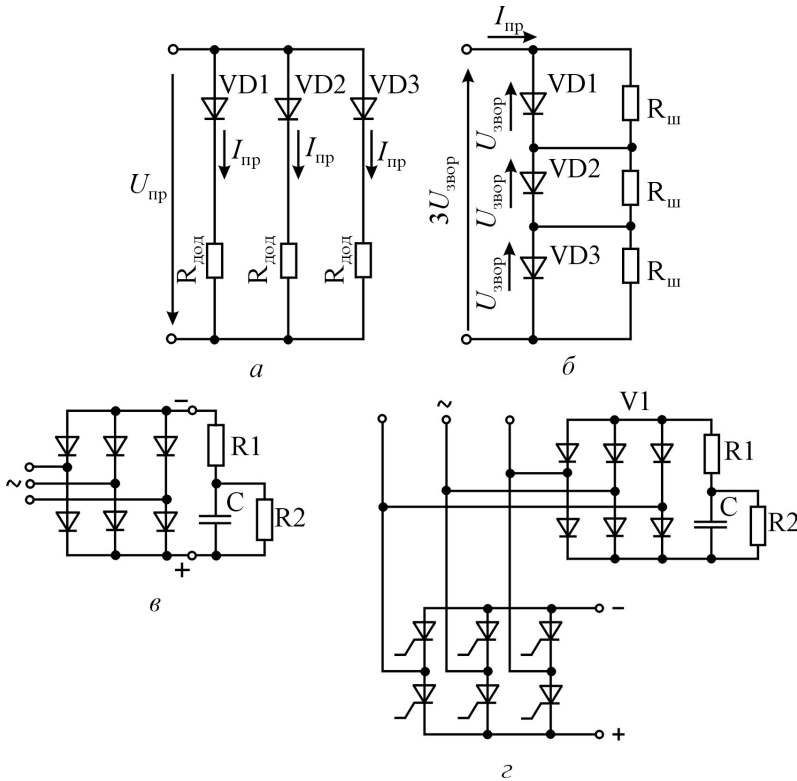


Рис. 4.2. Схеми вмикання кіл для захисту вентилів і випрямних блоків від перевантажень

Для захисту вентиляного блоку зварювального випрямляча від перенапруг використовують шунтувальні RC-кола. На рис.4.2,*в* наведено захисне коло  $R_1C$ , яке підключається при некерованих випрямних блоках до затисків кола випрямленої напруги. В тиристорних випрямлячах подібне коло підключається до вторинних обмоток трансформатора через допоміжний випрямний блок  $V_1$ , як наведено на рис.4.2,*г*. Опір резистора  $R_2$  є розрядним. Параметри елементів захисного кола визначаються таким чином:

а) ємність конденсатора для захисту від перенапруг, що виникають у момент вимикання трифазного силового трансформатора,

$$C \approx \frac{\varepsilon S_T}{(2U_{\text{в.прип}})^2 f}, \quad (4.1)$$

де  $\varepsilon = I_{\text{нмг}} / I_{1\text{н}}$  – відносне значення намагнічувального струму;  $I_{\text{нмг}}$  – діюче значення намагнічувального струму, А;  $I_{1\text{н}}$  – номінальний струм первинної обмотки трансформатора, А;  $S_T$  – потужність трансформатора, Вт;  $U_{\text{в.прип}}$  – припустиме значення зворотної напруги діоду, В;  $f$  – частота напруги живильної мережі, Гц;

б) ємність конденсатора для захисту від перенапруг, що виникають при обриві зварювального струму,

$$C \approx \frac{e_k S_T}{20 f} \left( \frac{K_{\text{п}}}{0,8U_{\text{в.прип}} - U_{\text{р}}} \right)^2, \quad (4.2)$$

де  $e_k$  – відносне значення напруги короткого замикання трансформатора;  $K_{\text{п}}$  – відношення фактичної амплітуди струму навантаження в момент обриву струму до номінального діючого значення струму вторинної обмотки трифазного силового трансформатора (перевантаження);  $U_{\text{р}}$  – амплітуда робочої змінної напруги на вентилі.

Для вибору захисного конденсатора слід прийняти більше з розрахованих значень.

Величина  $R_1$  визначається згідно з виразом

$$R_1 \leq \frac{0,8U_{\text{в.прип}} - U_{\text{р}}}{K_{\text{п}} I_{1\text{н}}}, \quad (4.3)$$

Шунтувальний опір попередньо визначається з виразу  $R_2 \approx \tau_{\text{р}} / C$ , де  $\tau_{\text{р}} = 0,1C$  – постійна розряду конденсатора.

Вказане коло RC одночасно обмежує й комутаційні напруги на вентилях.

### 4.3. Багатофазні схеми випрямлення

Головними параметрами та співвідношеннями, що характеризують схему випрямлення, стосовно до зварювальних випрямлячів, є:

- діюче значення фазної (лінійної) вторинної напруги трансформатора  $U_{2ф}$  ( $U_{2л}$ ) залежно від напруги холостого ходу випрямляча  $U_0$ ;
- амплітудне значення зворотної напруги на вентилі  $U_{в\max}$ ;
- середнє значення випрямленого струму через вентиль  $I_{в.сер}$ ;
- діюче  $I_{в}$  та максимальне  $I_{в\max}$  значення струму через вентиль;
- розрахункова потужність трансформатора  $S_T$ .

Середнє, діюче та максимальне значення струму через вентиль визначають втрати у вентилях, а також характеризують роботу випрямного блоку в режимі короткого замикання. Розрахункова потужність трансформатора визначає його пропускну спроможність при синусоїдальних струмах в обмотках та характеризує витрати його активних матеріалів.

Розглянемо особливості основних багатофазних схем випрямлення.

*Трифазна мостова схема випрямлення.* Це найбільш розповсюджена схема у випрямлячах з жорсткими та спадними зовнішніми характеристиками, особливо, коли регулювання струму і напруги здійснюється системами без застосування тиристорів. Схема забезпечує досить просту конструкцію трансформатора, що містить три первинні і відповідно три вторинні обмотки, та найбільш ефективно його використання. Обмотки трансформатора можуть вмикатися трикутником або зіркою.

На рис.4.3 наведено трифазну мостову схему випрямлення. Розглянемо роботу та визначимо основні показники цієї схеми спочатку у варіанті випрямляча з жорсткими ВАХ (силовий трансформатор має малий індуктивний опір короткого замикання) при роботі на активно-індуктивне навантаження. Слід відзначити, що режими роботи на активне та активно-індуктивне навантаження мало відрізняються.

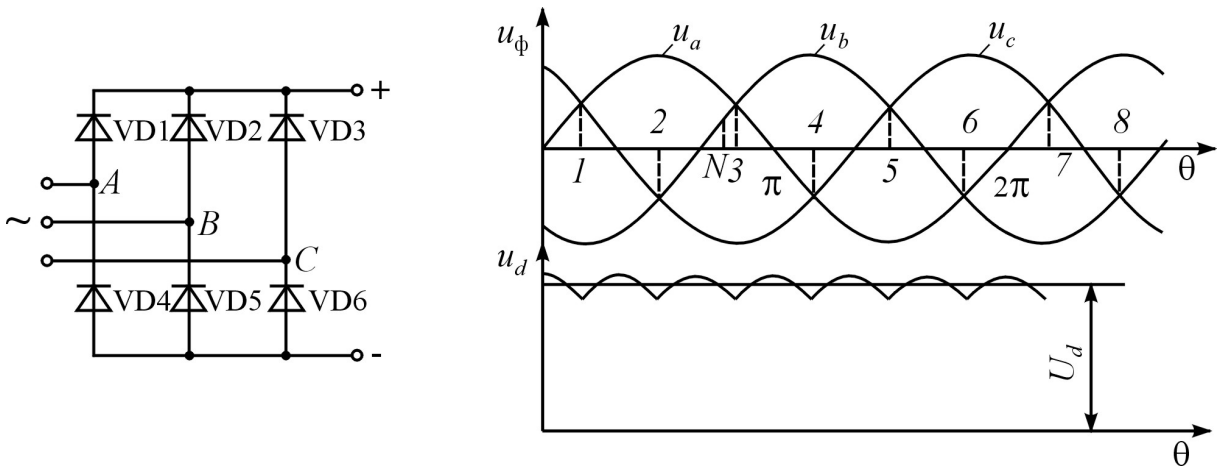


Рис. 4.3. Трифазна мостова схема випрямлення

Як видно з рис.4.3, у точці 1 вмикається вентиль VD1 фази A як такий, що має найбільший позитивний потенціал з усіх вентилів катодної групи відносно до нульової точки мережної напруги трансформатора; з ним у парі працює вентиль VD5 фази B, який має найбільший негативний потенціал з усіх вентилів анодної групи. У точці 2 виникає комутація струму у вентилях анодної групи – вмикається вентиль VD6 фази C. У точці 3 виникає комутація струму у вентилях катодної групи – вмикається вентиль VD2 фази B і так далі. Комутація з одного вентиля на інший виникає у момент перетинання синусоїд фазних напруг вторинної обмотки трансформатора. Таким чином, при відсутності індуктивного опору в анодних колах вентилів вони працюють попарно з кутом провідності  $2\pi/3$ . У реальних умовах через наявність деякої індуктивності у контурі комутації кут провідності більший за  $2\pi/3$  на кут комутації  $\gamma$  і робота вентилів здійснюється попарно та по три. Випрямлена напруга (миттєве значення) визначається лінійною напругою, яка через вентиля, що працюють у даний момент, подається на вихідні клеми випрямляча. Наприклад, у точці N напруга  $U_d = U_{AC}$ .

Пульсація випрямленої напруги – шестифазна з частотою 300 Гц (при частоті фазних напруг мережі 50 Гц). Тривалість анодних струмів без урахування комутаційних ділянок 120 ел. град.

Середнє значення випрямленої напруги при холостому ході випрямляча розраховується за формулою

$$U_0 = \frac{3}{\pi} \int_{-\pi/6}^{\pi/6} \sqrt{6} U_{2\phi} \cos \theta d\theta = 2,34 U_{2\phi} = 1,35 U_{2л}. \quad (4.4)$$



Зворотна напруга на вентилях  $U_{B \max} = 2,45U_{2\phi} = 1,41U_{2л} = 1,045U_0$ .

Діюче значення струму через вентиль  $I_B = 0,816I_d$  ( $I_d$  – сила випрямленого струму випрямляча).

У випрямлячах зі спадними ВАХ, які мають значний індуктивний опір в анодних колах вентилів, наприклад, у випадку застосування силових трансформаторів з пересувними котушками, вентилях у діапазоні  $0 \leq U_d/U_0 \leq 0,7$  працюють на зварювальну дугу одночасно по три з кутом провідності, близьким до  $\pi$ . У цьому випадку  $I_B = 0,745I_d$ .

Середнє значення струму через вентиль  $I_{B, \text{сеп}} = 0,333I_d$ . Максимальне значення струму  $I_{B \max} = 3,14I_{B, \text{сеп}}$ . Діюче значення струму у вентилю:  $I_B = 1,73I_{B, \text{сеп}}$  – при жорстких зовнішніх ВАХ;  $I_B = 1,57I_{B, \text{сеп}}$  – при спадних зовнішніх ВАХ. Розрахункова потужність трансформатора:  $S_{TЖ} = 3U_{2\phi}I_2 = 1,05I_dU_0$  – при жорстких ВАХ;  $S_{TC} = 0,95I_dU_0$  – при спадних ВАХ.

При роботі керованого тиристорного випрямляча кут керування  $\alpha$  відраховується від точки природної комутації (точка переходу струму з вентиля однієї фази на вентиль іншої фази для некерованого випрямляча).

Тиристорні зварювальні випрямлячі незалежно від виду зовнішніх ВАХ виконуються з застосуванням силових трансформаторів з малим індуктивним опором розсіювання. У цьому випадку при роботі на активне навантаження випрямлений струм є безперервним при  $\alpha \leq 60$  ел. град та перервним при  $\alpha > 60$  ел. град:

$$U_{0\alpha} = 2,34U_{2\phi} \cos\alpha = U_0 \cos\alpha \quad \text{при } \alpha \leq 60 \text{ ел.град};$$

$$U_{0\alpha} = U_0 [1 + \cos(\pi/3 + \alpha)] \quad \text{при } \alpha > 60 \text{ ел.град}.$$

З урахуванням того, що тиристорні випрямлячі містять спеціальний дросель для згладжування форми випрямленого струму, напруга визначається як  $U_d = 2,34U_{2\phi} \cos\alpha$ .

Для забезпечення нормальної роботи випрямляча ширина імпульсів керування, що подаються на тиристори, повинна бути більше за 60 ел.град. Можливе також подавання двох керуючих імпульсів, зсунутих між собою на 60 ел.град, при ширині імпульсу 25...30 ел.град.

Кола керування тиристорів анодної групи повинні мати гальванічну розв'язку.

*Подвійна трифазна схема зі зрівнювальним реактором.* Найбільш розповсюджена ця схема в тиристорних випрямлячах на струми до 500А. Порівняно з іншими шестифазними схемами випрямлення вона забезпечує найбільш ефективне використання вентилів (найменші втрати, найбільша навантажувальна спроможність, найменший  $I_{B \max}$ ).

Трансформатор у такому випрямлячі має шість вторинних обмоток, що утворюють дві трифазні групи, кожна з яких з'єднана у зірку; ЕРС відповідних фаз зсунуті на 180 ел.град. Обидві групи з'єднані між собою зрівнювальним реактором, який забезпечує їх паралельну роботу шляхом вирівнювання напруги між ними. Зрівнювальний реактор являє собою дросель з замкненим феромагнітним магнітопроводом, що має дві однакові обмотки.

Дію реактора наведено на рис.4.4. Безперервними лініями показані фазні напруги однієї зірки, а штриховими – другої. Різницю миттєвих значень фазних напруг у процесі їх чергування характеризують ординати заштрихованих площадок. Ця різниця напруг наводиться у секціях зрівнювального реактора  $L_{зр}$ , якщо хоча б по одній з них проходить невеликий намагнічувальний струм. У секціях реактора наводяться напруги  $U_{31} = U_{32} = 0,5U_3$ , що мають різні знаки по відношенню до загального виводу; у зв'язку з цим анодні напруги однієї зірки зменшуються на  $U_{31}$ , а другої – зростають на  $U_{32}$ . Фазні напруги вирівнюються, що й приводить до паралельної роботи трифазних груп. Приблизно  $U_3 = 0,5U_{2ф}$ .

Крива випрямленої напруги  $U_d$  наведена на рис.4.4. Тривалість проходження анодних струмів (без урахування комутаційних ділянок) складає 120 ел.град, а амплітуда струмів у вентилях – половину амплітудного значення випрямленого струму. Випрямляч має дві комутуючі групи вентилів: VD1...VD3 та VD4...VD6. Комутація здійснюється тільки між вентилями однієї трифазної групи. У випрямлячах з жорсткими зовнішніми характеристиками вентилялі працюють попарно. Таким чином, при малих струмах навантаження випрямляч працюватиме у режимах, що відповідають простій шестифазній схемі з нульовою точкою; при струмах, більших за критичний ( $0,01I_d$ ), розпочинається робота двох паралельних груп або подвійний трифазний режим. Первинна обмотка трансформатора може бути ввімкнута зіркою або трикутником. Пульсація випрямленої напруги має частоту 300 Гц.

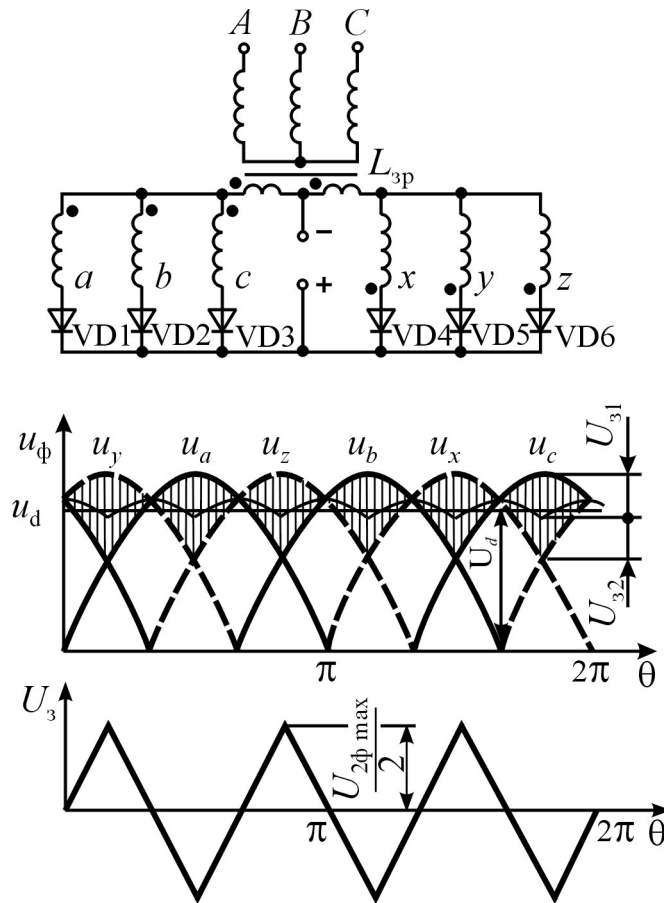


Рис. 4.4. Подвійна трифазна схема зі зрівнювальним реактором

Середнє значення випрямленої напруги при холостому ході  $U_0 = 1,35U_{2\phi}$ ;  $U_0 = 1,35U_{2\phi} \cos \alpha$  при роботі у режимах, що відповідають простій шестифазній схемі.

Зворотна напруга на вентилях  $U_{в\max} = \sqrt{6} U_{2\phi} = 2,09U_0$ . Діюче значення вторинного струму  $I_{в} = 0,29I_d$ .

У випрямлячах зі спадними зовнішніми характеристиками у діапазоні  $0 \leq U_d/U_0 \leq 0,65$  одночасно працюють по три вентиля з кутом провідності, близьким до  $\pi$ . У цьому випадку значення  $I_{в}$  знижується.

Потужність зрівнювального реактора  $S_{зр}$  складає при відсутності тиристорного регулювання близько  $0,007P_d$ , при тиристорному регулюванні  $0,2P_d$ , де  $P_d = I_d U_0$ .

Схема має підвищену чутливість до асиметрії фазових зсувів керуючих імпульсів. Порушення симетрії імпульсів приводить до перерозподілу навантаження між трифазними випрямними групами, що працюють паралельно.

Крім того, нормальна паралельна робота тиристорів різних трифазних груп забезпечується за умови, що ширина імпульсів керування становить не менше 60 ел.град.

*Проста шестифазна схема з нульовою точкою.* Така схема випрямлення застосовується значно рідше, ніж вище розглянута, тому, що вона забезпечує гірше використання силового трансформатора та вентилів. Без урахування комутаційних ділянок тривалість струму, що протікає через вентилі, та струму у фазі вторинної обмотки трансформатора складає 60 ел.град. У зв'язку з цим зростають втрати у вентилях, максимальне значення  $I_{B \max}$ , знижується навантажувальна спроможність випрямного блока. Трансформатор має всього шість вторинних обмоток, з'єднаних у шести-фазну зірку (рис.4.5). Первинна обмотка трансформатора може з'єднуватися лише трикутником.

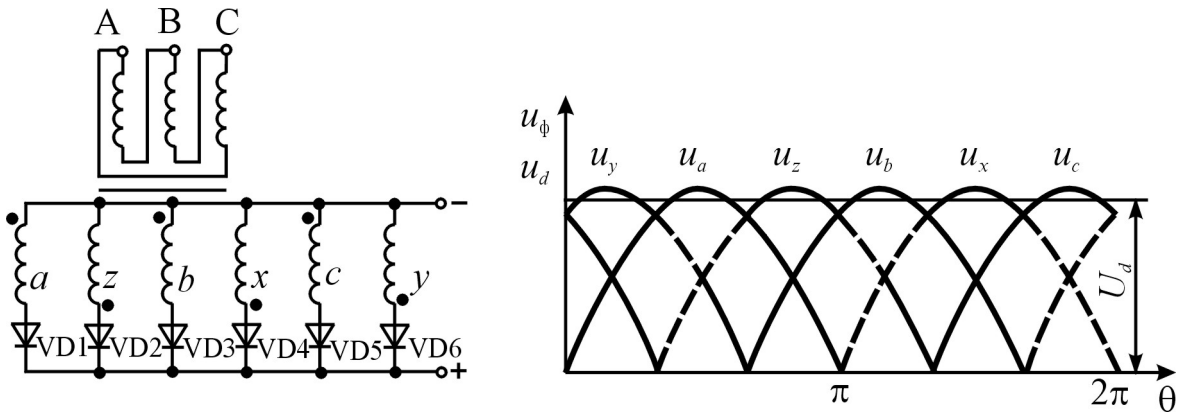


Рис. 4.5. Проста шестифазна схема з нульовою точкою

Якщо первинну обмотку з'єднати у зірку, то виникає пульсуючий струм примусового намагнічування, що приводить до насичення магнітопроводу трансформатора, значно збільшуються його індуктивні опори, зменшується середнє значення випрямленої напруги та збільшується крутість спадання зовнішньої характеристики.

Пульсація випрямленої напруги – 300 Гц. Зворотна напруга на вентилі  $I_{B \max} = 2,09U_0$ . Нормальна робота випрямляча забезпечується при ширині імпульсу керування 5 ел.град.

*Кільцева схема випрямлення.* Це одна з найбільш розповсюджених схем випрямлення в однопостових та багатопостових зварювальних випрямлячах на великі струми. При відсутності зрівнювального реактора

схема забезпечує, як і подвійна трифазна схема зі зрівнювальним реактором, добре використання зварювального трансформатора, але використання вентилів дещо гірше. Трансформатор випрямляча має шість вторинних обмоток, а блок вентилів замкнений у коло (рис.4.6).

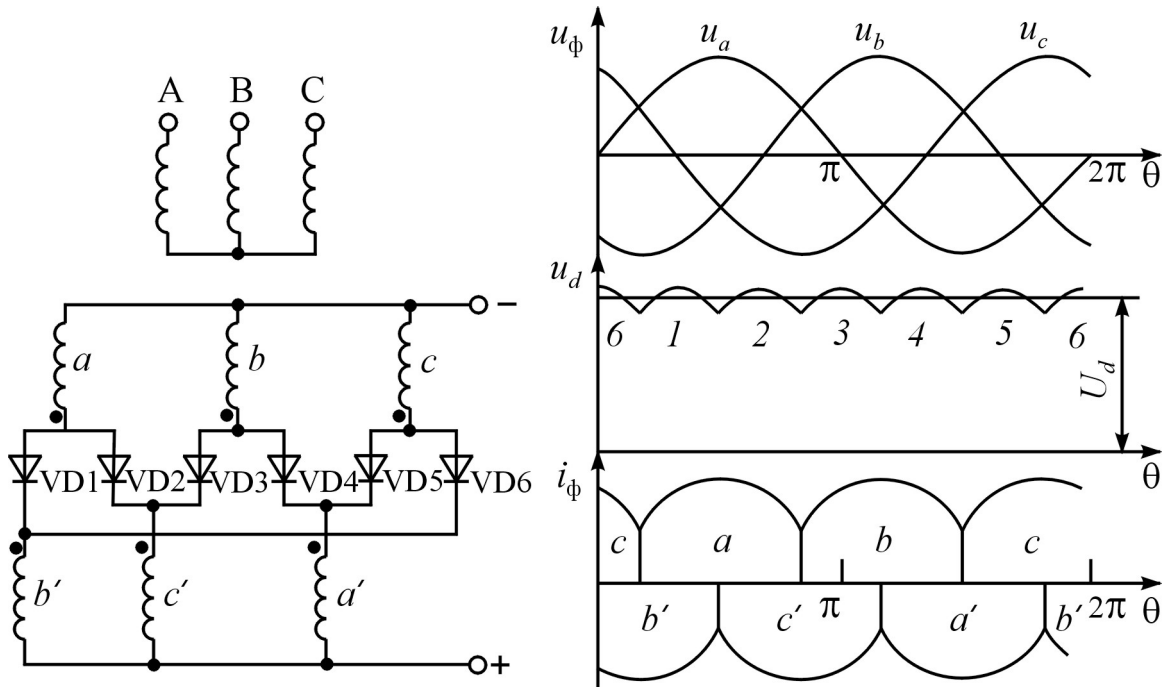


Рис. 4.6. Кільцева схема випрямлення

Тривалість роботи вентилів без урахування комутації складає 60 ел.град. Одночасно кожна з вторинних обмоток, як показано на діаграмі фазних струмів  $i_{\phi}$  (рис.4.6) працює протягом 120 ел.град. Первинна обмотка трансформатора може з'єднуватися трикутником або зіркою.

Амплітудне значення зворотної напруги на вентилі  $U_{в\max} = 4,9U_{2\phi}$ .

Мінімальна ширина керуючих імпульсів у випадку тиристорного регулювання має бути 5 ел.град. Для керування тиристорами потрібні три гальванічно ізольованих джерела живлення.

Основні співвідношення, що характеризують роботу розглянутих схем випрямлення, наведені у табл.4.1.

**Таблиця 4.1. Основні співвідношення, що характеризують схеми випрямлення**

Схема випрямлення	Зворотна напруга на вентилі $\frac{U_{\text{вmax}}}{U_0}$	Середнє значення струму вентилля $\frac{I_{\text{в.сер}}}{I_d}$	Діюче значення струму вентилля $\frac{I_{\text{в}}}{I_d}$	Розрахункова потужність трансформатора $\frac{S_{\text{Т}}}{P_d}$
Трифазна мостова	1,045	0,333	0,578	1,05
Подвійна трифазна зі зрівнювальним реактором	2,09	0,167	0,288	1,33
Проста шестифазна з нульовою точкою, кільцева			0,41	1,26

Найпоширеніші у зварювальних випрямлячах трифазна мостова, подвійна трифазна зі зрівнювальним реактором та шестифазна кільцева схема випрямлення. Аналіз співвідношень для цих схем показує: кожна з них має свої переваги та недоліки. У трифазній мостовій схемі розрахункова потужність трансформатора менше порівняно з двома іншими, але необхідно використовувати більш потужні напівпровідникові вентилі. У подвійній трифазній схемі зі зрівнювальним реактором найкраще завантаження вентилів, але більша розрахункова потужність трансформатора. Кільцева схема займає проміжне положення як за завантаженням вентилів, так і за потужністю трансформатора.

#### **4.4. Принципи формування зовнішніх характеристик та регулювання вихідних параметрів зварювальних випрямлячів**

Однією з головних особливостей зварювальних випрямлячів є поєднання в одному електричному апараті кіл змінного та постійного струму. Ця особливість суттєво ускладнює визначення та аналіз співвідношень, що характеризують роботу випрямляча при різних режимах навантаження.

До кола змінного струму входять мережа живильної напруги, силовий трансформатор, регулятор зварювального струму (наприклад, дросель насичення), які мають значний індуктивний  $X_{L1}$  та активний  $R_1$  опори, а також блок вентилів з активним опором  $R_{\text{в}}$ .

До кола постійного струму у загальному випадку входять стабілізувальний дросель з індуктивним  $X_{L2}$  та активним  $R_2$  опором, зварювальні кабелі та електроди з відповідними активними опорами. Головним видом навантаження випрямляча є зварювальна дуга.

Аналіз роботи зварювального випрямляча зручно проводити за допомогою схеми заміщення, яка складається для заданих параметрів живильного та зварювального кіл. При створенні схеми заміщення параметри кола випрямленого струму приводяться до параметрів кола змінного струму. Складена схема заміщення дає змогу отримати рівняння зовнішньої вольт-амперної характеристики та принципово визначити засоби регулювання вихідних параметрів для будь-якого типу зварювального випрямляча.

Розглянемо, наприклад, схему випрямляча з дроселем насичення, наведену на рис.4.7, яка характеризується параметрами, вказаними у табл.4.2.

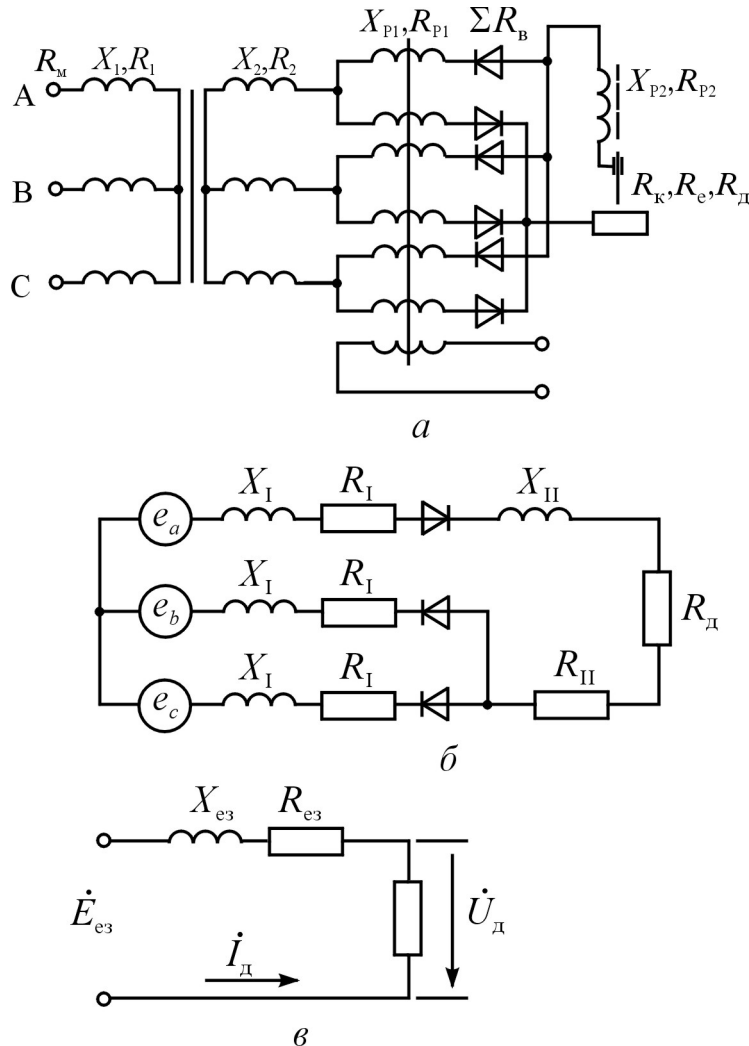


Рис. 4.7. Спрощена силова (а) вихідна (б) та еквівалентна (в) схема випрямляча з дроселем насичення

Для складання схеми заміщення визначимо опори кіл змінного та постійного струму.

Активний опір кола змінного струму

$$R_1 = R'_M + R_T + \sum R_B,$$

де  $R'_M$  – опір живильної мережі, приведений до кола вторинної обмотки силового трансформатора;  $R_T$  – сумарний опір силового трансформатора та дроселя насичення у режимі короткого замикання, приведені до кола вторинної обмотки трансформатора;  $\sum R_B$  – розрахунковий опір вентилів у двох плечах мостової схеми.

**Таблиця 4.2. Вихідні опори схеми заміщення випрямляча**

Елемент	Коло змінного струму		Коло постійного струму	
	Індуктивний опір $X$	Активний опір $R$	Індуктивний опір $X$	Активний опір $R$
Мережа		$R_M$		
Силовий трансформатор: первинні обмотки вторинні обмотки	$X_1$	$R_1$		
	$X_2$	$R_2$		
Робочі обмотки дроселя насичення	$X_{P1}$	$R_{P1}$		
Блок вентилів		$\sum R_B$		
Стабілізуючий дросель			$X_{P2}$	$R_{P2}$
Зварювальні кабелі				$R_K$
Зварювальний електрод				$R_e$
Зварювальна дуга				$R_d$



## Активний опір кола постійного струму

$$R_{II} = R_{p2} + R_K + R_e + R_d.$$

Сумарний індуктивний опір силового трансформатора  $X_T$  і дроселя  $X_{p1}$  у режимі короткого замикання, приведені до кола вторинної обмотки трансформатора, позначимо як  $X_I$ , індуктивний опір стабілізувального дроселя – як  $X_{II}$ , а діючі значення ЕРС у кожній фазі – як  $e_a$ ,  $e_b$  та  $e_c$ . Тоді вихідна схема заміщення випрямляча буде мати вигляд, як показано на рис.4.7,б.

Для складання еквівалентної схеми заміщення (рис.4.7,в) виконаємо приведення кола випрямленого струму до кола змінного струму за допомогою наступних виразів:

$$R_{e.3} = R_I + 2/3 R_{II}; \quad X_{e.3} = X_I + 2/3 X_{II},$$

де  $R_{e.3}$  та  $X_{e.3}$  – еквівалентні активний та індуктивний опори схеми заміщення;  $2/3$  – коефіцієнт приведення.

Еквівалентна схема заміщення має одну діючу змінну ЕРС  $E_{e.3}$ , що відповідає значенню ЕРС  $e_2$  або  $e_3$  ( $e_2$ ;  $e_3$  – діючі значення ЕРС при дво- або тривентильній комутації струму).

Для отриманої еквівалентної схеми заміщення рівняння зовнішньої ВАХ випрямляча можна записати у символічній формі:

$$\dot{U}_{дж} = \dot{E}_{3.0} - \dot{I}_d (jX_{e.3} + R_{e.3}) \cong \dot{U}_d. \quad (4.5)$$

Аналіз рівняння (4.5) показує, що формування зовнішньої характеристики випрямляча принципово можна здійснювати двома шляхами: 1) зміною індуктивного опору силового трансформатора або дроселя –  $X_{e.3}$ ; 2) зміною активного опору випрямного блока –  $R_{e.3}$  (іншими складовими параметра  $R_{e.3}$  можна знехтувати через їх незначність).

Форма зовнішньої характеристики і спосіб регулювання вихідних параметрів випрямляча визначатимуться співвідношеннями між  $X_{e.3}$  та  $R_{e.3}$ . При цьому можливі три випадки:

$$1. X_{e.3} \cong 0; R_{e.3} \cong 0.$$

Тоді рівняння (4.5) набирає вигляду

$$\dot{U}_{дж} = \dot{E}_{30} = \text{const},$$

тобто ВАХ випрямляча – жорстка  $\left( \frac{dU_{дж}}{dI} = 0 \right)$ .

Регулювання вихідної напруги здійснюється за допомогою силового трансформатора з малим електромагнітним розсіюванням шляхом зміни коефіцієнта трансформації.

$$2. R_{e.3} \cong 0; X_{e.3} > 0.$$

Тоді

$$\dot{U}_{дж} = \dot{E}_{30} - jI_d X_{e.3}.$$

При збільшенні струму навантаження вихідна напруга випрямляча зменшується, тобто ВАХ випрямляча – спадна  $\left( \frac{dU_{дж}}{dI} < 0 \right)$ . Крутість спадання ВАХ визначається величиною  $X_{e.3}$ .

$$\text{При цьому } X_{e.3} = X_T + X_{P1} + \frac{2}{3} X_{P2}.$$

Якщо  $X_T = 0$ , то спадна характеристика формується за рахунок послідовного вмикання з силовим трансформатором у коло змінного струму дроселя, який одночасно є й регулятором зварювального струму. Якщо  $X_T > 0$ , то характеристику випрямляча формує силовий трансформатор; він має розвинене електромагнітне розсіювання і виконує функції регулятора зварювального струму.

$$3. X_{e.3} \cong 0; R_{e.3} > 0.$$

У цьому випадку форма зовнішньої характеристики випрямляча може бути як жорсткою, так і спадною тому, що  $R_{e.3} \cong \sum R_B$ , тобто активний опір випрямляча визначається, головним чином, активним опором випрямного блока, зібраного на тиристорах. Формування зовнішньої характеристики випрямляча та регулювання вихідних параметрів забезпечується системою фазового керування тиристорами.

## 4.5. Однопостові випрямлячі

Однопостові зварювальні випрямлячі – найбільш масова група випрямлячів, що використовуються у різних галузях народного господарства для різних способів зварювання.

Однопостові випрямлячі за формою зовнішньої характеристики та функціональним призначенням можна поділити на такі групи:

зі спадними вольт-амперними характеристиками (ВАХ) для ручного дугового зварювання покритими електродами та механізованого зварювання під флюсом;

з жорсткими ВАХ для механізованого зварювання плавким електродом у захисних газах;

з універсальними ВАХ (крутоспадними та жорсткими) для декількох способів зварювання.

Промислові зразки однопостових випрямлячів мають різні системи регулювання вихідних параметрів – струму і напруги. Найбільш розповсюджені з них – це механічні. Використовуються також дроселі насичення, тиристорні регулятори, а також спосіб зміни коефіцієнта трансформації силового трансформатора; значно рідше – за допомогою баластних реостатів.

### 4.5.1. Випрямлячі за спадними зовнішніми характеристиками

Це найпоширеніша категорія випрямлячів; основні параметри цих джерел живлення регламентовані ГОСТ 13821-77Е.

Такі випрямлячі характеризуються стабільністю початкового збудження дуги і процесу зварювання, доброю якістю формування шва та порівняно малим розбризкуванням електродного металу. Перенесення металу при оптимальних режимах ручного дугового зварювання відбувається з періодичними замиканнями краплями дугового проміжку і лише при подовженні дуги можлива крупнокраплинна форма перенесення без коротких замикань.

Проведені дослідження процесів перенесення електродного металу через дугу при живленні її від випрямлячів при ручному дуговому зварюванні визначили основні вимоги до конструкції випрямлячів зі спадними зовнішніми характеристиками. Встановлено, що випрямлячі для ручного дугового

зварювання на струми до 500 А, які мають як регулюючий орган трансформатори з розвиненим електромагнітним розсіюванням, доцільно виготовляти за трифазною мостовою схемою випрямлення. Застосування подвійної трифазної та простої шестифазної схем випрямлення нераціональне.

*Випрямлячі з механічним регулюванням* – це одні з найпростіших за конструкцією джерел живлення для ручного дугового зварювання. Вони надійні у роботі, легкі в обслуговуванні, мають високі зварювальні властивості. Для формування спадних зовнішніх характеристик та регулювання зварювального струму використовуються головним чином дві системи механічного регулювання: трансформатори з рухомими магнітними шунтами та трансформатори з пересувними обмотками. Трансформатори з рухомими шунтами у трифазному варіанті широко використовуються у сучасних зразках вітчизняних та закордонних зварювальних випрямлячів. Основна перевага даної системи регулювання – можливість досягнення достатньо широких меж зварювального струму в одному діапазоні. Але це потребує дуже точного забезпечення повітряного зазору (0,5 мм) між шунтом і стрижнями трансформатора, що являє собою складне технологічне завдання. Крім того, трифазні трансформатори з магнітним шунтом мають велику асиметрію магнітних полів розсіювання, а також лінійних та фазних струмів, що потребує застосування спеціальних конструктивних рішень для вирівнювання магнітного поля.

В Україні (ВАТ "Фірма СЭЛМА") серійно випускаються випрямлячі ВД-131, ВД-306М, ВД-306С з пересувними магнітними шунтами, технічна характеристика яких наведена у дод.2 (табл.2.3).

У випрямлячах для ручного дугового зварювання широко застосовуються трансформатори з пересувними обмотками. Такий вид регулювання мають випрямлячі ВД-306, ВД-401. Асиметрія магнітних полів, вторинних напруг, лінійних та фазних струмів у таких трансформаторів значно менша, ніж у трансформаторів з рухомими шунтами.

Два діапазони струму дають змогу значно розширити межі регулювання (див. дод.2, табл.2.3).

Випрямляч ВД-306 (рис.4.8,*a*) містить випрямний блок 1 з вентилятором та трифазний знижувальний трансформатор 2 з розвиненим електромагнітним розсіюванням, що закріплені на металевій рамі, яка встановлена на двох колесах 4. Конструкція захищена кожухом і кришкою, на якій розміщена рукоятка 3 плавного регулювання зварювального струму. На лицевій панелі розташовані рознімачі 5 для підключення зварювальних кабелів, перемикач діапазонів 6 та транспортувальні рукоятки 7.

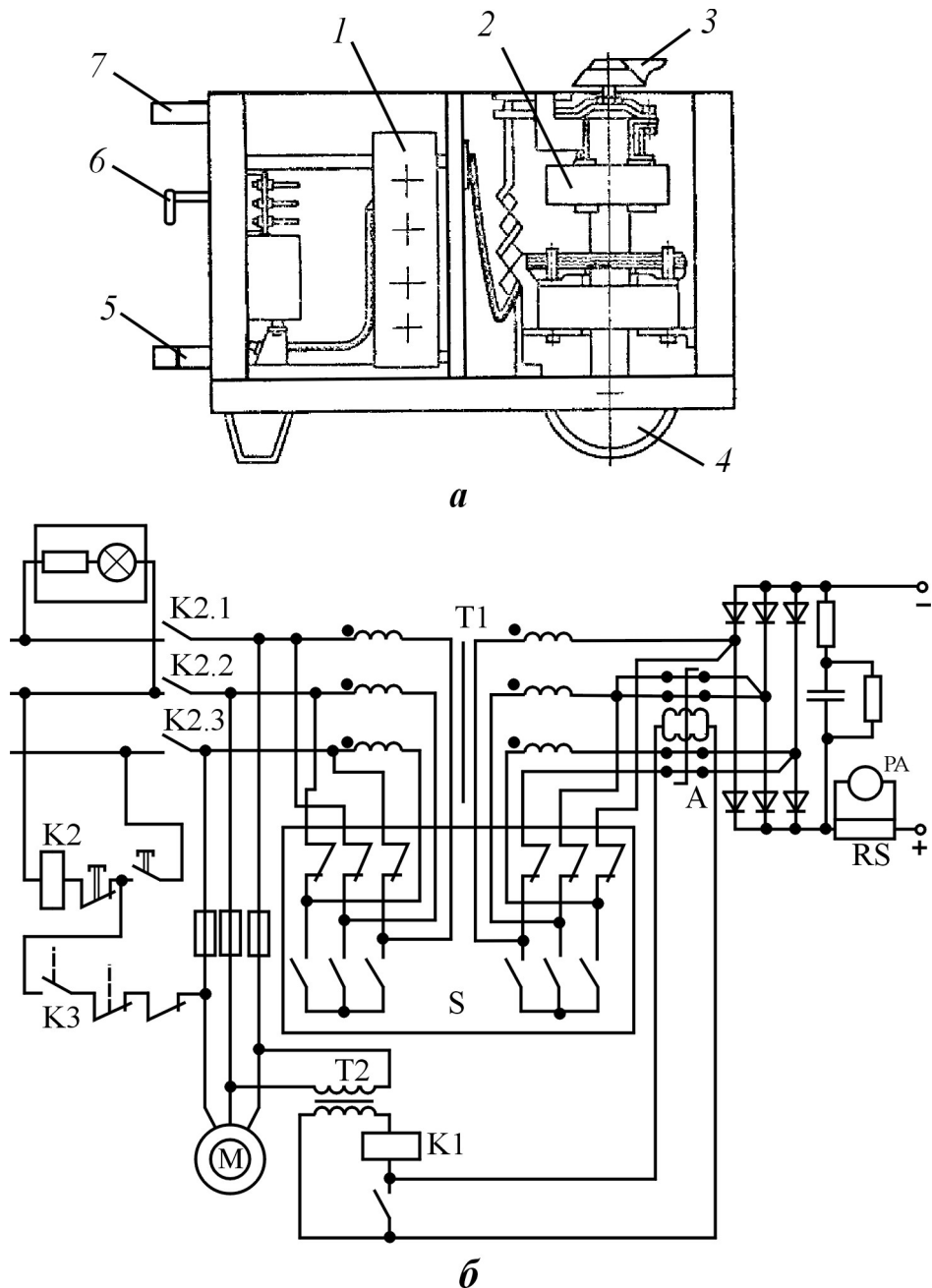


Рис. 4.8. Конструкція (*a*) та спрощена електрична схема (*б*) випрямляча ВД-306

Перемикання діапазонів здійснюється шляхом з'єднання первинних та вторинних обмоток трансформатора Т1 (рис.4.8,*б*) "трикутник-трикутник" (діапазон великих струмів) або "зірка-зірка" (діапазон малих струмів). Такий спосіб отримання двох діапазонів дає змогу змінити зварювальний струм у три рази без додаткових витрат активних матеріалів. Плавне регулювання струму в межах кожного діапазону здійснюється через зміну відстані між котушками обмоток трансформатора. При зближенні котушок індуктивність розсіювання обмоток та їх індуктивні опори зменшуються – зварювальний струм зростає. При збільшенні відстані між обмотками струм зменшується. Рухомими є котушки первинної обмотки, котушки вторинної обмотки закріплені біля верхнього ярма магнітопроводу трансформатора.

Випрямні блоки ВД-306 та ВД-401 виконані за трифазною мостовою схемою випрямлення на кремнієвих вентилях В200 класу 3 та вище. Вентиляція – повітряна примусова. Нормальна робота системи вентиляції контролюється повітряним реле К3. Перемикання діапазонів здійснюється перемикачем S.

Випрямляч ВД-306 має систему захисту, що відключає його від мережі у випадку виходу з одного з вентилів випрямного блока або при пробойі на корпус вторинної обмотки трансформатора. Система складається з магнітного підсилювача А, трансформатора Т2 та реле К1. Змінний струм, що протікає по фазних дротах, які проходять крізь вікно тороїдального магнітопроводу підсилювача, не насичує магнітопровід, і вся напруга падає на обмотках підсилювача. В аварійних режимах у фазних струмах трансформатора Т1 з'являється постійна складова, магнітопровід підсилювача А насичується, реле К1 спрацьовує і розмикає коло магнітного пускача К2, який відключає випрямляч від мережі. Подібний захист застосований у випрямлячі ВД-401.

Технічні характеристики зварювальних випрямлячів ВД-306 та ВД-401 наведені у дод.2 (див. табл.2.3).

*Випрямлячі з дроселями насичення.* Схема формування спадної зовнішньої характеристики та плавне регулювання зварювального струму за допомогою дроселя насичення, увімкнутого у вторинне коло силового трансформатора, раніше була поширеною у випрямлячах на струми 400 А

і більше завдяки простоті дистанційного керування зварювальним режимом та можливості його стабілізації при коливаннях напруги мережі. Зараз такі схеми у випрямлячах зі спадними ВАХ майже не використовуються у зв'язку з розвитком тиристорних схем керування.

Випрямляч ВД-502-2 поєднує певною мірою обидві ці системи. Обмотка керування ДН живиться від тиристорного регулятора, зібраного за однопівперіодною схемою випрямлення. Випрямляч має дистанційне регулювання зварювального струму з виносного пульта та забезпечує стабілізацію вихідних параметрів. У діапазоні 100...500 А струм підтримується з точністю 2,5 % при підвищенні напруги мережі на 5 % і з точністю 5 % при зниженні напруги мережі на 10 %. Випрямляч ВД-502-2 зібраний за трифазною мостовою схемою випрямлення з використанням вентилів В200. Охолодження – повітряне примусове. Технічну характеристику випрямляча наведено у дод. 2 (див. табл.2.3).

#### **4.5.2. Випрямлячі з жорсткими зовнішніми характеристиками**

Конструкція випрямлячів цієї групи суттєво визначається особливостями процесу зварювання у середовищі захисних газів. Як відомо, механізоване зварювання у середовищі захисних газів, зокрема в  $\text{CO}_2$ , є одним з найбільш масових способів дугового зварювання. У широкому діапазоні зварювальних режимів перенесення електродного металу має різний характер. Найбільш характерними режимами, що забезпечують допустиме розбризкування, є такі, за яких перенесення металу відбувається з короткими замиканнями дугового проміжку, а також режими з високою густиною струму в електроді, коли має місце дрібнокраплинне перенесення металу без короткого замикання дугового проміжку. При зварюванні з короткими замиканнями до джерел живлення ставляться спеціальні вимоги стосовно забезпечення стійкості процесу горіння зварювальної дуги. Ознакою стійкості процесу у цьому випадку є не сталість довжини дугового проміжку, напруги та струму дуги, а певна періодичність зміни всіх вказаних параметрів режиму зварювання. Коротко пояснити процес зварювання з періодичними короткими замиканнями можна за допомогою аналізу осцилограм струму та напруги в дугі протягом одного циклу (рис.4.9).

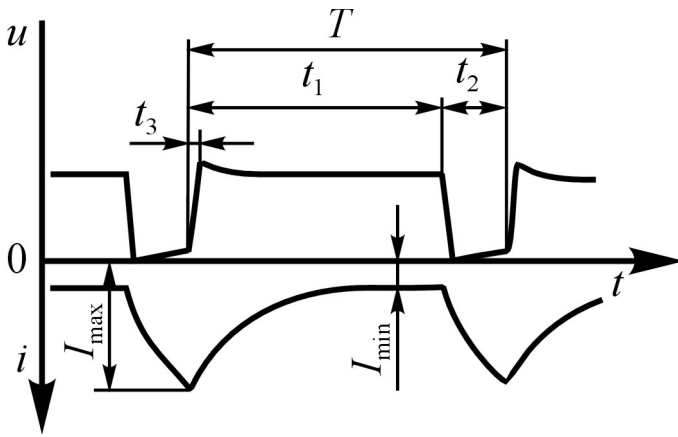


Рис. 4.9. Осцилограма струму та напруги в дузі при зварюванні з короткими замиканнями дугового проміжку:

$T$  — загальний час циклу;  $t_1$  — час горіння дуги;  $t_2$  — час короткого замикання дугового проміжку;  $t_3$  — час відновлення проміжку після вибуху рідкої краплі;  $I_{\max}$  — найбільше значення струму під час короткого замикання;  $I_{\min}$  — найменше значення струму, що передуює короткому замиканню

з'єднає її з електродом; дуга згасає, напруга різко спадає, струм короткого замикання зростає. Внаслідок цього підсилюється стискаюча дія струму на краплю металу, зростає густина струму у шийці краплі, вона перегорає з вибухом; напруга в дуговому проміжку майже миттєво зростає до значення, більшого за встановлене для зварювання. Дуга збуджується, і процес повторюється знову. Величини  $t_2$ ,  $t_3$ ,  $I_{\max}$ ,  $I_{\min}$  (див.рис.4.9) характеризують динамічні властивості джерела живлення та його здатність забезпечувати стійкий процес зварювання.

Головною причиною розбризкування металу при зварюванні є, таким чином, електричний вибух перемички (шийки краплі) між електродом та ванною. У зв'язку з цим особливо важливе значення для протікання процесу зварювання з короткими замиканнями дугового проміжку та зменшення розбризкування електродного металу має швидкість наростання струму короткого замикання

$$\frac{di}{dt} = \frac{\Delta I_{\text{к.з}}}{\Delta t_2}.$$

Обмеження струму короткого замикання здійснюється різними методами: вмиканням індуктивності у зварювальне коло, збільшенням крутості

Тепло, що виділяється дугою після її збудження услід за розривом перемички між електродом та краплею, швидко оплавляє кінець електрода, і дуговий проміжок дещо збільшується. Далі об'єм краплі поступово зростає, і внаслідок зменшення відводу тепла в електрод швидкість плавлення знижується. При постійній швидкості подачі електродного дроту кінець електрода наближається до ванни і крапля замикає дуговий проміжок. Починається перетікання краплі у ванну та утворення шийки, що



нахилу зовнішньої характеристики джерела, зокрема за допомогою баластного реостата; комбінованим способом – вмиканням у зварювальне коло дроселя з невеликою індуктивністю та зміною нахилу ВАХ випрямляча.

При зварюванні в  $\text{CO}_2$  дротами малих діаметрів для стійкого протікання процесу потрібні значно більша швидкість наростання струму та відповідно менша індуктивність у зварювальному колі, ніж при зварюванні товстими дротами. Для однопостових випрямлячів рекомендуються такі співвідношення між індуктивністю, силою струму та діаметром електродного дроту (табл.4.3).

**Таблиця 4.3. Індуктивність стабілізувального дроселя випрямляча при зварюванні у  $\text{CO}_2$  дротами різних діаметрів**

Діаметр дроту, мм	Сила струму зварювання, А	Індуктивність, мкГн
0,8...1,2	До 200	150...200
1,6...2,0	До 700	400...500
1,6...2,0	Більше 700	150...200

Слід пам'ятати, що обмеження струму короткого замикання шляхом використання баластного реостата не забезпечує якісного формування вертикальних та стельових швів і тому найменш ефективне.

Обмеження струму короткого замикання шляхом збільшення нахилу зовнішніх характеристик випрямляча дещо знижує розбризування, але одночасно може погіршити стійкість процесу зварювання короткою дугою тонкими дротами на малих струмах. Доцільно забезпечувати нахил ВАХ випрямляча при зварюванні в  $\text{CO}_2$  у межах 0,01...0,02 В/А.

Ефективним засобом підвищення стабільності горіння дуги при зварюванні з короткими замиканнями дугового проміжку дротами діаметром 1,0...1,6 мм, а також зниження мінімального зварювального струму при заданому діаметрі електродного дроту є введення у зварювальне коло дросельного пристрою з безступеневим регулюванням індуктивності зварювального кола. У цьому випадку зростає до 30 % частота коротких замикань, полегшується зварювання швів у положеннях, відмінних від нижнього. Процес горіння дуги йде стабільно при загально прийнятих нахилах зовнішніх характеристик випрямляча.

Випрямлячі зі ступінчастим регулюванням вихідної напруги. Такі випрямлячі належать до категорії найпростіших джерел живлення, що досить поширені. Вони складаються з трифазного знижувального трансформатора з секціонованою первинною обмоткою, перемикача ступеней, блока вентилів, дроселя у зварювальному колі. Випрямний блок складається за трифазною мостовою схемою на діодах, охолодження – повітряне примусове. Істотними недоліками подібних випрямлячів (BC-300A, BC-600M, ВДГ-304, BC-632) є необхідність у великій кількості ступеней регулювання, неефективне використання активних матеріалів, відсутність плавного та дистанційного регулювання. Секціонування первинної обмотки пов'язане зі збільшенням розрахункової потужності трансформатора. При роботі на максимальній потужності секціонована частина первинної обмотки не використовується. Тому коефіцієнт використання трансформатора виявляється значно менше одиниці (він дорівнює 0,67 при діапазоні регулювання напруги 1:2).

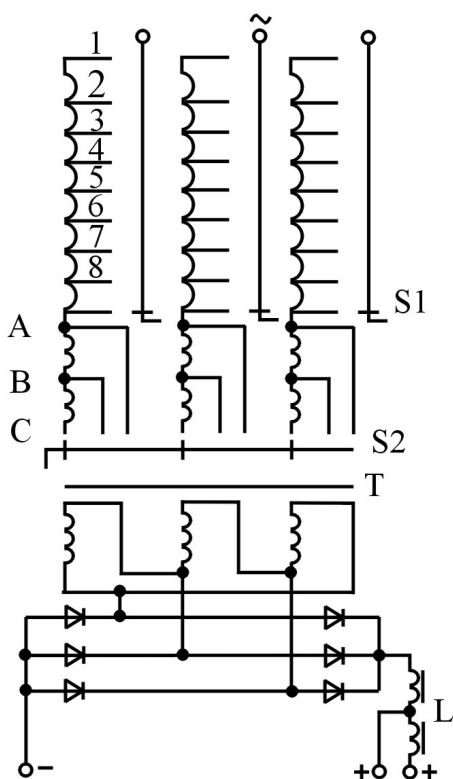


Рис. 4.10. Спрощена електрична схема перемикачання ступенів регулювання випрямляча BC-300A

*Випрямляч BC-300A.* Випрямляч (рис.4.10) містить силовий трансформатор Т, який за допомогою перемикачів первинної обмотки S1 ("Повільно") та S2 ("Глибоко") забезпечує 24 ступені регулювання вихідної напруги. У зварювальне коло увімкнений стабілізуювальний дросель з індуктивністю 250мкГн. За конструкцією випрямляча BC-300 фірма "СЭЛМА" випускає випрямляч ВДГ-304.

*Випрямляч BC-600M* має подібну конструкцію, але загальна кількість ступеней регулювання – 27, кількість перемикачів – 3. Для розширення діапазону допустимих режимів зварювання дросель випрямляча секціоновано. При зварюванні електродним дротом діаметром 0,8...1,2 мм у зварювальне коло вмикається частина витків дроселя (індуктивність – 150 мкГн), при зварюванні дротом більшого діаметра – вся дросельна

обмотка (індуктивність 450 мкГн). Технічні характеристики випрямлячів ВС-300А, ВС-600М та ВДГ-304 наведені у дод.2 (див. табл.2.3).

*Випрямлячі з плавно-ступінчастим регулюванням режиму.* Стабілізований зварювальний випрямляч ВДГ-303 (рис.4.11) використовується при механізованому зварюванні у середовищі CO<sub>2</sub>. Ступінчасте регулювання здійснюється шляхом зміни коефіцієнта трансформації силового трансформатора Т. Плавне дистанційне регулювання у середині ступеня – дроселем насичення L1. Максимальну вихідну напругу отримують при з'єднанні фаз первинної обмотки трикутником з відгалуженнями (1-а ступінь), найменшу – при з'єднанні фаз зіркою (3-я ступінь). Проміжна (2-а ступінь) відповідає з'єднанню фаз обмотки трикутником без відгалужень. Перемикач ступеней здійснюється трифазним пакетно-кулачковим перемикачем S1 на три положення. Трифазний дросель насичення L1 з внутрішнім зворотним зв'язком містить дві обмотки: робочу (силову) РО і обмотку керування або підмагнічування ОК. Секції цих обмоток розміщені на шістьох витих магнітопроводах. По робочих обмотках проходить однополярний, перервний струм. Час вступу чергового вентиля силового випрямного блока VD3 у роботу визначається часом, витраченим на перемагнічування магнітопроводу, тобто на перехід його з ненасиченого стану у стан насичення та назад.

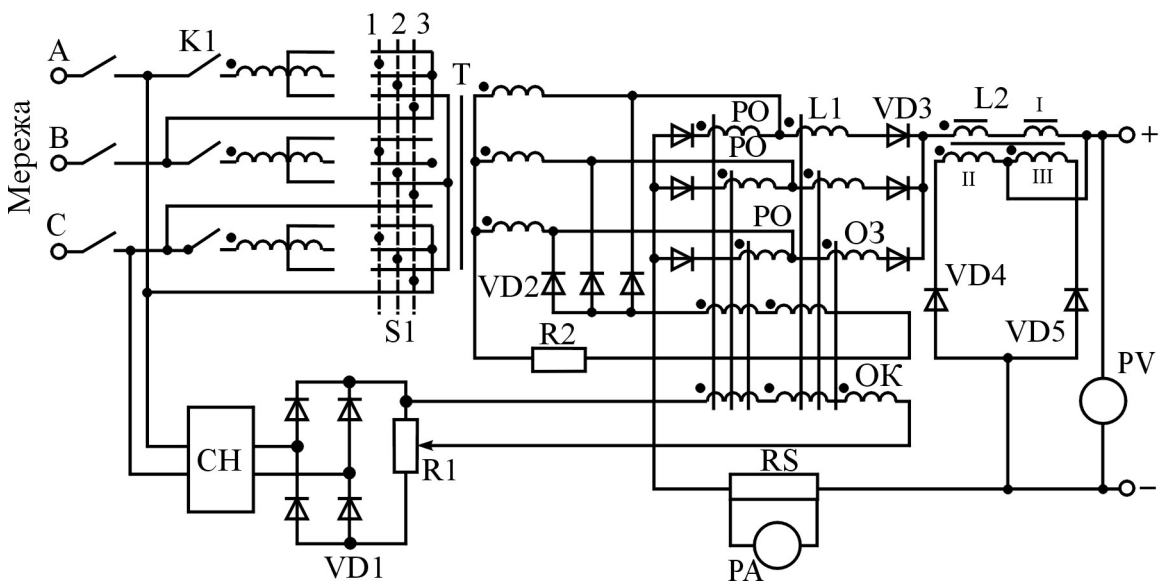


Рис. 4.11. Спрощена електрична схема випрямляча ВДГ-303

Для плавного регулювання вихідної напруги передбачений потенціометр R1, що змінює силу струму намагнічування в обмотці керування ОК дроселя L1, на яку подається напруга від стабілізатора напруги СН через випрямний блок VD1.

Обмотка зміщення ОЗ, яка живиться від допоміжного випрямляча VD2, служить для розширення меж регулювання зварювальної напруги.

При зниженні напруги мережі напруга на виході стабілізатора збільшується (та навпаки), що дає змогу частково компенсувати зміну робочої напруги при коливаннях напруги мережі. У випрямлячі ВДГ-303 застосований стабілізуювальний дросель L2 спеціальної конструкції, яка забезпечує підвищення стабільності зварювального процесу та безступеневе регулювання індуктивності залежно від режиму зварювання.

Вентиляція випрямляча – повітряна примусова. Технічну характеристику випрямляча ВДГ-303 наведено у дод.2 (див. табл.2.3). Треба відзначити, що за швидкодією та витратам матеріалів такі випрямлячі поступаються тиристорним випрямлячам.

*Випрямляч ВСЖ-303* містить трансформатор з магнітною комутацією (рис.4.12,*а*). Вторинна обмотка трансформатора складається з двох частин. Перша, що не регулюється, з числом витків  $W_{2\alpha}$  закріплена разом з первинною обмоткою з числом витків  $W_1$  у нижній частині магнітопроводу; друга, що регулюється, з числом витків  $W_{2\beta}$  розміщена між середнім та верхнім ярмами магнітопроводу. Ці ярма підмагнічуються обмотками керування ОК<sub>1</sub> та ОК<sub>2</sub>, які живляться постійним струмом. При підмагнічуванні верхньої частини магнітопроводу змінний магнітний потік  $\Phi$  замикається, в основному, через середнє ярмо і ЕРС утворюється лише частиною вторинної обмотки  $W_{2\alpha}$  трансформатора. Напруга на виході трансформатора буде мінімальною. При підмагнічуванні середньої частини магнітопроводу основна частина змінного магнітного потоку замикається через верхнє ярмо, ЕРС наводиться в обох частинах вторинної обмотки. Напруга трансформатора у цьому випадку буде найбільшою. При підмагнічуванні обох ярем отримують будь-яке проміжне значення вторинної напруги у межах діапазону плавного регулювання. Напруга плавно регулюється резистором R2 (рис.4.12,*б*) та спеціальною схемою керування. Для розширення діапазону напруг у випрямлячі передбачено ступеневе регулювання (три ступені) зміною числа витків обмотки  $W_{2\alpha}$  за допомогою перемикача Q.

Випрямний блок VD1 складається з шести кремнієвих вентилів, увімкнених за трифазною мостовою схемою випрямлення.

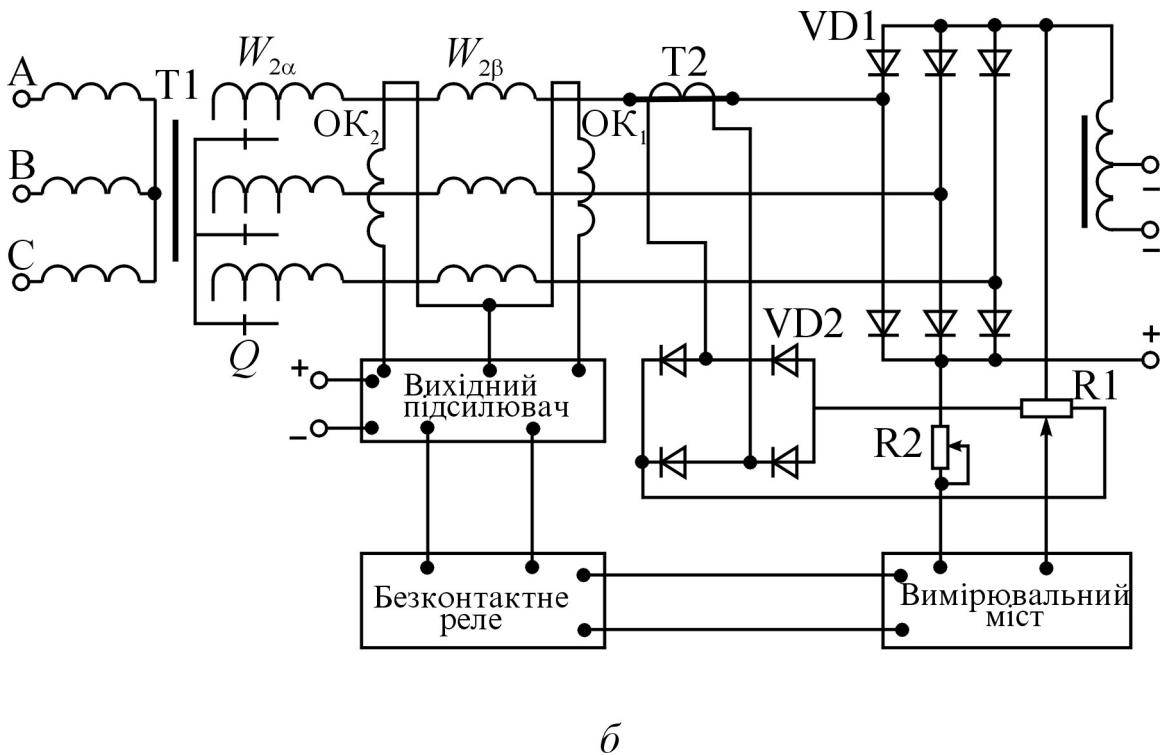
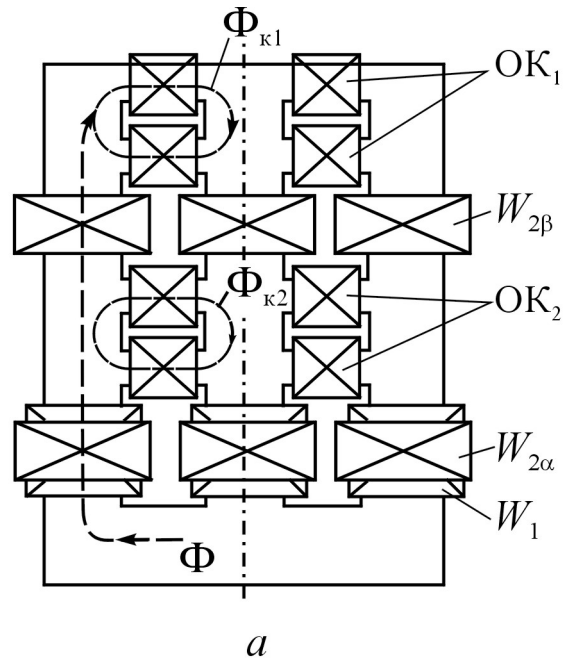


Рис. 4.12. Силовий трансформатор (а) та електрична схема (б) випрямляча ВСЖ-303

Електронна схема керування випрямляча ВСЖ-303 забезпечує стабілізацію вихідної напруги при коливаннях напруги мережі та корекцію нахилу зовнішніх характеристик. Зв'язок між швидкістю наростання струму короткого замикання  $\frac{di}{dt}$  та параметрами зварювального кола визначається залежністю

$$\frac{di}{dt} = \frac{U_0 - iR}{L}, \quad (4.6)$$

де  $U_0$  – напруга, докладена до кола, В;  $i$  – діюче значення струму, А;  $R$  – активний опір кола, Ом;  $L$  – індуктивність кола, Гн.

Отже, за наявності деякої індуктивності є можливість, як показано вище, у разі плавного роздільного регулювання напруги холостого ходу  $U_0$  та нахилу зовнішніх характеристик змінювати  $\frac{di}{dt}$ , відповідно струм короткого замикання  $I_{к.з}$  і, як наслідок, розбризкування металу при зварюванні.

Наявність додаткового блока корекції (трансформатор Т2, допоміжний випрямний блок VD2, регулятор R1 нахилу зовнішніх характеристик) дає змогу при роботі від випрямляча ВСЖ-303 виконувати деяку роздільну настройку режиму зварювання зміною напруги холостого ходу і нахилу зовнішніх характеристик.

Індуктивність у зварювальному колі випрямляча складає 150 мкГн. Нахил зовнішніх характеристик може змінюватися від 0,015 до 0,07 В/А.

Технічну характеристику випрямляча ВСЖ-303 наведено у дод.2 (див. табл.2.3).

Останнім часом розроблені вдосконалені конструкції випрямлячів з плавно-ступеневим регулюванням напруги типів ВДГ-303-3, та ВДГ-401, технічні характеристики яких також наведені у дод.2 (див. табл.2.3).

### 4.5.3. Тиристорні зварювальні випрямлячі

Створення потужних напівпровідникових приладів та застосування тиристорів у зварювальних випрямлячах привело до розробки й випуску широкої номенклатури тиристорних випрямлячів для дугового зварювання. За рахунок поєднання в собі функції випрямлення та регулювання тиристорний регулятор дає змогу простими методами конструювати випрям-

лячі зі спадними, жорсткими та універсальними зовнішніми характеристиками, з дистанційним регулюванням, стабілізацією режиму зварювання при коливаннях напруги мережі та програмним керуванням.

Тиристорні випрямлячі являють собою, як правило, замкнену систему автоматичного регулювання зі зворотними зв'язками за струмом зварювання  $I_{зв}$ , або за напругою дуги  $U_d$ , або за обома параметрами, як це має місце в універсальних випрямлячах (рис.4.13).

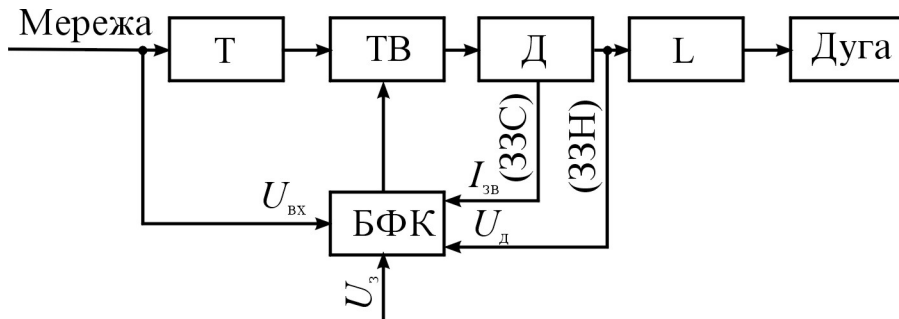


Рис. 4.13. Структурна блок-схема тиристорного універсального випрямляча:

Т – силовий трансформатор; ТВ – силовий тиристорний випрямний блок; Д – датчик струму; L – стабілізуювальний дросель; БФК – блок фазового керування тиристорами

Особливістю випрямлячів з універсальними зовнішніми характеристиками є уніфікація конструкції силового трансформатора Т. Стабільний процес зварювання в середовищі двоокису вуглецю тонкими електродними дротами суцільного перерізу у різних просторових положеннях може бути забезпечений лише за умови живлення від випрямлячів з природною жорсткою характеристикою, виготовлених на базі трансформаторів з нормальним електромагнітним розсіюванням. Одночасно ручне дугове зварювання покритими електродами та зварювання під флюсом можна виконувати при спадних характеристиках, що отримуються на базі трансформаторів з нормальним магнітним розсіюванням. З урахуванням цього всі тиристорні випрямлячі виконуються з силовим знижувальним трансформатором, що має нормальне розсіювання.

У тиристорних випрямлячах застосовують здебільшого трифазну мостову або подвійну трифазну зі зрівнювальним реактором схему випрямлення. Іноді використовують напівкеровані мостові схеми з половинною кількістю тиристорів і діодів.

Зварювальні випрямлячі на струми до 500 А виготовляють за подвійною трифазною схемою зі зрівнювальним реактором, на струм 630 А – за подвійною трифазною зі зрівнювальним реактором та за шестифазною кільцевою схемою, а на струм 1250 А – за шестифазною кільцевою схемою випрямлення.

Основним недоліком тиристорних випрямлячів є високий коефіцієнт пульсацій випрямленого струму, який, як було відзначено у розд.4.1, можна зменшити за допомогою дроселя  $L$ , що вмикається у зварювальне коло (див. рис.4.13). Магнітопровід дроселя виконується з повітряним зазором. Іноді дроселі, крім силової обмотки, обладнують обмоткою керування, яку вмикають у зварювальне коло між електродом та виробом через додаткові діоди або тиристори (рис.4.14). Застосування такого дроселя розглянуто також на рис. 4.11.

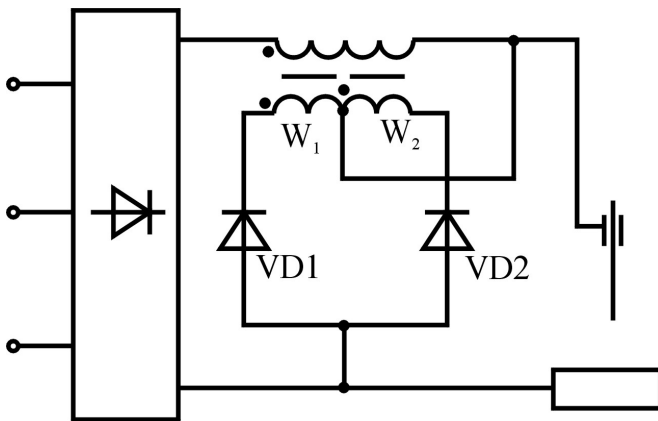


Рис. 4.14. Стабілізувальний дросель з обмоткою керування

В обмотці керування індукується ЕРС завдяки змінній складовій випрямленого струму, що протікає через силову обмотку. Це дає змогу автоматично змінювати індуктивність дроселя. На малих режимах випрямлений струм в обмотці керування сприяє зменшенню індуктивності дроселя. На великих режимах збільшується запірна робоча напруга дуги,

струм керування зменшується і індуктивність зростає. При короткому замиканні дугового проміжку краплею розплавленого металу, коли у силовій обмотці дроселя струм різко зростає, в обмотках  $W_1$  та  $W_2$  (див. рис.4.14) наводиться значна ЕРС. Діод  $VD_1$  закривається, а діод  $VD_2$  відкривається. Після закінчення КЗ діоди міняються ролями. Відбувається параметричне керування енергією дроселя, що сприяє здрібнюванню та стабілізації розміру крапель, які переносяться. Істотне покращання стабільності горіння дуги можна отримати, якщо застосувати допоміжні випрямні пристрої, що підживлюють дугу невеликим струмом (10...20 А). Прикладом такого



пристрою є блок підживлення випрямляча ВДГ-601 (рис.4.15). Блок складається з трифазного трансформатора Т2 зі спадною характеристикою (первинна і вторинна обмотки – рознесені) та випрямного блока VD, що зібраний за трифазною мостовою схемою. Згладжування пульсацій здійснюється не лише завдяки роботі власного блоку підживлення, а й за рахунок застосування випрямного моста як зворотного діода у сполученні з силовим дроселем у зварювальному колі.

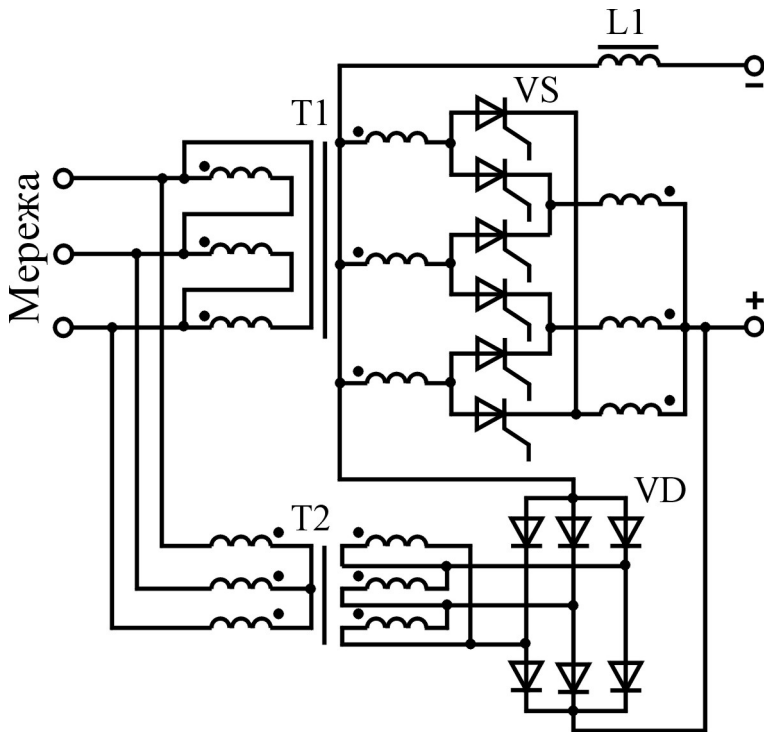


Рис. 4.15. Блок підживлення випрямляча ВДГ-601

Для керування тиристорними випрямлячами використовують багато-канальні системи, побудовані за принципом вертикального фазового зсуву.

Суть його полягає у тому, що формування фази керуючого імпульсу  $U_i$  у кожному каналі відбувається в момент рівності (порівняння по "вертикалі") змінної опорної напруги  $U_{оп}$  (синусоїдальної, трикутної або пилкоподібної) та постійної напруги  $U_k$ , що потрапляє до нього від пристроїв керування. При зміні значення  $U_k$  ( $U_{k1}$ ,  $U_{k2}$ ) відбувається зсув фази імпульсів керування тиристорами ( $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ) і, таким чином, забезпечується регулювання випрямної напруги від нуля до максимального значення. На рис.4.16,*a* наведено типову функціональну схему одного каналу такої системи. До його складу входять фазозсувний пристрій ФЗП та формувач ім-

пульсів  $\Phi$ . У свою чергу ФЗП містить генератор (ГОН) опорної напруги, що синхронізована з напругою відповідної фази мережі  $U_{\text{вх}}$ , та компаратор А. На вхід А, крім опорної напруги  $U_{\text{оп}}$ , яка у даному випадку має пилкоподібну форму, подається на-

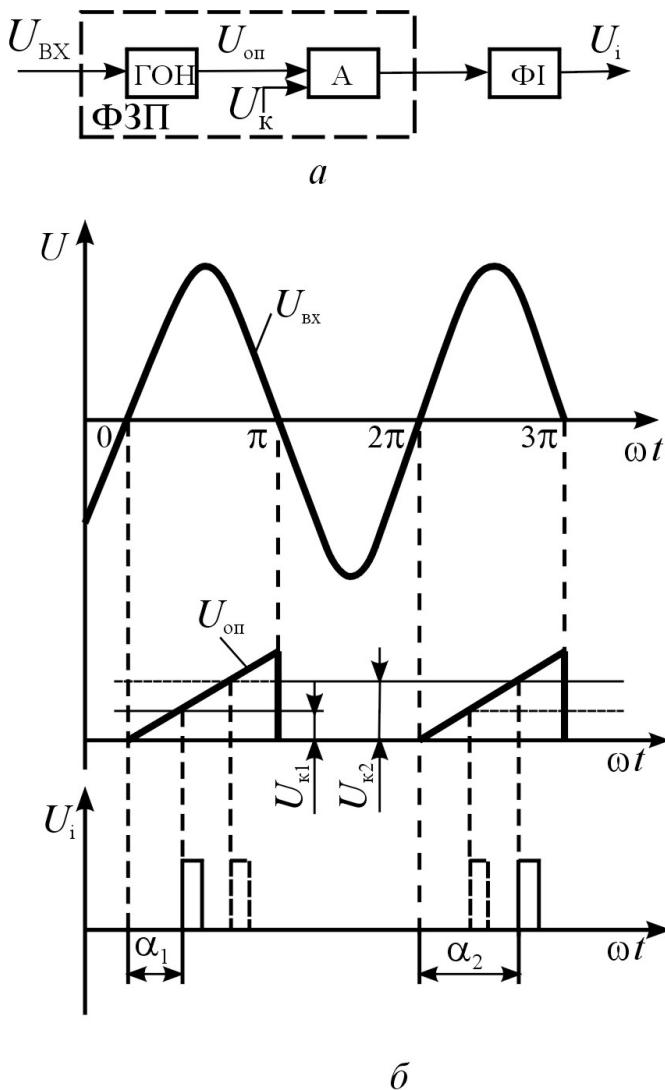


Рис. 4.16. Формування імпульсів керування тиристорами:  
**а** – структурна схема одного каналу БФК;  
**б** – діаграми напруг та імпульсів керування

підібну форму, подається напруга керування  $U_{\text{к}}$ , яка є сумою напруги завдання  $U_3$  (див. рис.4.13) та сигналів зворотних зв'язків за струмом ЗЗС і за напругою дуги ЗЗН. Вид зовнішніх характеристик випрямляча формується під дією цих зворотних зв'язків. В універсальних випрямлячах при формуванні спадної ВАХ діє лише зворотний зв'язок за струмом. Сигнал, пропорційний струму зварювання, знімається з шунта або іншого вимірювального пристрою, підсилюється та подається до одного з входів ФЗП. При формуванні жорсткої ВАХ діють зворотні зв'язки за струмом та напругою, причому дія ЗЗН переважає над ЗЗС.

*Зварювальні випрямлячі серії ВДУ та ВДГ.* Сьогодні випускається значна кількість тиристорних зварювальних ви-

прямлячів для ручного дугового та механізованого зварювання у захисних газах і під флюсом. Електричні схеми випрямлячів передбачають перемикання їх для роботи як з жорсткими, так і зі спадними зовнішніми характеристиками. Усі випрямлячі забезпечують плавне дистанційне регулювання зварювального струму та напруги, а також стабілізацію режиму при зміні напруги живильної мережі. При роботі на спадних зовнішніх характерис-

тиках випрямлячі забезпечують стабілізацію струму при зміні напруги мережі до 5 % з точністю не гірше  $\pm 2,5$  %, при коливаннях напруги мережі до  $-10$  % – не гірше  $\pm 5$  %. При роботі на жорстких характеристиках при подібних коливаннях напруги мережі забезпечується стабілізація робочої напруги з точністю  $\pm 1$  В.

Універсальні тиристорні випрямлячі ВДУ-506, ВДУ-601, призначені для механізованого зварювання у середовищі захисних газів та під флюсом, можуть використовуватися для ручного дугового зварювання покритими електродами. Вони також придатні для спільної роботи з роботами та автоматичними маніпуляторами. При роботі з маніпуляторами ставляться підвищені вимоги до таких технологічних показників джерела, як надійність первинного збудження дуги, стійкість процесу зварювання в усіх просторових положеннях.

До схеми випрямлячів уведений спеціальний вузол, що забезпечує вибіркове за величиною форсування збудження дуги залежно від протяжності та положення шва у просторі. Випрямлячі дають змогу здійснювати зварювання матеріалів малих товщин на струмах 60 А та більше з викорис-

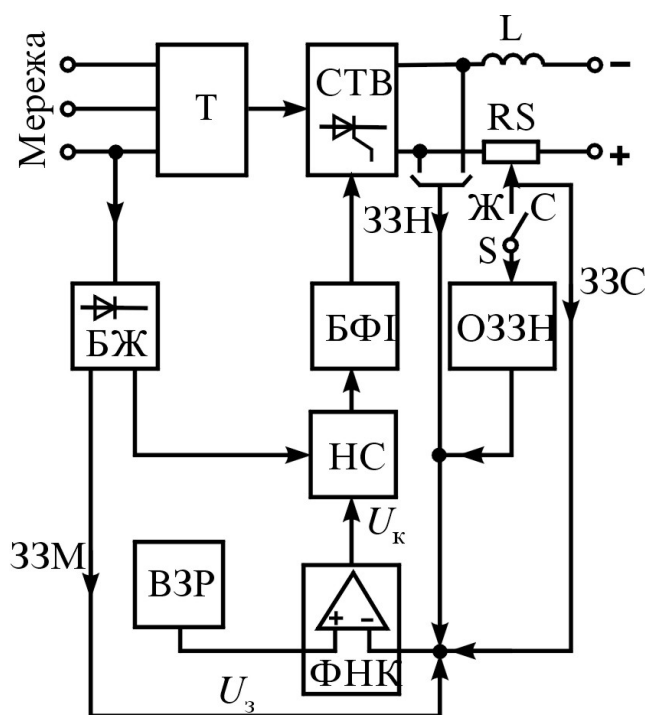


Рис. 4.17. Структурна схема системи керування випрямлячів ВДУ-506 та ВДУ-601

танням зварювального дроту діаметром 1,0 та 1,2 мм, а також безступеневу зміну індуктивності у зварювальному колі в залежності від режиму зварювання.

Структурна схема випрямлячів наведена на рис.4.17. Згідно з цією схемою спадні зовнішні характеристики (С) забезпечуються негативним зворотним зв'язком за струмом 33С, жорсткі (Ж) – вмиканням зворотного зв'язку за напругою 33Н, який діє спільно зі зворотним зв'язком 33С. Для поліпшення стабілізації режиму зварювання при коливаннях напруги живильної мережі, перед-

бачений додатковий зворотний зв'язок за мережею ЗЗМ. Напруга керування формується вузлом-формувавцем напруги керування ФНК, до входу якого надходять напруга завдання  $U_3$  з вузла завдання режиму ВЗР та сигнали зворотних зв'язків.

Імпульси керування силовими тиристорами створюються блоком формування імпульсів БФІ та потрапляють до силового тиристорного випрямляча СТВ.

Блок живлення забезпечує отримання напруг, потрібних для роботи системи фазового керування.

Для поліпшення запалювання дуги при зварюванні у середовищі двоокису вуглецю на жорстких зовнішніх характеристиках до схеми уведений спеціальний додатковий вузол обмеження дії зворотного зв'язку за напругою ОЗЗН.

Блок БФІ побудований за шестиканальною системою фазового керування. Керування тиристорами здійснюється імпульсами прямокутної форми. До входу блока БФІ потрапляють шість зсунутих між собою на 60 ел.град напруг синхронізації НС з трансформатора блока живлення БЖ. Кожен канал блока БФІ складається з формувача імпульсів у вигляді тригера, проміжного погоджуючого підсилювача-формувача, кінцевого тиристорного каскаду підсилення.

Випрямлячі ВДУ-506 та ВДУ-601 зібрані за подвійною трифазною схемою випрямлення зі зрівнювальним реактором.

Такі випрямлячі випускаються підприємствами Росії та Литви. В Україні подібні випрямлячі ВДУ-506С та ВДУ-601С випускає ВАТ "Фірма СЭЛМА". Слід мати на увазі, що випрямляч ВДУ-601 (ВДУ-601С) є дво-режимним джерелом живлення і дає змогу незалежно здійснювати настрійку робочої напруги для двох режимів зварювання за допомогою окремих потенціометрів. Дистанційне перемикавання режимів здійснюється з пульта керування напівавтомата.

Зварювальні випрямлячі ВДУ-1201 та ВДУ-1250 призначені для автоматичного зварювання у середовищі захисних газів, під флюсом, та порошковим дротом. Випрямлячі зібрані за шестифазною кільцевою схемою

випрямлення. Вони мають також деякі відмінності у системі керування тиристорами відносно випрямлячів ВДУ-506 та ВДУ-601. Технічні характеристики випрямлячів ВДУ-506 (ВДУ-506С), ВДУ-601 (ВДУ-601С), ВДУ-1201 та ВДУ-1250 наведені у додатку 2 (див. табл.2.3).

Зварювальний випрямляч ВДГ-601 доцільно використовувати для зварювання в середовищі  $\text{CO}_2$  з'єднань зі змінним зазором металоконструкцій зі швами, що розташовані у нижньому та вертикальному положеннях. У цьому випадку, а також для конструкцій, які мають широкий діапазон товщин деталей, зварювання здійснюється у двох режимах, що дистанційно перемикаються, без зміни діаметра електродного дроту. Випрямляч ВДГ-601 має тільки жорсткі зовнішні характеристики.

Електрична схема випрямляча дає змогу виконувати (місцево або дистанційно) незалежну настройку робочої напруги для двох режимів зварювання за допомогою двох окремих потенціометрів. Дистанційне перемикавання режимів здійснюється проміжним реле, що вмикається з пульта керування напівавтомата. Одночасно здійснюється й перемикавання швидкості подачі електродного дроту. Напруга в дузі при переході з одного режиму на другий змінюється повільно через часову затримку. Дросель у зварювальному колі випрямляча має дві ступені індуктивності (200 та 500 мкГн). Індуктивність для кожного режиму встановлюється попередньо та дистанційно перемикається у процесі зварювання разом зі зміною режиму. Дросель (рис.4.18) з повітряним зазором  $\delta$  містить додаткову обмотку керування ОК, що магнітно зв'язана з силовою обмоткою ОД. Для зменшення індуктивності обмотка ОК замикається на малопотужний допоміжний дросель L. При роботі випрямляча під навантаженням в обмотці керування ОК наводиться ЕРС частотою 300 Гц. Значення ЕРС зростає при зварюванні на режимах малих струмів, для яких характерна більш глибока пульсація струму. При підключенні дроселя L, обмотка ОК створює магнітний потік, спрямований стрічно основному, і індуктивність основного дроселя знижується, особливо при зварюванні на малих струмах.

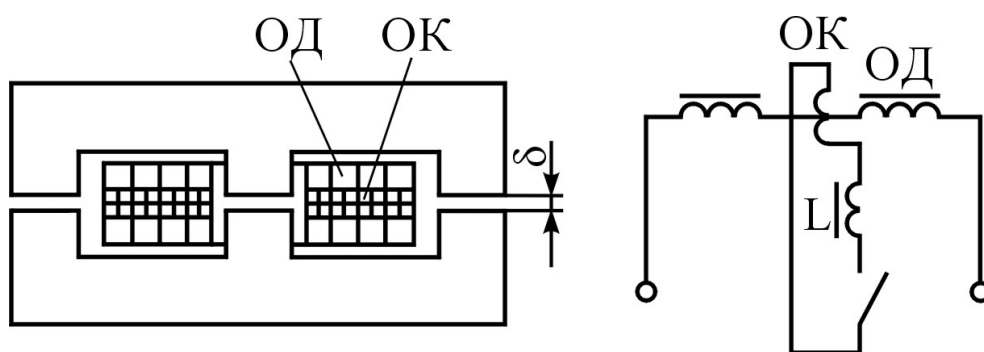


Рис. 4.18. Дросель з дистанційним перемиканням індуктивності

Випрямляч має широкі межі регулювання струму і напруги в одному діапазоні, що досягнуто шляхом застосування блока підживлення (див. рис.4.15). Випрямний блок ВДГ-601 зібраний за шестифазною кільцевою схемою випрямлення. Схема керування тиристорами подібна до схеми випрямляча ВДУ-1201. Для отримання жорстких зовнішніх характеристик у випрямлячі ВДГ-601 використовується тільки зворотний зв'язок за вихідною напругою. Технічна характеристика випрямляча ВДГ-601 наведена у дод. 2 (див. табл.2.3).

Не можна однозначно стверджувати, що тиристорні випрямлячі за технологічними властивостями переважають своїх попередників (генераторів, діодних випрямлячів). Але керовані тиристорні випрямлячі вирішують такі технологічні завдання, які на попередньому устаткуванні здійснити було важко. До цього можна віднести, наприклад, низькочастотну модуляцію зварювального струму від часток герців до 10...15 Гц, яка ефективна для керування формуванням та кристалізацією зварних швів. Таку модуляцію можна отримати, якщо підключити до будь-якого серійного випрямляча типу ВДУ спеціальний блок.

#### 4.6. Вибір випрямлячів для різних способів зварювання

Для вибору зварювального випрямляча при заданому способі зварювання слід насамперед визначити форму статичної вольт-амперної характеристики дуги та її параметри у залежності від режиму зварювання.

Порівнюючи статичні характеристики дуги і випрямляча, вибрати їх найкраще сполучення, при якому забезпечується стійка робота системи

"джерело живлення – дуга – ванна" та стабільність підтримання заданого режиму зварювання.

Далі, на основі технічних умов експлуатації зварювальних випрямлячів та електричних параметрів зварювання, вибирають зварювальний випрямляч потрібної потужності з необхідним режимом роботи (тривалий, переміжний або повторно-короткочасний).

Вибір однопостового випрямляча для певного способу зварювання розглянемо на прикладах.

**Приклад 1.** Вибрати випрямляч для ручного дугового зварювання покритими електродами діаметром 5 мм.

*Рішення.* При ручному дуговому зварюванні між діаметром електрода і силою зварювального струму існує співвідношення:  $I_{зв} = (35...50)d_e$ , де  $d_e$  – діаметр електрода в міліметрах. Для електрода з  $d_e = 5$  мм  $I_{зв} = 165...250$  А. Вольт-амперна характеристика дуги у цьому діапазоні струмів – жорстка, тому для забезпечення стійкого горіння дуги треба застосовувати випрямляч зі спадною зовнішньою характеристикою. При такій характеристиці струм короткого замикання дещо більше робочого струму, що не порушує режиму зварювання при виниканні випадкових коротких замикань. Крім того, під час частих змін напруги дуги, що характерно для ручного дугового зварювання, зварювальний струм змінюється мало. Напруга в зварювальній дузі при ручному дуговому зварюванні перебуває у межах 20...35 В і встановлюється відповідно до конкретних умов та досвіду зварника.

Для забезпечення заданих параметрів режиму зварювання можна вибрати випрямлячі серії ВД (дод.2, табл. 2.3). Найбільш придатними з них є випрямлячі марок ВД-306 або ВД-306С, які забезпечують роботу протягом 3 хв і паузу протягом 2 хв (номінальний режим роботи ВД-306 при ПН = 60 %, ВД-306С при ПВ = 60 %). Випрямляч ВД-306М має ПВ = 15 %, а випрямляч ВД-401 є занадто потужним і, крім того, має менший коефіцієнт корисної дії, ніж ВД-306.

**Приклад 2.** Вибрати однопостовий випрямляч для механізованого зварювання у середовищі вуглекислого газу струмом силою 400 А.

*Рішення.* Для механізованого зварювання у середовищі захисного газу застосовують випрямлячі з жорсткою або пологоспадною зовнішньою ха-

ракетистикою тому, що при високій густині струму, характерній для цього способу зварювання, статична характеристика дуги – зростаюча. Напруга в дузі при механізованому зварюванні у середовищі CO<sub>2</sub> для зварювального струму, що змінюється у діапазоні 200...500 А, складає 24...34 В і залежить від марки матеріалу та товщини деталей, які зварюються у конкретних умовах.

Для механізованого зварювання можна застосувати різні випрямлячі з жорсткими зовнішніми характеристиками та універсальні випрямлячі (див. дод.2,табл.2.3). Найбільше задовольняють умовам завдання випрямляч ВСЖ-303, який має жорстку зовнішню характеристику, та випрямляч ВДУ-506 (ВДУ-506С) зі спадною та жорсткою зовнішніми характеристиками. Слід відзначити, що випрямляч ВДУ-506С випускається в Україні і тому є переважним з економічної точки зору. У той же час використання вітчизняних випрямлячів більшої потужності буде економічно неефективним через великі енерговитрати.

### Контрольні питання

1. З яких функціональних блоків складається силова схема випрямляча?
2. У чому полягають особливості роботи вентилів у зварювальних випрямлячах?
3. Які схеми випрямлення змінного струму використовуються у зварювальних випрямлячах? Якими показниками ці схеми характеризуються?
4. Які фактори визначають форму зовнішньої вольт-амперної характеристики зварювального випрямляча?
5. Якими способами регулюються зварювальний струм та вихідна напруга у випрямлячах?
6. Які особливості мають випрямлячі для механізованого зварювання у середовищі захисних газів?
7. Як формуються сигнали керування тиристорами в універсальних зварювальних випрямлячах?



## *Глава 5*

# **ДЖЕРЕЛА ЖИВЛЕННЯ ДЛЯ ІМПУЛЬСНО-ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ**

Імпульсно-дугове зварювання плавким електродом (ІДЗПЕ) належить до механізованих способів зварювання з програмним керуванням процесом, зокрема з періодичною зміною потужності дуги.

Процес ІДЗПЕ розроблений на початку 60-х років в ІЕЗ імені Є.О. Патона НАН України під керівництвом академіка Б.Є. Патона. Цей спосіб дає змогу працювати при низьких значеннях зварювального струму в усіх просторових положеннях і отримувати добре формування зварного шва з малим розбризкуванням електродного металу. Імпульсно-дугове зварювання використовується при виготовленні конструкцій із алюмінієвих сплавів, титану і його сплавів. Розвиток технології та обладнання для ІДЗПЕ в активних газах зробив цей процес перспективним і при виготовленні конструкцій із маловуглецевих та легованих сталей.

Імпульсно-дугове зварювання плавким електродом здійснюється переважно при безперервному горінні дуги, тому як захисне середовище використовується аргон та аргоноокислювальні суміші. Іноді ІДЗПЕ виконується у середовищі вуглекислого газу. Оптимальні параметри процесу ІДЗПЕ в аргоні та активних захисних газах відрізняються між собою. Внаслідок цього всі імпульсні джерела живлення можна поділити на три групи: джерела живлення для зварювання в аргоні та сумішах газів на його основі; джерела живлення для зварювання в активних захисних газах; універсальні джерела живлення. Конструкція імпульсних джерел визначається в залежності від вимог до забезпечення потрібних електричних параметрів процесу та стабільності горіння дуги при імпульсному характері зміни зварювального струму.

### **5.1. Електричні характеристики і стабільність процесу імпульсно-дугового зварювання**

Імпульсно-дугове зварювання плавким електродом – це процес програмного керування плавленням та перенесенням металу шляхом зміни струму у вигляді імпульсів значної потужності. Найбільш поширеним є

процес ІДЗПЕ "довгою дугою" – без замикання дугового проміжку. Типову осцилограму ІДЗПЕ наведено на рис.5.1.

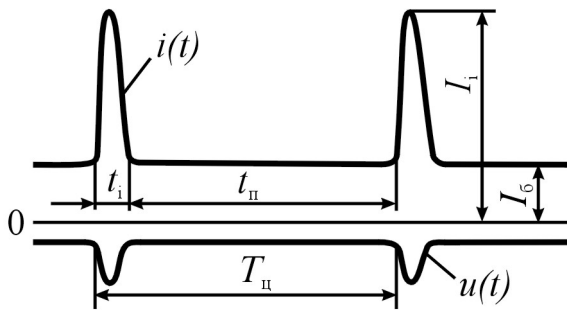


Рис. 5.1. Осцилограма струму і напруги в дузі при імпульсно-дуговому зварюванні плавким електродом

Основними параметрами процесу ІДЗПЕ, крім відомих параметрів режиму зварювання плавким електродом у середовищі захисних газів, є: амплітуда імпульсу  $I_i$ , базовий струм  $I_б$ , тривалість імпульсу  $t_i$ , паузи  $t_п$  та циклу  $T_ц = t_i + t_п$ , частота імпульсів  $f = 1/T_ц$ , швидкості наростання та спа-

дження струму імпульсу. Між амплітудою імпульсів, середнім  $I_с$  та базовим струмом існує співвідношення, що виражається нерівністю:  $I_i > I_с > I_б$ . Відношення  $T_ц/t_i = q$  називають шпаруватістю імпульсів,  $q = 2 \dots 10$ . Важливим параметром ІДЗПЕ є також значення критичного струму  $I_{кр}$ , нижче якого, без накладення імпульсів, перенесення електродного металу стає крупнокраплинним, що значно погіршує якість зварних з'єднань.

Головна особливість процесу ІДЗПЕ – кероване перенесення електродного металу. Існують два різновиди керованого перенесення металу при зварюванні довгою дугою. Перший полягає у тому, що при кожному імпульсі струму від електрода відбирається та переноситься у зварювальну вану одна крапля розплавленого металу. Такий процес характерний для зварювання в аргоні. Другий різновид полягає у тому, що під час дії імпульсу (як правило, більшої тривалості, ніж у першому випадку) відбувається інтенсивне плавлення електроду зі струменевим переносом металу – імпульсно-дугове зварювання плавким електродом з перервно-струменевим перенесенням металу. Цей процес характерний для зварювання активованим електродом струмом прямої полярності як в активних, так і в інертних газах, а також може використовуватися для зварювання в аргоні струмом зворотної полярності.

Використання ІДЗПЕ дає змогу вести процес з дрібнокраплинним перенесенням металу на струмі у 2,5...3,0 раза нижче критичного. Це розширює діапазон режимів зварювання, дає змогу здійснювати процес у положеннях, відмінних від нижнього, зварювати метал малої товщини. Імпульсно-дугове зварювання плавким електродом ефективно замінює зварювання неплавким електродом, забезпечує велику концентрацію енергії і одночасно не приводить до появи у металі шва вольфрамових включень.

При ІДЗПЕ струм у межах циклу змінюється від значення  $I_6$  до значення  $I_i$ . Середній та діючий струми визначаються за формулами:

$$I_c = \frac{1}{T_{ц}} \int_0^{T_{и}} [i(t) + I_6] dt; \quad (5.1)$$

$$I = \sqrt{\frac{1}{T_{ц}} \int_0^{T_{и}} [i(t) + I_6]^2 dt}. \quad (5.2)$$

При зміні параметрів імпульсів (амплітуди, тривалості, частоти) у широких межах та при постійній швидкості подачі електрода, характерній для звичайного процесу ІДЗПЕ, діючий та середній струми змінюються мало. Зі зростанням амплітуди та тривалості імпульсів діючий струм дещо зростає, а середній струм зменшується, при цьому базовий струм різко знижується. При збільшенні тривалості імпульсів зниження базового струму відбувається більш інтенсивно. Електрична потужність дуги  $P_d = E_d I_c + R_d I^2$  змінюється мало (де  $E_d$  – проти-ЕРС дуги, В;  $R_d$  – динамічний опір дуги, В/А).

Таким чином відбувається перерозподіл струму у межах циклу, завдяки якому здійснюється саморегулювання плавлення електрода. Зі зростанням амплітуди, частоти та тривалості імпульсів базовий струм може стати нижчим від мінімального, який забезпечує стійке горіння дуги. У цьому випадку накладення імпульсів струму викликає перериви у горінні дуги, що приводить до порушення стабільності процесу зварювання.

Безперервність горіння дуги визначається не лише режимом зварювання та параметрами імпульсів, а й у деяких випадках і перехідними процесами у джерелах живлення. Характер перехідних процесів, у свою чергу,

залежить від способів генерування імпульсів, живильної системи та її параметрів.

Максимальні значення амплітуди, тривалості та частоти імпульсів можна визначити за умови безперервного горіння дуги, що забезпечується властивістю саморегулювання імпульсно-дугового зварювання плавким електродом. Воно полягає у тому, що при збільшенні параметрів імпульсу базовий струм зменшується.

Існують залежності для розрахунку параметрів ІДЗПЕ. Значення діючого струму складається з двох складових: діючих струмів у проміжку між імпульсами  $I_1$  та під час імпульсу  $I_2$ :

$$I = I_1 + I_2. \quad (5.3)$$

З осцилограми на рис.5.1

$$\begin{cases} I_1 = I_0 \sqrt{\frac{T_{\text{ц}} - t_i}{t_i}}; \\ I_2 = \sqrt{\frac{1}{T_{\text{ц}}} \int_0^{T_{\text{ц}}} [I_0 + i(t)]^2 dt}, \end{cases} \quad (5.4)$$

де  $i(t)$  – зміна струму імпульса з часом.

Характеристики імпульсів різної форми наведені в табл.5.1.







Для уніполярних імпульсів струму (синусоїда, що згасає), які отримані шляхом розряду конденсатора на дугу, у колі з активним опором  $R$  та індуктивністю  $L$ :

$$i(t) = i_n e^{-bt} \sin(\omega_0 t), \quad (5.5)$$

$$\text{де } i_n = \frac{U_c}{\omega_0 L}; \quad R = R_1 + R_d; \quad b = \frac{R}{2L}; \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2};$$

тут  $R_1, R_d$  – опір кола імпульсного джерела та дуги відповідно;  $U_c$  – напруга заряду конденсатора.

Таблиця 5.1. Характеристики уніполярних імпульсів струму

Форма імпульсу	Назва імпульсу	Спосіб генерування
	Експоненціальний	Розряд конденсатора на активний опір R
	Синусоїда, що згасає	Розряд конденсатора на активний опір R та індуктивність L
	Синусоїдальний (частина синусоїди)	Подача синусоїдальної напруги з фазовим керуванням
	Прямокутний	За допомогою формувального ланцюга L C
	Складної форми	Суміщенням способів генерування
	Група імпульсів	Те ж саме

Максимальна амплітуда імпульса струму:

$$I_{i_{max}} = i_{\Pi} < \frac{2I}{\pi T_{\Pi} \sqrt{f}} \sqrt{\frac{\pi^2 T_{\Pi}^2 + t_i^2}{T_{\Pi} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{2t_i}{RC}\right) \right]}}, \quad (5.6)$$

де

$$I = \frac{i_{\Pi} \omega_0}{2} \sqrt{\frac{1 - \exp(-2bt_i)}{T_{\Pi} b (b^2 + \omega_0^2)}}.$$

Подібно, для експоненціальних імпульсів, що відповідають розряду конденсатора на дугу, у колі з активним опором

$$I_{i_{max}} = i_{\Pi} < \frac{I}{\sqrt{\frac{RCf}{2} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{2t_i}{RC}\right) \right]}}. \quad (5.7)$$

Із рівнянь (5.6) та (5.7) випливає, що зі збільшенням частоти імпульсів їх мінімально необхідна амплітуда зростає, а максимально при-

пустима зменшується, інтервал можливих амплітуд імпульсів звужається. Існує гранична частота, при якій мінімально необхідна частота дорівнює максимально припустимій (табл.5.2).

**Таблиця 5.2. Гранична частота імпульсів струму при зварюванні в аргоні ( $d_e = 1,6$  мм)**

Зварювальний струм, А	Марка електродного дроту	Гранична частота, імп/с, при тривалості $t_i$ , мс			Природна частота перенесення крапель, крап/с
		1,4	1,8	2,2	
100	Св-АМг61	82	80	79	6
140		158	155	153	25
180		259	253	252	69
200		318	312	310	110
240		456	445	443	174
100	Св-08Г2С	43	42	41	–
140		82	81	80	–
180		135	132	131	–
200		166	162	161	–
240		237	232	231	55

Гранично можлива частота імпульсів, як правило, значно вища за частоту природного перенесення металу, тому імпульсно-дугове зварювання плавким електродом можна здійснювати у широкому діапазоні частот імпульсів.

Накладання на дугу імпульсів струму з частотою вище граничної приводить або до переривів у горінні дуги, або до некерованого перенесення металу.

## **5.2. Вимоги до джерел живлення для імпульсно-дугового зварювання**

Імпульсно-дугове зварювання плавким електродом може здійснюватися як від одного джерела живлення, яке забезпечує базовий струм, так і від двох джерел: основного, яке забезпечує базовий струм, та

імпульсного, яке забезпечує накладання імпульсів. В останньому випадку ставляться не лише певні вимоги до основного та імпульсного джерела живлення, а й додаткові вимоги до умов їх спільної роботи.

Вимоги до джерел живлення ІДЗПЕ слід розглядати у двох аспектах: з точки зору забезпечення необхідних параметрів імпульсів та зручності настройки джерела (джерел) живлення на заданий режим.

Оптимальна напруга холостого ходу  $U_0$  силового трансформатора, що служить для формування імпульсів, знаходиться у межах 40...150 В. Якщо  $U_0 < 40$  В, то нижня межа зварювального струму значно підвищується. При  $U_0 \geq 150$  В виникають технічні труднощі з формуванням імпульсів, хоча нижня межа зварювального струму зменшується незначно. У більшості випадків  $U_0 = 40...60$  В.

Для зварювання в аргоні та сумішах газів на його основі імпульсні джерела живлення повинні забезпечувати наступні параметри імпульсів: амплітуду 300...400 А, тривалість 1,4...4,5 мс, частоту 25...150 імп/с. При цьому швидкість наростання струму імпульсу може складати до 2000 кА/с. Для зварювання в активних газах імпульсні джерела живлення повинні забезпечувати такі параметри імпульсів: амплітуда 300...650 А, тривалість 4...10 мс, частота 50...100 імп/с, швидкість наростання струму в імпульсі може досягати 500 кА/с. Більшій тривалості імпульсів відповідає менша частота їх проходження.

Частота імпульсів може бути фіксованою або змінюватися плавно. Діапазон зміни частоти імпульсів складає 25...150 імп/с, причому частоту імпульсів доцільно вибирати кратній частоті живильної мережі змінного струму, тобто:  $f_m/2$ ,  $2f_m/3$ ,  $f_m$ ,  $2f_m$ ,  $3f_m$  ( $f_m$  – частота живильної мережі). На практиці найчастіше використовуються частоти імпульсів 50 та 100 Гц, рідше 33,3 та 25 Гц, тому що останні несприятливо впливають на зір зварника.

Амплітуда імпульсів та їх тривалість в імпульсних джерелах живлення можуть встановлюватися роздільно, незалежно одна від одної, або змінюватися одночасно під час регулювання. Більшій амплітуді імпульсу повинна відповідати менша тривалість, та навпаки. При цьому бажано, щоб один з цих параметрів змінювався плавно. Це спрощує настройку імпульсного джерела на заданий режим. Більш бажаним є можливість

плавної зміни амплітуди імпульсів. Виходячи з цього, можна сказати, що при формуванні імпульсів доцільно здійснювати фазове тиристорне регулювання енергії імпульсів, а частоту змінювати дискретно.

Для забезпечення стабільності процесу при низьких базових струмах джерело живлення повинно забезпечувати малу його пульсацію. У моменти, коли базовий струм внаслідок пульсації знижується до нуля, можливий обрив дуги. Для запобігання цьому явищу бажано або застосовувати у схемах нелінійні згладжувальні дроселі, індуктивність яких зростає при зменшенні струму, або малопотужну схему підживлення.

При великих значеннях базового струму його пульсація на стабільність процесу істотно не впливає.

При зварюванні плавким електродом у середовищі захисних газів, у тому числі й при ІДЗПЕ, використовують, в основному, назалежну подачу дроту. При зварюванні великих товщин оплавлення кінця електродного дроту відбувається як при базовому, так і при імпульсному струмі. Тому вольт-амперні характеристики по базовому та імпульсному струму (базові та імпульсні ВАХ) повинні бути жорсткими – з нахилом 0,01...0,03 В/А, що сприяє саморегулюванню довжини дуги.

При зварюванні малих товщин базовий струм лише підтримує горіння дуги у проміжку між імпульсами, а оплавлення електрода та відрив краплі відбувається під час імпульсу. Для запобігання обривам базового струму його стабілізація, окрім вказаних вище заходів, здійснюється шляхом застосування крутоспадних базових ВАХ – з нахилом 0,5...1,5 В/А при збереженні імпульсних ВАХ жорсткими. При зварюванні на середніх струмах бажано використовувати пологоспадні базові ВАХ – з нахилом 0,1...0,2 В/А.

При застосуванні для ІДЗПЕ двох джерел живлення – основного та імпульсного – необхідно, щоб основне джерело було розраховане не на базовий струм, а на повний струм безімпульсного процесу. Ці вимоги диктуються необхідністю настройки режиму, коли спочатку процес проходить без імпульсів. Крім того, для кращого встановлення процесу необхідно, щоб основне джерело забезпечувало достатньо високу швидкість наростання струму короткого замикання  $dI_{кз}/dt$  – не нижче, ніж при зварюванні короткою дугою для відповідних діаметрів електрода.



Таким чином, можна сформулювати основні вимоги до імпульсного джерела живлення:

1) регулювання енергії імпульсів доцільно виконувати шляхом фазового тиристорного керування;

2) джерело імпульсного струму повинно забезпечувати для всього діапазону струму дві частоти 50 та 100 Гц, що змінюються ступінчасто; менші частоти використовувати для менших струмів;

3) напруга холостого ходу силового імпульсного трансформатора повинна бути рівною 40...60 В, в окремих випадках бажано її підвищити до 100...150 В;

4) регулювання зварювального струму повинно здійснюватися в основному за рахунок зміни базового струму;

5) вольт-амперні характеристики джерела базового струму повинні бути крутоспадними при зварюванні на малих струмах, пологоспадними – при середніх та жорсткими – при великих струмах. Вольт-амперні характеристики джерела імпульсного струму повинні бути жорсткими.

### **5.3. Способи формування імпульсного струму та типові схеми імпульсних джерел**

З великої кількості розроблених способів формування струму для ІДЗПЕ на практиці використовують два основних: паралельне вмикання джерела постійного струму і генератора імпульсів та спосіб шунтування згладжувального дроселя.

При способі паралельного вмикання (рис.5.2,*а,б*) дуга живиться базовим струмом  $I_6$  (рис.5.2,*в*) від джерела постійного струму ДЖ та імпульсами струму  $I_1$  від генератора імпульсів ГІ.

У випадку, коли джерелом базового струму служить зварювальний випрямляч (див. рис. 5.2,*а*), генератор імпульсів підключається до нього безпосередньо паралельно-зустрічно, та через замикаючий контакт силового контактора К вони разом підключаються до затискачів зварювальної дуги Е і В.

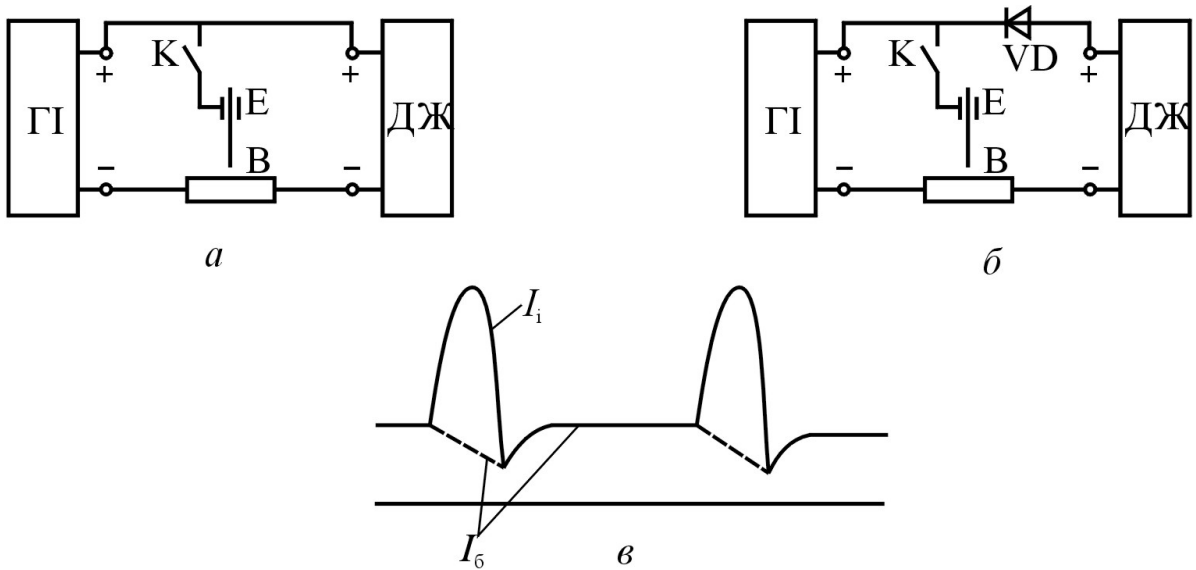


Рис. 5.2. Схеми паралельного вмикання джерел базового струму і генератора імпульсів (*а, б*) та крива струму (*в*)

Якщо як зварювальне джерело живлення застосовується перетворювач з генератором постійного струму, то генератор імпульсів та перетворювач з'єднуються подібним чином. У цьому випадку з метою запобігання розмагнічуванню (перемагнічуванню) генератора та усунення шунтування імпульсного джерела з малим опором кола якоря генератора у коло якоря у провідному напрямі послідовно вмикають захисний силовий діод VD (див. рис 5.2,*б*).

Перевагою даного способу є можливість застосування достатньо простого генератора імпульсів разом з серійними джерелами постійного струму. Недолік способу – комутація базового струму, тобто його зниження після закінчення імпульсу до неприпустимо малого значення, що часто приводить до обривів. Комутація пов'язана з тим, що під час імпульсу напруга генератора імпульсів перевищує напругу джерела постійного струму і базовий струм зменшується (штрихова лінія на рис.5.2,*в*). Для зменшення комутації послідовно з дугою вмикають нелінійний дросель.

Явище комутації особливо посилюється при тиристорному регулюванні струму джерела постійного струму, тому на практиці використовують головним чином регулювання за допомогою отпайок силового трансформатора. Проте при цьому неможливо здійснювати стабілізацію базової напруги при коливаннях напруги мережі та регулювання нахилу базових ВАХ.

Інший спосіб формування імпульсного струму – шунтування згладжувального дроселя – пояснюється схемою на рис.5.3,*а*. Силова частина дроселя містить тиристорний регулятор UZ, згладжувальний дросель L та тиристор VS, що формує імпульси. Тиристорний регулятор формує пульсуючу напругу, яка періодично знижується до нуля або до рівня, меншого за потенціал горіння дуги. У найпростішому випадку регулятор UZ складається з однофазного зварювального трансформатора та двопівперіодного тиристорного випрямляча. Середнє значення напруги, сформованої цим регулятором, визначається кутом вмикання  $\alpha$  тиристорів регулятора (рис.5.3,*б*).

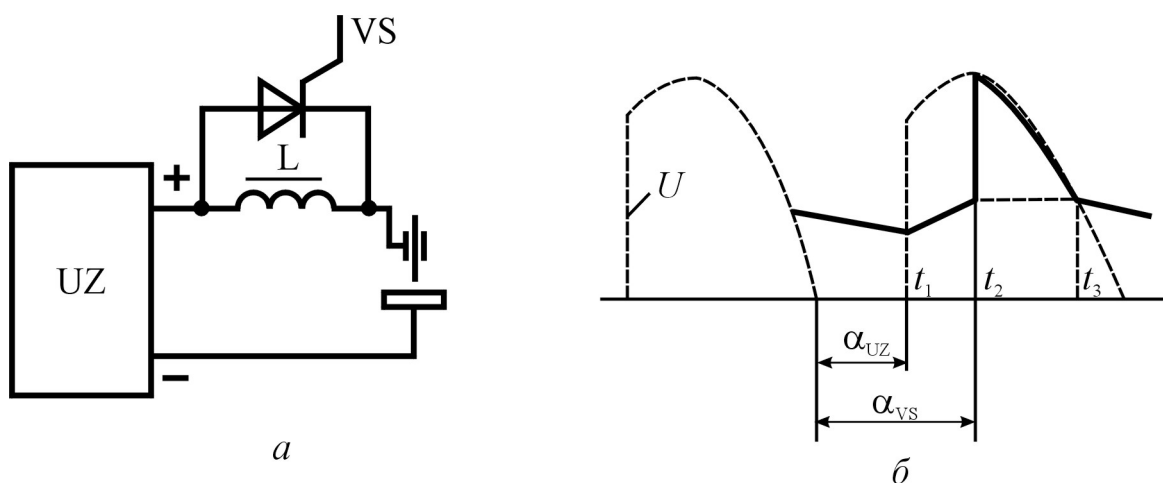


Рис. 5.3. Схема формування струму шунтуванням дроселя (*а*) та крива напруги  $U$ , сформованої тиристорним регулятором (*б*)

З моменту часу  $t_1$  починається наростання зварювального струму, що згладжується дроселем L. У момент часу  $t_2$  вмикається імпульсний тиристор VS і напруга  $U$  у вигляді імпульсу докладається безпосередньо до зварювальної дуги. Через тиристор VS протікають два зустрічних (контурних) струми: прямий струм імпульсу та зворотний струм, що запасений дроселем L. Доки прямий струм більше зворотного, струм тиристора дорівнює їх різниці і тиристор відкритий. В міру зменшення напруги  $U$  імпульс струму спадає. У момент часу  $t_3$  тиристор VS закривається, імпульс загасає і дуга живиться базовим струмом за рахунок енергії, запасеної дроселем. Таким чином, на ділянці  $t_1...t_2$  базовий струм зростає і одночасно запасється енергія дроселя. На ділянці  $t_2...t_3$  базовий струм залишається

постійним і енергія дроселя зберігається, тобто не витрачається. З моменту  $t_3$  до моменту появи чергової ділянки синусоїдальної напруги на виході регулятора UZ базовий струм знижується і енергія дроселя потрапляє у зварювальне коло.

Розглянутий спосіб шунтування дроселя має такі переваги перед способом паралельного вмикання джерел: наявність лише одного джерела (джерела постійного струму зі згладжувальним дроселем) та використання імпульсного тиристора замість генератора імпульсів суттєво знижують масу, габарити та вартість джерела живлення; відсутня комутація базового струму завдяки тому, що дросель під час імпульсу зашунтований; є можливість стабілізації базової напруги та зміни нахилу базових ВАХ завдяки наявності тиристорного регулятора UZ.

Шунтування дроселя можна здійснювати сумісно та по черзі кожного півперіоду одним з двох вентилів регулятора UZ, що дає змогу розвантажити вказані вентиля від імпульсного струму.

Усі імпульсні джерела живлення у залежності від принципу побудови силової схеми можна поділити на такі типи:

- з нагромадженням енергії у конденсаторі С;

- з нагромадженням енергії у реакторі L;

- з нагромадженням енергії у формувальній лінії LC;

- без нагромадження енергії (формувальні імпульси генеруються з півхвилі змінної синусоїдальної напруги або комутацією у колі постійного струму);

- комбіновані, що використовують поєднання наведених типів.

Розглянемо принципи побудови деяких типових схем.

Силова схема джерела (рис.5.4,*a*) являє собою однофазний однопівперіодний випрямляч, що складається з силового знижувального трансформатора Т та діода VD, який заряджає конденсатор С у позитивний півперіод напруги мережі. У негативний півперіод генерується імпульс струму при розряді конденсатора через тиристор VS. Частота імпульсів струму 50 імп/с.

Схема (рис.5.4,б) однофазного керованого двопівперіодного випрямляча з нулевим виводом від вторинної обмотки трансформатора та двома тиристорами VS1 і VS2, які заряджають конденсатор, і одним тиристором VS3, що розряджає конденсатор C, генерує імпульси струму з частотою до 100 імпл/с.

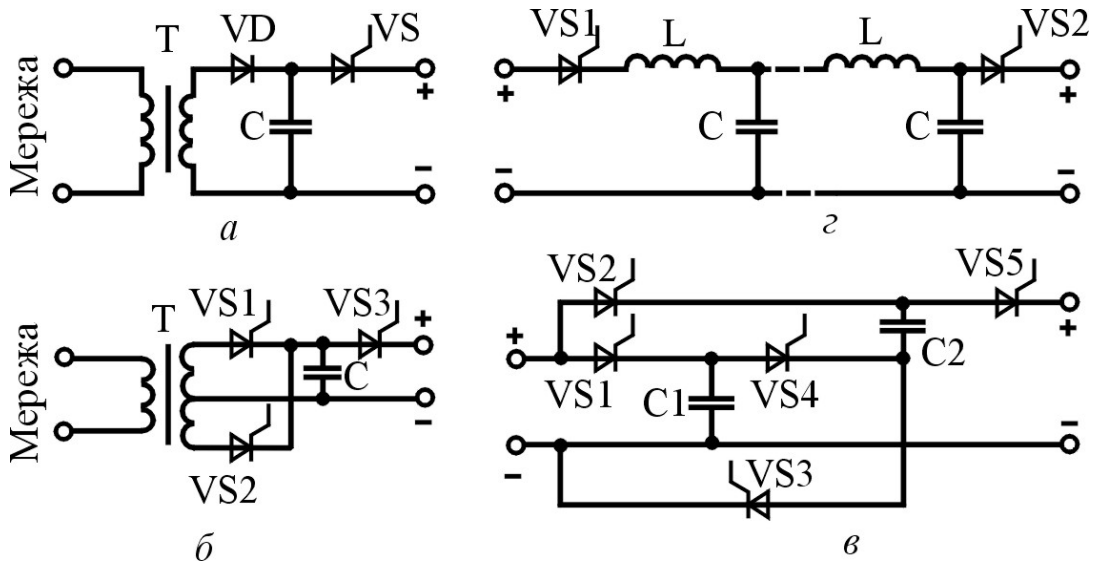


Рис. 5.4. Силові електричні схеми імпульсних джерел з нагромаджувачами енергії

Максимальна частота імпульсів перевищує частоту мережі, тому заряд та розряд конденсатора відбувається протягом одного півперіоду мережної напруги. В усіх режимах роботи схеми власна частота коливаний у зарядному колі повинна бути більшою за частоту мережі у 2,5...3,0 рази.

Розглянуті схеми отримують живлення від мережі змінного струму, і частота імпульсів, що ними генерується, визначається частотою мережі. Джерело, схему якого наведено на рис.5.4,в, живиться від зварювального джерела постійного струму, для зарядження конденсатора до напруги, більш високої, ніж напруга дуги, застосований принцип множення напруги (подвоєння, потроєння і т.ін.). Під час паузи між імпульсами струму у наведеній схемі з подвоєнням напруги конденсатори C1 та C2 заряджаються через тиристри VS1, VS2 та VS3 безпосередньо від зварювального джерела живлення, а під час формування імпульсу струму при розряді конденсаторів C1 та C2 через тиристри VS4 та VS5 здійснюється послідовне

з'єднання заряджених конденсаторів і подається подвійна напруга. Форма уніполярних імпульсів, які генерують розглянуті імпульсні джерела, – експоненційна або синусоїда, яка згасає.

Джерело, схему якого наведено на рис.5.4,2, генерує імпульси, близькі за формою до прямокутників. Живлення схеми здійснюється від джерела постійного струму через зарядний тиристор VS1, який подає напругу на формувальну лінію, що складається з LC-осередків. Розряд формувальної лінії через тиристор VS2 утворює імпульси прямокутної форми.

Схеми імпульсних джерел без нагромаджувачів енергії (у яких імпульси формуються з півхвилі змінної синусоїдальної напруги) наведені на рис.5.5. Силова електрична схема (рис.5.5,*a*) являє собою мостовий півкерований випрямляч з двома тиристорами VS1, VS2, двома діодами VD1, VD2 та силовим знижувальним трансформатором Т. При вмиканні одного тиристора забезпечується частота 50 імпульсів/с, двох – 100 імпульсів/с.

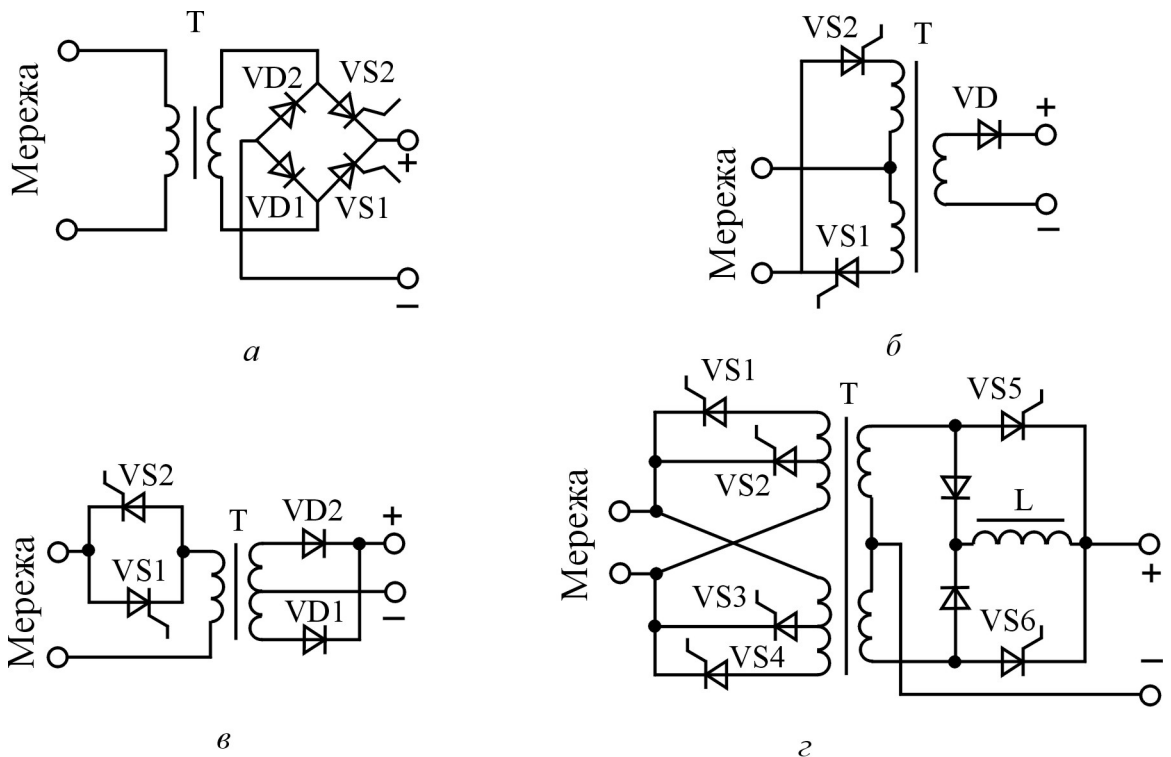


Рис. 5.5. Силові електричні схеми імпульсних джерел без нагромаджувачів енергії

На рис.5.5,*б* наведено силову схему генератора імпульсів у вигляді керованого випрямляча з двома первинними обмотками, що ввімкнуті через

тиристори VS1 та VS2 у мережу, та діодом VD у вторинному колі знижувального трансформатора Т. Регулювання частоти імпульсів виконується подібно до схеми на рис.5.5,*a*. У силовій схемі, яка наведена на рис.5.5,*в*, тиристори VS1 та VS2, ввімкнуті зустрічно-паралельно у коло первинної обмотки трансформатора, виконують роль регулятора струму. Вторинне коло трансформатора виконане як двопівперіодний випрямляч на діодах VD1 та VD2 з нульовим виводом від вторинної обмотки трансформатора.

Двопівперіодна керована схема випрямляча (рис.5.5,*г*) може працювати як генератор імпульсів у двох режимах з великою та малою амплітудою імпульсів струму. Одночасне вмикання тиристорів VS1 та VS5 протягом одного півперіоду утворює діапазон імпульсів малої амплітуди, а VS2 та VS5 – великої амплітуди. У другий півперіод вмикаються тиристори VS4, VS6 та VS3, VS6 відповідно для різних амплітуд імпульсів струму.

Форма імпульсів, що генеруються розглянутими схемами імпульсних джерел без нагромаджувачів енергії, – частина синусоїди при частотах 50 і 100 імпл/с. Реалізацію принципів формування імпульсів струму та побудови силових схем розглянемо на прикладах типових імпульсних джерел живлення для ІДЗПЕ.

#### **5.4. Імпульсні джерела живлення з нагромаджувачами енергії**

*Імпульсні джерела живлення типу ІИП.* Джерела цього типу (ІИП-1 та ІИП-2) розроблені в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона ще у 70-х роках. Такі імпульсні джерела побудовані за схемою, наведеною на рис.5.4,*a* і призначені для імпульсно-дугового зварювання плавким електродом в аргоні. Джерело (рис.5.6) є генератором імпульсів з частотою 50 імпл/с та використовується при спільній роботі зі зварювальним джерелом живлення. Форма уніполярних імпульсів, що генеруються, – згасаюча синусоїда.

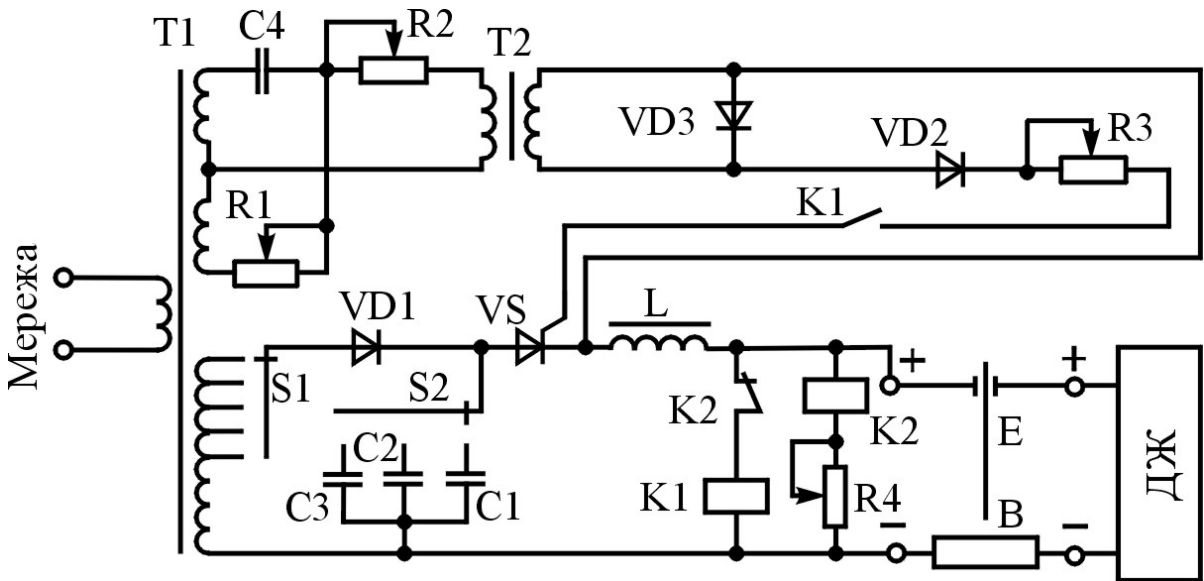


Рис. 5.6. Спрощена принципова електрична схема імпульсного джерела живлення типу ІІП

Як нагромаджувач енергії використовуються батареї конденсаторів С1...С3, що заряджаються від секціонованої вторинної обмотки силового трансформатора Т1 через діод VD1 у позитивний півперіод живильної напруги. Імпульси струму утворюються під час розряду конденсаторів через реактор L у негативний півперіод, коли вмикається тиристор VS. Для вмикання тиристора на його керуючий електрод подається імпульс, сформований фазозсувним пристроєм, до складу якого входять вторинна обмотка трансформатора Т1, резистори R1 та R2, диференціюючий трансформатор Т2, конденсатор С4, діоди VD2 та VD3 і контакти реле К1.

Керування роботою імпульсного джерела здійснюється за допомогою блока керування, що складається з двох реле К1 та К2, і змінного резистора R4. Замикаючими контактами реле К1 вмикається тиристор VS. Реле К1 спрацьовує тільки при вимиканні реле К2, а реле К2 вимикається у початковий момент зварки внаслідок падіння напруги у зварювальному колі. Настроюється реле К2 на вимикання при зниженій зварювальній напрузі змінним резистором R4. Реле К2 вмикається у момент закінчення процесу зварювання та розмикаючими контактами вимикає живлення котушки реле К1. Так, при холостому ході зварювального джерела відбувається вимикання імпульсного джерела, а при збудженні дуги – його вмикання. Перемикачами S1 регулюється напруга заряду, а S2 – тривалість імпульсу струму. Для отримання частоти 100 імпульсів/с слід паралельно увімкнути два дже-



рела ИИП. Технологічні характеристики імпульсних джерел живлення ИИП-1 та ИИП-2 наведені у дод.2 (див. табл.2.4).

Генератор імпульсів ГПИ-3 призначений для імпульсно-дугового зварювання плавким електродом в аргоні та його суміші при паралельному вмиканні зі зварювальним джерелом живлення. Частота імпульсів струму, що генеруються, змінюється плавно, форма імпульсів – прямокутна. Генератор імпульсів складається з силового трифазного керованого випрямляча, формувальної лінії, зарядного і розрядного тиристорів та елементів схеми керування.

Силова частина електричної схеми генератора (рис.5.7) вміщує трифазний керований випрямляч, який у свою чергу складається із трансформатора Т1 з нульовим виводом та тиристорів VS1...VS3, зарядного тиристора VS4, формувальної лінії (сім LC-осередків) та розрядного тиристора VS5.

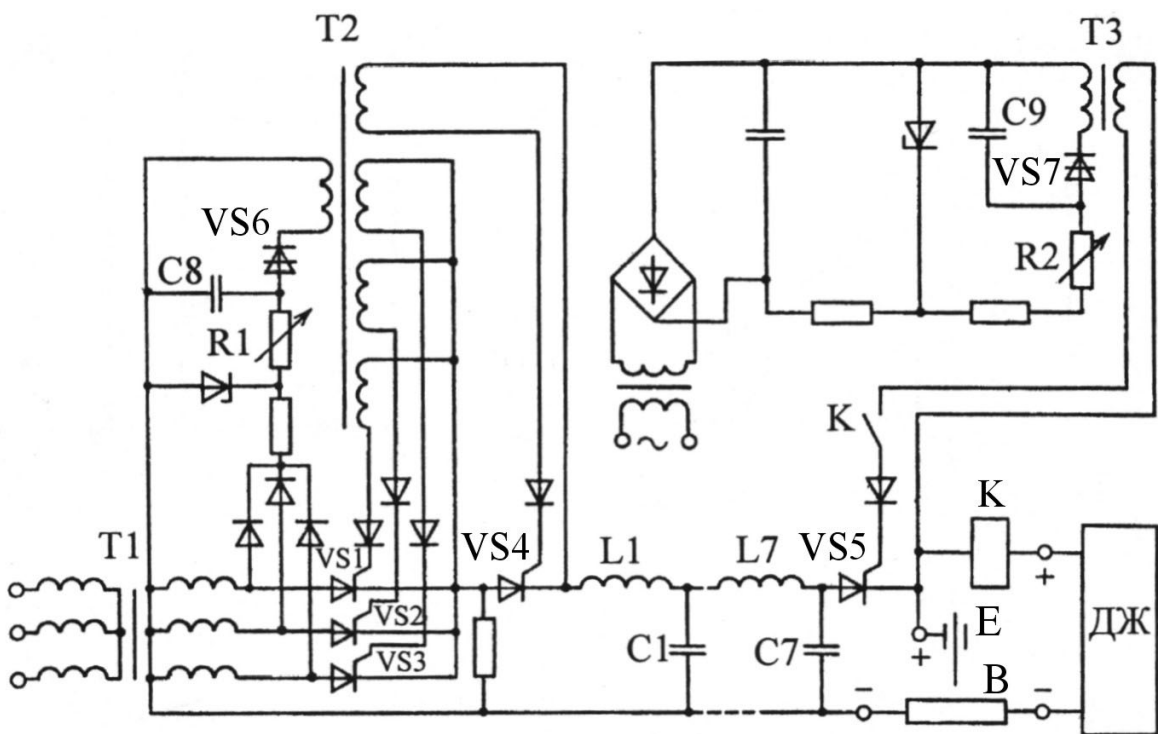


Рис. 5.7. Принципова електрична схема генератора імпульсів ГПИ-3

Керуючі імпульси, які вмикають тиристри VS1...VS4, формуються схемою фазового керування з частотою 150 імп/с. Конденсатор C8 заряджається від трифазного некерованного випрямляча з нульовим виводом через змінний резистор R1. Опір резистора R1 визначає час заряду конден-

сатора С8 та момент вмикання діодного тиристора (диністора) VS6. При вмиканні диністора конденсатор С8 розряджається на первинну обмотку трансформатора Т2. Імпульси керування зі вторинних обмоток одночасно подаються на керуючі електроди тиристорів VS1...VS3. При подачі імпульса відчиняється той тиристор, який має більшу позитивну анодну напругу. Таким чином резистором R1 регулюється напруга на виході випрямляча.

Одночасно імпульси керування зі вторинної обмотки трансформатора Т2 потрапляють на керуючий електрод тиристора VS4, що забезпечує однакові умови заряду формувальної лінії. Імпульси керування, які вмикають розрядний тиристор VS5, формуються релаксаційним генератором. Напруга на конденсаторі С9 зростає до напруги вмикання диністора VS7. Час наростання регулюється змінним резистором R2. При вмиканні диністора VS7 конденсатор С9 розряджається на первинну обмотку трансформатора Т3, зі вторинної обмотки якого імпульс подається на керуючий електрод розрядного тиристора VS5, та формувальна лінія розряджається на зварювальну дугу. Таким чином резистором R2 можна плавно регулювати частоту імпульсів струму, а резистором R1 – їх амплітуду. Регулювання тривалості імпульсів зварювального струму здійснюється перемиканням числа LC-осередків за допомогою пакетного перемикача на чотири положення (на рис.5.7 не показаний). Технічна характеристика імпульсного генератора ГПІ-3 наведена у дод.2 (див. табл.2.4).

## **5.5. Імпульсні джерела живлення без нагромаджувачів енергії**

*Генератори імпульсів ГИ-ИДС.* Генератори імпульсного струму цього типу (ГИ-ИДС-1, ГИ-ИДС-2) розроблені в ІЕЗ імені Є. О. Патона та випускалися у минулі роки великими серіями. Принципово ці генератори побудовані за схемою, наведеною на рис.5.5,*a*. Генератор імпульсів ГИ-ИДС-1 призначений для імпульсного зварювання плавким електродом в аргоні та його сумішах. Він генерує імпульси частотою 50 та 100 імп/с і використовується при спільній роботі зі зварювальним джерелом живлення. Форма імпульсів – частина синусоїди. Генератор імпульсів, електричну схему якого наведено на рис.5.8, призначений для роботи у закритих приміщеннях.

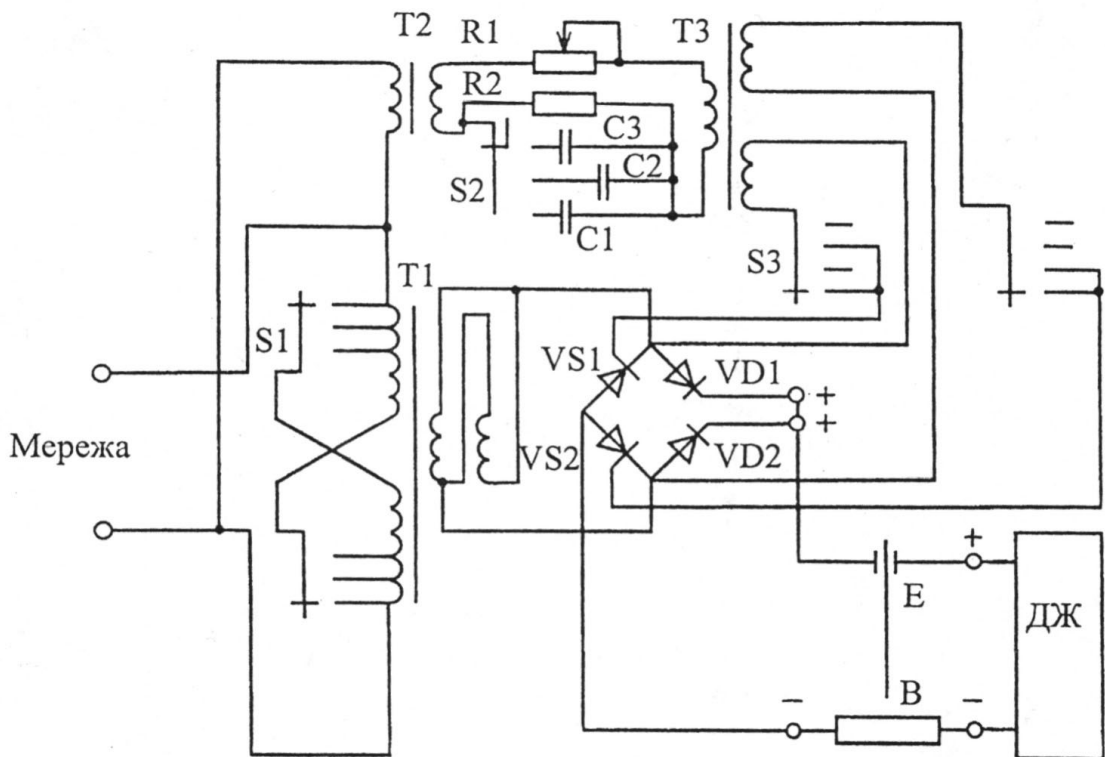


Рис. 5.8. Спрощена принципова електрична схема генератора імпульсів ГИ-ИДС-1

Після вмикання генератора напруга мережі подається на первинні обмотки силового трансформатора T1. Напруги на вторинних обмотках трансформатора співпадають за фазою. До вторинних обмоток підключена мостова схема випрямлення, зібрана на тиристорах VS1, VS2 та діодах VD1, VD2. Команди керування тиристорами формуються у фазовому пристрої. Цей пристрій складається із знижувального трансформатора T2, резисторів R1, R2, конденсаторів C1...C3, перемикача S2 на три положення, трансформатора T3, магнітопровід якого виконаний із магнітного матеріалу з прямокутною петлею гістерезису. На вторинних обмотках трансформатора T3 формуються імпульси. Вони відкривають тиристори VS1 та VS2 зі зсувом за фазою відносно напруги мережі. Частота імпульсів струму у зварювальному колі визначається положенням перемикача S3. Амплітуда імпульсів струму регулюється шляхом зміни вторинної напруги трансформатора T1 за допомогою перемикача S1 та частково шляхом зміни кута вмикання тиристорів перемикачем S2. Тривалість імпульсів ре-

гулюється перемикачем S2 через зміну ємності конденсатора у фазовому пристрої.

На принциповій електричній схемі генератора (див.рис.5.8) катоди діодів VD1 і VD2 з'єднані перемичкою (затискачі +). У залежності від наявності (відсутності) перемички та положення перемикача S3 генератор імпульсів може забезпечувати різноманітні схеми живлення зварювальних постів та режимів роботи: живлення одного зварювального поста імпульсами струму частотою 50 або 100 імп/с, одночасне або вибіркоче живлення двох незалежних зварювальних постів імпульсами струму частотою 50 імп/с.

*Малогабаритний генератор імпульсів ГИ-ИДС-2* призначений для ІДЗПЕ в інертних газах конструкцій із алюмінієвих сплавів на монтажі електростанцій, підстанцій та розподільних пристроїв. Відмітними особливостями генератора ГИ-ИДС-2 є мала маса та габарити, висока маневреність у монтажних умовах, плавне регулювання амплітуди та тривалості імпульсів струму, автоматичне керування його роботою.

Технічна характеристика генераторів імпульсів ГИ-ИДС-1 та ГИ-ИДС-2 наведена у дод.2 (див. табл.2.4).

*Генератор імпульсів ГИД-1* розроблений за часів СРСР науководослідним інститутом ВНИИЭСО і призначений для імпульсно-дугового зварювання плавким електродом в аргоні та його сумішах. Будова генератора відповідає загальній схемі, наведений на рис.5.5,б. Він використовується разом зі зварювальним джерелом живлення. Частота імпульсів струму, які генеруються, складає 50 або 100 імп/с, форма імпульсів – частина синусоїди. Генератор призначений для роботи у стаціонарних умовах та вміщує силовий трансформатор, реактор, блок кремнійових вентилів, блок керування та вентилятор. Дистанційне керування параметрами імпульсів струму здійснюється виносним змінним резистором.

Спрощену принципову електричну схему генератора показано на рис.5.9. Генератор являє собою керований випрямляч.

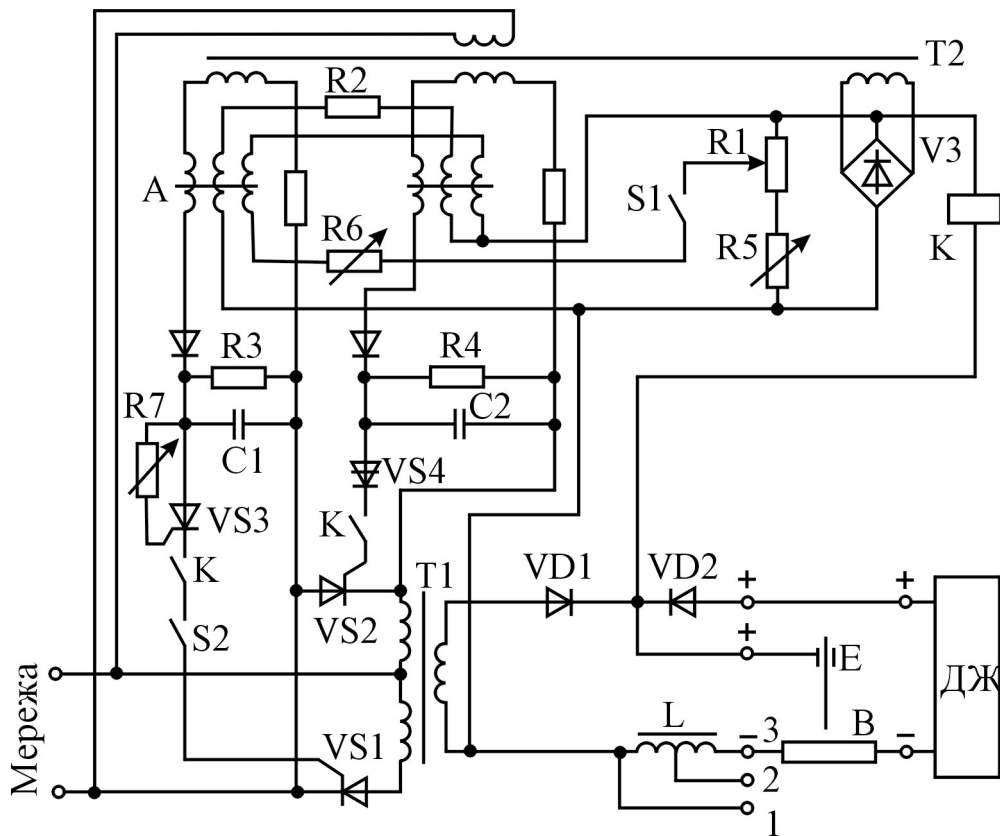


Рис. 5.9. Спрощена принципова електрична схема генератора імпульсів ГИД-1

Силовий імпульсний трансформатор Т1 містить дві первинні обмотки, ввімкнуті у мережу через тиристри VS1 та VS2. Вмикання тиристорів здійснюється на спаданні півхвилі напруги мережі. Фаза вмикання тиристорів визначає амплітуду та тривалість імпульсів струму. Вмикання одного тиристора відповідає частоті 50 імп/с, двох – 100 імп/с. Випрямлення імпульсів струму здійснюється діодом VD1, а захист основного джерела – діодом VD2.

Генератор імпульсів має три ступені плавного регулювання амплітуди та тривалості імпульсів, що досягається введенням реактора L (виводи 1–3) у зварювальне коло. Регулювання фази вмикання тиристорів здійснюється магнітним підсилювачем А, робочі обмотки якого живляться від трансформатора Т2. Обмотки керування магнітного підсилювача А підключені до випрямляча V3 через змінний резистор R1 дистанційного керування параметрами імпульсів струму, а обмотки зміщення – через резистор R2. Кожного півперіоду мережної напруги при наростанні струму в одній із робочих обмоток А напруга на резисторі R3 або R4 збільшується до напруги перемикання тиристора VS3 або диністора VS4. Після їх перемикавання відбувається розряд конденсаторів C1 та C2 через кола керуючих елек-

тродів тиристорів VS1 або VS2, що приводить до їх вмикання. Тумблером S1 припиняється подача імпульсів струму, а тумблером S2 змінюється їх частота з 50 на 100 імп/с.

Подача імпульсів струму на дугу здійснюється лише після початку процесу зварювання від основного джерела живлення ДЖ. Для цього до схеми введено реле холостого ходу К, яке при вмиканні своїми контактами вмикає тиристори VS1 та VS2.

Технічну характеристику генератора імпульсів ГИД-1 наведено у дод.2 (див. табл.2.4).

Випрямляч ВДГИ-301 суміщує функції основного та імпульсного джерел живлення і призначений для імпульсного зварювання плавким електродом у середовищі захисних газів. Джерело генерує імпульси з частотою 50 та 100 імп/с у формі частини синусоїди. Випрямляч входить до комплексу обладнання для механізованого зварювання разом з напівавтоматом ПДГИ-303, але може застосовуватися й з іншими типами напівавтоматів. Випрямляч складається з однофазного знижувального трансформатора, згладжуючого реактора, кремнієвих діодів та тиристорів, пуско-регулювальної та захисної апаратури. Силова схема джерела (рис.5.10) являє собою двопівперіодний керований випрямляч з трансформатором Т.

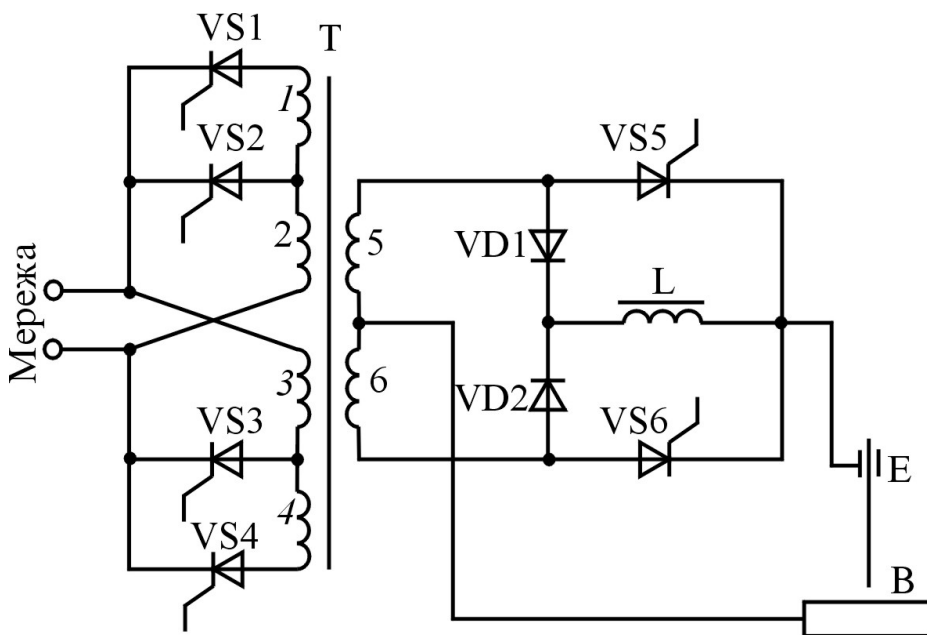


Рис. 5.10. Силова частина принципової електричної схеми випрямляча ВДГИ-301

Обмотки 1, 2, 5 розміщені на одному магнітопроводі трансформатора, 3, 4, 6 – на другому. Для забезпечення жорстких ВАХ трансформатора вторинні обмотки намотані поміж первинними, а для зменшення пульсацій базового струму в усьому діапазоні регулювання застосований нелінійний реактор L, який при малих струмах має значно більшу індуктивність, ніж при великих. Випрямляч може працювати у трьох режимах: базового струму, імпульсного струму і у режимі базового та імпульсного струмів. Вид режиму визначається порядком відкриття тиристорів.

При роботі випрямляча у режимі базового струму вмикаються тиристори VS1 та VS4 – кожний у свій півперіод – та здійснюється регулювання вторинної напруги трансформатора. Ця напруга випрямляється за допомогою випрамної схеми з нульовим виводом вторинної обмотки трансформатора, зібраної на діодах VD1 та VD2. Через реактор L напруга подається на вихідні клеми випрямляча. Діаграму напруг на різних елементах схеми при роботі випрямляча у режимі базового струму наведено на рис.5.11.

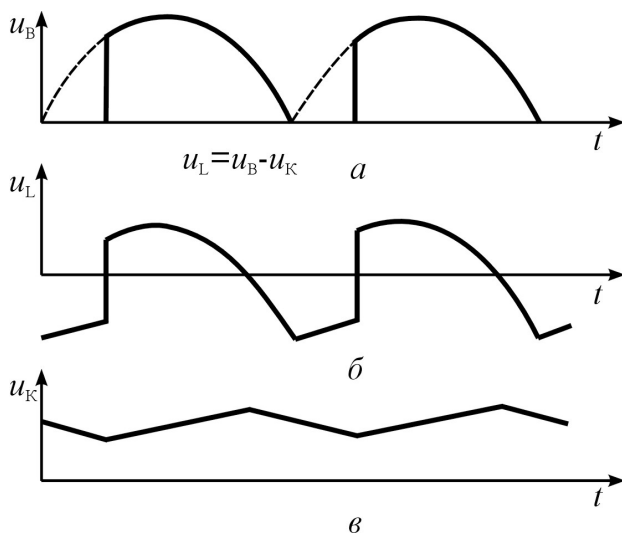


Рис. 5.11. Напруга на виході схеми випрямлення  $u_B$ , на реакторі  $u_L$  та на вихідних клемах випрямляча  $u_K$  при роботі випрямляча в режимі базового струму

Схема керування дає змогу змінювати нахил зовнішніх характеристик при роботі випрямляча у режимі базового струму. При великих струмах ВАХ жорсткі, а при малих – для стабілізації базового струму та запобігання обривам дуги – крутоспадні.

При роботі випрямляча у режимі імпульсного струму відкриваються тиристори VS5 або VS6, які шунтують реактор L, та напруга випрямляча у формі частини синусоїди подається на дугу. Якщо одночасно вмикаються тиристори VS1 та VS5 (або VS4 та VS6), то у

відповідний півперіод мережної напруги реактор шунтується тиристором VS5 (VS6) і на дугу потрапляють імпульси струму. Такому режиму роботи відповідає діапазон малої амплітуди.

Якщо тиристири VS2 та VS5 (або VS3 та VS6) вмикаються одночасно, тиристири VS1 (VS4) вимикаються, то коефіцієнт трансформації трансформатора  $T$  зменшується і випрямляч працює у діапазоні імпульсів великої амплітуди. Напруга в дузі при роботі випрямляча в режимі імпульсного

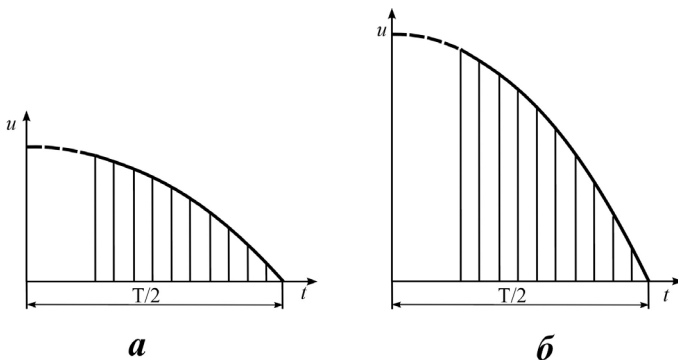


Рис. 5.12. Зміна напруги з часом в дузі у діапазоні імпульсів з малою (а) та великою (б) амплітудою при роботі випрямляча в режимі імпульсного струму

струму змінюється відповідно до діаграми на рис.5.12.

У кожному діапазоні амплітуда та тривалість імпульсів визначається фазовим кутом вмикання тиристорів VS1 (VS6).

При роботі випрямляча у режимі базового та імпульсного струму відбувається періодичне перемикавання режиму базового на режим імпульсного струму.

Після вмикання тиристора VS1 (VS4) базовий струм, що тече через діод VD1 (VD2), реактор  $L$  та зварювальну дугу, починає зростати. При вмиканні тиристора VS5 (VS6) реактор шунтується і вся напруга вторинної обмотки 5 (б) трансформатора  $T$  у вигляді імпульсу за формою, подібною до частини синусоїди, подається на дугу. Струм тиристора VS5 (VS6) дорівнює різниці значень прямого струму (струму дуги) та зворотного (струму реактора). Внаслідок того, що прямий струм більший за зворотний, тиристор відкритий. Але з бігом часу прямий струм зменшується відповідно до зменшення миттєвих значень напруги півхвилі синусоїди, а зворотний струм практично залишається постійним за значенням. У той момент, коли відбувається рівність цих струмів, тиристор VS5 (VS6) закривається і випрямляч починає працювати у режимі базового струму.

Таким чином, з моменту вмикання тиристора VS1 до моменту вмикання тиристора VS5 струм реактора зростає, при цьому зростає енергія



реактора. Під час імпульсу струм реактора не змінюється і реактор зберігає запасену енергію до закінчення імпульсу. Після закриття тиристора VS5 ця енергія віддається у зварювальне коло у вигляді базового струму до вмикання тиристора VS4 у наступний півперіод. При перемиканні джерела на роботу в діапазоні імпульсів великої амплітуди одночасно з тиристором VS5 (VS6) вмикається VS2 (VS3), а VS1 (VS4) вимикається завдяки докладеній до нього зворотній напрузі з обмотки 1 (4) трансформатора Т.

На рис.5.13 показані зміни напруги і струму з часом, що ілюструють роботу випрямляча у режимі базового та імпульсного струму.

Частота 50 імп/с забезпечується вмиканням лише одного тиристора VS5 (VS6) протягом періоду мережної напруги.

*Імпульсний пристрій живлення зварювальної дуги ИУП-1* розроблений

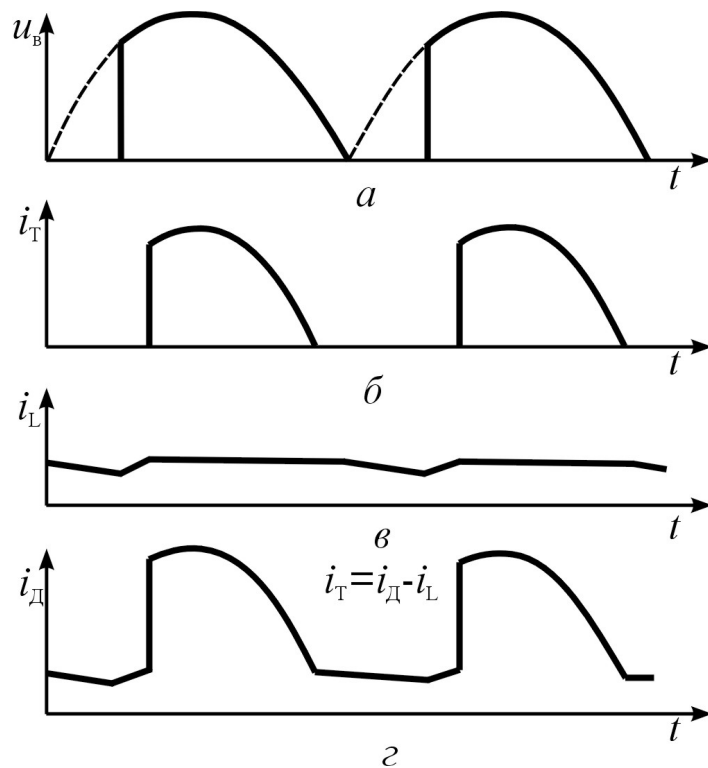


Рис. 5.13. Зміна напруги на виході схеми випрямлення  $u_B$  (а), струму  $i_T$  тиристора VS5(VS6) (б), струму реактора  $i_L$  (в) та струму дуги  $i_d$  при роботі випрямляча в режимі базового та імпульсного струму

в ІЕЗ імені Є.О. Патона. Цей пристрій є універсальним як за призначенням, так і за способом вмикання у зварювальне коло. Він може використовуватися у різних варіантах:

для ІДЗПЕ на струмах до 350 А як автономний пристрій, коли базовий струм та струм імпульсів забезпечується самостійно;

для ІДЗПЕ на струмах більше 350 А як генератор імпульсів при спільній роботі з серійними джерелами постійного струму;

для зварювання неплавким електродом у режимах імпульсної модуляції зварювального струму та без неї;

для ручного електродугового зварювання покритими електродами в усіх просторових положеннях з імпульсною модуляцією зварювального струму та без модуляції.

Технічні характеристики випрямляча ВДГИ-301 та імпульсного пристрою ИУП-1 наведені у дод. 2 (див. табл.2.4).

## **5.6. Особливості настроювання та регулювання вихідних параметрів імпульсних джерел живлення**

Перед настройкою джерел вибирають параметри режиму зварювання та параметри імпульсів. Можливі два варіанти завдання вихідних даних: 1) задаються параметри режиму зварювання і параметри імпульсного процесу; 2) задаються тільки параметри режиму зварювання. В останньому випадку потрібно визначити необхідні параметри імпульсного процесу. Настройку обладнання та джерел живлення виконують на безімпульсному процесі.

Джерело живлення настроюється на необхідну напругу, а зварювальний автомат або напівавтомат – на задану швидкість подачі електродного дроту, яка забезпечує необхідний зварювальний струм.

Розглянемо принципи настройки імпульсних джерел живлення з нагромаджувачами та без нагромаджувачів енергії.

В імпульсних джерелах з нагромаджувачами енергії (конденсаторного типу) амплітуда імпульсів встановлюється напругою заряду конденсатора, яку можна регулювати ступінчасто шляхом секціонування обмоток трансформатора, плавно – шляхом зміни кута вмикання тиристорів у зарядному колі, а також спільним використанням вказаних способів. Тривалість імпульсів встановлюється параметрами розрядного кола – ємністю та індуктивністю, які регулюються, як правило, ступінчасто. Слід мати на увазі, що зміна ємності та індуктивності приводить також до зміни амплітуди імпульсів.

В імпульсних джерелах живлення без нагромаджувачів енергії імпульси струму формуються подачею на дуговий проміжок трансформованої мережної напруги. Тривалість імпульсів встановлюється кутом вмикання тиристорів, а амплітуда – зміною живильної напруги шляхом секціонування первинної або вторинної обмотки силового трансформатора.

Точна оцінка настройки джерел живлення на заданий режим при імпульсно-дуговому зварюванні може бути виконана за осцилограмами струму та напруги в дузі.

Приблизна оцінка правильності настройки джерела може бути виконана за відсутністю краплі на кінці електрода, за коефіцієнтом втрат металу на угар та розбризкування, за відсутністю пришовних виплесків.

Режим зварювання встановлюється за допомогою органів керування та настройки джерел живлення. В процесі зварювання, як правило, контролюються середні значення струму та напруги дуги, яким може відповідати різне сполучення параметрів режиму. Тому на якість зварного з'єднання великий вплив має досвід зварника. Для зменшення впливу суб'єктивного фактора на процес та якість зварного з'єднання ефективним засобом є автоматизація настройки джерел живлення на оптимальний режим. При заданні таких вихідних даних, як товщина та марка металу, що зварюється, вид з'єднання, просторове положення шва, система автоматичної настройки забезпечує вибір усіх параметрів. Такі системи використовуються у сучасних інверторних джерелах живлення з програмним керуванням на базі мікропроцесорів.

### **Контрольні питання**

1. Які фактори впливають на стабільність режиму при імпульсно-дуговому зварюванні плавким електродом?
2. У чому полягають особливості вимог до імпульсних джерел живлення?
3. Які типові схеми формування імпульсного струму використовуються в сучасних джерелах живлення?
4. Чим принципово відрізняються схеми імпульсних джерел з нагромаджувачами та без нагромаджувачів енергії? Чим відрізняється настройка цих джерел на заданий режим зварювання?

## Глава 6

# ДЖЕРЕЛА ЖИВЛЕННЯ ДЛЯ АРГОНОДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ НЕПЛАВКИМ ЕЛЕКТРОДОМ

Джерела живлення для аргонодугового зварювання неплавким електродом, а також універсальні призначені для зварювання сталей з особливими властивостями (корозійностійких, жароміцних, жаростійких) кольорових і легких металів, а також сплавів на їх основі. Ці джерела живлення забезпечують високу якість зварних з'єднань, можливість автоматизації та роботизації зварювального процесу. Внаслідок цього вони відрізняються складністю електричних схем, наявністю зворотних зв'язків за напругою мережі живлення та параметрами зварювального кола. Тому такі джерела називаються параметричними.

Характерною особливістю всіх джерел живлення для зварювання неплавким електродом є крутоспадна зовнішня характеристика. Така ВАХ забезпечує стабільність сили струму при коливаннях довжини дуги та стійкість роботи енергетичної системи "джерело живлення – дуга – ванна" (див. гл.1).

Для отримання спадної ВАХ ці джерела живлення мають або високу напругу холостого ходу, що у 4...6 разів перевищує робочу напругу, або глибокий зворотний зв'язок за струмом. В останньому випадку є можливість формувати також вертикальну ("штикову") зовнішню характеристику.

У зв'язку з тим, що глибина проплавлення при зварюванні неплавким електродом дуже чутлива до коливань струму, особливо при зварюванні тонких металів, при зварюванні без формуючих пристроїв або в різних просторових положеннях, до джерел живлення ставляться підвищені вимоги щодо стабілізації струму при зміні напруги мережі живлення, коливаннях температури та інших збуреннях. Точність стабілізації струму в деяких джерелах досягає 1...2 %.

Другою особливістю джерел живлення для зварювання неплавким електродом є широкий діапазон регулювання струму. Це пов'язано з необхідністю зниження струму в 2,5...3,0 рази в кінці процесу зварювання для заповнення кратера шва, що виникає під дією тиску дуги. З цього при-

воду для зварювання неплавким електродом не використовують джерела живлення зі ступінчастим або механічним регулюванням струму. При плавно-ступінчастому регулюванні діапазони повинні перекриватися з тим, щоб забезпечити в одному діапазоні зниження струму, необхідне для зварювання кратера. Пристрої для зварювання кратера містять усі джерела струму для цього виду зварювання.

Джерела живлення сучасних установок забезпечують також плавне зростання струму на початку процесу зварювання, що дає змогу уникнути руйнування та перенесення в шов матеріалу електрода (вольфрама), які виникають у результаті різких кидків струму при холодному електроді.

Деякі джерела для зварювання неплавким електродом забезпечують зварювання дугою, що пульсує. Тривалість імпульсу та паузи змінюється від 0,01 до 1...3 с, глибина модуляції – до 10...12 разів. Використання імпульсних режимів накладає підвищені вимоги на динамічні властивості джерела живлення, зокрема на сталу часу його кола керування.

Характерні особливості мають також джерела для аргонодугового зварювання змінним струмом.

По-перше, щоб запобігти нестійкому горінню дуги в зв'язку з різким ростом напруги повторного збудження, що виникає внаслідок струмової паузи під час зміни полярності з прямої на зворотну, зварювання ведеться, як правило, у режимі безперервних струмів. При цьому напруга холостого ходу має бути не менше 70...80 В, а в деяких випадках (наприклад, при зварюванні в середовищі гелію або при зварюванні на малих струмах) досягає 120 В. Для безпеки зварника в усіх установках для зварювання неплавким електродом передбачається вимикання холостого ходу через 1...2 с.

Для полегшення повторного збудження дуги використовуються спеціальні пристрої, що прискорюють перехід через нуль.

По-друге, у зв'язку з великою різницею напруг горіння дуг прямої та зворотної полярності та несприятливого впливу на якість зварювання постійної складової струму дуги (див. гл.1) у джерелах змінного зварювального струму застосовують пристрої компенсації постійної складової струму.

Таким чином, наявність допоміжних пристроїв у джерелах живлення для аргонодугового зварювання вимагає їх розгляду як особливої групи джерел зварювального струму.

## **6.1. Спеціалізовані функціональні пристрої джерел живлення**

### **6.1. 1. Початкове запалювання дуги**

Пристрої для початкового запалювання дуги в установках для аргонодугового зварювання поділяються на два класи: пристрої підпалювання від короткого замикання торканням та пристрої підпалювання через газовий проміжок.

При підпалюванні коротким замиканням можливий перенос електродного металу в зварний шов (утворення вольфрамових включень). Для усунення цього небажаного явища запалювання повинно здійснюватися при малому струмі (5...20 А, залежно від форми загострення кінця електрода). Пристрій для підпалювання підтримує малий струм короткого замикання до того часу, коли збуджується дуга, і лише потім забезпечує його плавне наростання до робочого значення.

Але в більшості випадків при зварюванні неплавким електродом, а іноді і плавким електродом, небажано або неприпустимо запалювання дуги торканням електрода до виробу.

При збудженні дуги шляхом пробою міжелектродного проміжку не тільки спрощується техніка запалювання дуги, а й значно зменшуються витрати неплавкого (вольфрамового) електрода. Пристрої, призначені для безконтактного збудження дуги, за принципом дії є генераторами високовольтних високочастотних імпульсів напруги та дістали назву збудників горіння дуги або осциляторів. До них ставляться такі основні вимоги:

забезпечення надійного збудження дуги у всіх можливих режимах роботи зварювальної установки за час, значно менший часу виконання зварювання;

безпека роботи зварника;

відсутність впливу на надійність роботи зварювальної установки.

Збудники дуги використовуються для запалювання дуги постійного або змінного струму. В останньому випадку збудники мають забезпечувати певну мить подачі імпульсу напруги на дугу.

Збудники можуть житися безпосередньо напругою мережі або використовувати напругу зварювальної дуги. Останні збудники мають переваги перед першими: вони не потребують додаткового кола живлення, автоматично вимикаються при подачі напруги на дуговий проміжок та також автоматично припиняють роботу після збудження дуги.

Головними складовими частинами збудника є джерело високої напруги, високочастотний генератор та пристрій вводу високої напруги в коло зварювальної дуги.

Численні схеми збудників можна об'єднати у дві основні групи: з безперервним та імпульсним живленням.

Збудники з безперервним живленням достатньо прості за схемою та конструкцією, але сьогодні вони можуть характеризуватися як застарілі пристрої. Проте вони ще використовуються у промисловості та випускаються деякими підприємствами.

У таких збудниках (рис.6.1) джерелом високої напруги є високовольтний трансформатор Т2 з підвищеним електромагнітним розсіюванням, розрахований на напругу мережі живлення та підключений до неї вимикачем SA1 протягом всієї роботи збудника. Джерелами високої частоти в таких збудниках є, як правило, іскрові генератори.

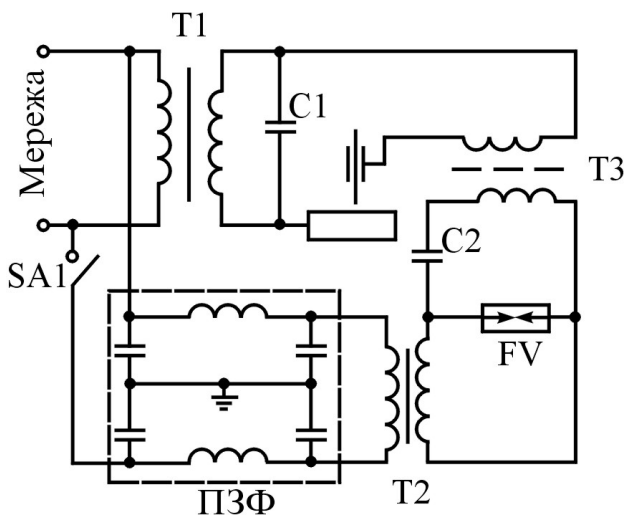


Рис. 6.1. Збудник горіння дуги з безперервним живленням

Розрядник FV, конденсатор C2 та первинна обмотка високочастотного вихідного трансформатора Т3 (або обмотка вихідного дроселя) утворюють коливальний контур високочастотного генератора. Вторинна обмотка вихідного трансформатора Т3 (або обмотка дроселя) може підключатися паралельно дуговому проміжку або, як показано на рис.6.1, вмикатися послідовно у зварювальний контур.

Конденсатор C2 заряджається від трансформатора Т2 до напруги пробою розрядника, після чого в контурі виникають високочастотні згасаючі коливання, частота яких визна-

чається параметрами контуру, а амплітуда – напругою пробою розрядника. Частоту електромагнітних коливань можна розрахувати за формулою

$$f_k = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L_k C_k} - \left(\frac{R_k}{2L_k}\right)^2}, \quad (6.1)$$

де  $L_k$ ,  $C_k$  – відповідно індуктивність, Гн, та ємність, Ф, елементів, що утворюють коливальний контур;  $R_k$  – активний опір контуру, Ом.

Наявність активного опору контуру обумовлює періодичне згасання коливань у межах кожної півхвилі змінного струму. Кожного півперіоду напруги збудник генерує 10...15 згасаючих високочастотних імпульсів з інтервалом близько 0,5 с. Частота коливань складає 200...250 кГц, напруга 3...6 кВ, енергія одного імпульсу не перевищує 0,1 Дж.

Захист джерела зварювального струму Т1 від напруги високої частоти здійснюється конденсатором фільтра С1.

Збудники з безперервним живленням мають низку недоліків. Наявність складного та громіздкого низькочастотного високовольтного трансформатора обумовлює високу матеріаломісткість цих пристроїв. Наявність високої напруги низької частоти робить такі збудники джерелами підвищеної небезпеки для персоналу. Наявність іскрового генератора, що генерує широкий спектр частот, підвищує рівень радіоперешкод, створених збудником. Незважаючи на те, що такі збудники обладнуються громіздкими перешкодозахисними фільтрами ПЗФ (див.рис.6.1), рівень радіоперешкод не вдається знизити до припустимих норм. Тому час роботи та частоту вмикання таких збудників треба строго обмежувати – їх слід вимикати одразу ж після збудження дуги.

До розглянутого типу збудників належать осцилятор послідовного вмикання в зварювальне коло ОСППЗ-300-М та паралельного вмикання ОСПЗ-2М.

Друга група збудників – з імпульсним живленням – побудована на основі схем тиристорних формувачів імпульсів з ємнісним нагромаджувачем енергії. Заряд нагромаджувача відбувається від допоміжного малопотужного джерела постійної напруги, розряд – через тиристор на первинну обмотку підвищувального імпульсного трансформатора. Генерація імпульсів здійснюється один раз у півперіод напруги мережі, причому момент гене-



рації строго узгоджується з вибраною фазою напруги джерела зварювального струму.

У збуднику з імпульсним живленням (рис.6.2) попередньо накопичена в нагромаджувачі енергія виділяється за короткий час на конденсаторі  $C_n$ .

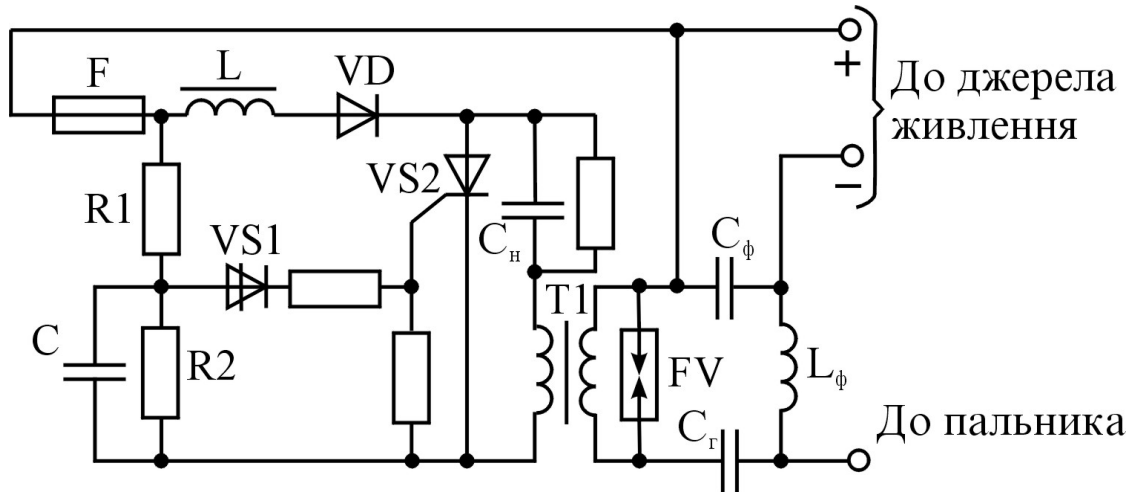


Рис. 6.2. Принципова схема збудника дуги з імпульсним живленням

Збудник живиться від кола зварювальної дуги через запобіжник F. Резистори R1, R2, конденсатор C та діодний тиристор (диністор) VS1 утворюють блок, при спрацюванні якого конденсатор C розряджається через керуюче коло тиристора VS2. При цьому тиристор відкривається та розряджає нагромаджувальний конденсатор  $C_n$ , заряджений через дросель L та діод VD, на первинну обмотку імпульсного трансформатора T1.

Розрядник FV, конденсатор  $C_\phi$  і дросель  $L_\phi$  утворюють генератор високої частоти; конденсатор  $C_\phi$  разом з дроселем  $L_\phi$  створюють фільтр високих частот. За такою схемою побудований збудник ВІР-101, що використовується в установках для плазмового різання.

Для зварювання використовується імпульсний збудник послідовного вмикання УПД-1, який генерує імпульси з частотою 100 Гц. Його особливістю є відсутність комутатора (розрядника) на стороні високої напруги. Наслідком цього є низький рівень перешкод, що створюються збудником.

### 6.1.2. Імпульсна стабілізація горіння дуги

Стабілізатор горіння дуги – необхідний елемент обладнання для дугового зварювання алюмінію та його сплавів неплавким електродом на змінному струмі промислової частоти. Стабілізатор забезпечує повторне збу-

дження дуги під час зміни полярності з прямої на зворотну і тому повинен генерувати імпульси такої енергії та тривалості, при яких жевріючий розряд стабільно переходить у дуговий. Рекомендовані параметри імпульсів: амплітуда напруги 500...600 В, амплітуда струму імпульсів 60...80 А, тривалість імпульсу не менше 60 мкс. Імпульси повинні генеруватися через 60...100 мкс після зміни полярності зварювального струму один раз у період при формуванні катода на алюмінії.

У схемі імпульсного стабілізатора горіння дуги (рис.6.3) заряд конденсатора  $C_H$  здійснюється від вторинної обмотки трансформатора  $T$  через діод  $VD$  та струмообмежувальний резистор  $R_{обм}$ . Діод  $VD$  відвертає розряд конденсатора  $C_H$  на вторинну обмотку трансформатора  $T$  при зниженні напруги на ній. При подачі керуючого імпульсу до тиристора  $VS$  від схеми керування (на рис.6.3 не показана) конденсатор  $C_H$  розряджається на дуговий проміжок між електродом  $E$  та виробом  $B$  через коло  $VS-R_{бал}-E-B$ . Відкриття тиристора  $VS$  відбувається при досягненні позитивного потенціалу на його аноді відносно катода, а закриття – після повної розрядки конденсатора  $C_H$ .

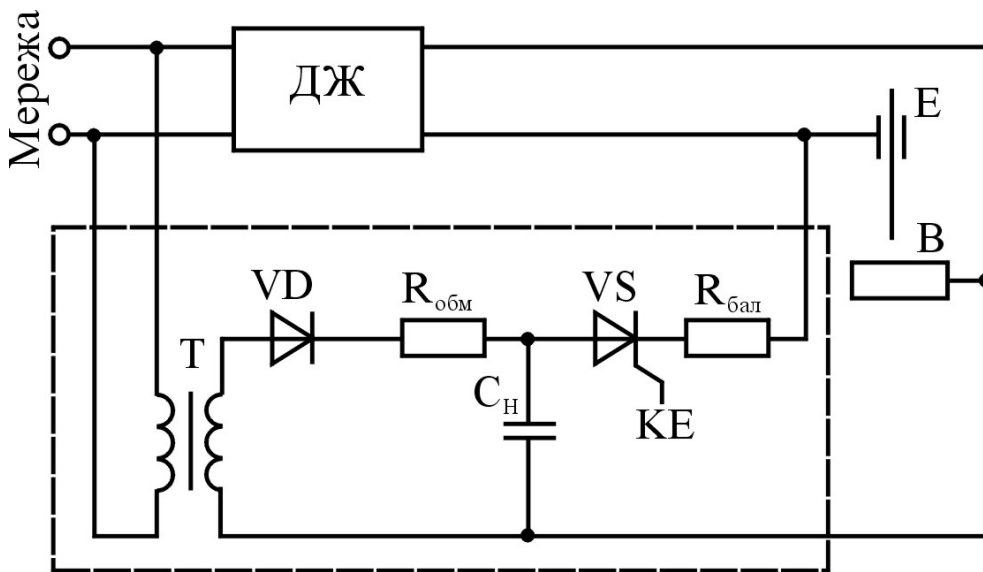


Рис. 6.3. Електрична схема імпульсного стабілізатора горіння дуги

Останнім часом у більшості установок для аргонодугового зварювання використовують пристрої, які поєднують функції збудника і стабілізатора дуги.

Одним з таких пристроїв є збудник-стабілізатор ВСД-01, який розроблений та серійно випускається в Росії. Він призначений для збудження та

стабілізації горіння дуги при аргонодуговому зварюванні та може використовуватися для стабілізації горіння дуги при зварюванні покритими електродами на постійному струмі.

Збудник-стабілізатор підключається до мережі змінного струму паралельно зварювальному трансформатору Т1 (рис.6.4) та керується напругою, що знімається з його вторинної обмотки.

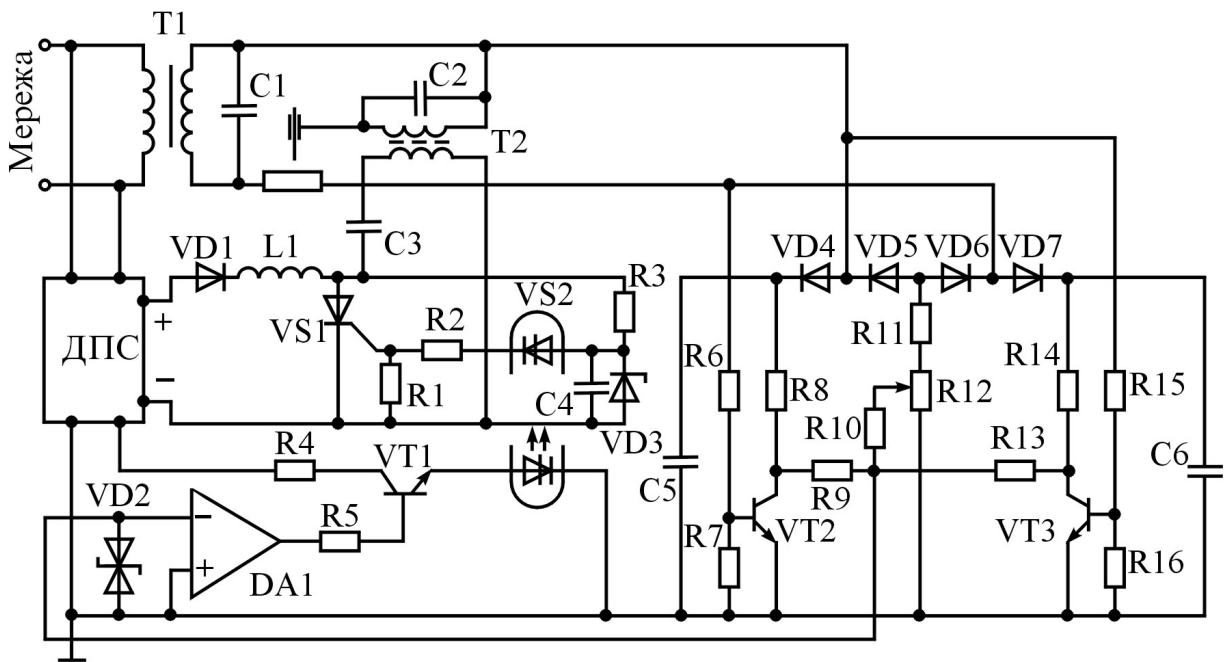


Рис. 6.4. Імпульсний збудник – стабілізатор горіння дуги

Нагромаджувальний конденсатор С3 заряджається від допоміжного малопотужного джерела постійного струму (ДПС) через зарядний дросель L1 і діод VD1. При вмиканні тиристора VS1 відбувається розряд конденсатора С3 на первинну обмотку високочастотного трансформатора Т2 з феритовим магнітопроводом. Циклічний заряд конденсатора С3 забезпечує на ньому значення напруги, яке в 4...5 разів перевищує напругу ДПС.

У зв'язку з тим, що генерація імпульсів відбувається з частотою 100 Гц, заряд і розряд конденсатора С3 здійснюються протягом одного півперіоду напруги мережі, при цьому власна частота коливань зарядного контуру в 3...4 рази перевищує частоту мережі.

Власна частота розрядного контуру близько 20 кГц. Розрядний струм має практично синусоїдальну форму, напруга на обмотках трансформатора змінюється за законом косинуса. Миттєво зростаючий імпульс напруги на вторинній обмотці, що шунтована високочастотним конденсатором С2, за-

безпечує в цьому контурі ударне збудження високочастотних коливань з частотою 2...3 МГц, які потрапляють до дугового проміжку через конденсатор високочастотного фільтра С1.

Коло керування тиристором VS1 містить оптронний тиристор VS2 і конденсатор С4, заряджений через коло R3, VD3.

На виході транзистора VT1, який керується операційним підсилювачем DA1, ввімкнутий світлодіод тиристора VS2. Прямий вхід підсилювача підключений до нульової точки схеми і, відповідно, підсилювач вмикається, коли на його інверсний вхід потрапляє негативний потенціал. Стабілітрон VD2 захищає вхід підсилювача від перенапруг.

Потенціал інверсного входу підсилювача визначається станом схеми, що зібрана на транзисторах VT2, VT3, діодах VD4...VD7, резисторах R6...R16. Ця схема живиться від вторинної обмотки трансформатора Т1.

У півперіоди зворотної полярності заряджається (або підзаряджається) конденсатор С5 через діод VD4 та резистори R6, R7; транзистор VT3 при цьому відкритий. Потенціал колектора транзистора VT3 дорівнює нулю, а потенціала колектора транзистора VT2 визначається потенціалом конденсатора С5.

У півперіод прямої полярності транзистор VT2 відкритий, а потенціал колектора транзистора VT3 визначається потенціалом конденсатора С6.

Напруга на інверсному вході підсилювача в кожному півперіод визначається різницею середнього та миттєвого значень напруг своєї півхвилі, що знімаються відповідно з конденсатора С5 (або С6) та резисторів R11, R12. У момент порівняння цих напруг кожного півперіоду відбувається вмикання підсилювача DA1 збудника-стабілізатора.

Завдяки відсутності іскрового генератора рівень перешкод радіоприйому відповідає встановленим нормам, і збудник-стабілізатор може працювати в тривалому режимі та генерувати імпульси напругою 5 кВ, з енергією до 0,7 Дж.

### **6.1.3. Обмеження постійної складової змінного струму**

Вище (див. гл.1) розглянуто виникнення постійної складової струму при зварюванні, її несприятливу дію на джерело живлення та показано необхідність її усунення або обмеження до припустимих значень.

У минулі роки в промисловості для повного або часткового усунення постійної складової змінного струму використовували два способи: вмикання послідовно у зварювальне коло конденсаторної батареї або резистора, зашунтованого силовим діодом.

Перший спосіб забезпечує повну компенсацію постійної складової струму, але він пов'язаний зі значним зростанням габаритів і маси зварювальної установки та, крім того, є економічно недоцільним.

Другий спосіб поширений головним чином при створенні збірних зварювальних постів для аргонодугового зварювання. Полярність діода вибирається такою, щоб він пропускав струм у півперіоди зворотної полярності. У півперіод прямої полярності діод закритий і значення струму обмежено резистором, що ввімкнутий паралельно діоду. З тим, щоб усунути постійну складову струму при різних режимах зварювання, резистор має бути змінним. Недолік такого пристрою – необхідність його перенастройки при зміні режиму зварювання та значні енергетичні втрати при проходженні прямої півхвилі струму через резистор.

Використання в зварювальній техніці силових тиристорів привело до появи більш ефективних та економічних способів обмеження постійної складової струму.

У сучасних установках для аргонодугового зварювання алюмінію та його сплавів постійну складову струму обмежують шляхом зустрічно-паралельного вмикання у зварювальне коло діода для пропускання півхвилі зворотної полярності та тиристора для пропускання півхвилі струму прямої полярності.

У пристрої на рис.6.5 зварювальний струм півхвилі зворотної полярності проходить через діод VD1. Струм півхвилі прямої полярності проходить через тиристор VS1, який відкривається приблизно через 1 мс після появи на його аноді напруги, що дорівнює різниці між напругою холостого ходу трансформатора T1 та напругою в дузі. Струм дуги від моменту закінчення півперіоду зворотної полярності до вмикання тиристора підтримується на мінімально необхідному рівні через резистор R<sub>д</sub>.

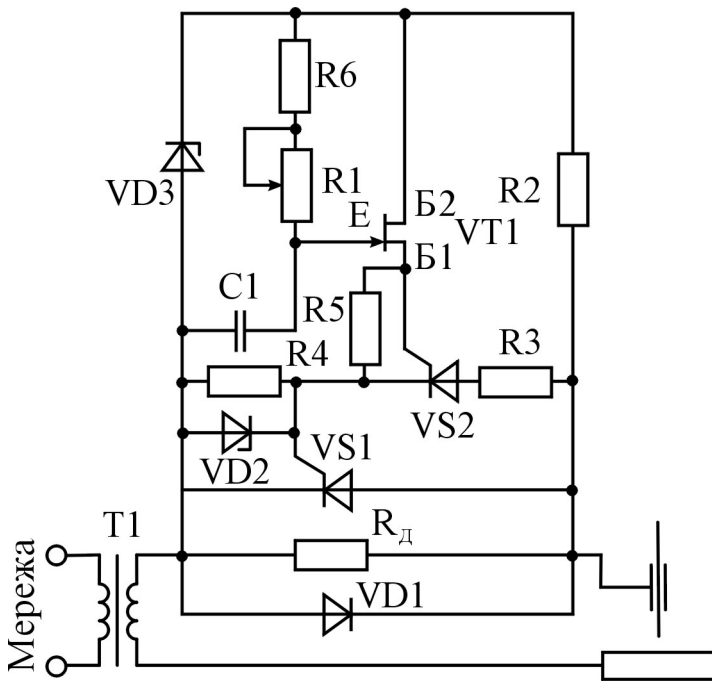


Рис. 6.5. Пристрій обмеження постійної складової зварювального струму

Витримка часу  $\tau = 0,001$  с забезпечується роботою лінії затримки. Конденсатор C1 заряджається до напруги перемикачання, пропорційній напрузі стабілізації стабілітрона VD3. Струм стабілітрона задається баластним резистором R2. У момент перемикачання одноперехідного транзистора VT1 розрядний струм конденсатора відкриває допоміжний малопотужний тиристор VS2, і в коло керування тиристором VS1 потрапляє імпульс струму необхідної тривалості.

Струм керування обмежується резистором R3, напруга – стабілітроном VD2. Після вмикання тиристора VS1 усі елементи схеми керування практично позбавляються струму.

У джерелах живлення змінного струму з тиристорним регулюванням спеціальний пристрій компенсації постійної складової струму не потрібний. У цих джерелах передбачаються дві окремі системи автоматичного регулювання для струму прямої та зворотної полярності. Кожна система регулювання має свій блок завдання значення струму, датчик струму, ввімкнутий послідовно з відповідним тиристором, та формувач імпульсів керування для цього тиристора. За допомогою блоків завдання струму прямої та зворотної полярності задаються значення і полярність постійної складової струму або передбачається її повне усунення. При цьому підтримка заданого значення постійної складової струму здійснюється системами автоматичного регулювання незалежно від ступеня випрямної дії дуги, її довжини та інших факторів режиму зварювання.

### 6.1.4. Заварювання кратера шва

Для заварювання кратера шва в установках автоматичного аргонодугового зварювання неплавким електродом використовують пристрої плавного зниження зварювального струму в кінці зварювання.

Одним із варіантів побудови регулятора зниження зварювального струму (РЗЗС) є схема, наведена на рис.6.6,*a*. У цьому пристрої використовується однокаскадний підсилювач струму за схемою зі спільним емітером. На вході транзистора VT підключене коло R1–C, яке живиться від зовнішнього джерела постійного струму (на рис.6.6,*a* не показано) через вимикач та змінний резистор R2. Для обмеження базового струму транзистора ввімкнутий резистор R3. Підсилювач струму живиться від джерела постійної напруги через резистор навантаження  $R_H$ , який імітує вхідне коло регулятора джерела зварювального струму (наприклад, підмагнічений шунт трансформатора з магнітним керуванням).

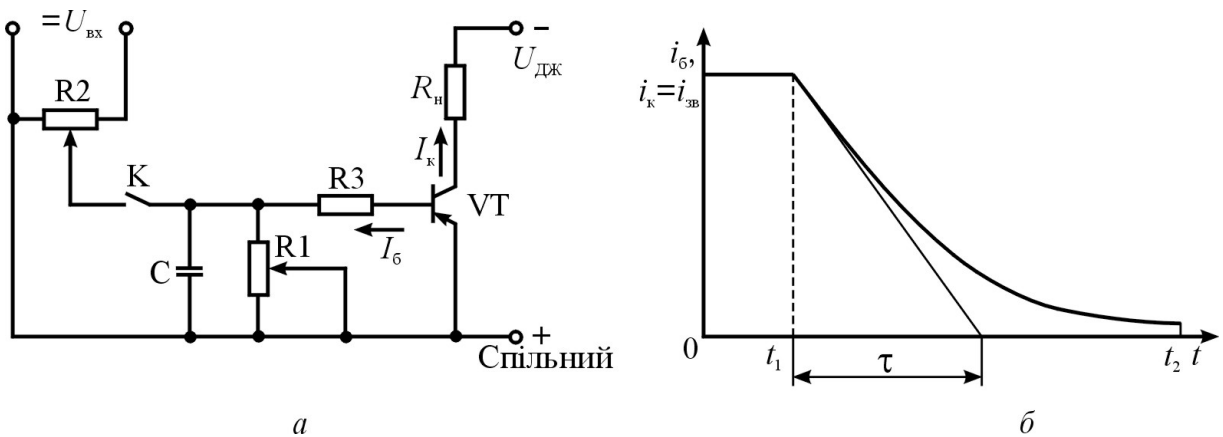


Рис. 6.6. Регулятор зниження зварювального струму на базі однокаскадного транзисторного підсилювача струму (*a*) та зміна колекторного і базового струмів з часом (*б*)

Струм бази визначається відповідно до виразу

$$I_6 = \frac{U_{\text{вх}}}{R_3 + R_{\text{е-б}}}, \quad (6.2)$$

де  $I_6$  – струм бази транзистора, А;  $U_{\text{вх}}$  – напруга на вході транзистора, В;  $R_3$  – опір обмежувального резистора, Ом;  $R_{\text{е-б}}$  – опір переходу: емітер–база транзистора, Ом.

Колекторний струм транзистора VT у сталому режимі залежить від напруги живлення транзистора, опору навантаження та базового струму.

У процесі зварювання вимикач К замкнений, конденсатор С заряджається до вхідної напруги. При цьому параметри підсилювача струму підбирають так, щоб забезпечити необхідний коефіцієнт підсилювання при номінальному струмі.

У кінці зварювання вимикач К розмикається сигналом від схеми керування джерелом живлення. Але колекторний струм не переривається, а зменшується плавно в результаті розряду конденсатора С на вхідне коло транзистора. Постійна часу розряду конденсатора С визначається як

$$\tau = C \frac{R_1(R_3 + R_{e-б})}{R_1 + R_3 + R_{e-б}}, \quad (6.3)$$

де  $R_1$ ,  $R_3$  – відповідно опори змінного та обмежувального резисторів, Ом,  $R_{e-б}$  – опір переходу емітер–база транзистора, Ом;  $C$  – ємність конденсатора, Ф.

За допомогою змінного резистора  $R_1$  можна плавно змінювати зварювальний струм протягом даного часу заварювання кратера шва.

З метою забезпечення високої якості зварювання підсилювач повинен мати лінійну характеристику, тоді колекторний струм так само, як і базовий струм, змінюватиметься строго за експонентою. В момент часу  $t_2$  (рис.6.6,б) зниження сили зварювального струму закінчується і джерело живлення зварювальної дуги відмикається від мережі.

Подібні пристрої заварювання кратера шва в новітніх зварювальних джерелах живлення побудовані на інтегральних аналогових та дискретних мікросхемах. При цьому вони разом з іншими спеціалізованими пристроями забезпечують повну автоматизацію керування циклом зварювання: подачу захисного газу в зону зварювання, вмикання, з певною витримкою часу, збудника-стабілізатора горіння дуги, плавне наростання зварювального струму, зварювання в безперервному або імпульсному режимі, заварювання кратеру шва, вимикання струму, газовий захист зони шва, вимикання джерела живлення від мережі.



## 6.2. Джерела живлення для зварювання змінним струмом

Джерела живлення для аргонодугового зварювання змінним струмом конструктивно поєднуються з пристроями збудження дуги, компенсації постійної складової струму, стабілізації горіння дуги, зниження струму для заварювання кратера шва та апаратурою керування циклом зварювання і подачею захисного газу, а також обладнуються зварювальними пальниками. У такому вигляді ці вироби містять усе необхідне для ручного або автоматичного зварювання і називаються установками для зварювання змінним струмом.

Такі установки використовуються для зварювання алюмінію та його сплавів вольфрамовим електродом.

*Зварювальні установки УДГ-301-1 та УДГ-501-1* призначені для ручного дугового зварювання алюмінію та його сплавів вольфрамовим електродом у захисному середовищі аргону, можуть використовуватися також як джерела живлення для автоматичного зварювання.

Функціональну блок-схему установки наведено на рис.6.7. Джерело живлення установки містить однофазний силовий трансформатор Т, що виконує також функцію регулятора струму за допомогою нерухомого шунта з підмагнічуванням постійним струмом. Осердя магнітного шунта встановлене перпендикулярно стрижням трансформатора, на яких розміщені секціоновані обмотки трансформатора. На осерді розміщена обмотка керування, через яку тече постійний струм. Плавна зміна величини цього струму впливає на магнітний стан осердя і, як наслідок, – на величину зварювального струму. Як і трансформатори серії ТДФ, установки УДГ-301-1 та УДГ-501-1 мають два діапазони регулювання струму. Зміна діапазону здійснюється перемиканням обмоток силового трансформатора: ступінь великих струмів – при паралельному з'єднанні обмоток і ступінь малих струмів – при їх послідовному з'єднанні.

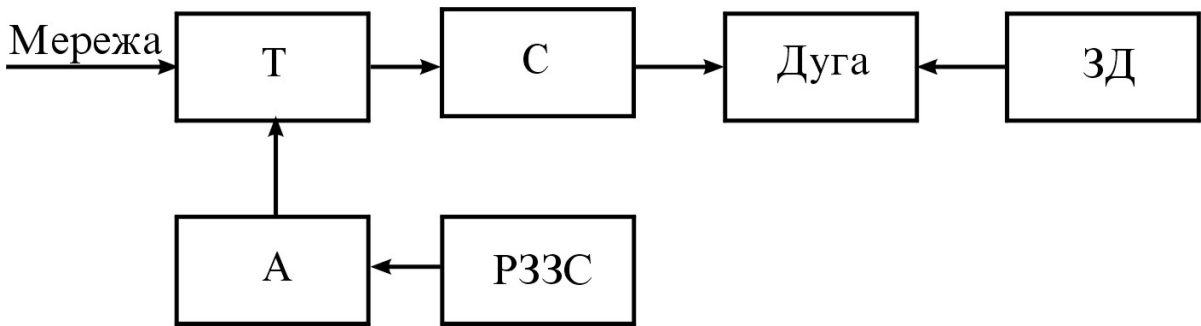


Рис. 6.7. Функціональна блок-схема зварювальних установок типу УДГ-501-1

В установці УДГ-301-1 передбачена можливість вмикання послідовно з вторинною обмоткою силового трансформатора додаткового дроселя, що дає змогу отримати діапазон малих струмів (15...25 А).

Блок С (діодно-тиристорний пристрій) обмежує проходження постійної складової несинусоїдального струму до вторинної обмотки трансформатора Т. В установках попередніх випусків (УДГ-301, УДГ-501) таку функцію виконувала батарея конденсаторів, що значно збільшувало масу та габарити джерела живлення.

Блок ЗД служить для збудження зварювальної дуги за допомогою високовольтних високочастотних знакозмінних згасаючих імпульсів (осциляторний режим) та підтримки стабільного горіння дуги за допомогою низьковольтних аперіодичних імпульсів струму (стабілізаторний режим). Генерація імпульсів як в осциляторному, так і в стабілізаторному режимах відбувається один раз на період при позитивній полярності на електроді, але з випередженням у часі на 40...60 мс відносно нульового значення зварювального струму.

Магнітний підсилювач А призначений для керування струмом підмагнічування шунта, який регулюється резистором у колі обмотки керування магнітного підсилювача.

Блок РЗЗС також працює у колі обмотки керування підсилювача А. Час заварювання кратера регулюється плавно від 0 до 30 с. Після заповнення кратера зварювальний струм автоматично вимикається.

Роботою усіх блоків установок керує апаратура керування циклом зварювання. Технічну характеристику установок УДГ-301-1 та УДГ-501-1 наведено в дод.2 (див. табл.2.5).

### 6.3. Джерела живлення для зварювання постійним струмом

Для зварювання виробів із кольорових металів та їх сплавів, а також корозійно-стійких сталей у середовищі захисного газу як на прямій, так і на зворотній полярності напруги дуги застосовують установки з джерелами живлення постійного струму зі зворотними зв'язками за струмом та напругою.

Залежно від вимог, що ставляться до джерел живлення постійного струму, формується їх функціональна схема, основою якої є силові схеми випрямлячів.

Прикладами таких джерел живлення є джерела *установок типу УДГ-101, УДГ-161*, призначені для зварювання вольфрамовим електродом виробів із корозійно-стійких сталей постійним струмом у середовищі аргону. Функціональну блок-схему джерела установки наведено на рис.6.8.

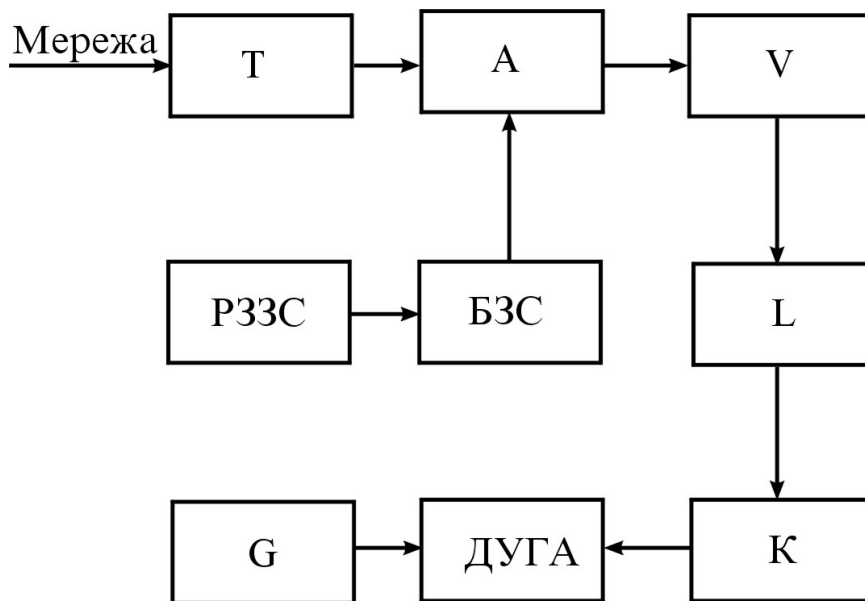


Рис. 6.8. Функціональна блок-схема джерела живлення установки типу УДГ-101

Силовий трифазний трансформатор **Т** має жорстку зовнішню характеристику і призначений для узгодження напруги мережі з напругою зварювальної дуги. Вторинна обмотка трансформатора секціонована, завдяки чому забезпечуються дві ступені регулювання зварювального струму. Навантаженням трансформатора служить магнітний підсилювач **А**. За його допомогою формується спадна зовнішня характеристика джерела та здійс-

нюється плавне регулювання зварювального струму в межах кожної ступені пропорційно сигналу, що потрапляє з блока завдання струму БЗС. Навантаженням магнітного підсилювача є силовий випрямний блок.

Випрямний блок V зібраний за трифазною мостовою схемою на півпровідникових діодах. Вихід випрямного блока підключений до зварювальної дуги через лінійний дросель L та перемикач полярності напруги зварювальної дуги K. Лінійний дросель зменшує кидки струму під час збудження дуги та сприяє зниженню розбрикування металу в процесі зварювання.

Блок завдання струму (БЗС) формує сигнал керування для зміни сили зварювального струму на підставі завдання. Конструктивно БЗС – це змінний резистор, ручка керування яким виведена на панель керування установки.

Регулятор зниження зварювального струму РЗЗС формує сигнал плавного зниження струму в кінці зварювання за заданою програмою. У джерелі живлення застосований також осцилятор паралельного включення G, який забезпечує стабільне збудження зварювальної дуги на початку зварювання.

Технічні характеристики джерел живлення УДГ-101 та УДГ-161 наведені у дод. 2 (див. табл.2.5).

Для автоматичного зварювання плавким або неплавким електродом у середовищі захисних газів виробів із звичайних, корозійно-стійких та жароміцних сталей, а також алюмінієвих і титанових сплавів застосовують джерела живлення постійного струму, побудовані з уніфікованих блоків. До таких джерел належать джерела струму серії ВСП та ВСВ. Єдина функціональна схема таких джерел та наявність блоків з певними функціями дає змогу керувати формою і тривалістю імпульсів, що подаються на електроди керування тиристорів випрямного блока джерела живлення. Це дає змогу регулювати зварювальний струм і напругу на виході джерела. Схеми таких джерел забезпечують стабілізацію зварювального струму при зміні напруги мережі, довжини дуги та температури навколишнього середовища.

Структурна функціональна *схема джерел серії ВСП* (рис.6.9) містить наступні блоки: силовий трансформатор T з жорсткою вольт-амперною характеристикою, керований випрямляч V, що виконує функції формування

зовнішньої характеристики джерела та стабілізації зварювального струму, блок збудження дуги БЗД, зварювальний дросель L, блок формування імпульсів БФІ, блок регулювання напруги БРН, вимірювальний елемент ВЕ, релейний блок РБ.

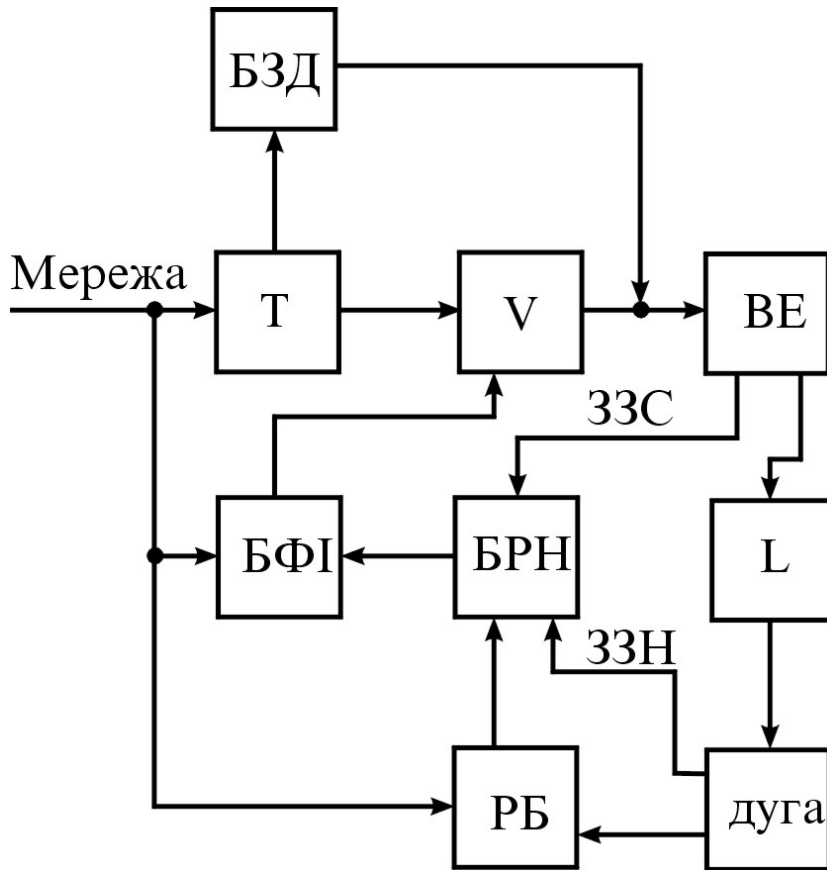


Рис. 6.9. Функціональна блок-схема джерела живлення серії ВСП

Блок формування імпульсів виконаний за принципом вертикального керування подібно до того, що використовується в універсальних випрямлячах (див. гл.4).

Робота блока базується на порівнянні пілкоподібної напруги і напруги керування з наступним формуванням прямокутних імпульсів малої тривалості. Цей блок складається з таких елементів: вхідного пристрою, що формує сигнал керування; генератора пілкоподібної напруги, частота якої синхронізована з частотою напруги мережі; пристрою порівняння і формування вихідних імпульсів керування.

Блок регулювання напруги виконаний за схемою диференціального підсилювача постійного струму, до входу якого потрапляють сигнали зворотного зв'язку за зварювальним струмом (33С) та напругою (33Н) дуги, а на виході формується сигнал керування для блока формування імпульсів.

Вимірювальний елемент являє собою трубку з корозійно-стійкої сталі, що охолоджується проточною водою. До трубки приварені виводи, по яких тече струм. Сталість електричного опору ВЕ в процесі роботи забезпечується малим температурним коефіцієнтом опору матеріалу трубки та охолодженням трубки водою.

Дросель L виконує звичайні функції лінійного дроселя, як у зварювальних випрямлячах.

Блок збудження дуги забезпечує миттєве збудження зварювальної дуги за рахунок різкого зростання струму короткого замикання через контакт електрода з поверхнею виробу. При цьому кінець електрода швидко розігрівається, тобто відбувається "гарячий старт". Зростання струму короткого замикання здійснюється при зміні нахилу зовнішньої характеристики джерела живлення (рис.6.10).

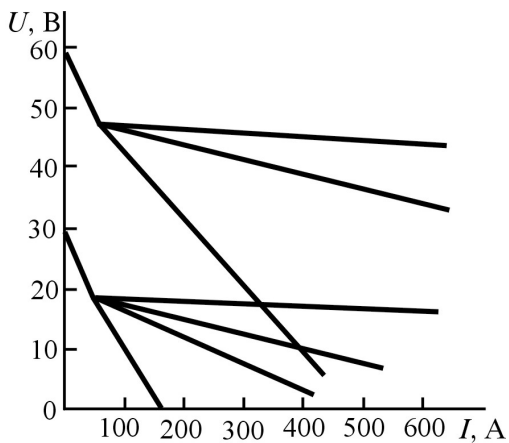


Рис. 6.10. Зовнішні вольт-амперні характеристики джерела живлення ВСП-1000

Джерела серії ВСП забезпечують стабілізацію встановленого зварювального струму в межах  $\pm 2,5\%$  при відхиленнях напруги мережі на  $\pm 10\%$  та температури навколишнього середовища в діапазоні  $+5\dots+35\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Крім того, джерела серії ВСП забезпечують зміну амплітуди та швидкості зростання зварювального струму на початку процесу зварювання та плавне його зниження в кінці зварювання. Технічні характеристики джерел живлення типу ВСП наведені в дод.2 (див. табл.2.5).

*Джерела серії ВСВ* призначені для автоматичного зварювання вольфрамовим електродом у середовищі захисного газу виробів із звичайних, корозійно-стійких та жароміцних сталей, а також титанових сплавів.



живлення ГДЖ. Для цього на стороні низької напруги трансформатора Т є додаткові обмотки малої потужності в кожній фазі, до яких підключені дроселі насичення  $L_d$ .

Допоміжне джерело живлення забезпечує швидке збудження зварювальної дуги струмом не більше 3 % встановленого значення зварювального струму для даного технологічного режиму; зниження пульсацій напруги дуги при малих значеннях зварювального струму; швидке згасання автоколивального процесу при виникненні збурень; напругу холостого ходу при зварюванні в середовищі аргону – 100 В, у середовищі гелію 200 В; формування зовнішньої характеристики головного джерела живлення ГДЖ при зміні зварювального струму.

Головне джерело живлення ГДЖ має крутоспадну ("штикову") зовнішню характеристику, а допоміжне джерело живлення ДДЖ – крутоспадну зовнішню характеристику з широким діапазоном зміни зварювального струму при відносно малому діапазоні зміни напруги дуги. Слід мати на увазі, що зміна зварювального струму в допоміжному джерелі живлення впливає на формування вертикальної ділянки зовнішньої вольт-амперної характеристики головного джерела живлення ГДЖ. В області робочої напруги зовнішня характеристика паралельна осі напруги за рахунок дії зворотних зв'язків.

При суміщенні двох джерел з різними зовнішніми характеристиками знижується напруга холостого ходу головного джерела ГДЖ, підвищуються ККД, коефіцієнт потужності джерел серії ВСВ і, як наслідок, знижуються їх розміри і маса. Технічну характеристику джерел серії ВСВ наведено в дод.2 (див. табл.2.5).

#### **6.4. Універсальні джерела живлення для зварювання змінним та постійним струмом**

Універсальні джерела для механізованого аргонодугового зварювання призначені для виконання швів неплавким електродом у безперервному та імпульсному режимі постійним струмом, змінним струмом, а також можуть використовуватися для ручного дугового зварювання покритими



електродами. До цього типу джерел належать джерела серії ВСВУ, зварювальні установки серії ТИР, УДГУ та інші.

Загальною рисою таких джерел є широке використання зворотних зв'язків за вихідними параметрами, застосування уніфікованих блоків, високий ступінь автоматизації зварювального процесу. Тому електричні схеми універсальних джерел досить складні і містять спеціалізовані електронні блоки. За допомогою цих блоків здійснюється керування формою, величиною та тривалістю імпульсів, що подаються на силові тиристори випрямних блоків, завдяки чому здійснюється регулювання вихідних струмів та (або) напруг джерел. Крім того, передбачена можливість керування асиметрією змінного струму, що ефективно використовується при зварюванні легких сплавів. Схеми забезпечують також стабілізацію вихідних струмів при коливанні напруги мережі живлення, довжини дуги та температури навколишнього середовища.

*Джерела живлення серії ВСВУ* призначені для автоматичного зварювання вольфрамовим електродом як у безперервному, так і в імпульсному режимі виробів із звичайних, корозійно-стійких та жароміцних сталей, а також титанових сплавів вільною та стиснутою дугою. Джерела забезпечують стабілізацію встановленого струму в тих самих межах, як і джерела серії ВСВ. Окрім того, вони дають змогу в автоматичному режимі виконувати такі процеси: плавне, регульоване з бігом часу, зростання струму на початку зварювання від мінімального до заданого значення, завдяки чому відбувається рівномірний розігрів кінця вольфрамового електрода та підвищується його стійкість; плавне регулювання струму чергової дуги в імпульсному режимі в межах від 2 до 30 % номінального зварювального струму; модулювання форми імпульсу від практично прямокутної до трикутної, що дає різні швидкості зміни полярності зварювального струму; плавне, регульоване з бігом часу, зниження зварювального струму від робочого до мінімального значення в кінці зварювання під час заварювання кратера шва.

Незалежність зварювального струму від температури навколишнього середовища досягається тим, що елементи електричної схеми, чутливі до зміни температури, розміщені в термостаті спеціальної конструкції. Термостат входить до складу блока керування джерела.



відним зазором у роз'ємному осерді дроселя. Цей струм є найменшим струмом джерела. Дроселі  $L_d$  виконують також функції фільтрів на малих струмах.

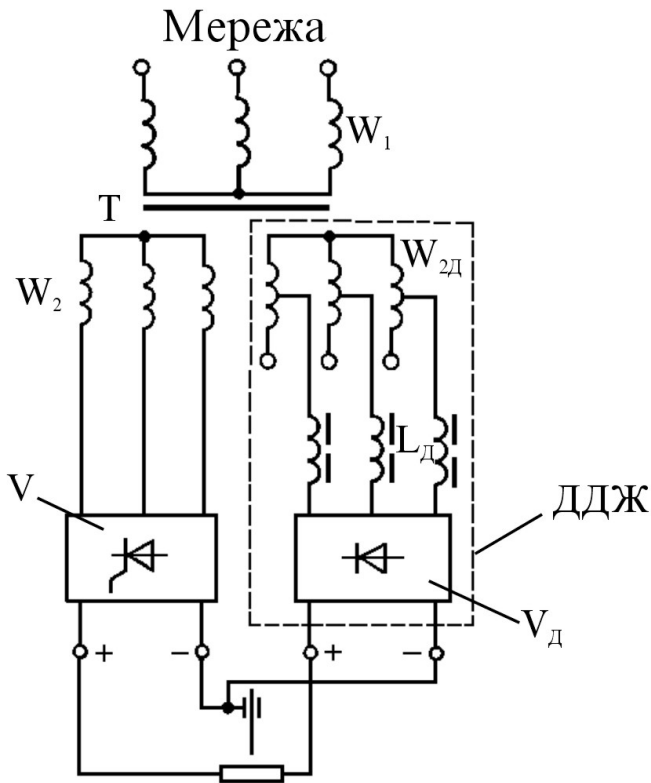


Рис. 6.13. Схема побудови блоків головного та допоміжного джерел живлення в установках серії ВСВУ

Допоміжне джерело живлення ДДЖ забезпечує необхідну напругу холостого ходу та формування специфічної зовнішньої характеристики всього джерела (рис.6.14).

У процесі зварювання горять обидві дуги: від головного та допоміжного джерел живлення. Малопотужна дуга забезпечує сигнали зворотного зв'язку за струмом та напругою, що потрібні для формування вертикальної ділянки зовнішньої характеристики всього джерела до збудження основної, зварювальної дуги. Суміщення двох істотно різних за формою зовнішніх характе-

ристик забезпечує надійне збудження дуги та високу стабілізацію струму у всьому робочому діапазоні.

Робота та взаємодія блоків БФІ, БРС та ВЕ подібна роботі відповідних блоків джерел живлення серії ВСП та ВСВ.

Тригерний блок ТБ служить для завдання імпульсного режиму джерела живлення та забезпечує незалежне регулювання тривалості імпульсів і пауз, яка кратна цілому числу періодів синусоїдальної напруги мережі. Тригерний блок генерує імпульси напруги, що періодично повторюються і можуть регулюватися за тривалістю та частотою, які через блоки БРС та БФІ задають режим роботи тиристорного блоку V. Регулювання струму чергової дуги при імпульсному зварюванні здійснюється також за допомо-

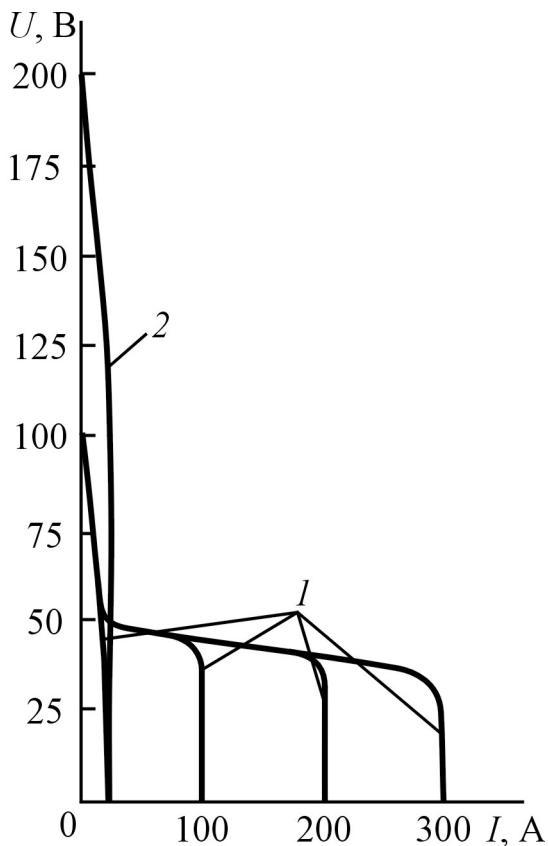


Рис. 6.14. Зовнішні вольт-амперні характеристики джерела живлення установки ВСВУ-315: 1 – ВАХ головного джерела; 2 – ВАХ допоміжного джерела

гою цих імпульсів. Технічні характеристики джерел живлення серії ВСВУ наведені в дод. 2 (див. табл. 2.5).

Зварювальні установки ТИР-300Д та ТИР-630 конструктивно подібні і призначені для зварювання виробів неплавким електродом у середовищі аргону постійним та змінним струмом прямокутної форми, а також для ручного дугового зварювання покритими електродами. Установки забезпечують зварювання сталей та кольорових металів, у тому числі алюмінію та його сплавів. Силова схема установки ТИР-300Д (рис.6.15, а) складається з трансформатора з нормальним електромагнітним розсіюванням Т1, силового тиристорного мосту VS1...VS4 з лінійним дроселем L1 у колі постійного струму, малопотужного дроселя насичення на магнітопроводах 1 і 2, робочі обмотки якого розділені на струмові

$W_{1c}$  і  $W_{2c}$  та обмотка напруги  $W_{1н}$  і  $W_{2н}$ , а в коло обмоток керування  $W_{1к}$  і  $W_{2к}$  увімкнута дросель L2 для заглушення парних гармонік струму. Установки обладнані імпульсним збудником-стабілізатором горіння дуги змінного струму, блоком зниження струму для заварювання кратера шва, апаратурою керування, захисту та охолодження.

Джерело живлення установок працює таким чином. При замиканні кола навантаження насиченому під дією струму керування  $I_k$  стану магнітопроводів дроселя насичення 1 і 2 відповідає режим вмикання по черзі плечей випрямного моста на початку кожного півперіоду напруги живлення  $U_{20}$  (рис.6.15,б). Відбувається зростання постійного струму дроселя  $i_{L1}$  та змінного струму навантаження  $i_2$ . Час наростання цих струмів визначається індуктивністю дроселя L1 і складає 0,3...0,4 с. Внаслідок того, що ма-

гніторушійні сили обмоток керування та струмової на кожному магнітопроводі дроселя спрямовані назустріч, магнітопровід виводиться із стану насичення. У наступний черговий півперіод відбувається перемагнічування магнітопроводу дроселя. Час, що витрачається на перемагнічування, визначає час затримки вмикання чергового тиристора. Тому вмикання тиристорів відбувається не на початку півперіоду, а з фазовим зсувом  $\varphi_1$  та  $\varphi_3$  (рис.6.15,б). Значення  $\varphi_3$ , що відповідає сталому режиму, залежить від режиму навантаження, тобто від співвідношення величин  $U_d$  та  $U_{20}$ .

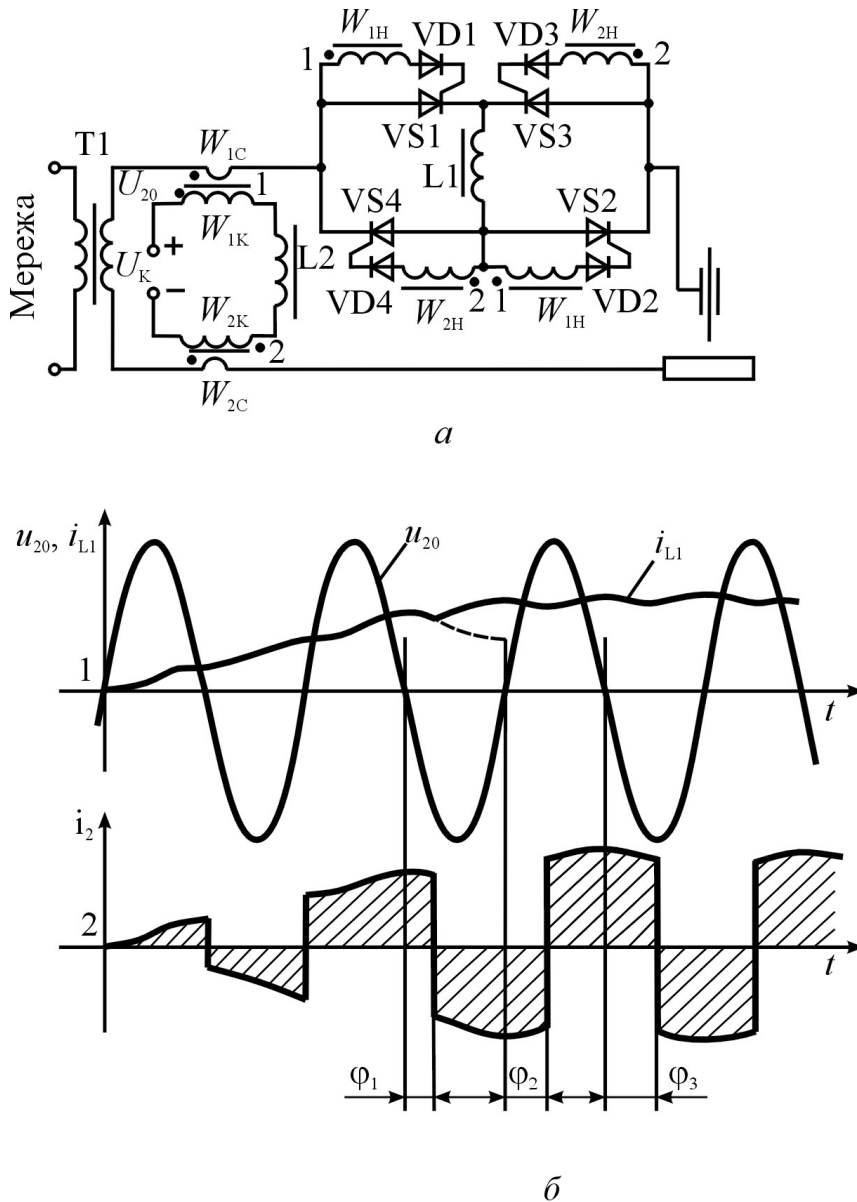


Рис. 6.15. Спрощена схема (а) та діаграми струмів і напруги (б) установок типу ТІР

При заданій напрузі  $U_k$  або струмі керування дросель насичення забезпечує стабілізацію струму навантаження в широкому діапазоні зміни співвідношення  $\frac{U_d}{U_{20}}$ . Якщо під дією зовнішніх факторів струм навантаження зменшиться, то зменшиться й ступінь розмагнічування магнітопроводу, і, відповідно, час, необхідний для його насичення. Кут  $\phi$  зменшиться, і струм навантаження знову зростатиме.

Таким чином, джерело живлення працює як стабілізатор зварювального струму незалежно від того, куди ввімкнуте навантаження: в коло змінного струму, як це показано на рис.6.15,*a*, або в коло постійного струму послідовно з дроселем L1. Велика інерційність зварювального струму джерела живлення установки ТИР-300Д забезпечує їй добрі зварювальні властивості, особливо при зварюванні неплавким електродом у режимі імпульсного струму. Характер наростання струму при збудженні дуги також сприятливий для поступового розігріву вольфрамового електрода.

Прямокутна форма кривої зварювального струму забезпечує стабільність процесу зварювання та поліпшує технологічні властивості джерела живлення. Через сталість амплітудного значення струму наявність постійної складової струму при зварюванні алюмінієвих сплавів проявляється лише в різній тривалості півхвиль прямої (завжди більше) та зворотної полярності, що приводить до підвищення проплавлення металу та збільшення стійкості вольфрамового електрода.

Технічні характеристики установок ТИР-300Д та ТИР-630 наведені в дод.2 (див. табл.2.5).

### Контрольні питання

1. З якою метою до схем джерел живлення вводяться допоміжні пристрої?
2. Якими схемними рішеннями досягається стабільність збудження та горіння дуги: у джерелах змінного струму; постійного струму; в універсальних джерелах?
3. Як формується режим імпульсного струму в джерелах для аргонодугового зварювання?
4. Які переваги забезпечує застосування уніфікованих блоків у джерелах живлення для аргонодугового зварювання?

## **СПЕЦІАЛІЗОВАНІ ДЖЕРЕЛА ЖИВЛЕННЯ ДЛЯ ЗВАРЮВАННЯ ТА СПОРІДНЕНИХ ПРОЦЕСІВ**

Окрім способів зварювання матеріалів дугою, що вільно горить у розрядному проміжку між електродом та виробом, для з'єднання деталей використовуються такі бездугові способи зварювання, як електрошлакове, струмом високої частоти, електронно-променево. Також використовується зварювання і різання металів стиснутою дугою. Для живлення цих процесів електричним струмом застосовують спеціалізовані джерела, які забезпечують стійке протікання процесу, автоматизоване керування параметрами режиму, їх стабілізацію, програмування технологічного циклу обробки металу.

Особливості бездугових способів зварювання та плазмових технологій ставлять певні вимоги до джерел живлення, тому розглянемо їх схемні рішення і конструкцію відповідно до цих вимог.

### **7.1. Джерела живлення для електрошлакового зварювання**

Процес електрошлакового зварювання (ЕШЗ) починається з наведення шлакової ванни, яке можна здійснювати двома способами:

1) шляхом запалювання та підтримання потужної електричної дуги або декількох дуг під шаром флюсу. Дуга, що виникає у початковий період часу, розплавляє флюс. Коли над поверхнею розплавленого металу утворюється достатній шар розплавленого флюсу, дуга шунтується розігрітим флюсом (який у розплавленому стані стає провідником струму) та згасає. Чим вище температура розплавленого флюсу-шлаку, тим менше його електричний опір;

2) електрод закорочується на метал через електропровідний у твердому стані флюс. З бігом часу об'єм розплавленого флюсу-шлаку зростає і через підвищення температури шлаку починає плавитися метал, що зварюється, та присадний метал у вигляді дроту або пластин. Спільна зварювальна ванна металу і шлаку підтримується за рахунок подачі електродного металу та пересування його вздовж зварюваних кромки.

Густина струму в електродах складає 15...160 А/мм<sup>2</sup> (100...600 А на кожний дріт) або 0,3...2,5 А/мм<sup>2</sup> (400...2500 А на одну пластину). Загальна сила струму при цьому становить 300...3000 А.

Умови стійкості системи "електрошлакова ванна–джерело живлення" можна визначити шляхом аналізу залежностей, наведених на рис.7.1. Потужність  $P_M$  (крива 1), потрібна для розплавлення основного та електродного металів, зростає з підвищенням температури шлакової ванни  $T_{ш}$ . До температури плавлення основного металу залежність має лінійний характер. Подальше підвищення  $T_{ш}$  супроводжується більш різким зростанням потужності. Це пов'язано зі збільшенням поверхні контактування між металом і шлаком при розплавленні кромки, поглинанням прихованої теплоти плавлення, розплавленням електродного металу тощо.

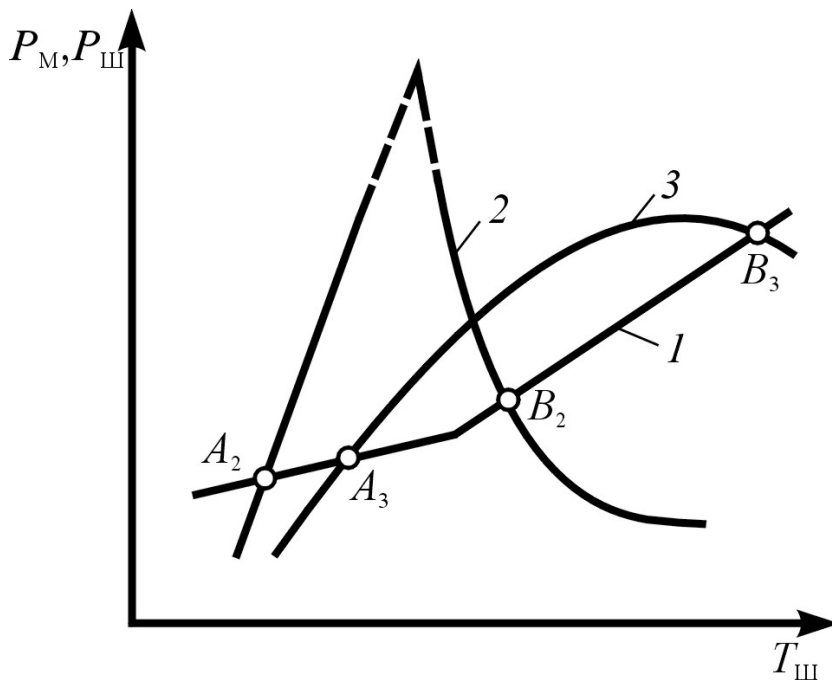


Рис. 7.1. Зв'язок між потужностями шлакового процесу  $P_M, P_{ш}$  та температурою шлакової ванни  $T_{ш}$ :

$$1 - P_M = f(T_{ш}); 2 - P_{ш} = f(T_{ш}) - \text{жорстка ВАХ};$$

$$3 - P_{ш} = f(T_{ш}) - \text{крутоспадна ВАХ}$$

Потужність, що виділяється у шлаковій ванні  $P_{ш}$ , зображується кривою, яка має максимум; він відповідає рівності опорів навантаження (шлакової ванни) та джерела живлення. При цьому, якщо джерело живлення має жорстку (пологоспадну) вольт-амперну характеристику (крива 2 на



рис.7.1), максимум потужності припадає на більш низьку температуру шлакової ванни, ніж при крутоспадній вольт-амперній характеристиці (крива 3).

Точки перетинання кривих  $A$  і  $B$  визначають можливість протікання процесу електрошлакового зварювання. Режим роботи буде стійким, якщо відхилення його від рівноважного стану в бік більш високих температур приведе до того, що потужність  $P_{ш}$  стане меншою за потужність  $P_m$ . Внаслідок цього ванна охолоджуватиметься й режим відновиться. Відхилення в бік більш низьких температур приведе до зворотного явища. Отже, стабільність процесу спостерігатиметься лише в точках  $B_2$  та  $B_3$ .

Умови стійкості процесу записуються в такому вигляді:

$$P_{ш}=P_m; \quad \frac{dP_{ш}}{dT_{ш}} < \frac{dP_m}{dT_{ш}}.$$

Зміни потужності шлакової ванни при коливаннях її температури будуть більшими при застосуванні джерел живлення з жорсткими ВАХ. Це забезпечує швидше відновлення рівноваги процесу. На відміну від дугового зварювання в даному випадку жорсткі ВАХ може мати джерело живлення не тільки постійного, а й змінного струму, що особливо важливо. Пояснюється це тим, що електрошлакова ванна являє собою активний опір і зміна напряду струму в ньому не пов'язана з будь-якими додатковими явищами, наприклад з повторним збудженням дуги. Крім того, при електрошлаковому процесі можливі випадки виникнення дугового процесу між електродом та поверхнею шлакової ванни або між електродом та поверхнею розплавленого металу, в глибині шлакової ванни. Для запобігання дуговому розряду слід застосовувати джерела, що не сприяють стабілізації цього розряду.

Таким чином, для ЕШЗ найбільш придатні джерела змінного струму з жорсткими ВАХ, мінімальною індуктивністю в зварювальному колі та зі зниженою напругою холостого ходу.

Найбільш поширені для ЕШЗ однофазні та трифазні зварювальні трансформатори з нормальним магнітним розсіюванням. Особливістю трансформаторів є широкий діапазон регулювання вторинної напруги.

Вторинну напругу можна змінювати під навантаженням як на початку зварювання під час встановлення необхідного режиму, так і в процесі зварювання за заданою програмою. Регулювання зварювальної напруги здійснюється трьома способами: ступінчастим, плавним та комбінованим.

Ступінчасте регулювання застосовується в однофазних трансформаторах ТШС-1000-1 та ТШС-3000-1 (дві ступені): грубе регулювання – у вторинній обмотці перемиканням її секцій, більш тонке – за допомогою дистанційного керування – у первинній обмотці, що містить шість секцій, з'єднаних послідовно (рис.7.2,*а*). Така конструкція трансформаторів дає змогу регулювати напругу ступенями достатньо малої величини.

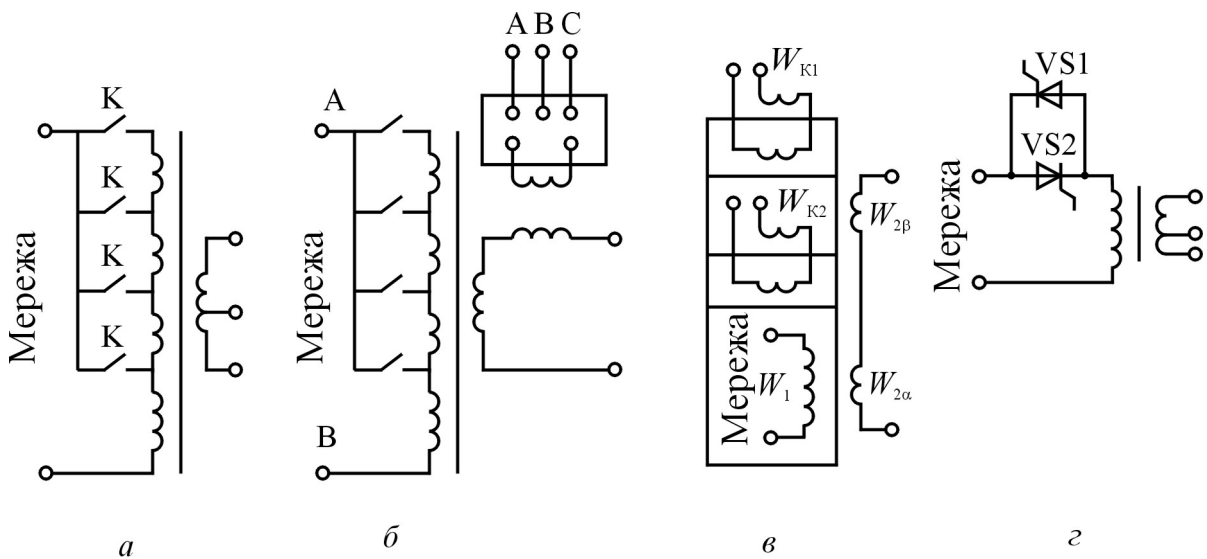


Рис 7.2. Принципові схеми регулювання вихідної напруги в трансформаторах для ЕШЗ

У трифазних трансформаторах для ЕШЗ регулювання фазної напруги здійснюється за допомогою схеми з вольтододатковим трансформатором, потужність якого не перевищує 10 % потужності основного трансформатора. Напруга регулюється в кожній фазі: грубо – перемиканням секцій первинної обмотки, тонко – перемиканням первинної обмотки вольтододаткового трансформатора на відповідну фазу (рис.7.2,*б*). Така комутація забезпечує п'ять ступенів регулювання. При вмиканні первинної обмотки вольтододаткового трансформатора на ті ж фази, що й первинної обмотки основного трансформатора, одержують максимальну та мінімальну фазну напругу. При вмиканні первинної обмотки вольтододаткового трансформатора на дві інші фази отримують два проміжних значення фазних на-

пруг, а при закороченій первинній обмотці – половинне значення фазної напруги.

Плавне регулювання зварювальної напруги в трансформаторах для ЕШЗ здійснюється за допомогою магнітної комутації або тиристорного керування.

У трансформаторах ТРМК-1000-1, ТРМК-3000-1 (рис.7.2,в) первинна обмотка  $W_1$  та близько 70 % вторинної обмотки  $W_{2a}$  розміщені на стрижні в нижньому вікні магнітопроводу, а решта вторинної обмотки  $W_{2b}$  знаходиться на стрижні у верхньому вікні магнітопроводу. Обмотки керування  $W_{к1}$  та  $W_{к2}$  розміщені відповідно на верхньому та середньому ярмах магнітопроводу. При зміні постійного струму, що протікає через обмотки керування, здійснюється перерозподіл основного магнітного потоку між верхнім та середнім ярмами магнітопроводу трансформатора та регулюється вихідна напруга. Трансформатори з магнітною комутацією мають високий коефіцієнт потужності й не бояться короткого замикання або розриву в зварювальному контурі. Але одночасно вони мають більш низькі динамічні властивості та підвищені витрати обмоткових матеріалів порівняно з трансформаторами, що не мають плавного регулювання.

Тиристорне керування зварювальною напругою в трансформаторах для ЕШЗ здійснюється тиристорним фазорегулятором у первинному колі (рис.7.2,г).

Щоб знизити споживану потужність та стабілізувати зварювальну напругу в шлаковій ванні, в ІЕЗ ім. Є.О. Патона розроблено тиристорний переривник, який здійснює дозування споживаної потужності шляхом роздільної зміни тривалості імпульсів керування тиристорами та паузи між ними. Тиристорний переривник (рис.7.3) складається з блока керування та тиристорного блока.

Блок керування містить задатчики тривалості імпульсу 1 та паузи 2, тригер керування 3, задатчик-формувавч ФОК, що складається з інтегратора 6, генератора 7 пилкоподібної напруги, фазозсувного пристрою 8, підсилювача 9, блоків 10 та 11 швидкодіючого захисту, трансформатора 13 зворотного зв'язку.

Тиристорний блок ТБ вміщує зварювальний трансформатор 15, тиристири 14, трансформатор струму 16 та дросель 12.

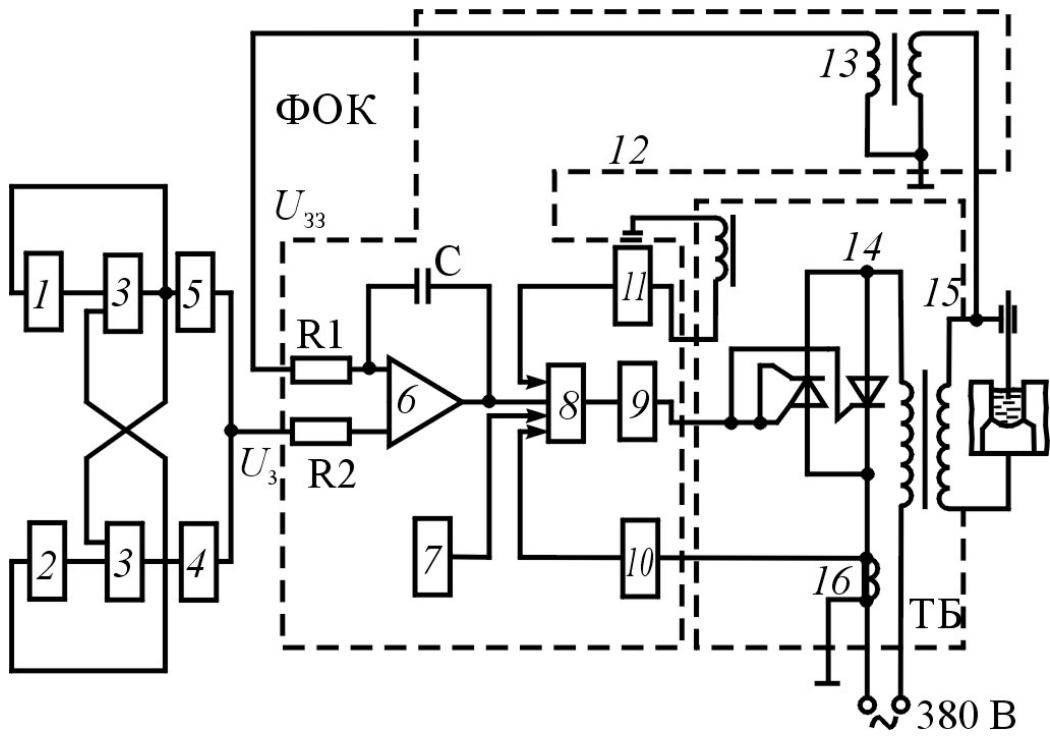


Рис. 7.3. Структурна схема однофазного тиристорного переривника

Задатчики 1 та 2 формують сигнал тривалості перемикання тригера 3, вихідний сигнал якого потрапляє на відповідні задатчики 4 та 5. До входу інтегратора 6 потрапляють два сигнали, які задають напругу імпульсу або паузи від задатчиків-формуваців 4 та 5 і напругу зворотного зв'язку від трансформатора 13. Вихідна напруга інтегратора 6, пропорційна різниці заданої напруги та напруги зворотного зв'язку, потрапляє до фазозсувного пристрою 8 одночасно з пилкоподібною напругою від генератора 7. Фазозсувний пристрій 8 зсуває передній фронт керуючого імпульсу відносно початкової фази напруги живлення тиристорів. Сформований керуючий імпульс підсилюється підсилювачем 9 та потрапляє до керуючого електрода тиристорів, завдяки чому змінюється їх кут відкриття залежно від різниці між величиною напруги завдання та зворотного зв'язку. У результаті стабілізується напруга на шлаковій ванні при зміні в допустимих межах опору навантаження та напруги мережі. Блоки 10 та 11 формують сигнал зняття керуючих імпульсів протягом одного півперіоду у фазозсувному пристрої 8 при перевантаженні або асиметрії тиристорів. Сигнал захисту для блока 11 формується дроселем 12, а для блоку 10 – трансформатором струму 16.

Тиристорні переривники використовуються в трансформаторах ТШС-1000-1, ТШС-1000-3, ТШС-3000-1, ТШС-3000-3 та ін.

Трансформатори для ЕШЗ входять у комплект установок для ЕШЗ і окремо не поставляються. Технічні характеристики найбільш розповсюджених трансформаторів наведені в дод.2 (див. табл.2.6).

В установках середньої та великої потужності (більше 300 кВА) трансформатор з'єднується зі зварювальним автоматом за допомогою спеціального кабелю. При цьому значно зростають реактивна складова повного опору лінії та падіння напруги в ній. З метою підвищення техніко-економічних показників електрошлакових установок застосовують так звані біфілярні схеми живлення (рис.7.4). Зварювальний трансформатор має секціоновану вторинну обмотку, середній вивід якої підключений до виробу 3, а кожен з основних виводів – до рухомого 1 та нерухомого 2 електродів. Підключення середньої точки вторинної обмотки трансформатора до виробу дає змогу регулювати швидкість плавлення рухомих та нерухомих електродів, а в цілому біфілярна схема живлення підвищує коефіцієнт потужності всієї установки для ЕШЗ.

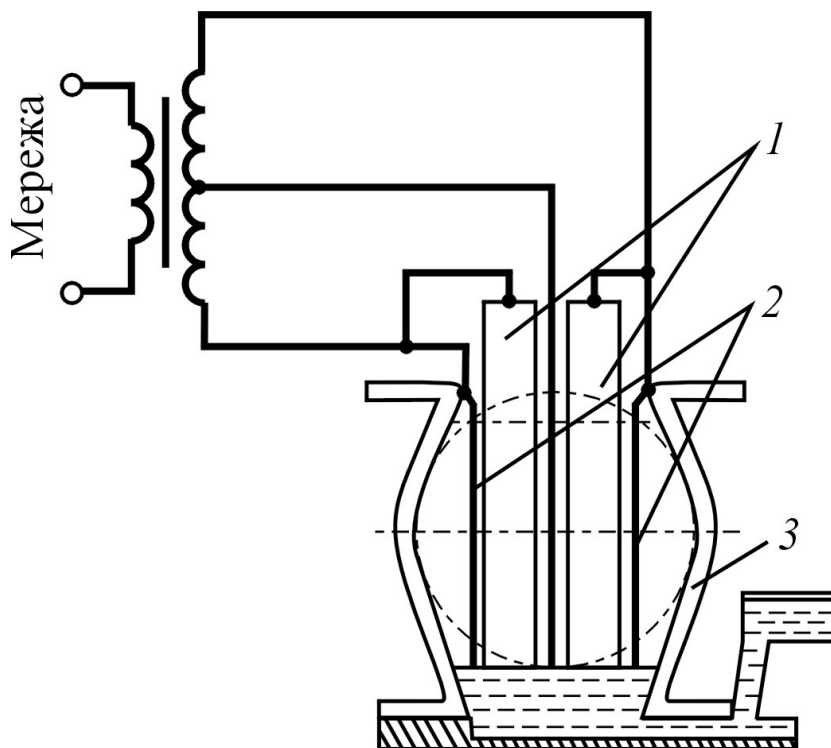


Рис. 7.4. Біфілярна схема живлення установки для електрошлакового зварювання

## 7.2. Джерела живлення для зварювання струмом високої частоти

Під джерелом живлення струмом високої частоти розуміють пристрій для перетворення трифазного струму промислової частоти на однофазний струм високої частоти. Для високочастотного зварювання використовуються струми частотою 8...1760 кГц, причому як джерела живлення струму частотою до 10 кГц здебільшого застосовують машинні перетворювачі частоти, а для отримання струму 66 кГц та вище – лампові генератори. Слід мати на увазі, що машинні перетворювачі частоти поступово витисняються тиристорними інверторами, які мають порівняно з машинними перетворювачами низку переваг (більш високий ККД, відсутність шуму тощо). Розглянемо основні типи джерел високочастотного зварювального струму.

Високочастотний машинний перетворювач так само, як і звичайний машинний зварювальний перетворювач, являє собою пристрій, який складається з двох електричних машин, що мають спільний вал та розташовані, як правило, в спільному корпусі.

Струм частотою 8...10 кГц вироблюється індукторним генератором (див. гл.3). Частота струму, яку створює генератор, визначається виразом

$$f = \frac{Zn}{60}, \quad (7.1)$$

де  $Z$  – кількість зубців ротора;  $n$  – частота обертання якоря приводного двигуна,  $\text{хв}^{-1}$ .

Номінальну потужність індукторного генератора можна отримати лише при ємнісному навантаженні. При активному, а тим більше при індуктивному навантаженні зовнішня вольт-амперна характеристика генератора має різко спадний характер. Це пояснюється тим, що при високих частотах струму та конструктивних особливостях індукторних машин внутрішній опір обмотки статора дуже великий. Внаслідок цього струм короткого замикання мало перевищує номінальний струм генератора, а для деяких типів генераторів менше за нього. Тому високочастотні індукторні генератори здатні віддавати номінальну потужність лише при активно-ємнісному навантаженні.

Великий внутрішній опір індукторних генераторів, який особливо зростає при підвищенні частоти та потужності, приводить до того, що ЕРС генератора не забезпечує досягнення номінальних режимів через збудження полюсів котушкою збудження. Тому для деяких типів індукторних генераторів передбачено компенсацію внутрішнього падіння напруги шляхом застосування додаткового конденсатора, який вмикається послідовно з обмоткою статора. Але при цьому виникає низка проблем, яка вимагає застосування певних заходів.

По-перше, при послідовно ввімкнутому в коло генератора конденсаторі напруги на навантаженні та на затискачах генератора неоднакові і можуть істотно відрізнятись одна від одної. При цьому, якщо напруга на навантаженні, що має ємнісний характер, дорівнює номінальній, то на затискачах генератора вона буде значно більшою, а це неприпустимо за умов електричної міцності ізоляції та охолодження заліза статора. Тому при використанні послідовного конденсатора коефіцієнт потужності навантаження  $\cos\phi$  повинен мати індуктивний характер.

По-друге, якщо для індукторного генератора без послідовного конденсатора безпечні короткі замикання через невелику різницю між значеннями струмів номінального та короткого замикання, то при використанні послідовного конденсатора струм короткого замикання істотно зростає. Струм короткого замикання в цьому випадку розраховується за формулою

$$I_{к.з} = \frac{U_{\Gamma}}{X_0 - X_C}, \quad (7.2)$$

де  $U_{\Gamma}$  – напруга на затискачах генератора;  $X_0$  – внутрішній опір генератора;  $X_C = \frac{1}{2\pi fC}$  – реактивний опір послідовного конденсатора  $C$  при частоті струму  $f$ .

У випадку, коли реактивний опір послідовного конденсатора буде порівняний з внутрішнім опором генератора, струм короткого замикання прямуватиме до дуже великих значень, а напруга на затискачах генератора при короткому замиканні необмежено зростатиме. У зв'язку зі зміною магнітних властивостей заліза магнітопроводів генератора розпочнеться процес самозбудження генератора (процес "ферорезонансу"), який неможливо

припинити навіть вимиканням струму збудження. Як правило, цей процес закінчується пробоем ізоляції та виходом генератора з ладу. Для запобігання цьому явищу ємність послідовного конденсатора необхідно робити такою, щоб його реактивний опір був значно меншим за внутрішній опір генератора, тобто  $X_C = (0,5 \dots 0,6)X_0$ . На затискачах генератора слід встановити розрядник, що закорочує затискачі генератора при напрузі, яка значно перевищує номінальну напругу генератора.

Технічні характеристики деяких електромашинних перетворювачів частоти наведені в дод.2 (див. табл.2.7).

Лампові генератори це – пристрої, які перетворюють струм промислової частоти на струм високої частоти за рахунок використання багатоелектродних (у більшості випадків триелектродних) вакуумних ламп та коливальних контурів.

При високочастотному зварюванні металів лампові генератори використовують головним чином для генерації струмів частотою більше 60 кГц. До складу лампового генератора входять такі вузли: вхідний пристрій комутації, анодний трансформатор, високовольтний випрямляч, блок генераторної лампи, анодний коливальний контур.

Вхідний пристрій комутації та анодний трансформатор мають конструкцію, яка принципово не відрізняється від аналогічних пристроїв потужних промислових електротехнічних установок.

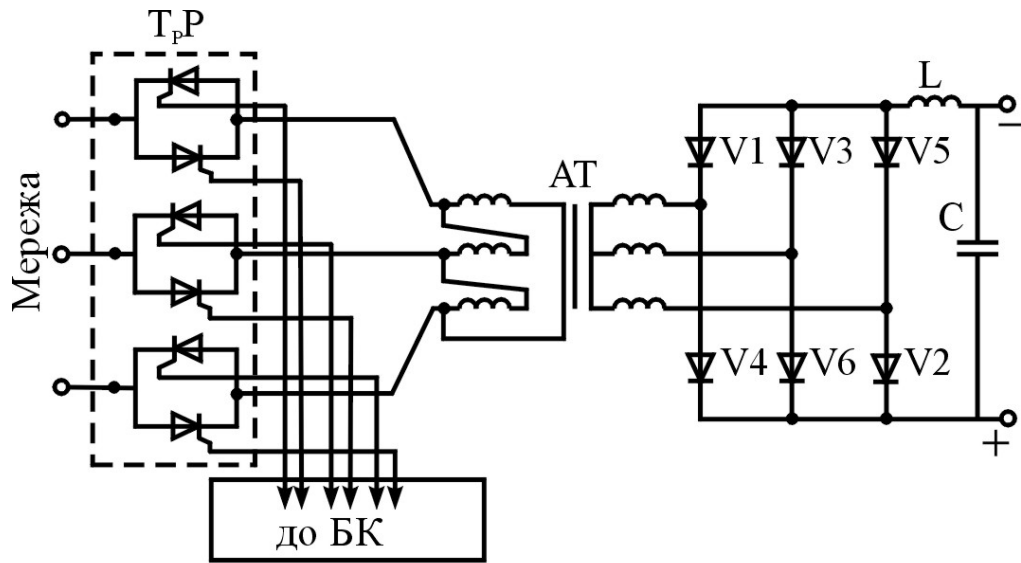
Як випрямні елементи високовольтного випрямляча використовуються діоди або тиристори. У лампових генераторах, що живляться від мережі 380 В, випрямляч зібраний на діодах, а регулювання здійснюється за допомогою тиристорів з боку нижчої напруги силового (анодного) трансформатора (рис.7.5,а).

У потужних лампових генераторах (600 кВт та більше), що живляться від високовольтної мережі, застосовуються тиристорні випрямлячі (рис.7.5,б). Силовий блок випрямляча зібраний за трифазною мостовою схемою з шістьма керованими плечима V1...V6. Усі плечі випрямляча зібрані за однаковою схемою та містять декілька десятків послідовно увімкнених тиристорів.

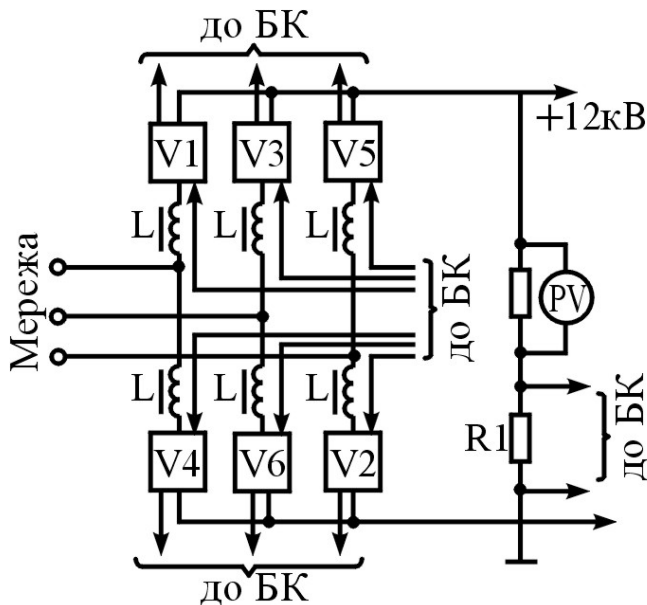
Послідовно з кожним плечем увімкнуті дроселі насичення для зниження швидкості наростання струму через тиристори під час вмикання.



Система керування забезпечує подачу до плеча випрямляча імпульсу керування, синхронізованого з мережею високої напруги.



*a*



*б*

Рис. 7.5. Спрощені принципові схеми головних кіл керованих випрямлячів потужних лампових генераторів:

*a* – напівпровідникові діоди на стороні вищої напруги, тиристорний регулятор на стороні нижчої напруги анодного трансформатора; *б* – тиристорний випрямляч при живленні високовольтною напругою:  $V1...V6$  – високовольтні вентилі;  $AT$  – анодний трансформатор;  $T_pP$  – тиристорний регулятор;  $L$  – дросель; БК – блок керування

Найбільш важливою частиною лампового генератора є електронна лампа. У потужних лампових генераторах використовуються виключно триелектродні вакуумні лампи – тріоди. У цих лампах електрони рухаються під впливом результуючого поля, що визначається потенціалами сітки та анода відносно катода, причому напруга сітка–катод діє на потік електронів сильніше, ніж напруга анод–катод.

Принцип роботи лампового генератора можна розглянути на прикладі схеми генератора з незалежним збудженням (рис.7.6).

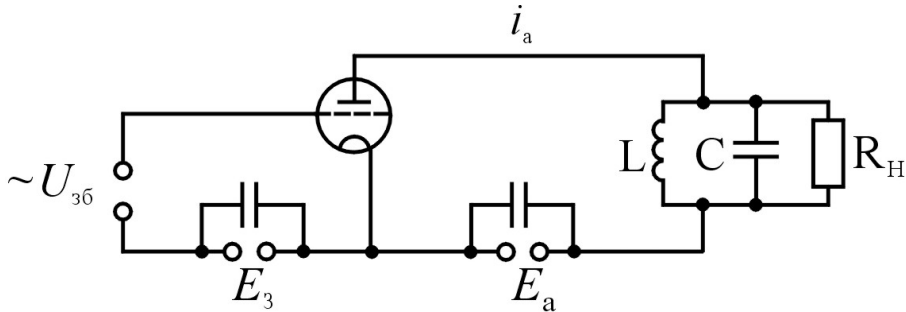


Рис. 7.6. Схема генератора з незалежним збудженням

В анодне коло тріода ввімкнуті коливальний контур та джерело постійного струму  $E_a$ , зашунтоване ємністю. До сітки подано постійну напругу зміщення  $E_3$  та змінну високочастотну напругу збудження  $u_{36} = U_{36} \sin \omega t$ . Залежність миттєвих значень анодного струму  $i_a$  від значення напруги між сіткою та катодом  $e_c = E_3 + U_{36} \cos \omega t$  визначатиметься за сітковою характеристикою лампи при відповідній анодній напрузі  $E_a$ .

Залежно від значення сіткового зміщення  $E_3$  та амплітуди напруги збудження  $U_{36}$  можливі два режими коливань:

1. Режим коливань першого роду (рис.7.7,а). У цьому випадку  $E_3$  підбирається так, що робоча точка лежить на висхідній ділянці сіткової характеристики тріода, а амплітуда  $U_{36}$  така, що сіткові напруги не виходять за межі сіткової характеристики по осі абсцис. Характер зміни анодного струму та форма його кривої відповідають характеру зміни та формі кривої напруги збудження. Анодний струм може розглядатися як сума двох складових: постійної  $I_{a0}$  та змінної з амплітудою  $I_{a1}$ .

Коливання першого роду неекономічні, тому такий режим у потужних генераторах не використовується.

2. Режим коливань другого роду (рис.7.7,**б**). Величини  $E_3$  та  $U_{3\delta}$  співвідносяться між собою так, що сіткова напруга виходить уліво за межі висхідної частини сіткової характеристики анодного струму. При цьому анодний струм має вигляд послідовних імпульсів косинусоїдальної форми. Залежно від співвідношення  $E_3$  та напруги зсуву статичної характеристики триода  $E_3'$  кут відсічки анодного струму  $\theta$  може змінюватися в достатньо широких межах:

$$\cos \theta = \frac{E_3 - E_3'}{U_{3\delta}}. \quad (7.3)$$

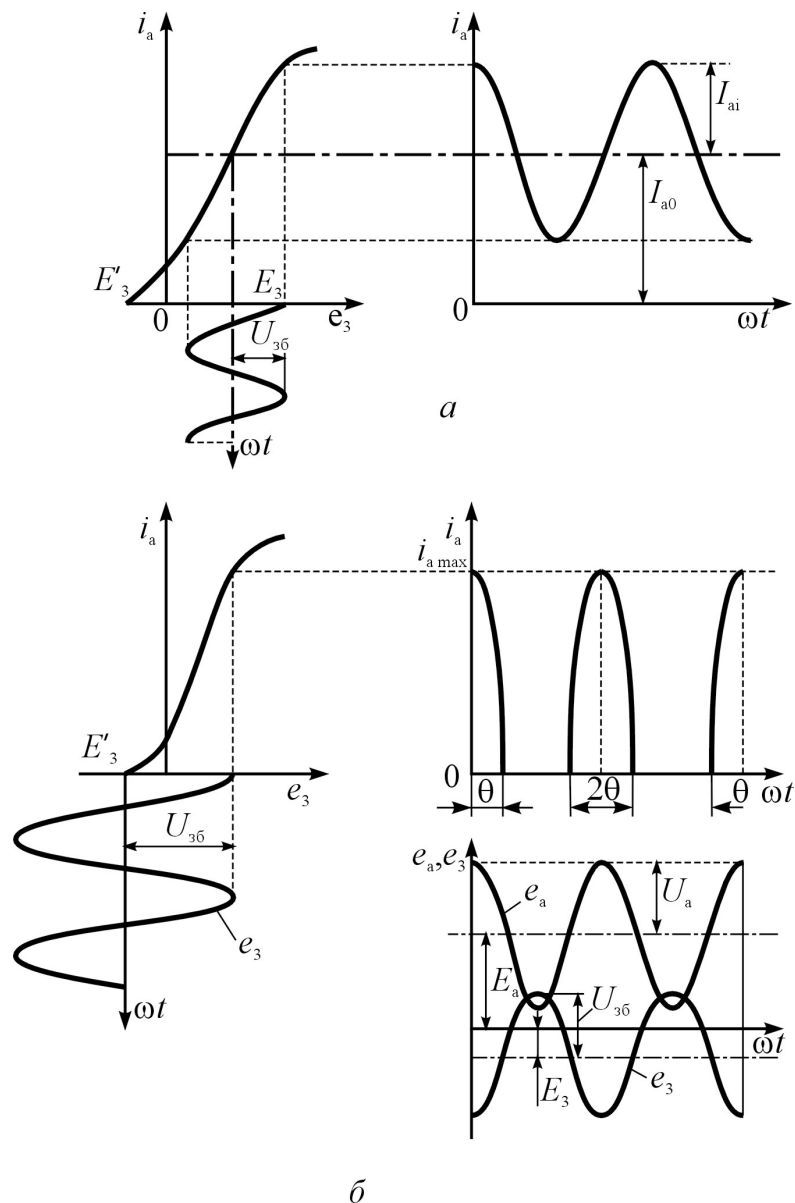


Рис. 7.7. Форма анодного струму та напруги:  
**a** – режим першого роду; **б** – режим другого роду

Із цього співвідношення видно, що зі зменшенням  $U_{36}$  кут  $\theta$  відсічки збільшується і при  $U_{36} = E_3 - E_3'$  стає рівним 180 ел. град, тобто лампа переходить у режим коливань першого роду.

Форма кривої анодного струму має достатньо складний характер, який можна представити у вигляді суми постійної та гармонічних складових.

Для забезпечення оптимальних кутів відсічки анодного струму, при яких досягається найбільший ККД генератора, необхідно правильно підібрати значення сіткового зміщення  $E_3$ . Встановлено, що оптимальний кут відсічки  $\theta = 65 \dots 80$  ел. град, тому для його досягнення слід зсунути робочу точку на сітковій характеристиці генераторної лампи вліво (див. рис.7.7). Це можна зробити за допомогою спеціального активного опору (гридліка), ввімкненого в коло, або подачею постійної напруги від окремого джерела. Внаслідок того, що сітковий струм містить постійну складову, протікає по зовнішньому колу від виводів сітки до катода, проходження цієї складової через гридлік забезпечує появу негативної відносно катода напруги на сітці. Сіткове зміщення автоматично регулюватиметься залежно від значення сіткового струму. Це особливо важливо для генераторів із самозбудженням, які головним чином застосовуються для зварювання.

У цих генераторах частина напруги анодного контуру подається назад до сітки за допомогою зворотного зв'язку. Внаслідок того, що при зварюванні, термообробці та споріднених процесах активний та реактивний опір навантаження і, відповідно, всього коливального контуру змінюються, відбувається і зміна резонансної частоти контуру. За рахунок зворотного зв'язку частота коливань автоматично змінюється так, що підтримується оптимальний режим роботи генераторної лампи.

Залежно від будови генератора анодний контур може виконувати одночасно функції й навантажувального: це так звана одноконтурна схема; якщо струм високої частоти від анодного контуру подається до навантажувального контуру, то маємо двоконтурну схему конструктивного виконання генератора.

Для живлення лампових генераторів принципово можливе застосування також двох схем: послідовної та паралельної. Послідовна схема живлення (див. рис.7.6) характеризується тим, що в ній шляхи постійних та змінних струмів не розділені.

Оскільки випрямляч, який живить схему, ввімкнутий послідовно з коливальним контуром, то через нього протікає не тільки постійна, а й високочастотна складові анодного струму, що неприпустимо. Тому джерело живлення лампи обов'язково повинно шунтуватися достатньо великою ємністю. Послідовна схема проста, але в джерелах живлення для високочастотного зварювання її не використовують через те, що коливальний контур (як частина зварювального інструмента) в такій схемі перебуває під повною постійною напругою відносно корпусу, а це небезпечно для обслуговуючого персоналу.

В установках для високочастотного зварювання застосовують паралельну схему, в якій шляхи постійної та змінної складові струму розділені. Генератори випускаються за одноконтурною або двоконтурною схемами (рис.7.8).

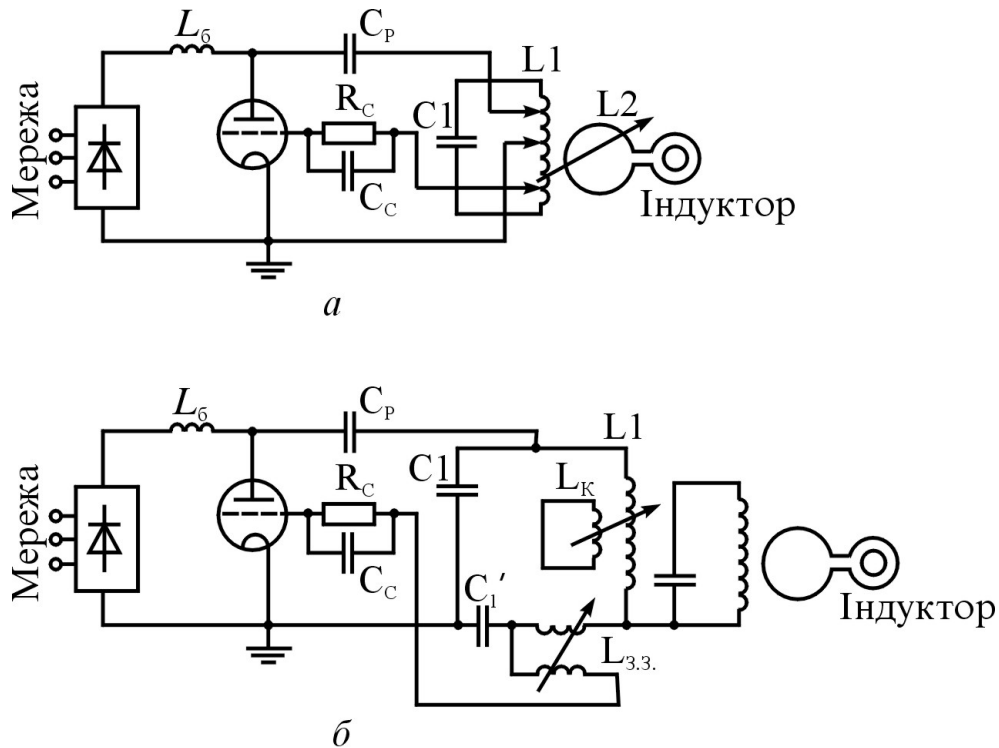


Рис. 7.8. Одноконтурна (а) та двоконтурна (б) схеми лампових генераторів для зварювання струмом високої частоти

У цих схемах постійна складова анодного струму не заходить у коливальний контур, тому що протікає від джерела живлення (випрямляча) через дросель  $L_6$  та лампу, а змінні складові проходять через розподільний конденсатор  $C_p$ , коливальний контур та лампу. Шлях до випрямляча їм перекриває дросель  $L_6$  з великою індуктивністю.

В одноконтурній схемі (рис.7.8,*a*) коливальний контур складається з котушки індуктивності  $L_1$  та конденсатора  $C_1$ . Котушка індуктивності  $L_1$  одночасно є первинною обмоткою високочастотного зварювального трансформатора. Вторинною обмоткою цього трансформатора служить котушка індуктивності  $L_2$ . До виводів вторинної обмотки підключається зварювальний індуктор. Виводи з котушки  $L_1$  призначені для добору оптимального еквівалентного опору контуру та коефіцієнта зворотного зв'язку.

Таку схему доцільно використовувати у випадку, коли зварювальний пристрій-індуктор розміщується безпосередньо поблизу лампового генератора, тому що вихідні параметри коливального контуру значною мірою залежать від параметрів навантаження.

У двоконтурній схемі генератор значно менше чутливий до зміни параметрів навантаження в процесі зварювання та допускає віддалення зварювального пристрою на 10...15 м від генератора. Але такі схеми більш складні, а відповідно й дорожчі. У двоконтурній схемі на рис.7.8,*б* плавне регулювання коефіцієнта зворотного зв'язку забезпечується шляхом застосування трансформаторів зворотного зв'язку  $L_{3,3}$  з рухомими одна відносно другої обмотками та плавним регулюванням зв'язку між контурами за рахунок використання рухомої короткозамкненої котушки  $L_k$ . Це дає змогу досягти достатньо точної настройки режиму генератора при зміні навантаження в широких межах, але при цьому ускладнюється конструкція генератора.

Наведені на рис.7.8 схеми не вичерпують усіх можливих варіантів виконання, але вони є принциповими для більшості генераторів, які використовуються в промисловості. Технічні характеристики лампових генераторів, що серійно випускаються та використовуються для зварювання струмом високої частоти, наведені в дод.2 (див. табл.2.7).

Останнім часом для отримання струму частотою до 10 кГц для цілей електротермічної обробки металів промисловість випускає тиристорні перетворювачі високої потужності.

До складу тиристорного перетворювача входять напівпровідниковий випрямляч, а також апаратура керування та комутації, тиристорний інвертор, до виходу якого підключається навантажувальний контур зі зварювальним індуктором.

Головною частиною тиристорного перетворювача є тиристорний інвертор, який перетворює постійний струм у струм високої частоти (докладно роботу інверторного перетворювача розглянуто в гл.8).

У промисловій практиці застосовують достатньо велику кількість електричних схем тиристорних перетворювачів частоти. Однією з них є мостова схема з подвоєнням частоти, на основі якої серійно випускається генератор СУГЗ-100/10 потужністю 100 кВт, частотою 10 кГц. Функціональну схему цього перетворювача наведено на рис.7.9.

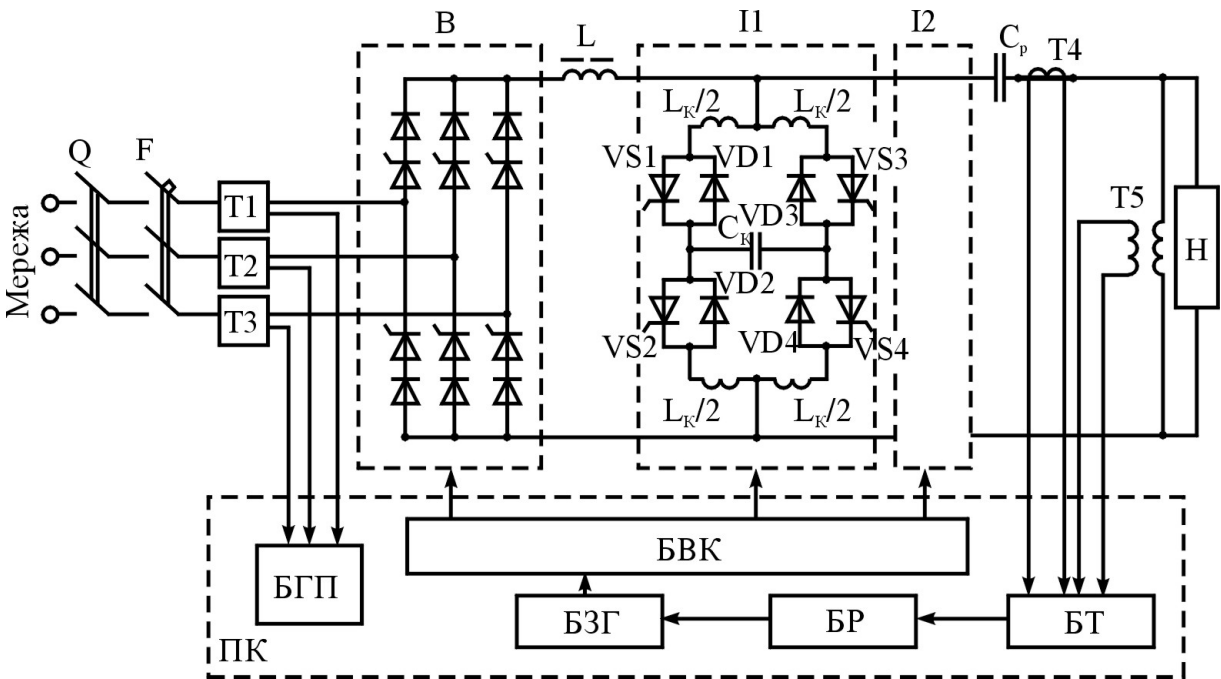


Рис. 7.9. Функціональна схема генератора середньої частоти СУГЗ – 100/10: ПК – пристрій керування; БГП – блок готовності та пуску; БВК – блок вихідних каскадів; БЗГ – блок генератора, що задає сигнал; БТ – блок трансформаторів; БР – блок регулювання.

Схема складається з таких функціональних частин: силової схеми, яка вміщує керований випрямляч та інвертор, кола комутації, пристрої керування, регулювання та захисту. Напруга 380 В промислової частоти через рубильник Q та автомат F подається до входу керованого випрямляча В. Випрямлена напруга 485...520 В через дросель фільтра L подається до входу інвертора, в якому вона перетворюється в змінну напругу підвищеної частоти. Інвертор складається з двох однофазних мостів I1 та I2, ввімкнених паралельно. Навантаження Н підключається через розподільний конденсатор  $C_p$  у коло подвоєння частоти.

Імпульси керування на тиристори двох мостів інвертування подаються зі зсувом, що регулюється в межах  $0...180$  ел. град, завдяки чому можна плавно змінювати вихідну напругу (потужність) генератора при постійній напрузі випрямляча.

Розглянемо роботу одного мосту, що інвертує.

В одну діагональ мосту ІІ увімкнутий контур комутації, що складається з котушки індуктивності  $L_k$  та конденсатора комутації  $C_k$ . У другу діагональ мосту через розподільний конденсатор  $C_p$  увімкнуте навантаження. Власна частота контуру, що утворений котушкою індуктивності  $L_k$  та конденсаторами  $C_k$  і  $C_p$ , близька до подвійної частоти перемикавання тиристорів (частоти завдання).

Перед подачею імпульсів керування на тиристори інвертора розподільний конденсатор  $C_p$  заряджений до напруги випрямляча за рахунок того, що подача імпульсів керування на тиристори інвертора відбувається автоматично з певною часовою затримкою.

Імпульс відкриття подається до тиристорів  $VS1$ ,  $VS4$  мосту, що інвертує. У контурі " $L_k-C_k-C_p$  – навантаження" відбувається коливальний процес. Зворотна півхвиля струму протягом деякого часу  $t_0$  замикається через той самий контур " $L_k-C_k-C_p$  – навантаження" та через зворотні діоди  $VD1$ ,  $VD4$ . При цьому забезпечується закриття тиристорів, що робить неможливим подальший розвиток коливального процесу.

У кінці інтервалу провідності конденсатор комутації  $C_k$  перезарядиться і полярність напруги на ньому зміниться на зворотну відносно початкової. У момент часу  $t = T/2$  (половина періоду частоти завдання) подаються імпульси відкриття на тиристори  $VS2$ ,  $VS3$  і через коло " $L_k-C_k-C_p$  – навантаження" знову проходить струм. Наприкінці цього півперіоду стан схеми відповідатиме початковому.

Таким чином, частота струму навантаження вдвічі вища за частоту подачі імпульсів керування інвертором.

Форма напруги на навантаженні близька до синусоїдальної, а її значення залежить від куту зсуву фаз мостів, що інвертують, та опору навантаження.

Трансформатор струму  $T4$  та трансформатор напруги  $T5$  забезпечують зворотний зв'язок відповідно за струмом та напругою.

До головних переваг тиристорних перетворювачів частоти порівняно з електромашинними перетворювачами належать: високий ККД, який мало залежить від завантаження перетворювача, та відсутність рухомих частин і пов'язаного з цим шуму, а також постійна готовність до роботи.



### 7.3. Джерела живлення для електронно-променевого зварювання

Джерело живлення для електронно-променевого зварювання (ЕПЗ) входить до складу енергетичного комплексу установки поряд з іншою апаратурою, призначеною для формування пучка електронів з заданими параметрами та керування його потужністю й положенням відносно зварювального стику.

Для живлення електронних гармат застосовують декілька автономних джерел (рис.7.10): високовольтне (10...100 кВ) – для подачі на прожектор гармати та виріб напруги прискорення; живлення розжарювання катода; живлення прикатодного електрода; живлення лінзи фокусування; живлення системи, що відхиляє електронний струмінь.

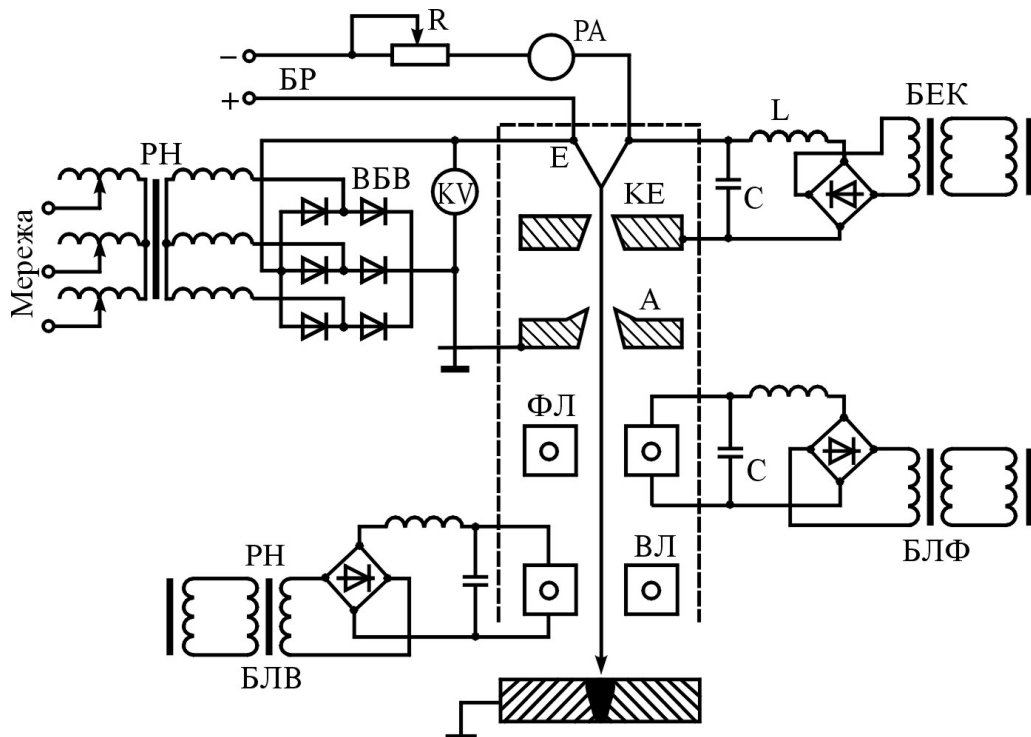


Рис. 7.10. Загальна принципова електрична схема джерела живлення електронної гармати:

РН – регулятор напруги; ВБВ – високовольтний блок випрямляча напруги прискорення; БР – блок розжарювання; БЕК – блок електроду керування; БЛФ, БЛВ – блоки лінз фокусування та відхилення електронного струменя

До кожного з цих джерел ставляться специфічні вимоги, обумовлені технологічним процесом ЕПЗ.

Головна вимога до високовольтних джерел полягає в отриманні стабілізованих вихідних параметрів, зокрема напруги прискорення. Припустиме

відхилення цієї напруги від номінального значення не повинно перевищувати  $\pm 3 \%$ . Для забезпечення таких умов зварювання високовольтні джерела обладнують стабілізаторами напруги, які знижують коливання напруги прискорення.

Процес ЕПЗ є також чутливим до пульсації випрямленої напруги. Залежно від типу гармати коефіцієнт пульсацій не повинен перевищувати  $0,1...5 \%$ . Для випрямлення струму у високовольтних джерелах використано головним чином трифазну мостову схему.

З точки зору технології, джерело живлення зварювальної електронної гармати повинне забезпечувати плавне регулювання потужності електронного пучка. Найбільш припустиме регулювання шляхом зміни напруги прискорення. Для цього в джерелах застосовують регулятори напруги різних типів, наприклад автотрансформатори.

Електрична схема джерела розжарювання катода визначається способом його нагрівання. Для регулювання потужності електронного пучка використовують подвійну настройку: зміною напруги прискорення та встановленням різної температури підігріву катода.

Джерело живлення прикатодного електрода (модулятор) призначене для регулювання струму електронного пучка, роботи гармати в імпульсному режимі, плавного зниження струму пучка при заварюванні кратера шва тощо. Як модулятор часто використовують напівпровідникові випрямлячі з високою стабілізацією напруги ( $\pm 1,5 \%$ ) та мінімальною пульсацією ( $0,3...0,5 \%$ ). Вихідна напруга в таких джерелах плавно регулюється від нуля до номінального значення.

Для періодичного запирання гармати в імпульсному режимі роботи в коло живлення прикатодного електрода вмикається переривник, наприклад мультівібратор. Внаслідок того, що розміри зварювальної ванни і шва при ЕПЗ залежать від стабільності струму в лінзі фокусування, навіть мала зміна його приводить до зміни фокусної відстані електронного пучка. Крім того, висока стабільність струму в лінзі відхилення необхідна для забезпечення пересування електронного пучка строго по осі стику.

Тому головні вимоги до джерела живлення електромагнітних лінз мають бути такими: висока стабілізація вихідної напруги з мінімальною пульсацією; можливість регулювання струму в лінзах у широких межах; можливість застосування систем слідування за густиною струму в плямі нагріву та спрямуванням пучка електронів по стику.

Для живлення електромагнітних лінз широко застосовують малопотужні стабілізовані випрямлячі з мінімальною пульсацією. Стабілізатори дають змогу плавно регулювати силу струму в лінзі в межах 15...250 мА. При коливаннях напруги в мережі живлення  $220 \pm 10$  В точність стабілізації струму складає  $\pm 0,05$  %.

#### **7.4. Джерела живлення для плазмових технологій обробки матеріалів**

Спеціалізовані джерела живлення для плазмових процесів (мікроплазмового зварювання, різання, напилення) повинні забезпечувати стійке горіння дуги, сталість її робочих параметрів. Горіння стиснутої дуги супроводжується пульсаціями струму й напруги, що викликані різними термодинамічними коливаннями, схемою випрямлення та іншими збуреннями. Тому ВАХ такої дуги являє собою не лінію, а смугу, ширину якої визначають амплітуди коливань, що мають місце. У зв'язку з цим дійсна зовнішня ВАХ джерела живлення (з урахуванням пульсації струму) є також не лінією, а смугою, ширина якої залежить від схеми випрямлення.

Специфіка технології мікроплазмового зварювання ставить до джерела живлення такі основні вимоги: надійне збудження та горіння зварювальної дуги як у безперервному, так і в імпульсному режимах на прямій та зворотній полярності в широкому діапазоні зварювальних струмів, починаючи з 0,3...0,5 А, з регулюванням частоти та скважності. Джерела живлення повинні мати гіперболічну або пологоспадну зовнішню характеристику.

В ІЕЗ ім.Є.О.Патона розроблені універсальні джерела живлення для мікроплазмового зварювання з уніфікованих блоків. Структурні схеми цих джерел подібні до структурних схем джерел живлення для аргонодугового зварювання і відрізняються тільки вхідними та вихідними параметрами, а також габаритними розмірами та масою.

*Джерело живлення МПА-80* універсального типу призначене для мікроплазмового зварювання як у режимі постійного струму, так і в імпульсному режимі імпульсами прямої полярності виробів із корозійно-стійких сталей. Амплітуда та тривалість імпульсів встановлюється залежно від вимог технології зварювального процесу. Для забезпечення імпульсного режиму джерело обладнане керованим тиристорним блоком, який зібраний за двопівперіодною схемою. Кожного півперіоду ввімкнутий один із тиристорів.

*Джерело живлення МПУ-5* також універсальне. Його особливістю є можливість зварювання постійним струмом, в імпульсному режимі на прямій та зворотній полярності та змінним струмом, а також мікроплазмового зварювання легких сплавів постійним струмом імпульсами зворотної полярності. Для цього передбачені два тиристорних комутатори, які вмикаються до роботи перемикачем прямої та зворотної полярності, розташованим на панелі керування. Джерело МПУ-5 має розширений діапазон зварювального струму (2...100 А).

Дослідження встановили: найкращими зовнішніми статичними ВАХ джерела живлення для плазмового різання та напилення є крутоспадні або "штикові", адже при таких характеристиках при зміні напруги дуги не відбувається помітних коливань сили струму. Це значно підвищує стабільність технологічного процесу. Тому для живлення плазмотронів використовують джерела живлення, які повинні відповідати низці специфічних вимог, пов'язаних з їх динамічними властивостями.

По-перше, електромагнітна стала зварювального кола має бути достатньою з тим, щоб усунути різкі стрибки струму, які виникають під час коливань напруги дуги. Одночасно електромагнітна стала кола керування повинна бути якнайменшою, щоб була можливість автоматичного регулювання сили струму, наприклад, за будь-яким технологічним параметром.

По-друге, джерела живлення повинні забезпечувати плавне регульоване з бігом часу наростання струму на початку процесу від мінімального до заданого та плавне зниження його в кінці.

По-третє, крім цих, специфічних, вимог ставляться й загальні: високі значення ККД та коефіцієнта потужності, найменші габарити, маса тощо.

Крутоспадні та "штикові" зовнішні ВАХ у випрямлячах для плазмових технологій формуються шляхом застосування таких же технічних рішень, як і в джерелах для аргонодугового зварювання: використанням дроселів насичення, схем з тиристорними випрямними блоками, зворотних зв'язків за струмом, трансформаторів зі спадною зовнішньою характеристикою та інших.

Для плазмового різання та напилення серійно випускаються в Україні та країнах СНД установки таких типів: АПР, ВПР, АВПР, ИПР, ВПТМ, "Україна-2" та подібні. Технічні характеристики деяких джерел наведено в дод.2 (див. табл.2.8).

Джерело живлення ИПР-120/600 (рис.7.11) являє собою випрямляч з дроселем насичення, призначений для плазмового різання металу. Стрижні дроселів L намагнічуються робочим струмом, який має один напрямок. Дроселі насичення обладнані двома обмотками керування. Обмотка керування дроселя L2 живиться від незалежного джерела і підмагнічує дросель насичення. Обмотка L1, яка розмагнічує дросель, живиться від двох джерел: випрямляча U, напруга якого пропорційна силі струму дуги, та випрямного моста VD1...VD6, напруга якого пропорційна напрузі дуги. Обидва джерела ввімкнуті відповідно. Ампер-витки L2 більше за L1. Регулятором струму є змінний резистор R1.

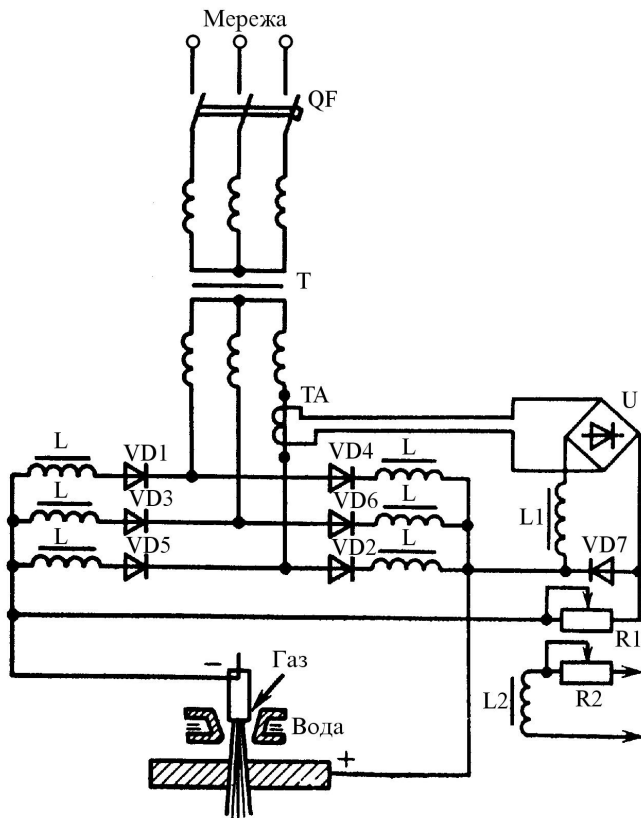


Рис. 7.11. Спрощена принципова електрична схема випрямляча ИПР 120/600

У початковий момент часу з ростом струму та падінням вихідної напруги джерела зменшується сила струму в обмотці L1 та збільшується дія підмагнічування обмотки L2. Джерело живлення в цю мить має жорстку характеристику, тобто величина напруги мало залежить від сили струму. При подальшому зростанні сили струму напруга, що живить обмотку L1, зростає пропорційно силі струму дуги і дросель насичення розмагнічується, внаслідок чого зовнішня характеристика джерела стає круто спадною. Дросель у процесі розрізування металу постійно підтримує величину струму.

Параметрична стабілізація випрямленого струму в діапазоні зміни напруги дуги використовується у випрямлячах ВПР-602, ВПР-403. Але для збільшення довжини круто-

спадної ділянки зовнішньої ВАХ у цих джерелах разом з обмоткою керування намотано декілька витків, що ввімкнуті в зварювальне коло та виконують роль негативного зворотного зв'язку за струмом.

Загальним недоліком джерел з дроселями насичення є велика маса та низький коефіцієнт потужності. У тиристорних випрямлячах, наприклад типу ВПТМ, ці недоліки усунуті. Випрямляч (рис.7.12) складається з силового знижувального трансформатора Т з жорсткою ВАХ, двох випрямних мостів (головного, зібраного на тиристорах VS1...VS6, та допоміжного – на діодах VD1...VD6), згладжувального дроселя з діодом VD7, блока фазового керування тиристорами (БФК), блока зворотних зв'язків (БЗЗ) і блока підпалювання плазмотрона (БП).

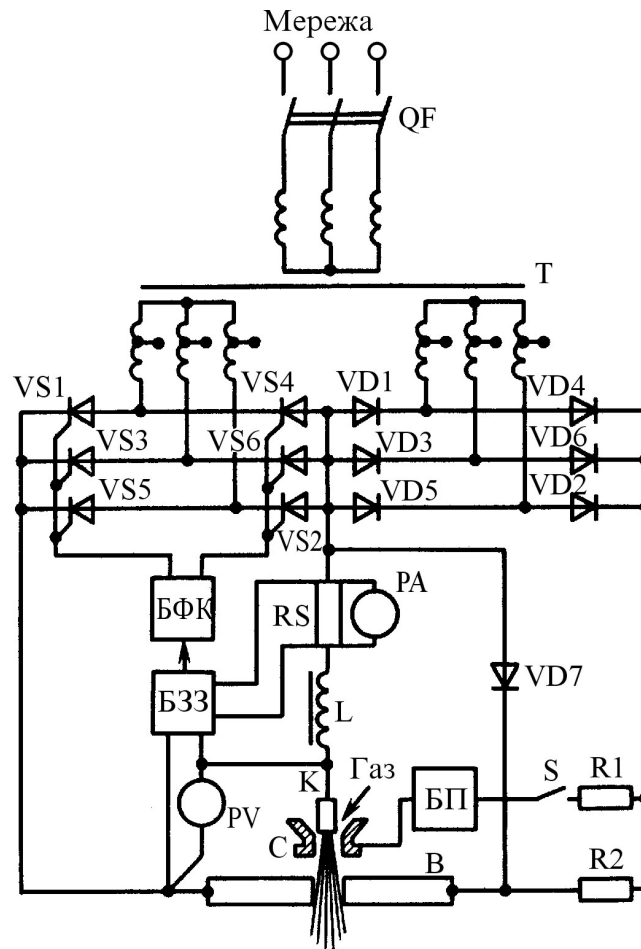


Рис. 7.12. Схема тиристорного випрямляча типу ВПТМ

Допоміжна (чергова) дуга збуджується за допомогою осцилятора блока БП та живиться від допоміжного моста через резистор обмеження R1. Допоміжна дуга, що горить між катодом К та соплом С, одразу ж перекидається до виробу, який обробляється, В і утворює "підкладку" головної

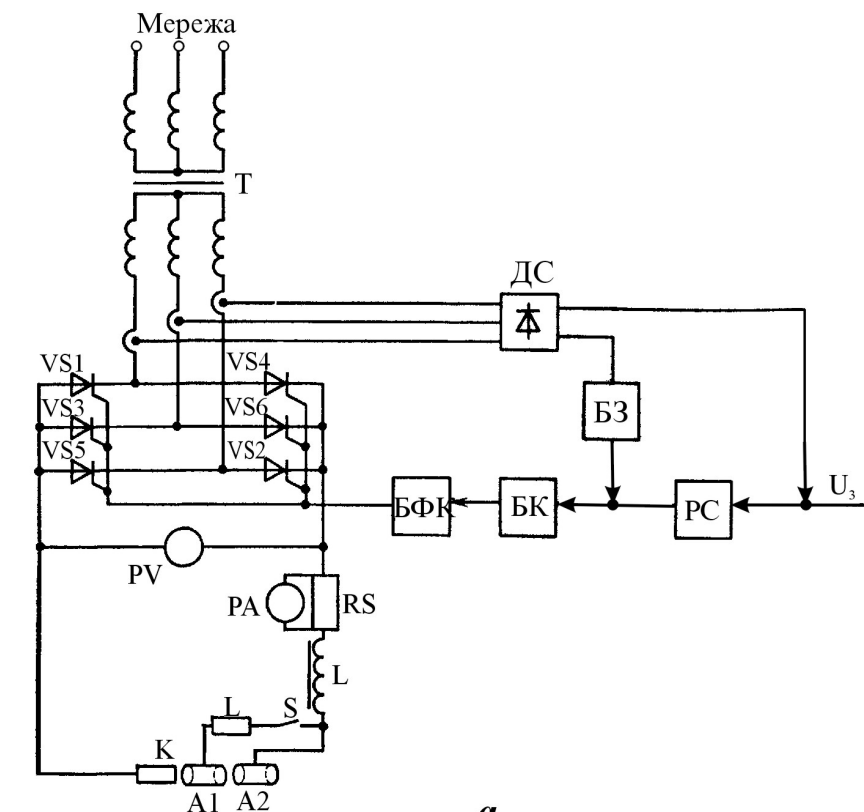
робочої дуги. Ця дуга живиться від некерованого допоміжного моста через баластний резистор R2. При подальшому зростанні струму БФК відкриває тиристорний міст, який приймає на себе живлення робочої стисненої дуги. Силу робочого струму визначає кут вмикання тиристорів. Зовнішні ВАХ джерела формує БЗЗ так само, як і в тиристорних зварювальних випрямлячах. За такою схемою побудовані тиристорні апарати, АПР-402, УПР-201, "Київ-2" та інші.

Для установок плазмового напилення типу "Україна-2" використовується тиристорне джерело живлення з напругою холостого ходу 470 В та номінальною силою струму 320 А (рис.7.13,а).

У джерелі живлення застосовано універсальну блочну систему регулювання, подібну до випрямлячів типу ВДУ. Блоки фазового керування тиристорами (БФК), регулятор струму (РС) та датчик струму (ДС) виконують такі ж функції. Блок керування (БК) керує послідовністю робіт блоків установки. Блоки регулювання виконані на мікросхемах. Для підвищення надійності роботи джерела живлення у схему введений блок захисту (БЗ).

Чергова дуга збуджується між катодом К (див. рис.7.13,а) та першим анодом А1, а робоча – між катодом К та другим анодом – А2 (соплом). Таким чином, перший анод грає роль міжелектродної вставки, яка розтягує робочу дугу та підвищує напругу в ній.

Розглянемо принципову електричну схему пуску цього плазмотрона (рис.7.13,б). Після вмикання автоматичного вмикача QF та кіл керування натисканням пускової кнопки S1 замикається коло котушки контактора К1, який контактами К1:1 підключає джерело живлення (ДЖ) до плазмотрона, а блок-контактами К1:2 шунтує кнопку S1. Кнопкою S2 ("Підпал") замикається коло котушки контактора К2, який контактами К2:2 замикає коло чергової дуги. Контакти К2:3 вимикають вольтметр PV (з метою його захисту від високочастотного розряду), К2:1 вмикають осцилятор паралельного вмикання G.



*a*

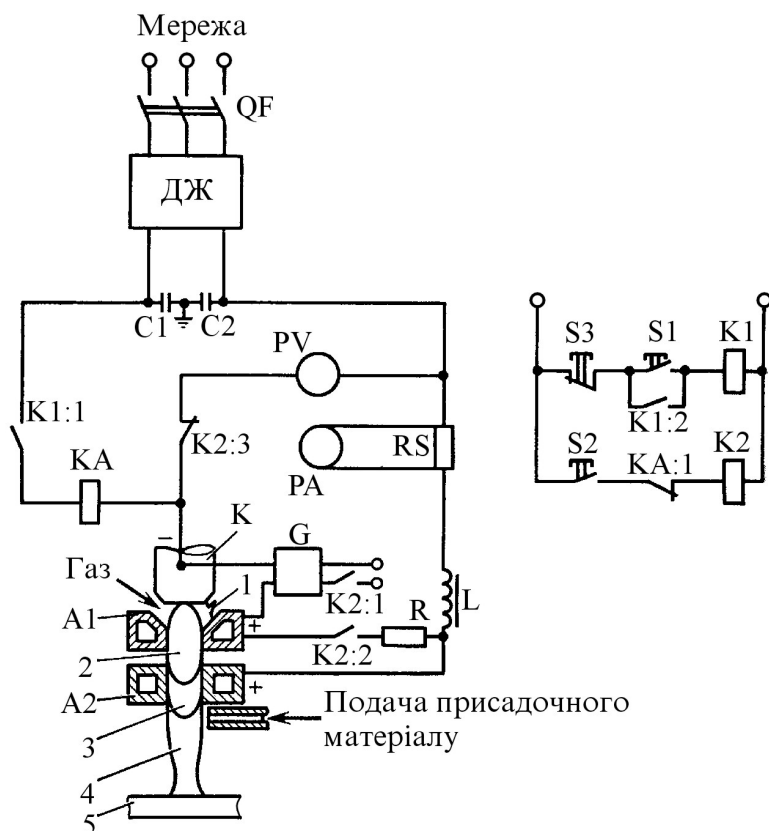


Рис. 7.13. Функціональна схема тиристорного джерела живлення установки плазмового напилення "Україна-2" (*a*) та схема керування плазмотроном з двома анодами (*б*)



Відбувається іскровий розряд  $I$  (див. рис.7.13,б) між катодом  $K$  та першим анодом  $A1$ , який збуджує чергову дугу  $2$ , що живиться джерелом ДЖ, між катодом  $K$  та першим анодом  $A1$ . Силу струму чергової дуги обмежує резистор  $R$ . Чергова дуга  $2$  збуджує робочу (основну)  $3$ , яка горить між катодом  $K$  та другим анодом  $A2$ .

Коли сила струму робочої дуги досягне величини спрацювання струмового реле  $KA$ , останнє своїми контактами  $KA:1$  розірве коло котушки контактора  $K2$ . Внаслідок цього вимикається осцилятор  $G$ , коло чергової дуги та вимикається вольтметр  $PV$ . З виходом на заданий режим роботи в плазмовий струмінь  $4$  подається порошок та розпочинається процес напилення поверхні  $5$ . Процес напилення припиняється натисканням кнопки  $S3$ , яка розриває коло котушки контактора  $K1$ . Перед натисканням кнопки  $S3$  слід знизити силу струму дуги за допомогою регулятора струму.

Джерело живлення установки "Україна-2" захищене від розряду осцилятора дроселем  $L$  та конденсаторами  $C1, C2$ . Дросель  $L$ , крім того, зменшує стрибки струму під час перехідних режимів роботи.

### Контрольні питання

1. Чим принципово відрізняються умови стійкої роботи енергетичної системи при електрошлаковому зварюванні від роботи системи при дуговому зварюванні?
2. Як регулюються вихідні параметри джерел живлення для електрошлакового зварювання?
3. З яких функціональних блоків складаються джерела живлення для зварювання струмом високої частоти?
4. За допомогою яких схемних рішень генерується струм високої частоти?
5. У чому полягають особливості джерел живлення для електронно-променевого зварювання, плазмових технологій обробки металів?

## Глава 8

# ІНВЕРТОРНІ ДЖЕРЕЛА ЖИВЛЕННЯ ДЛЯ ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ

Інверторні джерела живлення для зварювання (ІДЖ) останнім часом використовуються достатньо широко у світовій зварювальній техніці. Малі розміри та маса, мала інерційність, поліпшені динамічні властивості ІДЖ вигідно відрізняють їх від традиційних технічних рішень джерел живлення. Поняття "інвертор" походить від латинського *inverto* – перевертаю, змінюю. Інвертори використовують у багатьох галузях техніки, у тому числі у різних радіо- та електротехнічних промислових установках та системах. Так, у радіотехніці інвертор – це електричне коло або електронний пристрій, на виході якого амплітуда, полярність або фаза електричних сигналів протилежні вхідним (наприклад, фазоінвертор). В обчислювальній техніці інвертор – елемент ЕОМ, що реалізує логічну операцію заперечення (не "А"), або розв'язувальний підсилювач, який виконує математичну операцію інвертування (множення на "-1"). Інвертор в електротехніці – це пристрій для перетворення постійного струму в змінний. Інвертори використовують для живлення споживачів змінного струму в умовах, коли єдиним джерелом енергії є акумуляторна батарея (наприклад, бортові джерела живлення); у керованому електроприводі змінного струму з частотним керуванням; на електротранспорті (залізничний, метро); для живлення різних технологічних установок, які споживають нестандартну частоту (електротермія, ультразвукова обробка, електромагнітне перемішування різних металів тощо). Їх застосовують також для перетворення постійного струму одного рівня у постійний струм іншого рівня. Зварювальні інвертори умовно належать до цієї групи перетворювачів.

Інверторні джерела живлення набули останнім часом широкого застосування при дуговому зварюванні плавким та неплавким електродами, ультразвуковому та мікроплазмовому зварюванні, контактному зварюванні деталей малої та середньої товщини. У перспективі можливе використання джерел живлення на основі потужних високочастотних інверторних перетворювачів для електрошлакового зварювання та зварювання під флюсом.

## 8.1. Принцип роботи та схемні рішення інверторів струму і напруги

Інвертором струму називається інвертор, пов'язаний з джерелом живлення через згладжувальний дросель так, що ключі інвертора перемикають струм. Як ключі в інверторах струму використовують тиристри або транзистори. Для комутації ключів-тиристорів паралельно навантаженню підключається комутуючий конденсатор. За способом підключення конденсатора до навантаження такі інвертори називаються також паралельними.

На рис.8.1,*a* наведено схему однофазного мостового паралельного інвертора струму. Через велику індуктивність згладжувального дроселя  $L_d$  вхідний струм інвертора  $i_d$  (струм джерела  $E$ ) будемо вважати ідеально згладженим. При вмиканні тиристорів  $VS1$  та  $VS4$  за допомогою імпульсів від системи фазового керування, не показаної на рисунку, утворюється контур протікання струму  $E_d-L_d-VS1-R_H-VS4-E_d$ . Спрямування струму  $i$  у діагоналі мосту показано на рисунку. При вмиканні  $VS2$  і  $VS3$  струм змінює своє спрямування. Вхідний струм інвертора  $i_d$  завдяки періодичному перемиканню, що здійснюється тиристорами, перетворюється в діагоналі мосту в змінний струм прямокутної форми (рис.8.1,*б*).

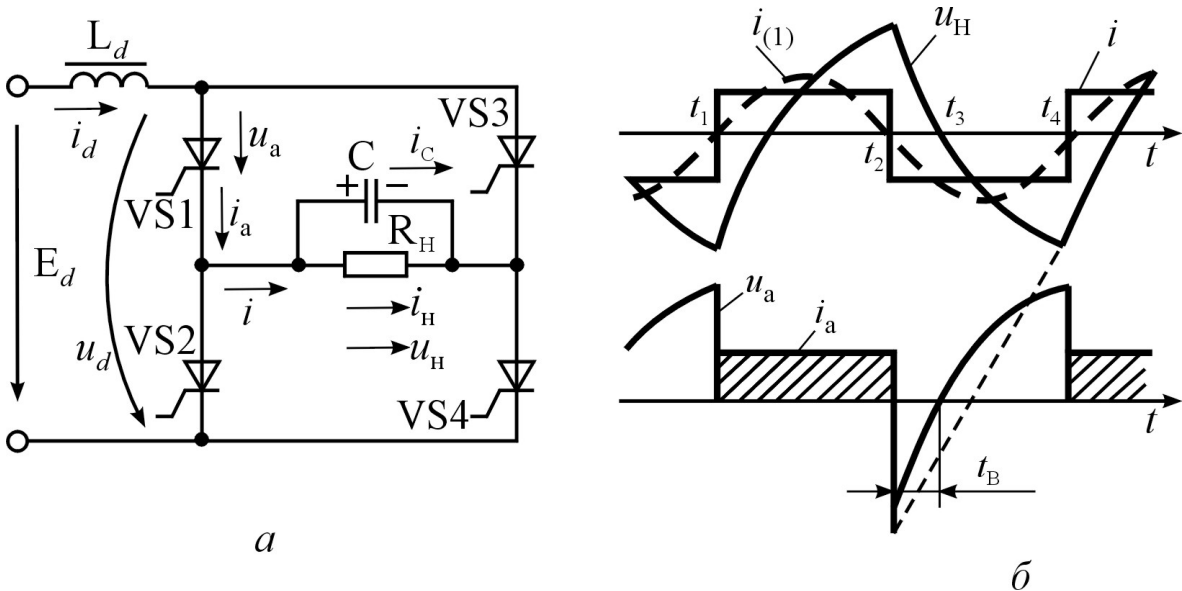


Рис. 8.1. Схема (*a*) та часові діаграми (*б*) однофазного паралельного мостового інвертора струму

При активному характері навантаження  $R_H$  напруга на конденсаторі  $U_C = U_H$  внаслідок постійності струму  $i = I_d$  змінюється за експоненціальним законом з постійною часу  $\tau = R_H C$  і в кінці інтервалу, коли тиристри VS1 та VS4 відкриті, має полярність, вказану на рис.8.1,а. У момент  $t_2$  сигнал керування подається на керуючі електроди тиристорів VS2 та VS3. При їх відкритті комутуючий конденсатор С стає підключеним паралельно до обох тиристорів VS1 та VS4, які раніше проводили струм. Полярність напруги на конденсаторі така, що напруга на вентилях при цьому стає зворотною, струм через VS1 та VS4 припиняється й тиристри відновлюють свої замикаючі властивості. При  $t > t_3$  напруга  $u_a$  між анодом й катодом вентилів через перезарядку конденсатора знову стає позитивною.

При  $t = t_4$  знову відбувається вмикання тиристорів VS1 та VS4 і вмикання VS2 та VS3. У даній схемі має місце одноступенева комутація струму, коли струм з одного силового тиристора одразу ж переводиться на другий.

Форма й величина вихідної напруги інвертора та час закриття тиристорів залежать від режиму інвертора, що визначається постійною часу  $\tau$ . Чим більше  $\tau$ , тим повільніше змінюється напруга на навантаженні, закон її зміни наближається до лінійного, а форма напруги  $u_H$  наближається до трикутної. Напруга  $u_d$  на діагоналі мосту у будь-який момент часу дорівнює напрузі на закритому вентилі. Під час роботи вентиля VS2  $u_d$  дорівнює  $u_{a1}$ , тобто напрузі на вентилі VS1, а при відкритому тиристорі VS4  $u_d = u_{a3}$ .

Середнє значення  $u_d$ , якщо знехтувати втратами в дроселі, дорівнює  $E$ . При збільшенні  $\tau$  (наприклад, при зростанні  $R_H$ ) збільшується від'ємна площа кривої  $u_a$  (штрихова лінія на рис.8.1,б) і, внаслідок того, що  $E_d = \text{const}$ , спостерігається зростання додатної площі та збільшення напруги  $u_H$  на навантаженні. Тому зовнішня характеристика  $u_H = f(I_H)$  інвертора струму є крутоспадною.

Сильна залежність напруги на навантаженні від навантаження є недоліком інверторів струму. Для стабілізації напруги на навантаженні використовують різні схемні рішення, серед яких найбільш поширена схема інвертора струму з так званим індуктивно-тиристорним регулятором (рис.8.2).

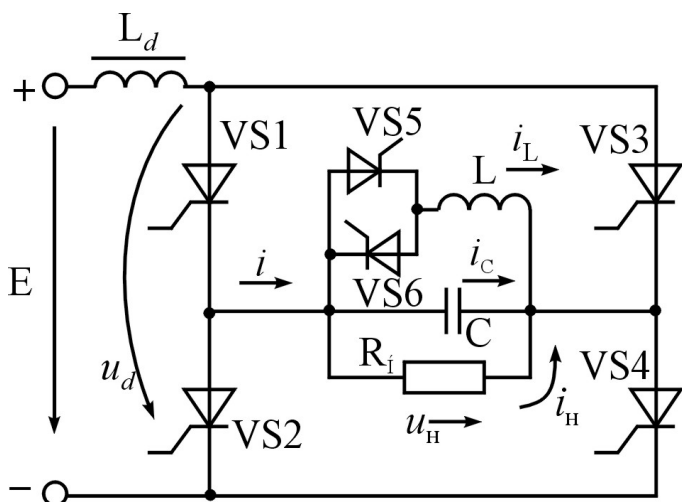


Рис. 8.2. Інвертор струму з індуктивно-тиристорним регулятором

У схему однофазного мостового паралельного інвертора струму додатково введений перетворювач, що регулює змінну напругу з індуктивним навантаженням (елементи VS5, VS6, L).

Якщо змінювати струм  $I_L$  за допомогою системи керування тиристорами VS5 і VS6 таким чином, щоб кут зсуву між струмом  $i$  та напругою  $u_H$  залишався постійним, то на-

пруга на навантаженні  $R_H$  буде незмінною при зміні струму навантаження.

Інвертори струму з індуктивно-тиристорним регулятором широко використовуються у промисловості, вони забезпечують передачу потужності до сотні кіловат. Форма вихідної напруги близька до синусоїдальної, завдяки чому їх можна використовувати без фільтрів на стороні змінного струму. При створенні інверторів струму зі змінною вихідною частотою виникають труднощі при роботі на низьких частотах тому, що зі зниженням частоти необхідно збільшувати ємність комутуючих конденсаторів. Для подолання цих труднощів розроблені модифіковані схеми інверторів струму, у яких комутація струму одного тиристора на інший відбувається у два етапи. З цією метою у схему вводяться допоміжні вентиля, але це ускладнює електричну схему інверторного перетворювача.

Проте більш прості рішення у цих випадках забезпечують інвертори напруги.

*Інвертором напруги* називається автономний перетворювач, у якому змінна напруга на навантаженні утворюється в результаті його періодичного підключення за допомогою ключів до джерела постійного струму, причому за допомогою ключів забезпечується полярність імпульсів напруги, що чергуються, на навантаженні. Інвертори напруги виконуються на повністю керованих приладах (транзисторах, двохопе-

раційних тиристорах, одноопераційних тиристорах, які обладнані колами комутації).

На рис.8.3,*a* наведено схему однофазного мостового інвертора напруги, зібраного на повністю керованих вентилях (зверніть увагу на зображення тиристора, що запирається).

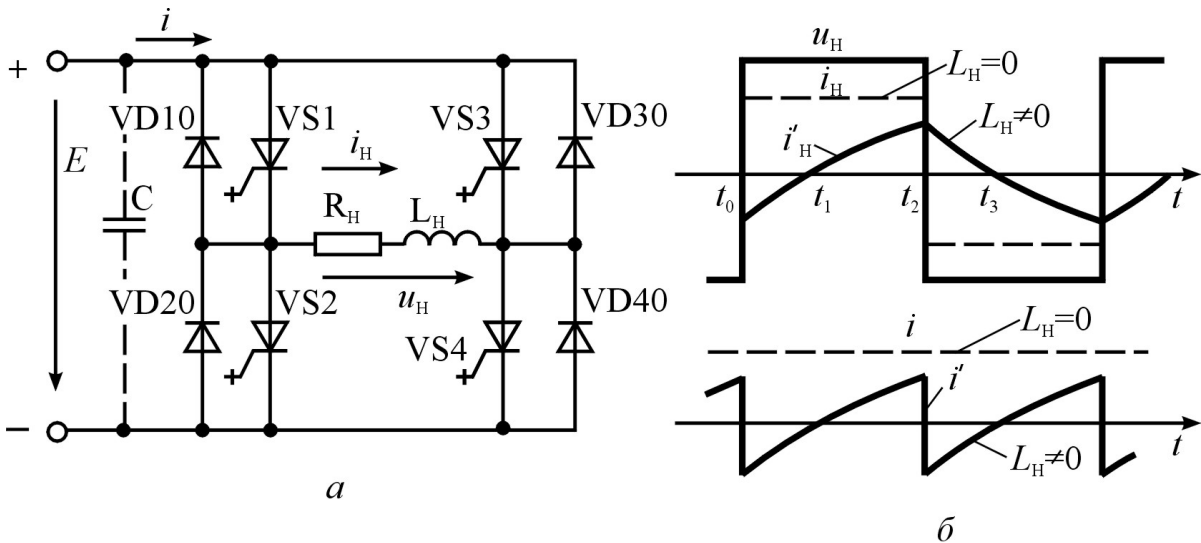


Рис. 8.3. Схема (*a*) та часові діаграми (*б*) однофазного мостового інвертора напруги

При увімкнутих тиристорах  $VS1$  і  $VS4$  та вимкнених  $VS2$  і  $VS3$  навантаження підключається лівим кінцем до позитивної шини живлення, а правим – до негативної і струм  $i_H$  тече, як показано на рисунку. Якщо  $VS1$  та  $VS4$  вимкнуті, а  $VS2$  та  $VS3$  увімкнуті, то напруга й струм навантаження змінять напрям. При активному навантаженні ( $L_H = 0$ ) струм навантаження  $i_H$  повторює за формою напругу на навантаженні  $u_H$ . На рис.8.3,*б* штриховою лінією показані крива струму навантаження  $i_H$  та вхідного струму інвертора  $i$  при  $L_H = 0$ . Струм  $i_H$  та напруга  $u_H$  мають прямокутну форму.

При активно-індуктивному навантаженні ( $L_H \neq 0$ ) струм навантаження  $i_H'$  змінюється за експоненціальним законом з постійною часу  $\tau = \frac{L_H}{R_H}$ .

При запиранні  $VS1$  та  $VS4$  у момент  $t_2$ , незважаючи на потрапляння відпираючих імпульсів на  $VS2$  та  $VS3$ , струм навантаження  $i_H'$  через присутність індуктивності  $L_H$  прагне зберегти свій напрямок. Для того, щоб після запирання  $VS1$  та  $VS4$  відкрити шлях струму навантаження, тири-

стори шунтують діодами VD10...VD40. Тому струм навантаження  $i_n'$  при  $t_2 < t < t_3$  тече через VD20 та VD30 і повертає частку енергії, яка запасена в індуктивності, назад у джерело E.

У момент часу  $t = t_3$  струм навантаження  $i_n'$  стає рівним нулю, а при  $t > t_3$  починає текти у протилежному напрямі через VS2 та VS3, на керуючих електродах яких продовжують існувати сигнали відпирання. Подібно на інтервалі  $t_0 < t < t_1$ , тобто після запирання VS2 та VS3, струм навантаження тече через VD10, VD40.

Вихідна напруга інвертора напруги через відносно малу тривалість процесу комутації (запирання вентилів, навіть з урахуванням процесів у комутаційних вузлах, якщо інвертор виконаний на одноопераційних тиристорах, триває не більше 200 мкс) за формою близька до прямокутної і не залежить від струму навантаження. У зв'язку з цим зовнішня характеристика інвертора напруги  $U_n = f(I_n)$  – жорстка, з малим кутом нахилу.

Вхідний струм інвертора  $i'$  (рис.8.3,б) при  $L_n \neq 0$  стає знакозмінним, що говорить про періодичний енергообмін між колом навантаження та джерелом живлення інвертора: нагромадження енергії в індуктивності навантаження під час роботи тиристорів та повернення енергії в джерело на інтервалі роботи зворотних діодів. Якщо джерело живлення E являє собою випрямляч (а саме це має місце у зварювальних інверторних джерелах живлення), то для утворення в ньому зворотної провідності, що дає змогу прийняти енергію з інвертора, його шунтують конденсатором C великої ємності, як показано на рис.8.3,а.

Для регулювання вихідної напруги інверторів напруги або змінюють ЕРС напруги живлення E, або використовують так звані внутрішні засоби. З цією метою у схемі на рис.8.3,а зсувають керуючі імпульси на VS3 та VS4 відносно керуючих імпульсів на VS1 та VS2 на кут керування  $\alpha$  (на часових діаграмах рис.8.4 наведені інтервали провідності усіх тиристорів та форма струму і напруги на навантаженні).

На інтервалі  $t_0 < t < t_1$  відкриті тиристори VS1 та VS4, напруга на навантаженні  $u_n = E$ . У момент  $t_1$  тиристор VS1 запирається та подається керуючий імпульс на VS2, в результаті чого струм  $i_n$  замикається у контурі VS4–VD20– $R_n L_n$ , а напруга на навантаженні, яке закорочене тиристором VS4 і діодом VD20,  $u_n = 0$ . У момент  $t_2$  потрапляє відпираючий імпульс на

тиристор VS3, VS4 припиняє роботу і навантаження підключається до джерела живлення:  $u_H = -E$ . Внаслідок індуктивності навантаження деякий час на інтервалі  $t_2 \dots t_3$  струм  $i_H$  тече в попередньому напрямі по контуру  $R_H L_H - VD30 - E - VD20$ , потім після спаду струму до нуля при  $t = t_3$  він змінює свій напрям і тече у контурі  $E - VS3 - R_H L_H - VS2$ . Таким чином, у кривій  $u_H(t)$  з'являється керована пауза.

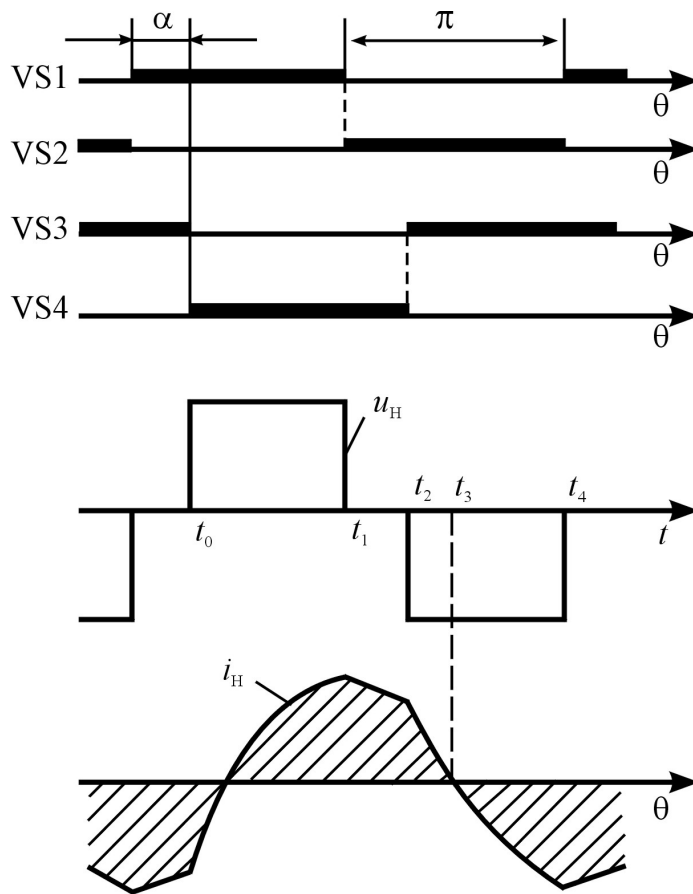
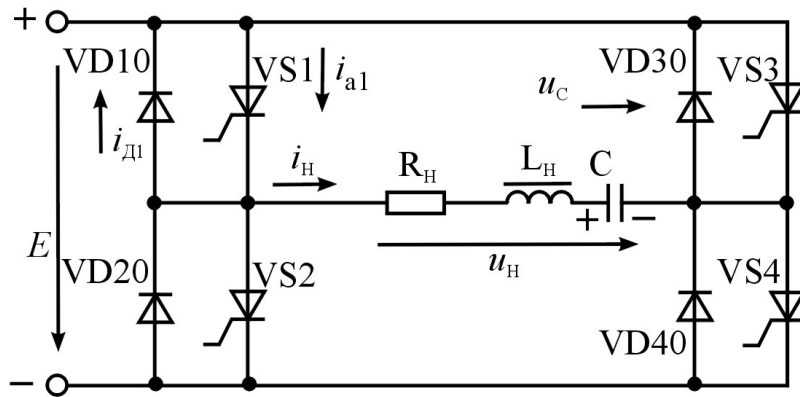


Рис. 8.4. Часові діаграми струму, напруги та інтервалу провідного стану вентилів у схемі на рис.8.3 при регулюванні вихідної напруги

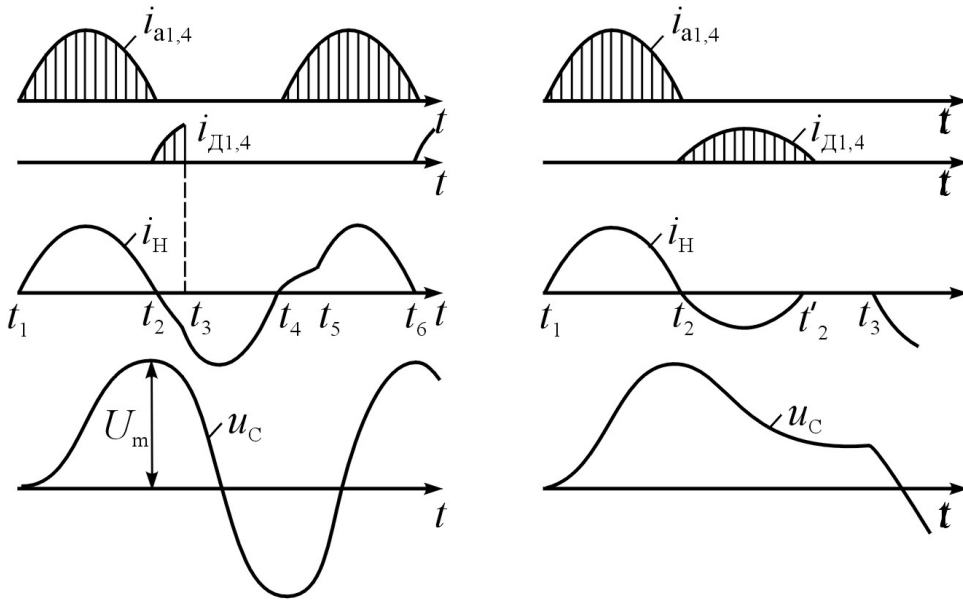
*Резонансні інвертори* використовуються для формування змінної напруги частотою 0,5...10 кГц. Такі інвертори працюють, як правило, на однофазне навантаження. Схему мостового однофазного резонансного інвертора наведено на рис.8.5,а. У коло навантаження  $R_H L_H$  послідовно ввімкнутий конденсатор  $C$ , тому такий інвертор називається послідовним. Коло  $R_H L_H C$  являє собою послідовний коливальний контур з резонансною частотою  $f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L_H C}}$ . Запирання одноопераційних тиристорів у такому



інверторі відбувається при спаданні струму до нуля в коливальному контурі.



*a*



*б*

*в*

Рис. 8.5. Резонансний інвертор зі зворотними діодами (*a*) та часові діаграми струмів і напруги у режимі безперервного (*б*) та перервного (*в*) струмів

У момент  $t_1$  (рис.8.5,*б*) подаються імпульси керування до тиристорів VS1 та VS4, напрямок струму  $i_H$  у коливальному контурі показаний на рисунку. Конденсатор C заряджається до напруги  $U_{\max}$ , полярність якої показано на рис.8.5,*a*. У момент часу  $t_2$  струм  $i_H$  контуру, що змінювався за синусоїдальним законом, спадає до нуля, при цьому VS1 та VS4 запираються. Потім напрям струму  $i_H$  змінюється на протилежний, цей струм починає

текти по контуру  $-E-VD40-R_H L_H C-VD10-+E$ , напруга на конденсаторі зменшується. На інтервалі  $t_2...t_3$  до VS1 та VS4 докладена невелика зворотна напруга, яка дорівнює спаду напруги на діодах VD10 та VD40, що проводять струм. На цьому інтервалі відновлюються запираючі властивості тиристорів VS1 та VS4. Тривалість інтервалу  $t_2...t_3$  має бути не менше часу вимикання тиристорів. Далі, у момент  $t_3$  подаються імпульси керування до тиристорів VS2 та VS3 й струм переходить з діодів на ці тиристори. На інтервалі  $t_3...t_4$  струм  $i_H$  тече по контуру  $+E-VS3-R_H L_H C-VS2- -E$ , напруга на конденсаторі змінює свій знак і досягає максимального значення у момент  $t_4$ , коли струм  $i_H$  зменшується до нуля. На інтервалі  $t_4...t_5$  струм  $i_H$  тече через VD20 та VD30, потім процес повторюється.

Найбільша потужність виділяється в навантаженні при частоті керування інвертора  $f$ , що максимально близька до резонансної частоти контуру  $f_0$ , але завжди повинна виконуватися нерівність  $f_0 > f$ , бо якщо тривалість інтервалів  $t_2...t_3$  та  $t_4...t_5$  буде меншою за мінімальну, необхідну для вимикання вентилів, то запирання тиристорів буде недостатньо надійним. При зменшенні частоти імпульсів керування тиристорів, потужність, яка віддається у навантаження, знижується. При подальшому зменшенні частоти  $f$  інтервали протікання струму через контур чергуються з безструмовими паузами (режим перервного струму). Часові діаграми у цьому режимі наведено на рис.8.5,**в**. На інтервалі  $t_1...t_2$  працюють тиристори VS1 та VS4, напрям струму вказано стрілкою на рис.8.5,**а**, потужність із джерела живлення передається до навантаження. У момент  $t_2$  струм у контурі змінює свій знак і тече через зворотні діоди по контуру  $-E-VD40-R_H L_H C-VD10-+E$ . При цьому навантаження повертає частку енергії, нагромаджені в реактивних елементах, у джерело живлення. Напруга на конденсаторі  $u_C$  зменшується, але через втрати в контурі вона не досягає нульового значення.

У момент  $t_2'$  струм через діоди спадає до нуля. Безструмова пауза триває доти, поки у момент  $t_3$  не будуть подані імпульси керування на силові тиристори VS2 та VS3. Під час безструмової паузи напруга на конден-

саторі незмінна. У момент  $t_3$  розпочинається формування другої половини періоду вихідної частоти інвертора. При такому режимі перервного струму потужність у навантаженні менше, а криві струму й напруги на навантаженні більше відрізняються від синусоїди, ніж у режимі безперервного струму. Тому режим перервного струму використовують рідко. Для того, щоб наблизити криву напруги на навантаженні до синусоїдальної, часто паралельно навантаженню вмикають конденсатор. Такий інвертор називається послідовно-паралельним.

Головним недоліком тиристорних інверторів є порівняно низька частота перетворювання, яка залежить від часу вимикання тиристорів. Сучасні швидкодіючі тиристори з мінімальним часом вимикання 20 мкс дозволяють отримати граничну частоту лише 5 кГц. Інвертування на вищій частоті неможливе через ймовірність виникнення аварійного режиму, який називається перекиданням інвертора (коротке замикання на виході інверторного перетворювача). Робочу частоту тиристорного інвертора можна підвищити, якщо зробити його багатокільцевим. Але цей шлях не можна визнати ефективним, оскільки істотно ускладнюється схема інвертора і відповідно знижується його надійність. Тому на провідних світових фірмах, які випускають зварювальні джерела живлення, віддають перевагу більш швидкодіючим транзисторним інверторам.

Сучасні потужні транзистори в порівнянні з тиристорами мають вищі комутуючі властивості й можуть забезпечити частоту інвертуючої напруги й струму до 100 кГц. У табл.8.1 наведено порівняльну характеристику силових напівпровідникових приладів, які можуть бути використані як ключ і для інверторних джерел живлення.

Найкращі характеристики в цілому мають транзистори IGBT, що випускаються багатьма провідними фірмами світу. Їх широко застосовують в інверторній техніці завдяки легкості керування, здатності стійко працювати з піковими струмовими навантаженнями, широкій області безпечної роботи, стійкості до перенапружень.

**Таблиця 8.1 Основні параметри напівпровідникових приладів**

Параметри	Тиристор	Транзистори		
		Біполярний BJT	Польовий MOSFET	Біполярний з ізолюваним за- твором IGBT
Струм, А	400(4)	600(4)	100(3)	600(4)
Робоча напруга, В	2500(4)	1200(4)	500(3)	1200(4)
Час вимикання, мкс	20(3)	5(4)	0,3(5)	1(5)
Легкість керування	(3)	(4)	(5)	(5)

*Примітка.* У дужках наведені умовні оцінки характеристик за 5-бальною шкалою.

## **8.2. Схеми інверторних перетворювачів зварювальних джерел живлення**

Транзисторні інвертори як сучасні потужні перетворювачі струму в зварювальних джерелах живлення за принципом побудови розподіляються на однокітні та двокітні. В однокітних перетворювачах енергія з мережі постійного струму передається навантаженню протягом одного з двох кітків його роботи. У двокітних схемах ця енергія потрапляє протягом обох кітків роботи перетворювача. У найпростішому вигляді однокітний інвертор являє собою послідовне з'єднання транзистора та навантаження (наприклад, первинна обмотка трансформатора). Транзистор працює у режимі перемикання з коефіцієнтом заповнення  $\gamma$ , який дорівнює відносній тривалості відкритого стану транзистора (звичайно  $\gamma = 0,5$ ). При відкритому транзисторі до навантаження прикладено постійну напругу і в намагнічувальному контурі трансформатора нагромаджується реактивна енергія. Коли транзистор закритий, ця енергія передається навантаженню, формуючи імпульс напруги зворотної полярності. Головним недоліком однокітних інверторів є несиметрична форма вихідної напруги і, як наслідок, підмагнічування трансформатора постійною складовою струму, що призводить до зростання його габаритних розмірів і підвищених втрат потужності в ньому. Тому область застосування однокітних схем обмежена малопотужними джерелами живлення (десятки ват).

У потужних зварювальних джерелах живлення застосовують двотактні схеми інверторів. На рис. 8.6,*a* показано одну з поширених схем силової частини інверторних джерел живлення з двотактним мостовим перетворювачем.

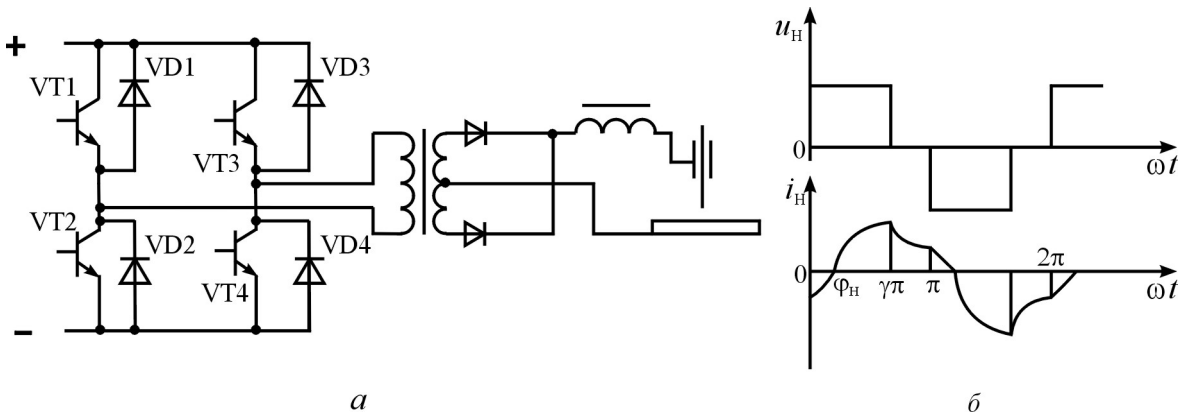


Рис.8.6. Джерело живлення на базі мостового інвертора (*a*) та часові діаграми напруги на виході інвертора і струму навантаження (*б*)

Керування транзисторами VT1...VT4 здійснюється таким чином, що одночасно відкрита одна пара транзисторів, наприклад VT1 та VT4 або VT2 та VT3. При перемиканні цих пар (одна пара закривається, друга – відкривається зі зсувом за фазою на кут  $\gamma\pi$  відносно першої пари – рис.8.6,*б*) відбувається зміна полярності на первинній обмотці трансформатора. В кожній парі транзистори відкриті півперіоду. В результаті вихідна напруга інвертора має вигляд прямокутників з паузою на нульовому рівні тривалістю  $(1-\gamma)\pi$  (див. рис.8.6,*б*).

Якщо в інтервалі  $(0... \gamma\pi)$  відкриті транзистори VT1 та VT4, то на ділянці від 0 до  $\varphi_n$  енергія, нагромаджена в попередньому періоді в намагнічувальному контурі трансформатора, повертається у джерело через діоди VD1, VD4, а на ділянці від  $\varphi_n$  до  $\gamma\pi$  струм  $i_n$  змінює напрям і потрапляє із джерела постійної напруги на навантаження. У момент часу, коли  $\omega_1 = \gamma\pi$ , відбувається вмикання транзисторів VT2, VT3 і утворюється коло, яке накоротко замикає вихідні виводи інвертора, що відповідає нульовому рівню напруги на виході інвертора (див. рис.8.6,*б*). Це коло складається з діода VD3 та транзистора VT1, який ще не закрився. Струм навантаження зменшується тому, що енергія, нагромаджена в індуктивності трансформатора, витрачається на опорі контуру та на навантаження (дугу). У момент часу, коли  $\omega_1 = \pi$ , вмикаються транзистори VT2, VT3 та розпочинається другий півперіод, процеси якого подібні до розглянутих вище і

відрізняються лише тим, що струм  $i_n$  має зворотний знак. За формою струм  $i_n$  більш схожий на синусоїду, ніж напруга, завдяки фільтруючій дії індуктивності трансформатора.

Півмостова схема з ємнісним подільником напруги та двома транзисторами (рис.8.7,*a*) достатньо часто зустрічається в інверторних джерелах живлення. Спільна точка конденсаторів  $C1$  і  $C2$  у цій схемі утворює штучний вивід потенціалу вхідного випрямляча, що живить інвертор. У півперіод, коли відкритий транзистор  $VT1$ , відбувається заряд конденсатора  $C2$  і розряд  $C1$ . У другий півперіод, коли відкритий транзистор  $VT2$ , заряджається  $C1$  і розряджається  $C2$ . Таким чином, за допомогою ключів  $VT1$  та  $VT2$  напруга кожної половини ємнісного подільника  $\left(\frac{U_n}{2}\right)$  докладається поперемінно з полярністю, що чергується, до первинної обмотки силового трансформатора.

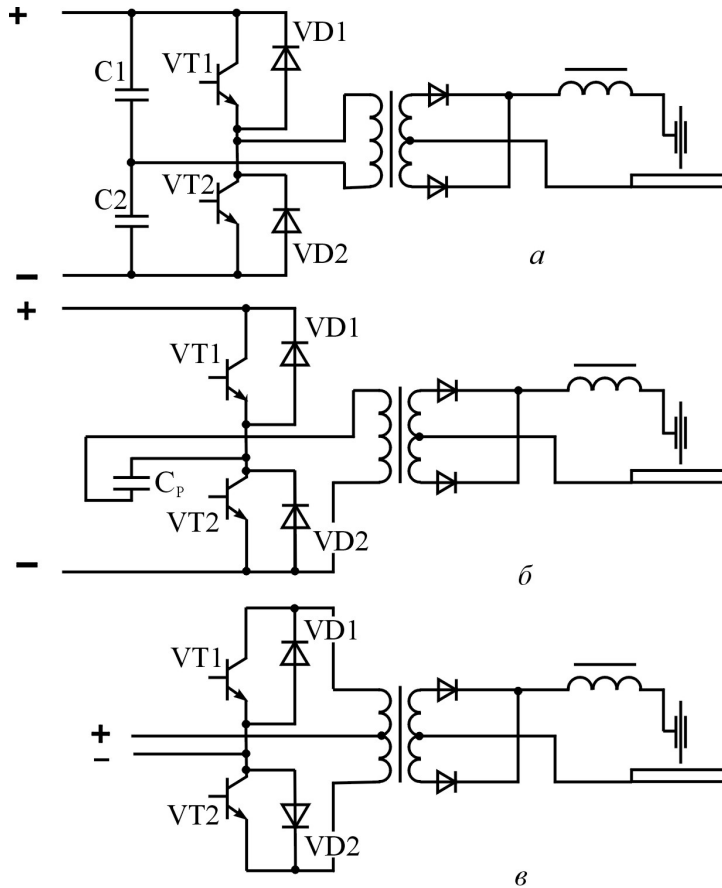


Рис. 8.7. Схеми силового контуру напівмостового інвертора з ємнісним подільником напруги (*a*) напівмостового інвертора з розподільним конденсатором (*б*) та джерела живлення на основі двотактного інвертора з нульовим виводом (*в*)

У другому варіанті півмостової схеми (рис.8.7,*б*) застосований розподільний конденсатор  $C_p$ , який заряджається, коли транзистор  $VT1$

відкритий (VT2 – закритий), і розряджається протягом наступного півперіоду, коли відкритий транзистор VT1 (VT1 – закритий). Завдяки тому, що конденсатор пропускає лише змінну складову струму, до навантаження (первинна обмотка трансформатора) докладається змінна напруга, а на конденсаторі виділяється постійна складова напруги, яка дорівнює  $\frac{U_H}{2}$ . Отже, амплітуда змінної напруги на навантаженні, як і в інших півмостових схемах, буде дорівнювати  $\frac{U_H}{2}$ , а її форма наблизатиметься до прямокутної.

Можливість об'єднання в спільну точку одного з виводів джерела, що живить інвертор, та одного із входних затискачів навантаження належить до особливостей схеми, наведеної на рис.8.7,б. Це дає змогу спростити монтаж пристрою. Таку ж позитивну властивість має й двотактна схема інвертора з нульовим виводом (рис.8.7,в), яка містить два транзистори (VT1 та VT2). У даному випадку колектор кожного транзистора підключений до відповідного виводу первинної обмотки трансформатора, а точка з'єднання емітерів – до негативного виводу випрямляча живлення. При комутації транзисторів VT1 та VT2 по черзі постійна напруга докладається відповідно то до однієї, то до другої половини первинної обмотки трансформатора і утворює в його магнітопроводі змінний магнітний потік. Напруга, що докладається до закритого транзистора в цій схемі, дорівнює подвійній напрузі джерела, яке живить інвертор, а в інших розглянутих схемах – одинарному її значенню.

Колекторний струм транзисторів у мостовій схемі так само, як і в нульовій схемі (рис.8.7,в), дорівнює приведенному значенню струму навантаження. У півмостових схемах значення цього струму вдвічі більше тому, що докладена до навантаження напруга вдвічі менша напруги мережного випрямляча. Нульова схема містить найменшу кількість елементів, але конструкція трансформатора при цьому дещо ускладнюється через необхідність забезпечення якісного магнітного зв'язку між половинами первинної обмотки.

Силові комутуючі транзистори мають бути розраховані на подвійну зворотну напругу та комутаційні перенапруги. Тому кращою в цьому випадку є мостова схема інвертора, яка дістала широке застосування в інверторних зварювальних джерелах живлення.

Сигнали управління транзисторами утворюються за допомогою спеціальних генераторів прямокутних імпульсів, які є самостійними пристроями, що входять до складу блока керування джерела живлення. У деяких джерелах застосовані двотактні інвертори з самозбудженням, у яких сигнали керування виробляються за рахунок позитивного зворотного зв'язку.

### **8.3. Типові зварювальні інверторні джерела живлення**

Інверторні джерела живлення (ІДЖ) відрізняються складністю схем керування, багатьма зворотними зв'язками за вихідними параметрами, наявністю спеціалізованих функціональних блоків, що забезпечують автоматизацію основних та допоміжних процесів, завдяки чому вони широко застосовуються для всіх способів дугового зварювання. Незважаючи на різноманітність електричних схем інверторних джерел, функціональна схема їх у загальному вигляді відповідає наведеній на рис.8.8. Згідно з цією схемою, напруга однофазної або трифазної промислової мережі перетворюється вхідним випрямлячем ВВ з фільтром Ф у постійну напругу. Ця напруга, в свою чергу, перетворюється за допомогою інвертора ІН у змінну напругу підвищеної частоти (до десятків кілогерців), яка далі потрапляє до знижуючого високочастотного трансформатора Тр. Вторинна обмотка трансформатора навантажена діодним випрямлячем ВД, до виходу якого через згладжувальний дросель Др підключені електрод Е та виріб В. Головними елементами схеми є сам інвертор ІН та система керування ним СК. Блок СК формує сигнали для періодичного відкриття та запирання ключів інвертора з заданою частотою. Регулювання вихідної напруги ІДЖ може здійснюватися зміною амплітуди та тривалості імпульсу напруги, яка інвертується, або зміною її частоти. Для формування потрібного нахилу зовнішніх вольт-амперних характеристик вводяться зворотні зв'язки за



струмом ЗЗС та за напругою дуги ЗЗН. Природні зовнішні характеристики інверторних джерел постійного струму – спадні через високий індуктивний опір трансформатора, який працює на високій частоті. Регулювання нахилу вольт-амперних характеристик у робочому діапазоні здійснюється за рахунок негативного ЗЗС, що забезпечує при зростанні зварювального струму зниження частоти інвертування та тим самим зменшення напруги на виході джерела.

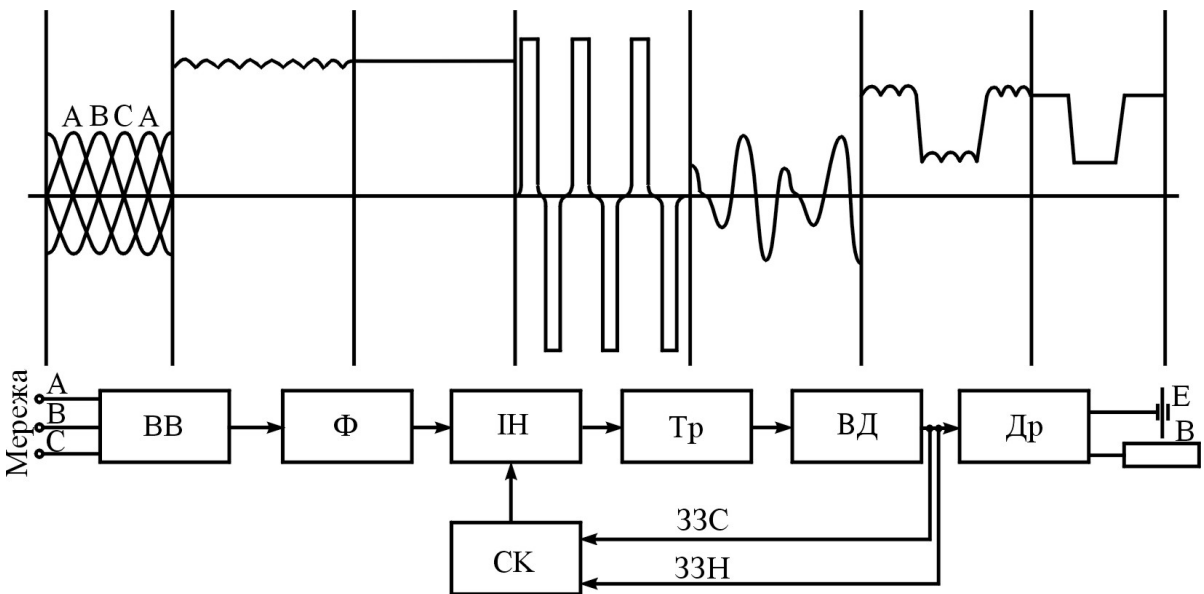


Рис. 8.8. Функціональна схема зварювального інверторного джерела живлення

Регулювання та стабілізація вихідної напруги в режимі роботи на жорстких (полого спадних) характеристиках здійснюється сигналом ЗЗН, який формується шляхом порівняння вихідної напруги з напругою завдання, тобто за принципом, подібним до принципу формування вихідної напруги тиристорних джерел живлення.

Живлення трансформатора Тр напругою високої частоти дає змогу істотно зменшити масу та об'єм використання активних матеріалів. Наприклад, при потужності трансформатора 20 кВ·А, при збільшенні частоти напруги з 50 Гц до 50 кГц об'єм магнітопроводу зменшується в 12 разів, а його маса – в 17 разів. При цьому відповідно зменшуються витрати обмоткового дроту та втрати потужності (табл.8.2). Наслідком цього є зростання ККД джерела живлення.

**Таблиця 8.2. Порівняльні характеристики трансформаторів при різних частотах напруги**

Параметр	Частота напруги, Гц	
	50	50·10 <sup>3</sup>
Маса, кг	120	7
Об'єм осердя, дм <sup>3</sup>	24	2
Втрати потужності, Вт	2500	100
Витрати обмоткового дроту, м:		
первинна обмотка	550	3,5
вторинна обмотка	21	0,8

Сучасні джерела живлення для дугового зварювання з транзисторними інверторами забезпечили можливість переходу з аналогового (у тиристорних схемах) до цифрового керування за допомогою мікропроцесорів. У цьому випадку розв'язується багато технологічних завдань шляхом керування формою струму в динаміці з високою швидкістю (швидкість спрацювання до 1000 А/мс) та отримання різного роду струмів (постійний, імпульсний середньої та високої частоти, змінно-постійний) для багатьох способів зварювання. Для порівняння: у звичайному тиристорному випрямлячі, що живиться від трифазної мережі частотою 50 Гц, мінімальний інтервал часу, за який можна внести одиничну зміну в динамічні параметри, складає 1/6 періоду напруги мережі або 3,3 мс. В інверторному джерелі живлення з робочою частотою 50 кГц за цей проміжок часу такі зміни можна виконати приблизно 160 разів. Наприклад, при зварюванні в середовищі CO<sub>2</sub> з короткими замиканнями дугового проміжку можна керувати силою струму в динаміці за заданими алгоритмами, регулюючи в необхідному напрямі дію електродинамічних сил при утворенні та руйнуванні рідкої перемички металу між зварювальною ванною та електродом і завдяки цьому знижувати розбризкування. Значно розширюються можливості механізованого зварювання у середовищі захисних активних (МАГ) та інертних (МІГ) газів з використанням імпульсних джерел на основі інвертора. За допомогою мікропроцесорів можна з великою точністю та швидкістю керувати всіма параметрами зварювального процесу – від швидкості подавання дроту та витрат захисного газу до оптимальних співвідношень тривалості й частоти імпульсів зварювального струму, а також задавати ці параметри.

Останнім досягненням у світовій зварювальній практиці стали системи цифрового керування зварювальними процесами з використанням алгоритмів, що ґрунтуються на нечіткій логіці (фаззі-керування). Алгоритм фаззі-керування передбачає використання великого обсягу інформації, що змінюється, щодо зварювальної дуги та параметрів усього технологічного процесу. Для реалізації цих алгоритмів також необхідна висока швидкодія виконавчих пристроїв, у тому числі й джерел живлення зварювальної дуги. Таким вимогам найбільше відповідають джерела живлення з транзисторними інверторними перетворювачами.

Коротко розглянемо деякі типи інверторних джерел живлення для дугового зварювання.

Джерела живлення LHG (POWCON) для ручного дугового зварювання плавким та неплавким електродом розроблені фірмою ESAB та використовуються в будівництві, суднобудуванні та інших галузях промисловості. Джерело (рис.8.9) розраховано на струми 250 А (або 400 А) і містить випрямляч В, вхідний фільтр (R1, L1 та L2) та конденсатори C1 і C2 ємністю 1000 мкФ для згладжування пульсацій вхідної напруги.

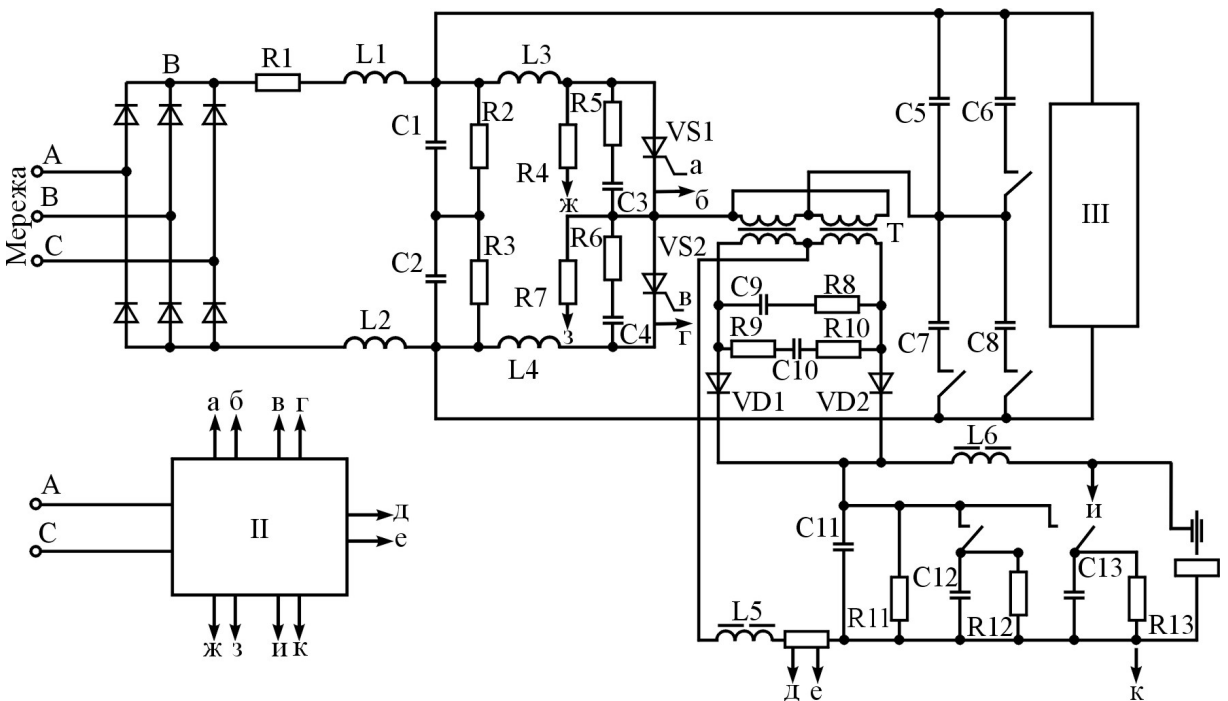


Рис. 8.9. Спрощена принципова електрична схема джерела LHG (POWCON)

Як ланка високої частоти використовується півмостовий послідовний інвертор, що складається з комутуючих конденсаторів C5...C8, тиристорів VS1, VS2 та силового трансформатора Т.

Для підвищення комутаційної стійкості тиристорів VS1 та VS2, а також запобігання виходу їх з ладу в момент комутації через велику швидкість наростання прямої напруги застосовані дроселі L3 і L4 та демпфірувальні ланцюги з резисторів R5, R6 і конденсаторів C3, C4. Силовий трансформатор Т стрижневого типу має осердя, виконане з холоднокатаної сталі та мідної обмотки, що намотана секційно. На виході випрямного мосту (діоди VD1 і VD2) увімкнутий фільтр (дроселі L5 і L6 та конденсатори C11, C12 і C13). Схема джерела містить також блок III скидання надлишку енергії, що нагромаджується в комутуючих конденсаторах C5...C8 під час виникнення резонансних процесів в інверторі, які з'являються в режимах холостого ходу та короткого замикання.

Схема керування II забезпечує роботу інвертора на частотах до 2 кГц, зниження частоти до 1 Гц у режимі холостого ходу та деяке зменшення частоти при короткому замиканні. Для підтримування постійної потужності, що підводиться до дуги, служать зворотні зв'язки за струмом та напругою. Сигнали потрапляють до схеми керування з шунта (д–е) та з дугового проміжку (и–к). Підвищення надійності роботи інвертора в пускових і робочих режимах та досягнення необхідної зовнішньої характеристики забезпечується автоматичною зміною частоти.

Коли джерело працює в режимі холостого ходу, до тиристорів VS1 і VS2 від схеми керування II потрапляють пускові імпульси з частотою 1 Гц, при цьому схема керування разом з блоком III обмежує зарядження робочих конденсаторів C5...C8 до напруги не більше 750 В. Після збудження дуги частота інвертування підвищується до 1...2 кГц залежно від режиму зварювання. Якщо тривалість короткого замикання перевищує 1 с, частота інвертора автоматично знижується. У разі обриву дуги частота також знижується до 1 Гц. Під час зміни довжини дугового проміжку схема керування забезпечує постійність потужності, що підводиться до дуги. Завдяки невеликим коливанням потужності знижується розбризкування металу, підвищується продуктивність зварювання.

Зварювальний струм джерела LHG регулюється ємністю конденсаторів C5...C8, зміною величини постійної складової випрямленого струму за допомогою конденсаторів C11...C13, а також плавною зміною частоти інвертування.

Джерело живлення для ручного дугового зварювання ВД-161. Принцип дії джерела (рис.8.10) полягає в наступному. При вмиканні автомата ВА напруга мережі потрапляє до випрямляча 1, вентилятора М та службового джерела живлення 2, що призначене для живлення стабілізованою напругою блоків електронного регулятора 3.

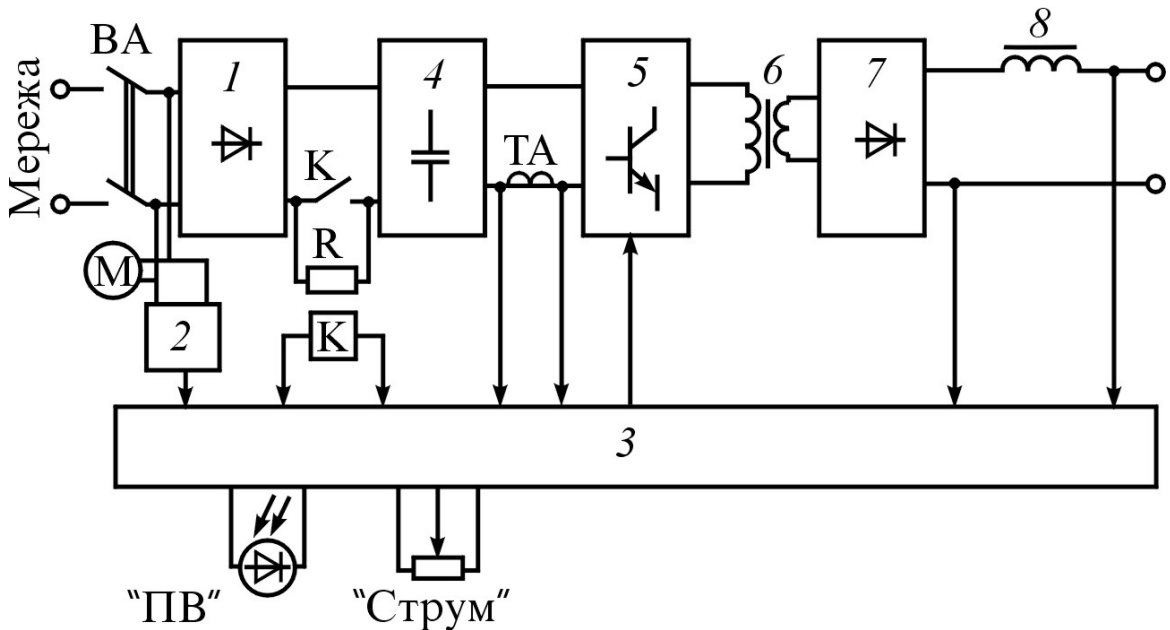


Рис. 8.10. Блок-схема джерела живлення ВД-161

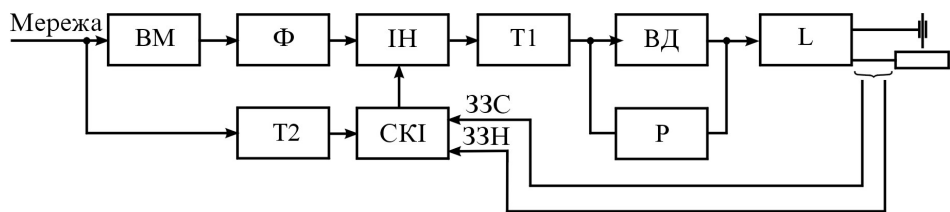
Одночасно розпочинається плавне зарядження батареї конденсаторів 4 для живлення транзисторного інвертора 5, який виконаний за однофазною мостовою схемою зі зворотним вмиканням другого випрямляча і зібраного на двох ключах.

Електронний регулятор з моменту появи службового живлення витримує технічну паузу, достатню для повного заряду батареї конденсаторів. Інвертор при цьому не працює. Після закінчення паузи регулятор вмикає реле К і запускає інвертор. Робоча частота інвертора визначається електронним блоком керування. З виходу інвертора прямокутні імпульси частотою більше 15 кГц потрапляють через силовий трансформатор 6 до вторинного випрямляча 7. Випрямлені однополярні імпульси через дросель 8 подаються до вихідних клем джерела живлення.

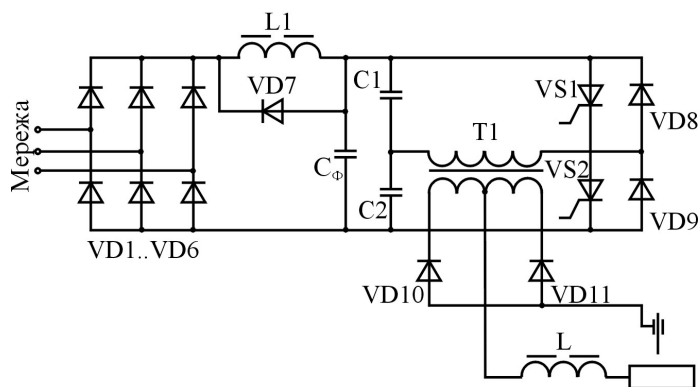
У режимі холостого ходу вихідна напруга джерела обмежується регулятором. Коли з'являється навантаження в зварювальному колі, регулятор пропорційно змінює рівень обмеження та забезпечує відповідність струму навантаження заданому регулятором "Струм" за допомогою сигналу зворотного зв'язку з трансформатора струму ТА. Сукупністю параметрів електронного регулятора та силової частини забезпечуються стабільне горіння дуги та добре формування шва.

*Джерело живлення ПИРС-160.* Джерело призначене для ручного дугового зварювання покритими електродами (ММА), неплавким електродом (ТІГ) і механізованого зварювання в середовищі захисних газів (МАГ).

Функціональна схема джерела (рис.8.11) складається з трифазного мостового випрямляча напруги мережі ВМ, з LC-фільтром  $\Phi$ , напруга з якого потрапляє до півмостового послідовного резонансного інвертора ІН з діодами зворотного струму, силового трансформатора Т1, вихідного випрямляча ВД з згладжувальним дроселем L, джерела напруги холостого ходу Р та системи керування інвертором СКІ, що живиться від мережі через трансформатор Т2. Фільтр  $\Phi$  згладжує пульсації напруги на виході випрямляча ВМ, обмежує кидок струму заряду згладжувального конденсатора  $C_{\phi}$  (рис.8.11, б) та зменшує вплив інвертора на мережу живлення.



а



б

Рис. 8.11. Функціональна блок-схема джерела живлення типу ПИРС-160 (а) та принципова електрична схема його силової частини (б)

З метою підвищення надійності роботи та ККД джерела в його схемі передбачено застосування демпфуючих захисних RLC-кіл, що захищають тиристри та діоди від неприпустимих швидкостей наростання напруги й струму.

Система керування інвертором містить вузол синхронізації, фазозсувний пристрій та вихідний вузол. Вузол синхронізації забезпечує синхронізацію роботи блоків системи керування з моментами природної ко-

мутації струму з тиристорів на діоди. Фазозсувний пристрій побудований за схемою вертикального фазового зсуву, подібно до розглянутого в гл.4. Вихідний вузол є зв'язною ланкою між системою керування та силовою частиною джерела живлення.

Одним з основних блоків системи керування є регулятор, що складається з джерела завдання необхідного значення величини, що регулюється датчиком сигналу величини елемента порівняння, та регулюючого підсилювача. Підсилювач визначає частоту керуючих імпульсів інвертора залежно від інформації, яка потрапляє до входу підсилювача. Сигнал керування з виходу підсилювача впливає на фазозсувний пристрій так, щоб усунути відхилення значень величини, що регулюється. При зварюванні покритим та неплавким електродом до входу регулюючого підсилювача подається сигнал, пропорційний зварювальному струму (зворотний зв'язок за струмом – ЗЗС), а при механізованому зварюванні в середовищі захисних газів – сигнал, пропорційний напрузі в дузі (зворотний зв'язок за напругою – ЗЗН).

З великої кількості розроблених останнім часом інверторних джерел живлення для дугового зварювання можна відзначити джерела фірм "Fronius", "Messer Griesheim", "ESAB", "KEMPP".

*TRANSPOKET 1400 ("Fronius")* – переносний апарат для ручного дугового зварювання (ММА, ТП), забезпечує за допомогою системи контролю дуги стабільне високоякісне зварювання, запобігає прилипанню електрода. При зварюванні покритим електродом з крупнокраплинним перенесенням металу через дугу в разі короткого замикання дугового проміжку сила зварювального струму автоматично підвищується, що сприяє швидкому встановленню заданого режиму зварювання. Джерело має незначну масу (4,2 кг) і габарити (312x110x200 мм).

*TRANSPOKET 330 ("Fronius")* – апарат для виробництва, монтажу трубопроводів та промислових установок, а також суднобудування. Забезпечує зварювання змінним та постійним струмом способами ММА та ТП. Система електронного керування дає змогу отримати стабільну силу зварювального струму незалежно від коливання напруги мережі, мале розбрикування металу при зварюванні. Завдяки функції "гарячий старт" запалювання дуги відбувається швидко.

*TRFNSSYNERGIC 3300 ("Fronius")* – повністю цифрове інверторне джерело живлення для механізованого зварювання в середовищі інертного

та активного газу (MIG/MAГ), розроблено для використання в автомобільній та суміжних галузях промисловості, в апаратобудуванні, хімічному машинобудуванні, на судноверфях та вагонобудівних підприємствах. Джерело обладнане системою програмного вибору зварювальних режимів, завдяки чому придатне для роботизованого зварювання.

*TRANSSYNERGIC 4000 ("Fronius")* – пересувне повністю цифрове інверторне джерело живлення для механізованого зварювання в середовищі захисних газів (MIG/MAГ). Система керування джерела забезпечує роботу в синергетичному (однаковому з механізмом подавання електродного дроту автомату) режимі. Наявність програм роботи дає змогу виконувати зварювання суцільним та порошковим дротом з плавним наростанням та зниженням струму відповідно на початку та в кінці шва. Джерело, крім того, обладнане дистанційним регулятором та цифровим дисплеєм, на якому реєструються наступні параметри: зварювальний струм, напруга в дугі, довжина дуги, швидкість подавання електродного дроту, товщина матеріалу, що зварюється, та інші.

*TRANSPULSSYNERGIC 2700 ("Fronius")* – переносне імпульсне джерело живлення для механізованого зварювання (MIG/MAГ) з вбудованим блоком подавання електродного дроту. Апарат використовується на будівельних майданчиках, в ремонтних майстернях, на судноверфях та в інших умовах, коли необхідна велика мобільність зварювального поста. Джерело придатне для зварювання не тільки сталей, а й для MIG-паяння оцинкованих листів та зварювання алюмінію і його сплавів. Система керування та інтерфейс мікропроцесора забезпечують виконання таких самих функцій, як і в джерелі живлення *TRANSSYNERGIC 4000*.

*TIME SYNERGIC ("Fronius")* – джерело живлення для механізованого зварювання сталей в середовищі однокомпонентних та багатокомпонентних захисних газів. За рахунок електронного регулювання, незалежно від коливання напруги мережі живлення, забезпечуються стабільність зварювального струму та точний відрив краплі металу від кінця електрода. Система керування дає змогу виконувати зварювання за програмою або без програми в дво- або чотиритактовому режимах з керуванням по трьох параметрах: подача захисного газу, зварювального дроту та струму зварювання. При двотактовому режимі має місце наступна послідовність робіт (рис.8.12,*a*).



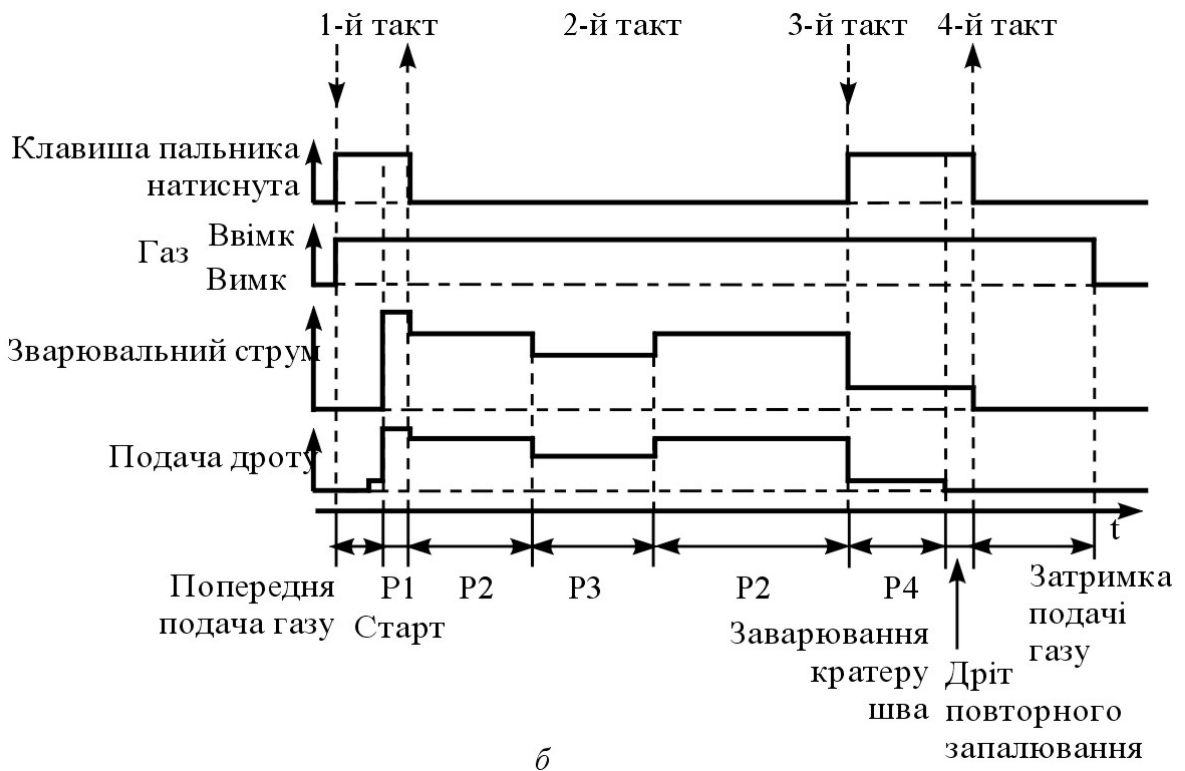
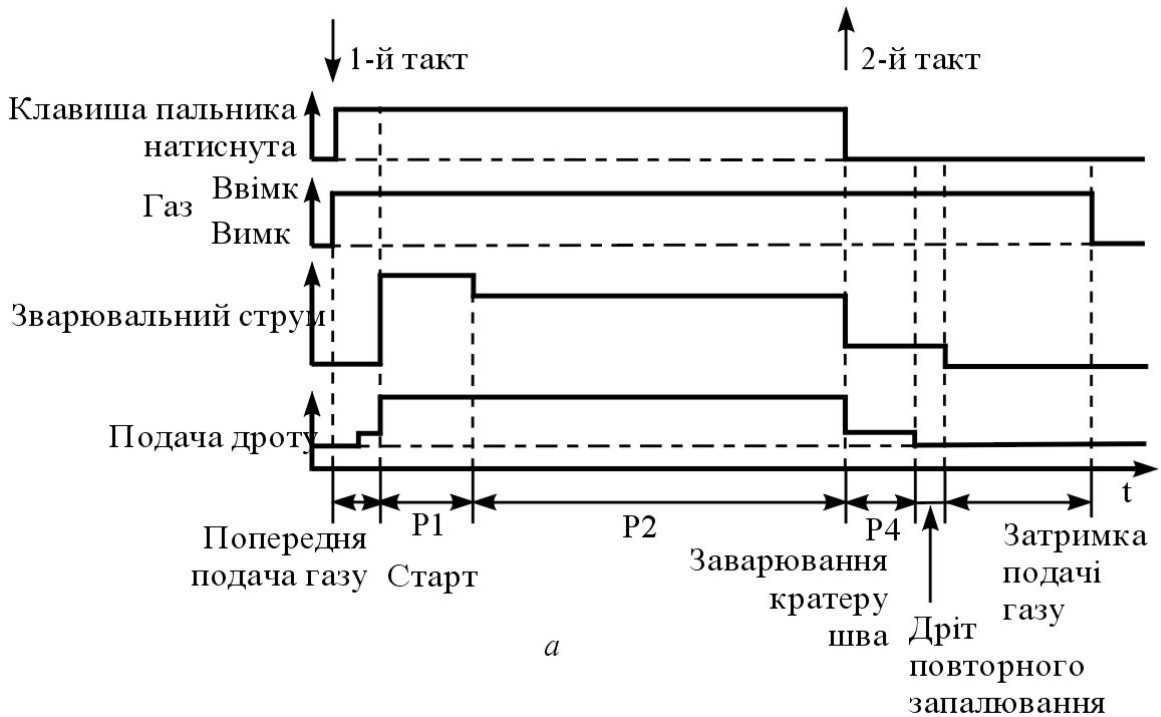


Рис. 8.12. Часові діаграми системи керування при роботі у двотактному (а) та чотиритактному (б) режимах

1-й такт: бере участь клавіша зварювального пальника (клавіша натиснута); витікає захисний газ; двигун приводу подачі дроту починає обертатися з повзучої швидкості, при цьому кінець електродного дроту

повільно торкається поверхні виробу, завдяки чому дуга стабільно збуджується. Відбувається старт зварювального апарата. Після закінчення встановленого часу старту відбувається перехід до режиму зварювання.

2-й такт: клавіша пальника віджата. Відбувається перехід від режиму зварювання до режиму заварювання кратера шва та вимикання струму.

При чотиритактовому режимі роботи виконуються в такій послідовності (рис.8.12,б). 1-й такт: бере участь клавіша пальника (клавіша натиснута). Двигун приводу подавання дроту починає обертатися з повзучої швидкості. Подається первинний зварювальний струм. 2-й такт: клавіша пальника віджата. Легким натисканням на клавішу можна змінити швидкість подавання дроту (відповідно до сили струму). При черговому легкому натисканні на клавішу можна знову перейти до попередніх параметрів режиму. При цьому зварювальний струм спочатку зростає, а потім спадає до первинного значення. 3-й такт: бере участь та постійно утримується клавіша пальника. Відбувається перехід від режиму зварювання до режиму заварювання кратера шва заданої тривалості. 4-й такт: клавіша пальника віджата. При віджиманні кнопки дуга відмикається.

*Inverter STIK 150*, *Inverter STIK 350* ("Messer Griesheim") призначені для ручного дугового зварювання покритими електродами (ММА) і виконані у вигляді переносних апаратів. Електрична схема цих джерел живлення забезпечує стабільне збудження дуги завдяки автоматичній функції "гарячого старту" (Hotstart) та швидке реагування на робочі перевантаження за струмом у перехідних режимах. Крім того, наявність спеціалізованого блоку Arcforcing дає змогу змінювати нахил вольт-амперних характеристик у діапазоні струмів короткого замикання, що сприяє більш ефективному використанню технологічних властивостей електрода. Безступеневе регулювання зварювального струму, можливість дистанційного керування режимом зварювання створює умови для ефективного використання цих джерел живлення в монтажних умовах.

*Inverter TIG 250 DC*, *Inverter TIG 450DC*, *Inverter TIG 250DC/AC*, *Inverter TIG 450 DC/AC* ("Messer Griesheim") – установки для зварювання постійним або постійним та змінним струмом, які забезпечують добрі характеристики запалювання дуги при використанні чисто вольфрамового електрода за рахунок безконтактного збудження. Завдяки можливості регулювання пер-

шої півхвилі запалювання (на установках АС – змінного струму) електрод попередньо нагрівається, і тому відбувається стабільне запалювання навіть тих електродів, які запалюються важко.

Установки дають змогу зварникові перед зварюванням у безструмовому режимі перевірити повний режим роботи з встановленими параметрами. При цьому імітується зварювальний струм і всі параметри можуть бути вказані на цифрових амперметрах та при необхідності підрегульовані. Частота змінного струму безступенево регулюється в діапазоні 50...200 Гц. Особливо тонкі листи можуть бути зварені малим струмом з високою частотою.

Робота установок може здійснюватися в дво- або чотиритактовому режимі без нахилу або з нахилом характеристик зміни струму зварювання (UP – Slope/DOWN – Slope).

На панелі обслуговування установок позначені всі функціональні можливості джерел живлення (рис.8.13).

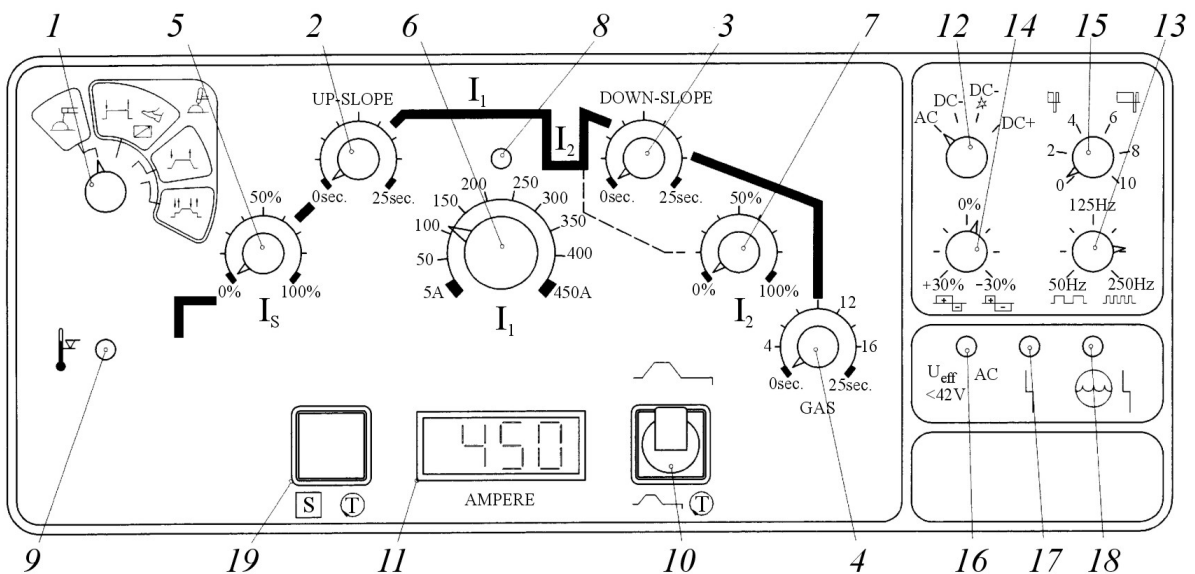


Рис. 8.13. Панель обслуговування установки inverter TIG

У наведеній схемі панелі установки позначені: 1 – перемикач вибору програм; 2 – UP–Slope (зростання струму); 3 – DOWN–Slope (спадання струму); 4 – регулятор затримки газу; 5 – регулятор пошукової дуги (за допомогою початкового струму дуги зварник легко знаходить початок шва); 6, 7 – регулятори струму дуги при різних режимах зварювання; 8 – контро-

льна лампочка "іде процес зварювання"; 9 – контрольна лампочка перегріву; 10 – попередня установка струму (безструмовий тест); 11 – цифровий амперметр; 12 – перемикач вибору струму – електронний перемикач полярності (за допомогою цього перемикача забезпечується трудомістке перемикання кабелів); 13 – регулятор частоти струму; 14 – регулятор балансу змінного струму (за допомогою цієї функції можлива оптимізація очищувальної дії дуги та глибини провару, наприклад, при зварюванні алюмінієвих сплавів); 15 – регулятор тривалості півхвилі запалювання; 16 – показчик перевищення напруги; 17 – контрольна лампочка нестачі охолоджувальної води.

Інтегрально-інверторні установки для зварювання способом МІГ/МАГ об'єднують у своїх технічних рішеннях найсучаснішу мікропроцесорну та напівпровідникову технологію з простою, розрахованою на тривалий термін роботи конструкцією. Керування механізмом подавання електродного дроту, дистанційне керування джерелом живлення та інші периферійні прилади можуть довільно комбінуватися між собою за допомогою цифрового інтерфейсу. Такі установки забезпечують також можливість друкування всіх робочих параметрів та з'єднання декількох установок у мережу через персональний комп'ютер.

За допомогою сучасних мікропроцесорів система інтегрального процесу через математичну модель (алгоритм) розраховує параметри оптимального зварювального процесу. Незалежно від умов зварювання (матеріал, діаметр дроту, захисний газ, швидкість подавання дроту, постійне або імпульсне подавання струму) система інтегрального процесу визначає найкращі необхідні параметри режиму та автоматично виставляє їх на установці. В результаті цього забезпечуються оптимальні характеристики збудження дугового розряду, підтримується коротка, стабільна дуга, здійснюється чітке, без короткого замикання, перенесення краплин електродного металу, виконується автоматичний підбір амплітуди, тривалості та частоти імпульсів струму. Таким чином досягається дуже висока якість зварювального шва в поєднанні з високою продуктивністю зварювального процесу.

До типу інтегрально-інверторних установок належать, наприклад, установки *integral inverter MIG 250 compact*, *integral inverter MIG 350 puls* ("Messer Griesheim").

Кероване мікропроцесором інверторне джерело живлення *Aristo 2000* ("ESAB") дає змогу виконувати зварювання способами MMA, ТІГ, МІГ/МАГ та легко переключатися з одного способу до іншого, що забезпечує його високу технологічну гнучкість. Імпульсний режим дає змогу зварювати такі важко зварювальні матеріали, як мідь та алюміній.

Параметри режиму зварювання записуються в пам'ять мікропроцесорної системи керування та можуть бути легко викликані, що скорочує час підготовки до зварювання і забезпечує високу якість роботи. Пам'ять зберігає 146 стандартних програм зварювання та дає змогу ввести ще 100 власних програм.

Джерело живлення *Aristo 2000* легко компонується з будь-яким додатковим обладнанням, таким, як зварювальні пальники, механізми подавання дроту, в тому числі проміжні та здвоєні, подовжувальні кабелі тощо, це забезпечує його ефективне використання не тільки в стаціонарних, а й у монтажних умовах.

*Інверторні джерела живлення PS 5000 та PSS 5000* ("Ketppi") є відповідно джерелами постійного та постійного/змінного струмів. Джерело *PS 5000* придатне для зварювання способами MMA, ТІГ та МІГ. Для зварювання способом ТІГ потребується додатковий блок збудження імпульсів, а для зварювання способом МІГ – блок подавання електродного дроту. Один або декілька додаткових блоків, з'єднаних з джерелом живлення, утворюють мультисистему, яка може бути застосована в комплексі з різними зварювальними автоматами або роботами. Мультисистема складається з таких компонентів: блока збудження імпульсів, блока подавання дроту, пристрою водяного охолодження, пристрою дистанційного керування, блока транспортування та допоміжних блоків контролю та вимірювання параметрів режиму. В імпульсному регуляторі джерела попередньо запрограмовані параметри режиму для дев'яти різних комбінацій матеріалу та діаметра зварювального дроту, які забезпечують для кожного значення швидкості подавання дроту стабільне перенесення електродного металу через дуговий проміжок без коротких замикань.

На відміну від джерела *PS 5000* джерело живлення *PSS 5000* автоматично вибирає форму зовнішньої вольт-амперної характеристики відповідно до способу зварювання: при зварюванні способами ММА та ТІГ – спадну "штикову", при зварюванні способами МІГ/МАГ – жорстку. Також залежно від матеріалу, що зварюється, автоматично вибирається вид струму при натисканні вмикача пальника. Але потрібне попереднє встановлення виду струму на передній панелі джерела (DC+, DC– або AC). Перехід з одного способу зварювання до іншого здійснюється простою зміною пальника.

При зварюванні алюмінію та його сплавів способом ТІГ джерело формує прямокутну форму хвилі зварювального струму, завдяки чому забезпечуються відмінні технологічні властивості в усьому діапазоні струмів. Автоматичне зниження частоти зварювального струму (до 50...100 Гц) при зниженні величини струму сприяє стабільності горіння дуги та доброму очищувальному ефекту проти окислення. Оптимізація очищувального ефекту, провару та форми валика шва досягається регулюванням балансу змінного зварювального струму в позитивний та негативний півперіоди. Максимальний ефект очищення має місце при балансі +70 % (електрод позитивний), а максимальний ефект проплавлення при балансі +30 % (електрод позитивний).

При зварюванні способом ТІГ AC автоматика збудження завжди збуджує дугу на постійному струмі, а після збудження автоматично перемикає на змінний струм.

Одне джерело *PSS 5000* забезпечує виконання зварювання, для чого звичайно застосовують 4 звичайних джерела живлення.

Технічні характеристики розглянутих та деяких подібних інверторних джерел живлення наведені в дод.2 (див. табл.2.10).

#### **8.4. Інверторні джерела живлення на основі акумуляторів**

Для роботи у польових умовах, на транспорті, у монтажних умовах будівельного виробництва єдиним видом зварювальних джерел сьогодні залишаються зварювальні агрегати (машинні перетворювачі), які характеризуються великими габаритами і масою. Перспективним напрямком роз-

витку джерел живлення для вказаних умов є акумуляторні зварювальні агрегати (АЗА), що вже використовуються для живлення різноманітних електроустановок (у тому числі і зварювальних) на космічних орбітальних станціях.

Внаслідок того, що акумуляторні батареї є джерелом постійного струму, на їх базі можна створювати інверторні зварювальні джерела живлення з широким діапазоном перетворення частоти напруги – від сотень герців до десятків кілогерців. Такі джерела живлення можуть використовуватися для зварювання покритими електродами, неплавким електродом та механізованого зварювання в середовищі захисних газів.

Узагальнену структурну схему АЗА, розробленого в ІЕЗ імені Є.О. Патона, наведено на рис.8.14.

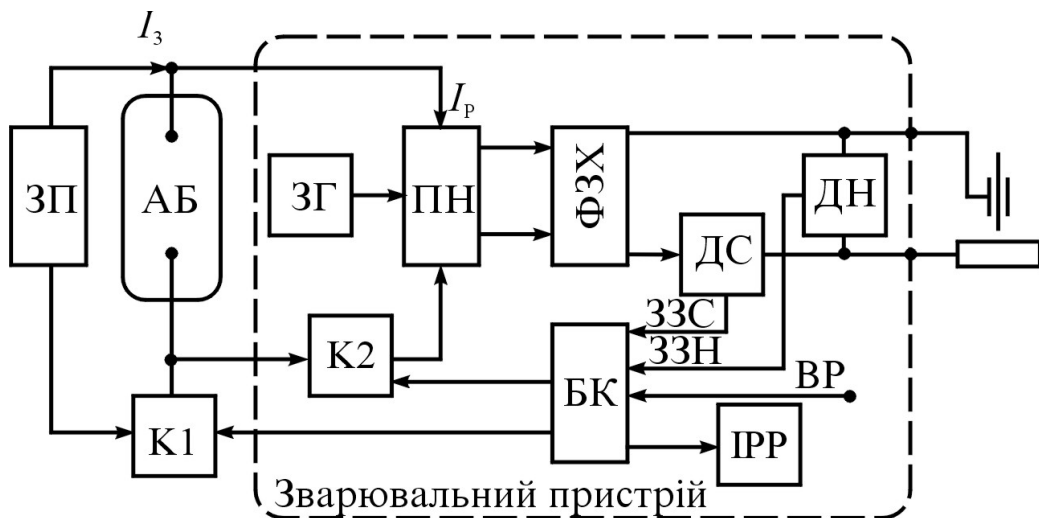


Рис. 8.14. Узагальнена структурна схема акумуляторного зварювального апарату

У складі АЗА виділяються три основних вузли: зарядний пристрій (ЗП), акумуляторна батарея (АБ) та безпосередньо зварювальний пристрій, який підключається до клем АБ за допомогою комутатора К2. Комутатор К1 використовується у тих випадках, коли виникає необхідність у процесі зварювання відмикати ЗП (наприклад, коли у якості зарядного пристрою використовується надпровідний генератор, який не може працювати при великих струмах, що виникають під час короткого замикання дугового проміжку).

Нагромаджувачем електричної енергії є свинцево-кислотна акумуляторна батарея, що забезпечує напругу до 80 В та розрядний струм силою 300...3000 А; номінальна електрична ємність батареї складає 50...800 А·год.

До складу зварювального пристрою входять перетворювач напруги (ПН), частота роботи якого визначається генератором завдання (ЗГ). До виходу ПН підключена схема формування зовнішньої характеристики (ФЗХ), режими роботи якої задаються блоком керування (БК). Схема ФЗХ призначена для забезпечення крутоспадної або жорсткої характеристики залежно від способу зварювання. Датчики зворотного зв'язку за струмом (ДС) та напругою (ДН) використовуються для формування відповідних сигналів (ЗЗС або ЗЗН) при роботі джерела на спадних або жорстких зовнішніх характеристиках. Вибір необхідного режиму роботи задається з пульта командою "Вибір режиму" (ВР) та висвітлюється на індикаторі (ІРР). У джерелі передбачений автоматичний контроль рівня напруги на клеммах АБ. При досягненні певного припустимого значення  $U_{AB} \approx U_{пр}$  виробляється сигнал, який за допомогою комутатора К2 відключає зварювальний пристрій від АБ.

За даною схемою розроблене дослідне джерело живлення АСА-24 на напругу 24 В, призначене для ручного зварювання покритими електродами та механізованого зварювання у середовищі активних газів. В основу структурної будови джерела покладений метод вольтодобавки з додатковим генератором для стабілізації горіння дуги. Робоча частота перетворювача напруги становить 400 Гц, що значно спрощує вибір елементів комутації та випрямлення. Номінальний струм джерела – 100 А, межі його регулювання від 30 до 100 А. В умовах надзвичайних ситуацій для виконання ремонтних робіт може використовуватися зварювальний апарат ранцевого типу (рис.8.15). Силовий блок апарата являє собою інверторний перетворювач, частота комутації якого становить понад 50 кГц. До його складу входять: транзисторний перетворювач (ТРП), виконаний на біполярних транзисторах, блок керування та діагностики (БКД), високочастотний трансформатор (ВТ) і випрямляч VD1, VD2. Контактір К призначений для виключення пристрою при розряді АБ нижче припустимого рівня.



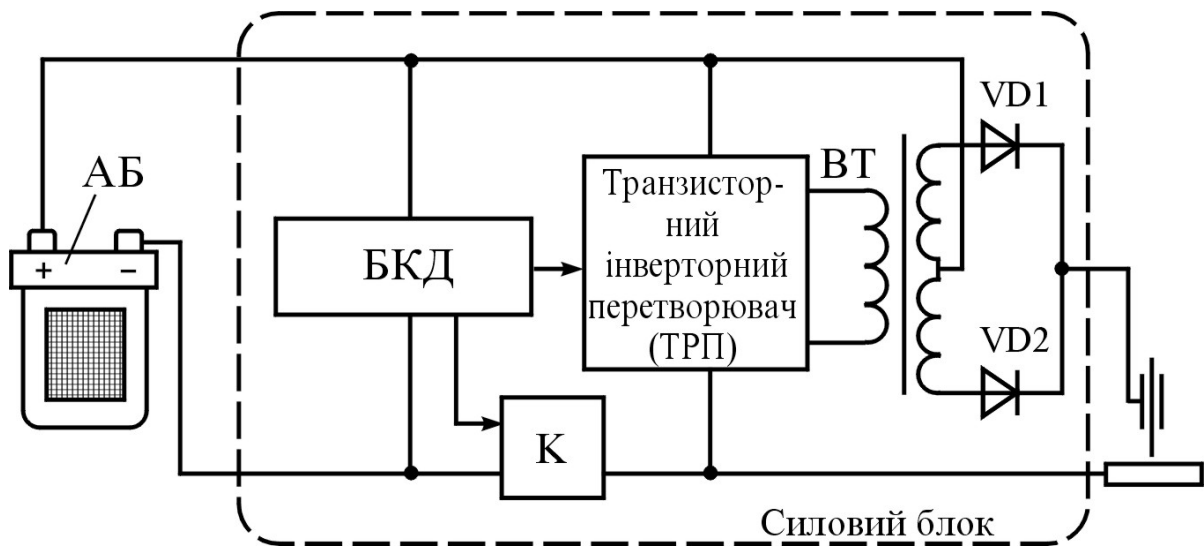


Рис. 8.15. Структурна схема зварювального апарату ранцевого типу

Джерело живлення призначене для короткочасного використання у важкодоступних місцях, куди доставка традиційного зварювального обладнання неможлива. Через те, що система електропостачання апарата є низьковольтною ( $U_{\text{ж}} \leq 24 \text{ В}$ ), його можна використовувати в умовах підвищених вимог до електробезпеки.

### Контрольні питання

1. Які параметри характеризують інверторні перетворювачі?
2. У чому полягає різниця між роботою інвертора струму та інвертора напруги?
3. Які схемні рішення інверторів застосовуються в зварювальних джерелах живлення?
4. З яких функціональних блоків складається інверторне зварювальне джерело живлення?
5. Які особливості структурної схеми мають інверторні джерела живлення на основі акумуляторів?

### БАГАТОПОСТОВІ СИСТЕМИ ТА ДЖЕРЕЛА ЖИВЛЕННЯ

Сучасна концентрація виробництва в деяких галузях промисловості, зокрема у суднобудуванні та машинобудуванні, приводить до того, що потреба у зварювальному струмі сягає до 20000 А та більше. Головні обсяги зварювальних робіт на суднобудівних підприємствах зосереджені на стапелях, у доках та зварювальних цехах. При цьому на обмежених виробничих площах концентрується велика кількість зварювальних постів. Застосування однопостових джерел живлення у таких умовах має суттєві недоліки: велику вартість обладнання; необхідність прокладки тимчасових мереж напругою 380 В, що особливо небезпечно в місцях зварювальних робіт; потребу в збільшених площах цехів під тимчасові місця встановлення; значне завантаження кранового обладнання для пересування джерел живлення, необхідність у великій кількості обслуговуючого персоналу, що виконує електрокомутаційні та ремонтні роботи; порівняно низький коефіцієнт корисної дії багатьох джерел живлення, який знижується через недостатнє завантаження обладнання. Якщо кількість однопостових джерел живлення в зварювальному цеху перевищує сто і більше одиниць, застосування однопостових джерел живлення стає недоцільним. У цих умовах перехід до централізованої системи електропостачання постів – багатопостової системи живлення – необхідний та виправданий.

Під багатопостовою зварювальною системою розуміють сукупність джерел живлення зварювальних постів та електричних розгалужених кіл, які з'єднують окремі пости. Конфігурація електричних кіл може бути різноманітною, споживана потужність коливається у широких межах. До них, а також до багатопостових джерел ставляться певні вимоги, спрямовані на підвищення ефективності виробництва та зниження експлуатаційних витрат.

#### 9.1. Визначення параметрів багатопостових систем живлення

Багатопостові системи живлення можуть бути організовані за різними схемами залежно від технологічних та економічних умов.

Багатопостова система живлення постійного струму (рис.9.1) для ручного дугового зварювання та автоматичного зварювання під флюсом, що обслуговує  $n$  зварювальних постів ( $ЗП_1...ЗП_n$ ), отримує енергію за допомогою шинопроводу ШП від випрямляча В. Зварювальний струм  $i$ -го поста регулюється постовим (баластним або безбаластним) змінним опором РСП – регулятором струму поста.

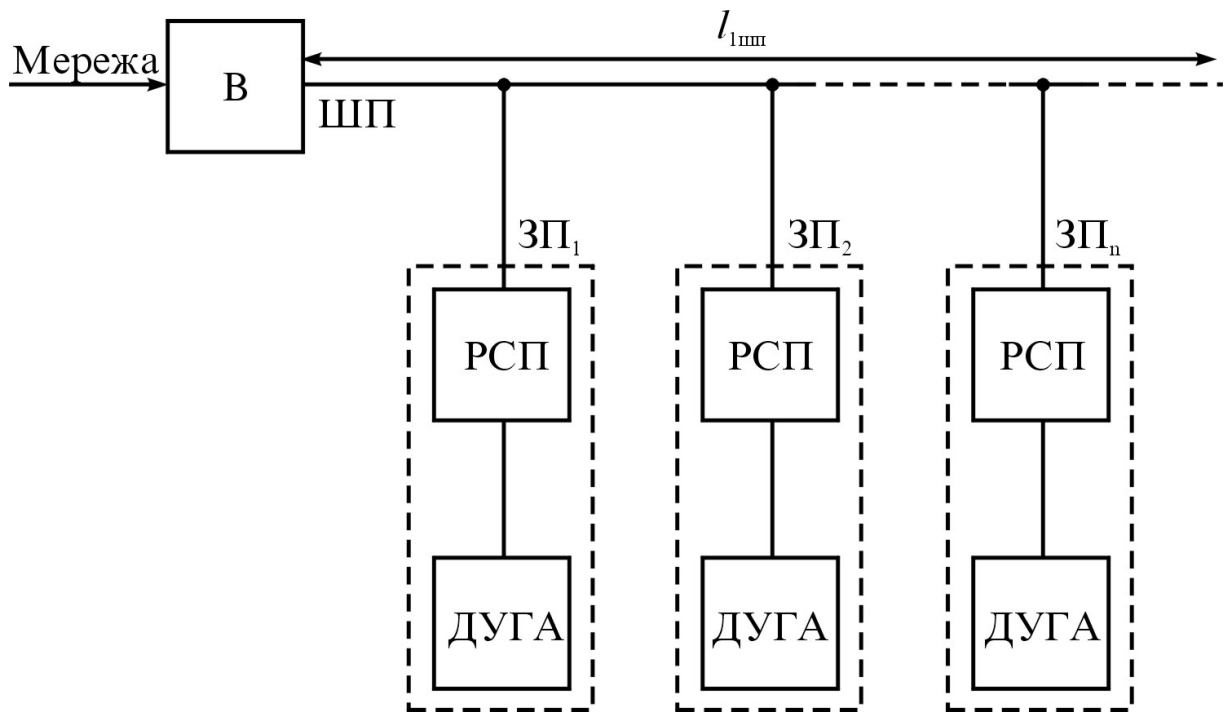


Рис. 9.1. Структурна схема системи багатопостового живлення для дугового зварювання

Головна вимога, що ставиться до багатопостових джерел живлення, – це забезпечення незалежної роботи  $i$ -го поста як у сталому, так і у перехідному режимі під час зміни зварювального процесу (обрив або збудження зварювальної дуги, коротке замикання дугового проміжку краплею розплавленого металу тощо) на інших постах.

Незалежна робота зварювальних постів від одного джерела живлення через шинопровід у статичному режимі визначається постійною напругою холостого ходу вздовж шинопроводу для  $i$ -го поста, тобто  $U_{х.пi} \approx \text{const}$ , а у динамічному – стійкістю горіння зварювальної дуги. Вказані умови роботи забезпечують якісне виконання зварного з'єднання.

Напруга холостого ходу для  $i$ -го поста у статичному режимі визначається формулою

$$U_{x,pi} = U_0 - \Delta U_{шп}, \quad (9.1)$$

де  $U_0$  – вихідна напруга багатопостового джерела живлення постійного струму, В;  $\Delta U_{шп}$  – падіння напруги вздовж шинопроводу довжиною  $l_{шп}$ , В.

Для забезпечення постійного значення  $U_{x,pi}$  потрібне виконання умови:  $\Delta U_{шп} \rightarrow 0$ ; а  $U_0 = \text{const}$  при максимальному навантаженні, тобто багатопостове джерело живлення повинно мати жорстку зовнішню вольт-амперну характеристику. Встановлено, що незалежна робота  $i$ -го поста при максимальному навантаженні буде забезпечена, якщо  $\Delta U_{шп} < +5\%$  від  $\Delta U_{x,pi}$  протягом тривалого часу.

Напруга дуги  $i$ -го поста в статичному режимі

$$U_{д,pi} = U_{x,pi} - \frac{I_{зв,pi}}{R_{\sigma i}}, \quad (9.2)$$

де  $\frac{I_{зв,pi}}{R_{\sigma i}}$  – падіння напруги на РСП з опором  $R_{\sigma i}$  при протіканні через нього

зварювального струму цього поста  $I_{зв,pi}$ .

Якщо як РСП використовується баластний реостат, то з рівняння (9.2) витікає, що напруга дуги  $i$ -го поста зворотно пропорційна силі зварювального струму, причому ця залежність лінійна. Таким чином, зовнішня характеристика  $i$ -го поста є спадною та лінійною, завдяки чому забезпечується висока стійкість процесу при ручному зварюванні та автоматичному зварюванні під флюсом.

Зварювальний струм  $i$ -го поста можна розрахувати, виходячи з рівняння (9.2), таким чином:

$$I_{зв,pi} = \frac{U_{x,pi} - U_{д,pi}}{R_{\sigma i}}, \quad (9.3)$$

де  $U_{д,pi}$  – напруга в дузі  $i$ -го поста, В.

При організації систем багатопостового живлення для механізованого зварювання у захисних газах ставляться більш високі вимоги до багатопостових джерел живлення, ніж при ручному дуговому зварюванні або автоматичному під флюсом. Це пов'язано з динамікою перехідних

процесів, зокрема, з високою швидкістю наростання зварювального струму під час коротких замикань дугового проміжку краплями розплавленого металу електродного дроту.

Багатопостова система живлення постійного струму (рис.9.2), призначена для забезпечення зварювання у середовищі вуглекислого газу, вміщує декілька шинопроводів ( $l_1 \dots l_n$ ), які ввімкнуті за схемою розподілу енергії постійного струму залежно від віддаленості зварювальних постів, причому  $l_1 < l_2 < l_3$  і т.д. Такий спосіб вмикання дає змогу змінювати напругу на конкретному шинопроводі у заданому діапазоні при постійності напруги на інших шинопроводах, а також забезпечувати спад напруги на шинопроводах у встановлених межах.

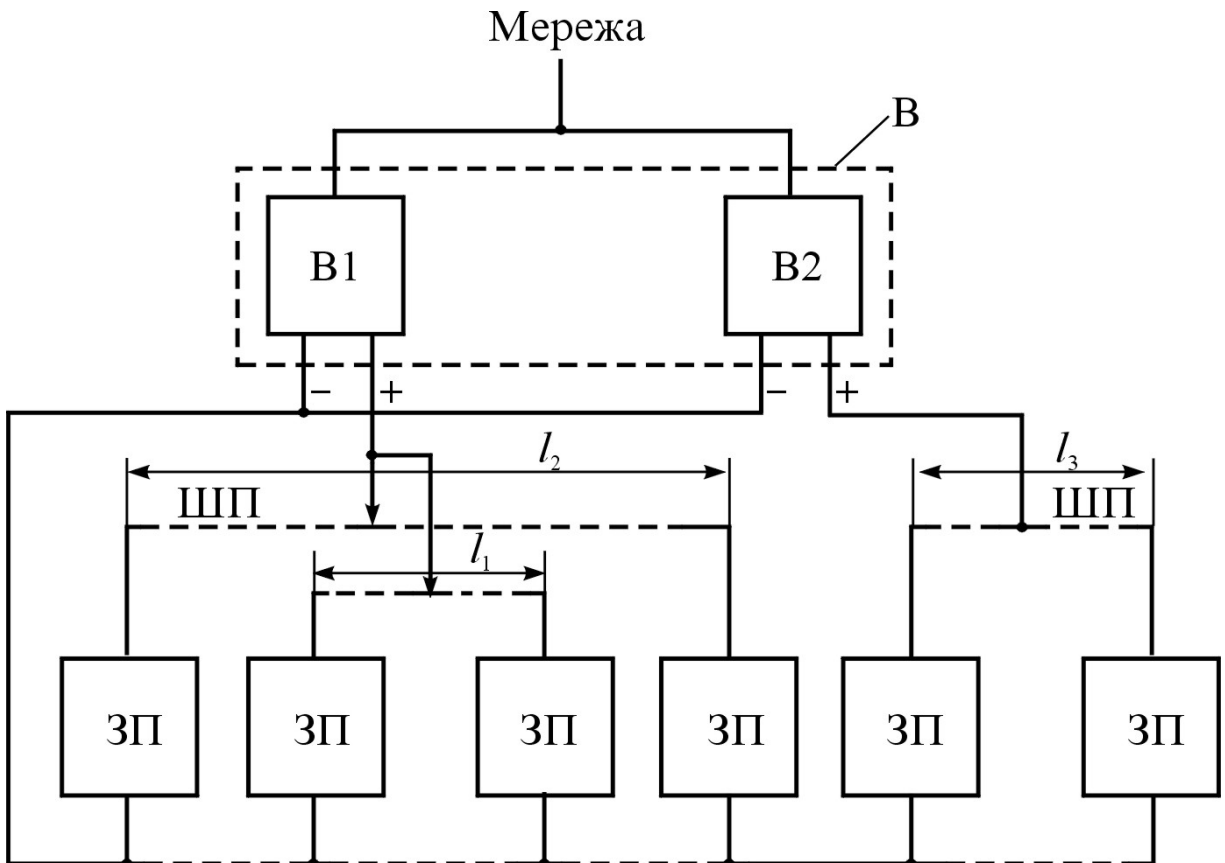


Рис. 9.2. Структурна схема системи багатопостового живлення для механізованого зварювання в середовищі захисних газів

Коефіцієнт корисної дії зварювального поста

$$\eta_{pi} = \frac{P_{di}}{P_{pi}} = \frac{P_{di}}{P_{di} + P_{\delta i}} \cdot 100 \% , \quad (9.4)$$

де  $P_{дi}$  – потужність зварювальної дуги  $i$ -го поста, Вт;  $P_{бi}$  – потужність, що виділяється на баластному опорі  $R_{бi}$   $i$ -го поста, Вт;  $P_{бi} = I_{звi}^2 R_{бi}$ . Втрати потужності на нагрівання баластного опору досягають значних величин, що відбивається на ККД поста. Підвищити  $\eta_{пi}$  зварювального поста можна двома шляхами: по-перше, зменшенням баластного опору  $R_{бi}$ , по-друге, зниженням напруги холостого ходу  $i$ -го поста  $U_{х.пi}$ .

Зменшення  $R_{бi}$  приводить до зростання розбризкування металу при зварюванні, що погіршує якість зварних виробів. Зниження напруги холостого ходу  $i$ -го поста  $U_{х.пi}$  утруднює збудження дуги та, відповідно, також знижує якість зварних виробів.

Для стабілізації режиму зварювання у зварювальне коло поста вводять індуктивність  $L$ , зменшуючи при цьому величину  $R_{бi}$  до мінімально можливого значення.

Кількість зварювальних постів, які можна одночасно жити, визначається за формулою

$$n = \frac{P_{б.д}}{\varepsilon P_i}, \quad (9.5)$$

де  $P_{б.д}$  – потужність на виході багатопостового джерела живлення, Вт;  $P_i$  – потужність  $i$ -го зварювального поста, Вт;  $\varepsilon$  – коефіцієнт, що враховує одночасну роботу зварювальних постів. Для ручного дугового зварювання та автоматичного зварювання під флюсом  $\varepsilon = 0,5...0,6$ , а для механізованого в середовищі захисних газів  $\varepsilon = 0,7...0,9$ .

Якщо багатопостове джерело відсутнє або його потужності недостатньо, застосовують паралельне вмикання джерел живлення для забезпечення потрібної потужності. При паралельному вмиканні джерел живлення їх позитивні полюси підключають до шини позитивного потенціалу, а негативні – до шини негативного потенціалу.

Крім того, при з'єднанні джерел живлення на паралельну роботу для отримання необхідної потужності зварювального поста слід додержуватися таких основних правил:

1. Напруги холостого ходу джерел живлення повинні бути однаковими. В іншому разі у замкнених контурах, що утворені обмотками паралельно з'єднаних джерел живлення, навіть при відсутності

навантаження можуть виникнути значні зрівнювальні струми, які порушують нормальну роботу джерел живлення.

2. Зовнішні характеристики джерел живлення повинні бути подібні: крутоспадні, пологоспадні, жорсткі. Якщо з'єднати джерела живлення з різними характеристиками (наприклад, з жорсткою та спадною), то при коливаннях довжини дуги зміна напруги на джерелах буде різною, внаслідок чого з'являться великі зрівнювальні струми.

3. Загальний струм навантаження  $I_n$ , що дорівнює сумі струмів окремих джерел живлення ( $I_1, I_2$  тощо), розподіляється між джерелами зворотно пропорційно їх повним опорам. Чим більша потужність джерела живлення, тим менший його внутрішній опір. Отже, джерела живлення різної потужності можна з'єднувати на паралельну роботу тільки за умови, що загальний струм навантаження не буде перевищувати суми номінальних струмів усіх джерел живлення, які з'єднуються.

4. Для того, щоб мати змогу роздільно вмикати джерела живлення, що вмикаються на паралельну роботу, та мати змогу роздільної настройки напруги холостого ходу, необхідно встановити однополюсний або двополюсний перемикач.

5. Для контролю напруги холостого ходу під час настройки, а також для контролю за розподілом струмів слід встановити вольтметри і амперметри, які вимірюють напруги та зварювальні струми окремих джерел.

## 9.2. Схеми живлення зварювальних постів

Економічність роботи будь-якої системи живлення головним чином залежить від раціонального розташування джерел живлення та користувачів зварювального струму. Джерела живлення та зварювальні пости мають бути розташовані та з'єднані між собою так, щоб забезпечити припустимі межі коливання напруги у місцях підключення постів при зміні навантаження, мінімальні втрати енергії у провідниках та оптимальні витрати активних матеріалів при створенні системи у цілому. Існує декілька способів розміщення джерел живлення. У залежності від способу

розміщення багатопостові системи розподіляються на системи з груповим, розосередженим та комбінованим розміщенням джерел живлення.

До групових належать системи, в яких усі джерела зосереджені в одному місці і точка їх підключення до мережі – спільна. В системах із розосередженим розміщенням джерела живлення розподілені за певною схемою. Їх місця підключення до мережі вибирають з урахуванням виконання поставлених вимог. При комбінованому розміщенні джерела живлення зосереджуються у декілька груп, котрі розподіляються по мережі, виходячи з тих самих вимог.

Багатопостові зварювальні системи мають електричні мережі складної конфігурації з різними геометричними розмірами, що визначаються виробничими приміщеннями, та необхідним обсягом зварювальних робіт. Схеми організації систем живлення можна поділити на п'ять видів: магістральна, радіальна, кільцева, змішана та довільна, кожна з яких має свої переваги та недоліки.

*Магістральна схема живлення.* В магістральній схемі живлення (рис.9.3,*а*) зварювальні пости підключаються до загального провідника. Як такий провідник використовують кабелі або шинопроводи з мідною або алюмінієвою жилою. Розміщення постів вздовж магістралі, яка у даній схемі є загальною частиною системи живлення, може бути довільним і визначатися конфігурацією приміщень цехів та робочих майданчиків, технологічними особливостями того або іншого виробництва, габаритами оброблюваних конструкцій, рівнем механізації виробництва тощо.

При магістральній схемі живлення величини струмів на ділянках магістралі залежать від кількості постів, підключених до частини магістралі, яка залишилася. Найбільшого значення струм досягає на ділянці магістралі, яка розташована ближче до джерела живлення. При переміщенні вздовж шинопроводу значення струмів зменшуються, але у межах кожної ділянки вони залишаються умовно постійними; зміна значень струму відбувається лише на межах ділянки (рис.9.3,*б*).

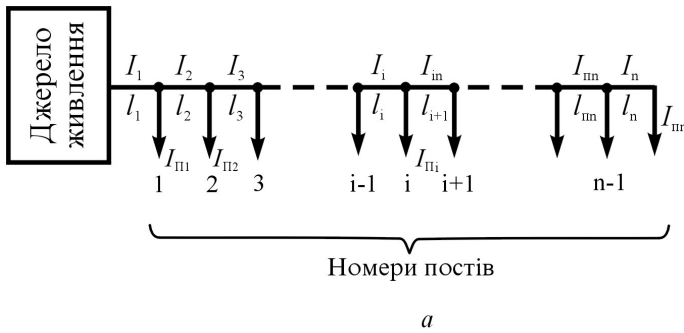
Магістральна схема забезпечується одним або кількома джерелами живлення, які можуть бути підключені з одного кінця, з обох кінців, у середині або розосереджені вздовж шинопроводу. Найчастіше



використовується варіант підключення джерела живлення з одного кінця магістралі. Для цього варіанта активний опір ділянки магістралі буде:

$$R = \frac{\rho}{S_i} \Delta l_i = \frac{\rho j}{I_{ін}} \Delta l_i, \quad (9.6)$$

де  $\rho$  – питомий опір матеріалу шинопроводу, Ом·м;  $j$  – припустима густина струму, А/м<sup>2</sup>;  $S_i$  – площа перерізу ділянки шини, м<sup>2</sup>;  $I_{ін}$  – струм на ділянці,



що відповідає номінальним режимам роботи зварювальних апаратів, А;  $\Delta l_i$  – довжина  $i$ -ї ділянки шинопроводу, м.

Спад напруги на будь-якій ділянці

$$U_i = R_i I_i = \frac{\rho j}{I_{ін}} \Delta l_i I_i. \quad (9.7)$$

Номінальний спад напруги в магістральному провіднику

$$U_{н} = \rho j \sum_{i=1}^n \Delta l_i, \quad (9.8)$$

Відповідні втрати потужності

$$P = \rho j \sum_{i=1}^n l_i I_{ін}. \quad (9.9)$$

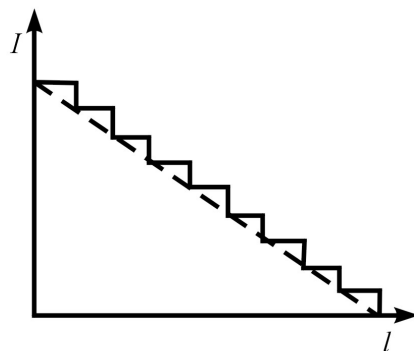


Рис. 9.3. Магістральна схема живлення зварювальних постів (а) та зміна струму вздовж шинопроводу (б)

*Радіальна схема живлення.* В радіальній схемі кожний зварювальний пост

живиться по окремому провіднику (рис.9.4). Така система забезпечує найкращу розв'язку постів при роботі та економію активних матеріалів при влаштуванні шинопроводу.

Економія матеріалу (м<sup>3</sup>) провідників при заміні магістральної схеми

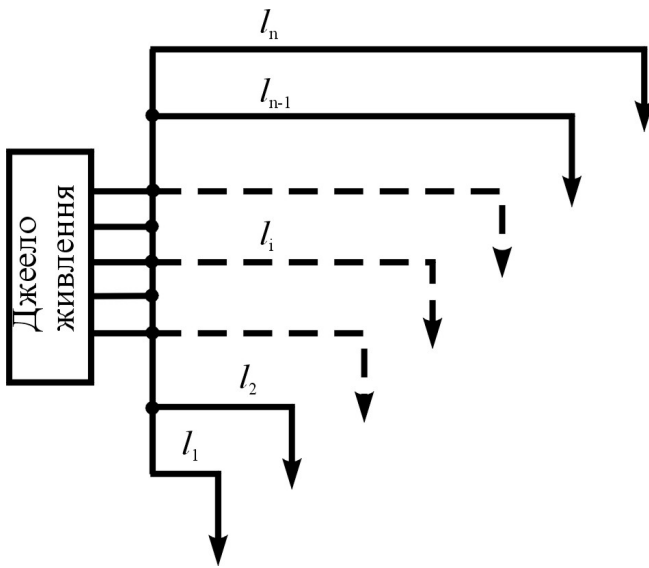


Рис. 9.4. Радіальна схема живлення постів

на радіальну складає

$$\Delta\Theta_p = \frac{2}{3}\Theta_m, \quad (9.10)$$

де  $\Delta\Theta_p$  – об'єм зекономленого металу;  $\Theta_m$  – об'єм активного матеріалу у магістральній системі.

Найбільший спад напруги в радіальній схемі при постійній густині струму має місце на найбільш віддаленому пості. Його можна розрахувати за формулою

$$U = \frac{\rho}{S} l_n I_n. \quad (9.11)$$

Втрати потужності в радіальній схемі

$$P = \sum_{i=1}^n \rho j I_n l_i. \quad (9.12)$$

*Кільцева схема живлення.* В кільцевій схемі будь-який зварювальний пост підключається до джерела живлення за допомогою двох провідників. Коли працюють усі зварювальні пости, через кожен частину загального шинопроводу тече половина номінального струму джерела живлення. Розрахунок перерізу провідників по припустимій густині струму, виходячи з цього половинного значення, приводить до подвійного збільшення напруги, її коливання на постах та зростання у чотири рази втрат енергії. Тому така схема є менш ефективною порівняно з розглянутими вище.

*Змішана та довільна схеми живлення.* У таких схемах зварювальні пости можуть підключатися на окремих ділянках до провідника живлення за магістральною, радіальною або кільцевою схемами. Найчастіше зустрічаються у багатопостових зварювальних системах сполучення ділянок, виконаних за магістральною та радіальною схемами (рис.9.5).

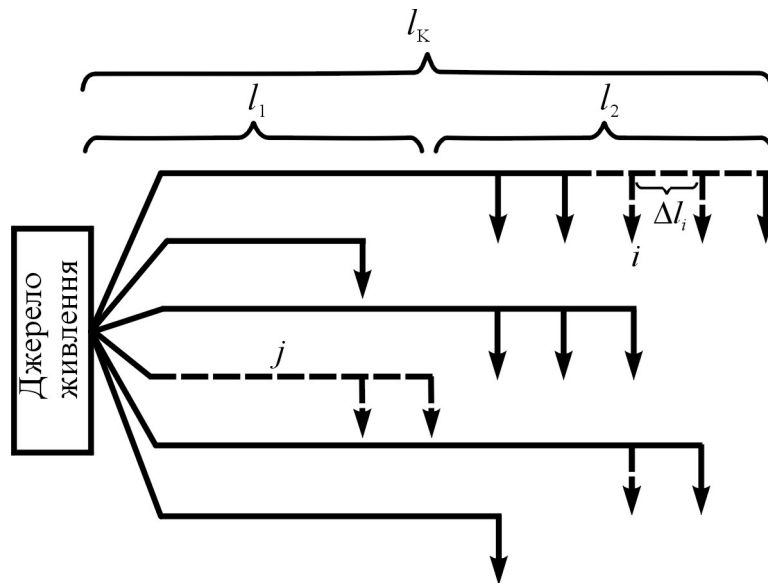


Рис. 9.5. Змішана схема живлення постів

Розрахунок параметрів такої розгалуженої схеми являє собою досить складну задачу, яку можна розв'язати за допомогою ЕОМ або графічними методами.

### 9.3. Багатопостові джерела живлення

Особливості використання багатопостових зварювальних систем накладають, як показано у розд.9.1, певні вимоги до джерел живлення. Існуючі багатопостові системи є системами постійного струму, тому вони комплектуються відповідними джерелами живлення. Головним чином багатопостові системи базуються на статичних перетворювачах струму – випрямлячах, але ще недавно широко використовували машинні перетворювачі – багатопостові перетворювачі типу ПСМ-1000 з колекторним генератором СГ-1000 з самозбудженням та підмагнічувальною послідовною обмоткою. Але низький коефіцієнт корисної дії машинних перетворювачів порівняно з випрямлячами поряд з іншими, характерними для колекторних генераторів, недоліками привів до того, що сьогодні використовуються лише багатопостові агрегати з вентильними генераторами. Одним з цих джерел живлення є чотирипостовий агрегат АДД-4x2501, що складається з дизельного двигуна та однокорпусного вентильного чотирипостового генератора. Агрегат має такі технічні характеристики:

Номінальна сила струму, А.....	4x250/800 <sup>*)</sup>
Номінальна тривалість циклу зварювання, хв.....	5/10
Номінальна тривалість роботи ПН, %.....	60
<u>Межі регулювання струму, А.....</u>	70...800

<sup>\*)</sup> У чисельнику – пости роздільно, у знаменнику – пости паралельно.

Електрична схема агрегата забезпечує плавне місцеве та дистанційне безреостатне регулювання напруги холостого ходу та сили зварювального струму кожного поста.

Багатопостові випрямлячі, що використовуються для ручного дугового зварювання покритими електродами, призначені головним чином для багатопостових систем живлення від спільних цехових магістральних шинопроводів. Такі випрямлячі мають жорстку зовнішню характеристику. Напруга на виході багатопостового випрямляча при зміні навантаження від 50 до 100 % номінального змінюються не більше ніж на 4 В. До цього типу джерел живлення належать випрямлячі марок ВДМ-1001, ВДМ-1601, ВДМ-3001, що випускаються заводом "Електрик" (Росія), та ВДМ-1202С, ВДМ-6303С (ВАТ "Фірма СЭЛМА").

Випрямлячі серії ВДМ відрізняються простотою конструкції і складаються з трифазного трансформатора, випрямного блока, вентилятора, пускової та захисної апаратури (рис.9.6). Первинна обмотка силового трансформатора увімкнута за схемою "трикутник" і має виводи у кожній фазі для стабілізації вихідної напруги мережі.

Вторинна обмотка має дві секції, що увімкнуті за схемою "зірка", а їх ЕРС зсунуті на кут 180 ел.град. Нейтраль першої секції цієї обмотки утворює негативний вивід, а другої секції – позитивний вивід випрямляча. Початки секцій вторинної обмотки підключені до кремнієвих вентилів випрямного блока. Кількість вентилів у кожній фазі визначається струмом навантаження. Випрямний блок ВДМ-1001 містить шість вентилів Д161-400, блок ВДМ-1601 – 12 вентилів Д161-320.

Випрямлячі серії ВДМ оснащені швидкодіючим тепловим захистом відповідно від короткочасного та тривалого перевантаження. Зварювальні пости підключаються до випрямляча через баластні реостати.

Випрямляч ВДМ-1001 призначений для живлення 7 постів ручного дугового зварювання, ВДМ-1601 – 9 постів, ВДМ-6303 – 4 постів і ВДМ-1202 – 8 постів.

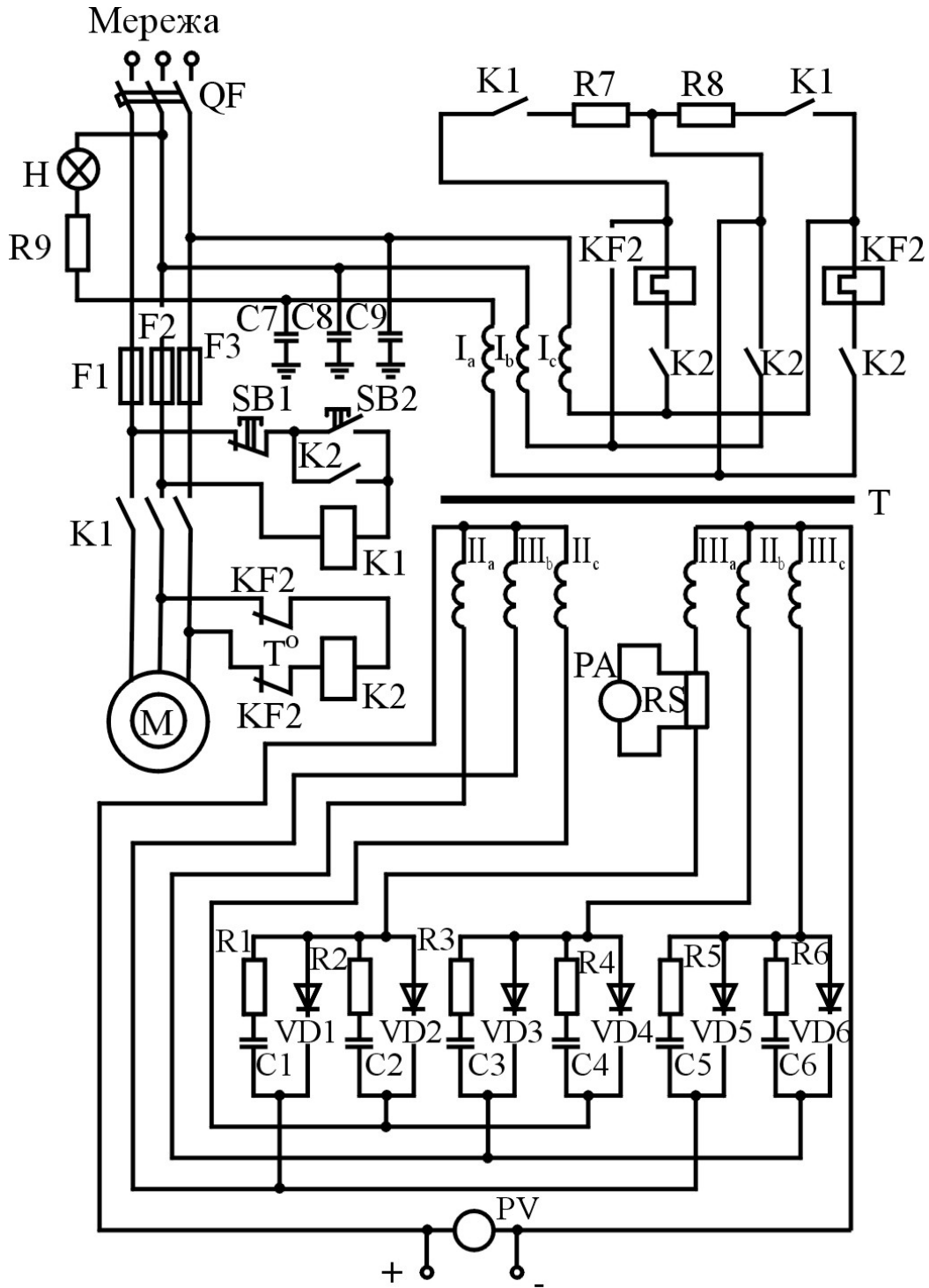


Рис. 9.6. Принципова електрична схема випрямляча ВДМ-1001

До багатопостових випрямлячів з безреостатним регулюванням струму належать випрямлячі ВДУМ-4х401 (Росія) та ВДМ-4х301 (Литва).

Випрямляч ВДУМ-4х401 призначений для живлення чотирьох зварювальних постів при ручному дуговому зварюванні та механізованому зварюванні в середовищі вуглекислого газу. Випрямляч ВДМ-4х301 використовується для живлення чотирьох постів ручного зварювання.

Конструктивно випрямлячі побудовані однаково. До їх складу входять спільний силовий трансформатор та автономні за числом постів тиристорні випрямні блоки з самостійними системами фазового керування. У випрямлячі ВДМ-4х301 чотири постових випрямних блоки зібрані за шестифазною схемою зі зрівнювальним реактором та підключені до спільної для всіх блоків вторинної обмотки силового трансформатора Т (рис.9.7). Блоки оснащені зварювальними дроселями L1...L4 та датчиками струму на магнітних підсилювачах А1...А4, сигнали з яких потрапляють на свої постові пристрої фазового керування БФК. На будь-якому з чотирьох

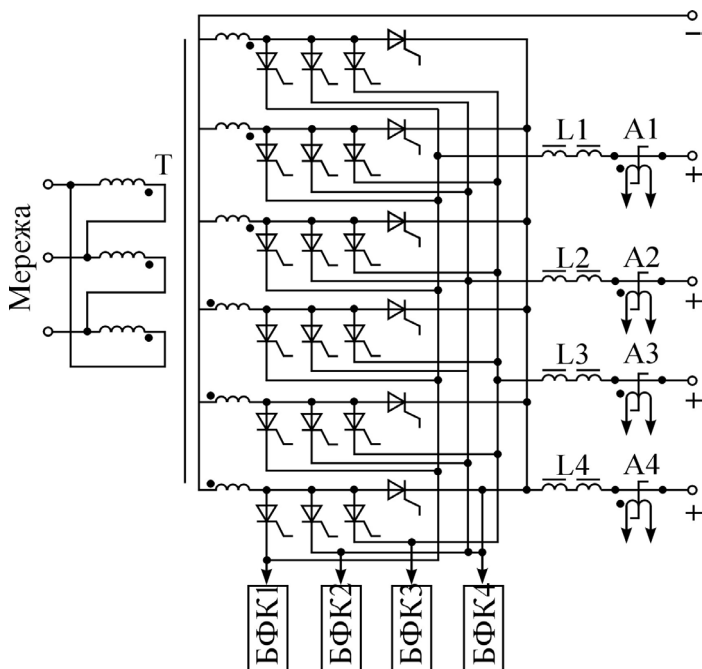


Рис. 9.7. Спрощена електрична схема силовій частини випрямляча ВДУМ-4х401

постів струм регулюється у межах від 60 до 315 А. Напруга холостого ходу не менше 80 В на кожному посту, при необхідності може обмежуватися за допомогою спеціального пристрою до 12 В через 1 с після закінчення зварювання. Кожен пост оснащений виносним пультом дистанційного керування режимом зварювання. Технічні характеристики випрямлячів серії ВДМ та ВДУМ-4х401 наведені в дод.2 (див. табл. 2.11).

Для забезпечення багатопостового зварювання в середовищі вуглекислого газу використовуються зварювальні випрямлячі серії ВДГМ та ВМГ-5000.

Електрична схема випрямляча ВДГМ подібна електричній схемі універсального випрямляча ВДУ-1201. Випрямляч ВДГМ так само, як і ВДУ-

1201, забезпечує стабілізацію вихідної напруги до 2,5 % при відхиленнях напруги мережі у діапазоні  $\pm 5$  % від номінального значення. Технічні характеристики випрямлячів серії ВДГМ наведені у дод.2 (див. табл. 2.11).

Багатопостовий випрямляч ВМГ-5000 призначений головним чином для централізованої системи живлення зварювальних постів. Він має жорстку зовнішню характеристику і зібраний за подвійною трифазною схемою випрямлення зі зрівнювальним реактором. Як випрямні елементи використовуються діоди В200. Електрична схема випрямляча ВМГ-5000 подібна електричній схемі випрямляча ВДУ-506 (див.рис.4.17). Визначною особливістю електричної схеми випрямляча ВМГ-5000 є використання більш потужного трифазного силового випрямляча. Первинна обмотка силового трансформатора з'єднана у "зірку" та секціонована, що дає змогу отримати п'ять значень вихідної напруги вторинних обмоток. Охолодження випрямляча водяне. Регулювання напруги на постах здійснюється автономно за допомогою баластних реостатів РБГ-302. При зварюванні у вертикальному положенні на струмах до 200 А зварювальні пости додатково обладнуються дроселями з індуктивністю 300 мкГн, що вмикаються послідовно з баластними реостатами. Технічну характеристику випрямляча ВМГ-5000 наведено у дод.2 (див. табл.2.11).

#### **9.4. Регулювання струму і напруги на зварювальних постах**

Ручне дугове зварювання здійснюється якісно при застосуванні однопостових джерел живлення з крутоспадними зовнішніми характеристиками. При багатопостовому живленні до всіх постів подається однакова напруга холостого ходу. Кожен пост має бути обладнаний пристроєм, який дає змогу отримати крутоспадні характеристики. Як такі пристрої застосовуються баластні реостати. Технічні характеристики деяких баластних реостатів наведені у дод. 2 (див. табл.2.12).

Найбільш типовим представником цих пристроїв є баластний реостат РБ-301У2. Конструктивно він виконаний у вигляді металевого ящика зі знімними стінками та кришкою (рис.9.8), що забезпечує простий доступ до елементів опору, з полозками та ручками для зручності транспортування.

На передній стінці змонтовані два затискних контакти та шість рубильників, за числом ступенів регулювання величини опору. Елементи опору, виготовлені з жароміцного фехралевого дроту діаметром 5 та 3,2 мм у вигляді плоскої спіралі, розміщені в середині корпуса.

Ступені опорів розраховані на струми 10, 20, 50, 100 А. За допомогою рубильників S1...S6 ступені вмикаються у паралель. На заводському щитку, що прикріплений до передньої стінки, подані рекомендовані комбінації щодо вмикання рубильників для отримання відповідних значень зварювального струму.

Регулювання тільки величини струму не завжди достатнє при роботі зварників. Часто потрібно обмежувати й величину напруги холостого ходу в паузах між зварюваннями. Це завдання особливо актуальне під час роботи у приміщеннях з підвищеною небезпекою, наприклад при виконанні зварювальних робіт у суднових приміщеннях, де зварника з усіх боків оточує метал. Неконтрольована підвищена напруга холостого ходу

при випадковому замиканні призводить до виникнення пожежі.

Для обмеження напруги холостого ходу при багатопостовому живленні застосовують баластні реостати з подільниками на опорах. Представником такого пристрою є баластний реостат типу РБС-300-1 (рис.9.9), у якому є можливість дистанційного регулювання зварювального струму за допомогою виносного пульта керування Е1.

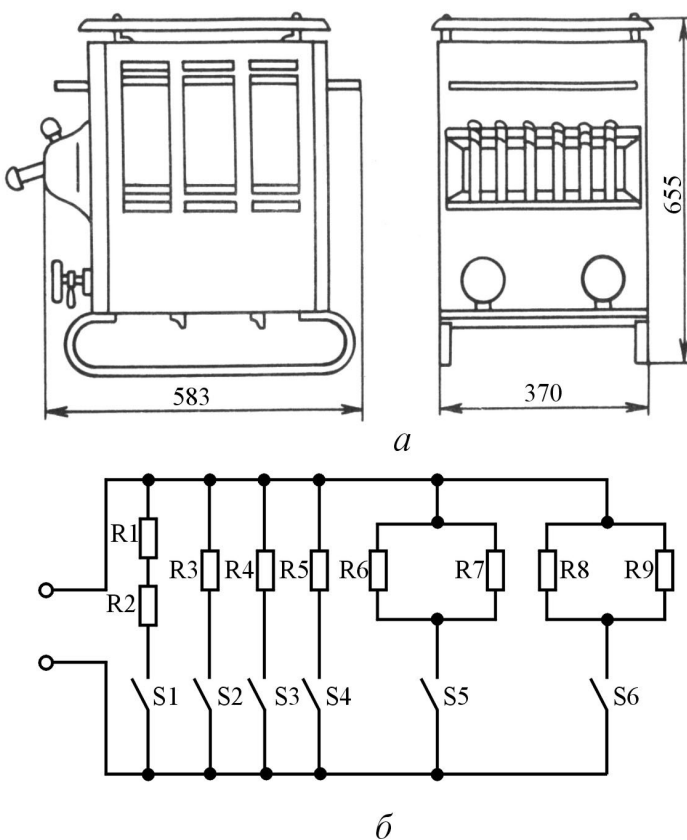


Рис. 9.8. Загальний вигляд (а) та принципова схема (б) баластного реостату типу РБ-301



Баластний реостат являє собою металевий каркас, усередині якого розміщені елементи опорів, знижувальний трансформатор місцевого освітлення на 12 В, блок зняття напруги з електрода та апаратура керування.

У реостаті РБС-300-1 передбачено п'ять ступенів регулювання опорів

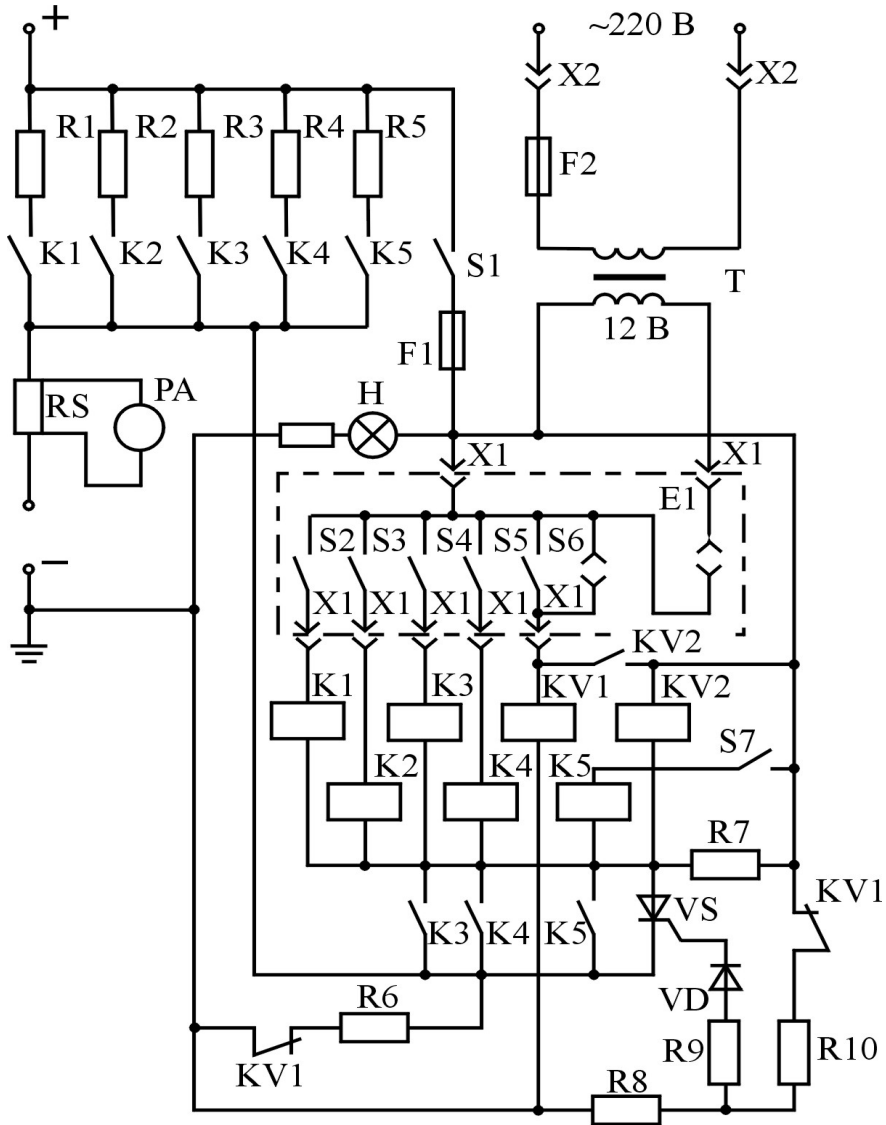


Рис.9.9. Принципова електрична схема реостату типу РБС-300-1

на 10, 20, 40, 80, 150 А. Кожний ступінь набрано з окремих елементів опору та підключено до вихідних клем за допомогою контакторів K1...K5. Контактори вмикаються з виносного пульта керування вимикачами S2...S5. Вимикачем S6 баластний реостат переводиться в режим роботи без зниженої напруги холостого ходу. Знижена напруга знімається з подільника на опорах R6 та R7, у коло яких увімкнутий тиристор VS. На

керуючий електрод тиристора за допомогою резисторів R8...R10 та діода VD постійно подається вимикальна напруга. Як тільки баластний реостат опиниться під зварювальною напругою, тиристор VS вимикається і на дуговий проміжок потрапить знижена напруга. Така ж напруга прикладена до котушки реле KV2, але вона недостатня для його спрацювання. У момент збудження дуги опір R6 замикається накоротко і напруга прикладається до котушки реле KV2. Тоді спрацює та замкне свій контакт KV2 у колі котушки реле KV1. Одночасно спрацюють контактори, скомутовані вимикачами S2...S5, та ввімкнуть відповідні секції опорів баластного реостата у коло зварювальної дуги. Реле KV1 після спрацювання розімкне контакти у колі дільника та керуючого електрода тиристора. Після припинення зварювання тиристор VS закриється. Схема повернеться у вихідне положення.

Широке використання баластних реостатів у багатопостових системах викликано простотою їх будови та нескладністю експлуатації. Але вони мають істотні недоліки: великі втрати енергії в опорах, порівняно малий термін служби, невисоку надійність у роботі, великі витрати на ремонт та неможливість регулювання величини струму в процесі зварювання. Все це вимагає заміни баластних реостатів іншими, більш прогресивними, пристроями.

Завдяки розвитку напівпровідникової техніки розроблено багато сучасних пристроїв, які успішно замінюють баластні реостати, для регулювання режиму зварювання на постах.

Одна група пристроїв ґрунтується на тиристорному регулюванні струму, що, в принципі, не змінює суті багатопостових систем живлення постійного струму; друга – передбачає використання системи живлення змінного струму з наступним випрямленням безпосередньо на зварювальному пості.

Безбаластні регулятори струму розробляються на базі керованих вентилів або потужних транзисторів. Заміна баластних реостатів на напівпровідникові пристрої дає змогу здійснювати плавне регулювання зварювального струму та напруги, різко знизити втрати електроенергії, уніфікувати обладнання та розширити область застосування

багатопостових систем. Безбаластні пристрої серійно промисловістю не випускаються, але деякі розробки подібних пристроїв пройшли заводські випробування та показали добрі результати.

Одним із прикладів таких пристроїв є регулятор струму дуги, схему якого наведено на рис.9.10. Його силова частина складається з тиристора VS1, згладжувального дроселя L1, шунта RS та зворотного діода VD1. Для звільнення регулятора від паралельних навантажень у силове коло увімкнаний діод VD2. Коло керування тиристором VS1 містить гасильний конденсатор C1 з комутуючим тиристором VS2, коло перезаряджання конденсатора з дроселем L2 та діодом VD3, з диференціюючим трансформатором Т, що живиться від стабілізованого джерела напруги. Електронне реле зібрано на транзисторах VT1 та VT2. Поява напруги приводить до відкриття вентиля VS1. Він залишається відкритим тому, що по опору R1 тече невеликий робочий струм. Конденсатор C1 заряджається через опір R2 до зварювальної напруги. Замикання електродом виробу приводить до зростання зварювального струму.

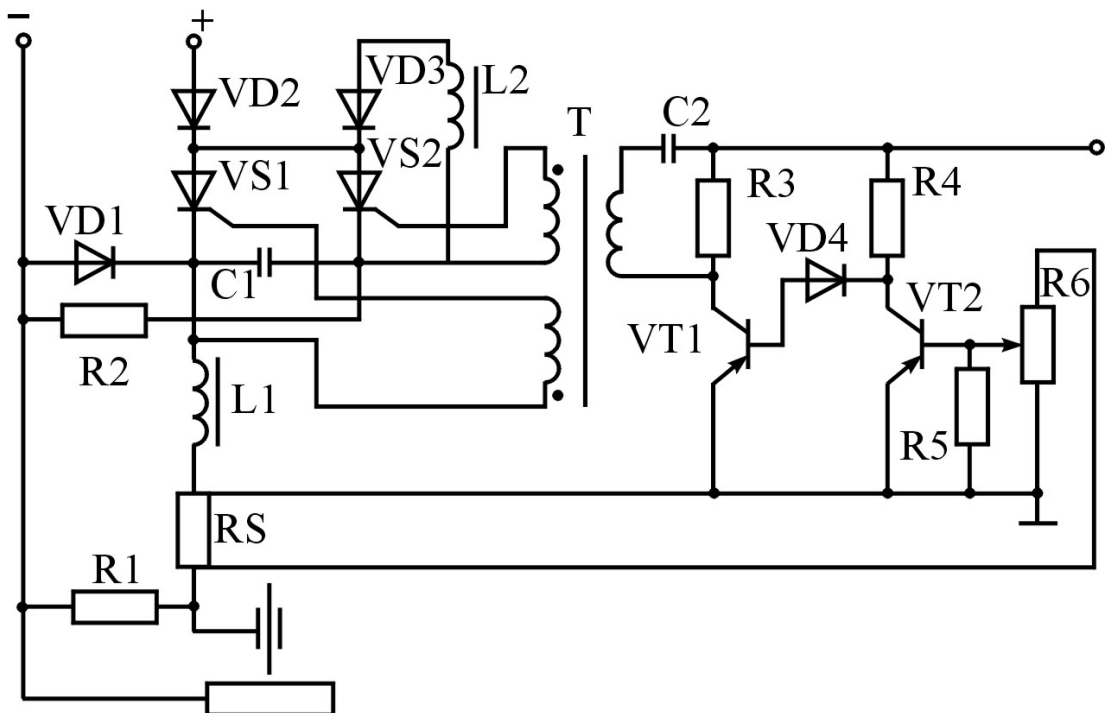


Рис. 9.10. Принципова електрична схема регулятора зварювального струму

З шунта RS знімається напруга, достатня для спрацювання електронного реле. Величина напруги спрацювання регулюється потенціометром R6 (датчик величини зварювального струму). Як тільки напруга з RS, що пропорційна величині зварювального струму, досягне порога спрацювання реле, останнє видає сигнал, який відкриває тиристор VS1. Енергія, нагромаджена у дроселі L1, підтримує зварювальний струм, який протікає через вентиль VD1. Коли зварювальний струм спадає до величини, що відповідає напрузі відпускання електронного реле, останнє з диференціальним трансформатором сформовує імпульс, який відкриває тиристор VS1. Коли тиристор VS1 відкривається, конденсатор C1 перезаряджається по колу L2–VD3–VS1. Таким чином формуються імпульси зварювального струму, які йдуть один за одним.

Величина зварювального струму повністю визначається параметрами електронного реле та задається потенціометром на його вході. На потенціометр потрапляє сигнал зворотного зв'язку за струмом із шунта та поділяється ним.

## **9.5. Особливості багатопостового живлення при імпульсно-дуговому зварюванні**

Характерною особливістю багатопостової системи живлення для імпульсно-дугового зварювання плавким електродом є те, що кожна зварювальна дуга живиться від двох джерел живлення. При цьому можливі такі варіанти побудови системи живлення:

1) система, що має як джерело базового струму багатопостову або централізовану систему живлення і як джерело імпульсного струму керований випрямляч, підключений через розподільні діоди, кількість яких визначається числом зварювальних постів;

2) система, що має як джерела базового струму зварювальні постові джерела живлення і як джерело імпульсного струму – додатковий керований випрямляч, зібраний за однофазною мостовою схемою, що містить одне плече мосту спільне, а друге з розгалуженими колами за числом зварювальних постів для зменшення їх взаємного впливу при живленні дуг базовим струмом;

3) система, що має однокорпусне джерело живлення, яке містить багатообмотковий силовий трифазний трансформатор, на основі якого

будується багатопостова система живлення постів постійним та імпульсним струмом.

Розглянемо приклади багатопостових систем живлення з індивідуальним та спільним регулюванням параметрів імпульсів струму на всіх зварювальних постах.

*Система з індивідуальним регулюванням* (рис.9.11) містить зварювальні джерела живлення базового струму ДЖ, кількість яких визначається числом зварювальних постів, та керований випрямляч, що складається з силового трансформатора Т, діодів VD1, VD2 та тиристорів. Діоди утворюють некероване плече, а тиристори – керовані плечі однофазного мосту, що вмикаються блоками керування БК. При імпульсно-дуговому зварюванні плавким електродом кожен зварювальний пост живиться від двох джерел: базового струму ДЖ, індивідуального для кожної дуги, та спільного керованого випрямляча. Кожна зварювальна дуга (виводи Е, В) живиться імпульсним струмом через відповідне плече мосту, зібране на тиристорах. Амплітуда та тривалість імпульсів струму задається для кожної з дуг індивідуальним блоком керування БК. В паузі між імпульсами кожна дуга отримує живлення від свого ДЖ.

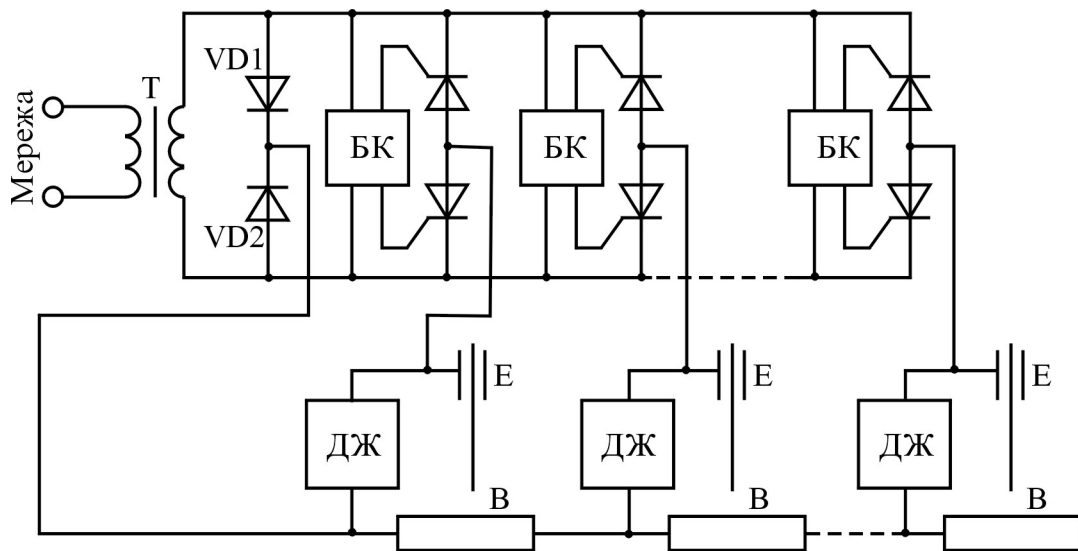


Рис. 9.11. Багатопостова система живлення з індивідуальним регулюванням параметрів імпульсів струму на кожному зварювальному посту

*Схема багатопостової системи живлення зі спільним регулюванням параметрів імпульсів струму* одночасно на всіх зварювальних постах (рис.9.12) містить подібні до розглянутої схеми елементи. Різниця полягає у тому, що кероване плече діодного мосту, спільне для всіх зварювальних постів, виконане на тиристорах VS1, VS2 та має один блок керування, а некеровані плечі у колах зварювальних дуг виконані на діодах. Амплітуда

та тривалість імпульсів струму для всіх дуг зварювальних постів однакові і визначаються настройкою БК.

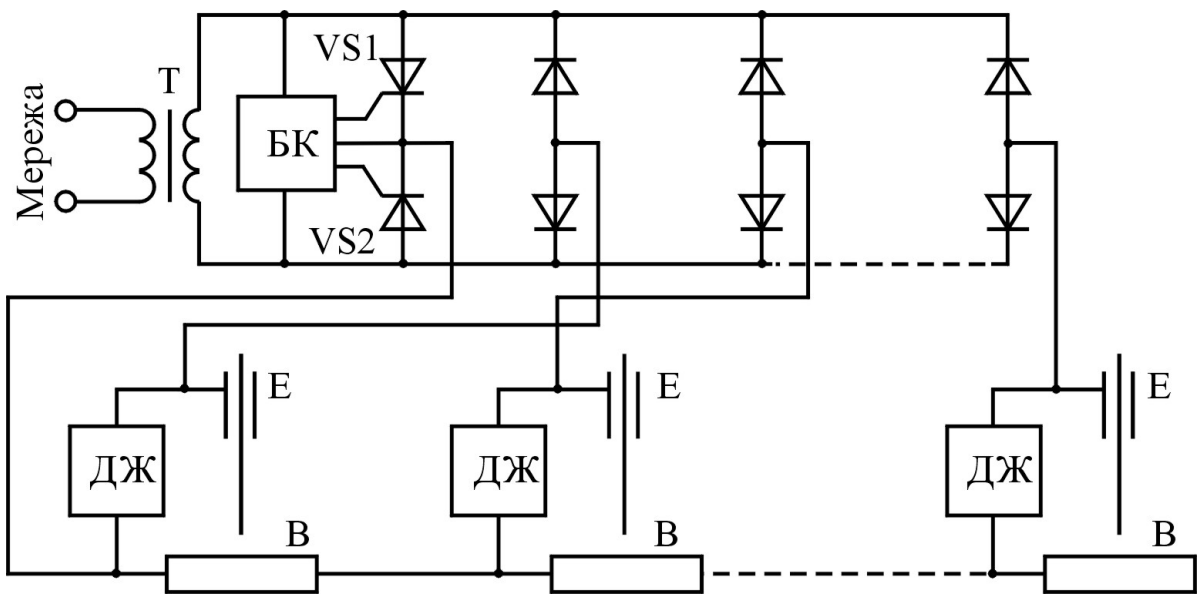


Рис. 9.12. Багатопостова система живлення зі спільним регулюванням параметрів імпульсів струму на всіх зварювальних постах

Потужність силового трансформатора випрямляча визначається кількістю зварювальних постів.

Розглянуті багатопостові системи живлення можуть використовуватися для ІДЗПЕ в інертних та активних газах. Застосування багатопостових систем сприяє більш ефективному використанню імпульсно-дугового зварювання плавким електродом.

### Контрольні питання

1. Які вимоги ставляться до систем багатопостового живлення зварювальних постів?
2. Які схеми живлення постів використовуються у багатопостових системах? Чим вони відрізняються?
3. У чому полягає принципова різниця між багатопостовими джерелами живлення і однопостовими?
4. Якими засобами регулюються напруга дуги та зварювальний струм на постах при багатопостовому живленні?
5. Чим відрізняються системи багатопостового живлення для зварювання постійним та імпульсним струмом?

## *Глава 10*

# **ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ ТА ОХОРОНА ПРАЦІ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЗВАРЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ЖИВЛЕННЯ**

В Україні проблемі запобігання та зниження виробничого травматизму приділяється велика увага. У Законі України від 14.10.1992 р. "Про охорону праці" сказано: "Державна політика в області охорони праці базується на принципах пріоритету життя та здоров'я робітників згідно з результатами виробничої діяльності підприємства, повної відповідальності власника за створення безпечних, нешкідливих умов праці".

З метою поліпшення охорони праці зварників проводяться науково-дослідні роботи, які включають вивчення умов праці, проведення оздоровчих заходів та створення санітарно-технічних засобів боротьби зі шкідливими факторами виробництва. Цими проблемами займається ІЕЗ імені Є.О. Патона та інші науково-дослідні організації. Розроблені типові кабінети для визначення умов праці, конструкції пристроїв для зменшення або повного усунення статичної напруги тіла при типових зварювальних операціях, принципи видалення зварювальних аерозолів, комплект інструмента для електрозварника, що включає засоби для створення безпечних умов праці. Значні результати, досягнуті в напрямку створення електробезпечних контактних рознімачів для підключення зварювальних апаратів до джерел живлення, автоматичних пристроїв для зниження напруги холостого ходу зварювальних джерел живлення.

Основні вимоги безпечної експлуатації зварювального обладнання, в тому числі й джерел живлення, викладені в "Правилах пожежної безпеки при проведенні зварювальних та інших вогневих робіт на об'єктах народного господарства", "Правилах технічної експлуатації електроустановок споживачів", "Правилах техніки безпеки при експлуатації електроустановок споживачів", ГОСТ 12.0.001-82СБТ.

### **10.1. Загальні положення техніки безпеки**

Найбільшу небезпеку при зварюванні являє ураження електричним струмом. Правилами техніки експлуатації дозволяється підключати зварю-

вальні джерела живлення до мережі напругою до 660 В. Напруга, що підводиться до зварювальних електродів, може досягати 60...80 В. Для змінного струму промислової частоти безпечною вважається сила струму до 0,01 А, а опір людської шкіри змінюється в широких межах 500...50000 Ом. Тому напруга холостого ходу джерела живлення є небезпечною. У зв'язку з цим особливо небезпечно працювати у вологих приміщеннях та вологими руками. Різко зростає небезпека при роботі з джерелами живлення на суднобудівних та судноремонтних підприємствах. Сталевий корпус, що оточує зварника, обмежений об'єм приміщень, підвищена вологість повітря створюють умови, при яких є постійна можливість одночасного доторкання до струмопровідних частин та заземлення. В цих умовах джерела живлення повинні бути обладнані пристроями для обмеження напруги холостого ходу до 12 В з витримкою часу при відновленні не більше 0,5 с. Можливо також застосування пристроїв автоматичного вимикання холостого ходу джерел живлення. Ці вимоги не поширюються на обладнання, що працює на шахтах, рудниках, під водою та в космосі.

Заземленню підлягають корпуси всіх джерел живлення та електрозварювального обладнання. Якщо в пересувному обладнанні заземлення виконати складно, то повинен бути пристрій захисного вимикання. Ручки настройки необхідно виготовляти з ізолювального матеріалу. Забороняється використовувати як зворотний дріт контури заземлення, метало-конструкції будівель, технологічне обладнання та санітарно-технічні мережі.

При імпульсно-дуговому зварюванні імпульси струму генеруються подачею до дуги підвищеної напруги, тому необхідно, щоб схема керування забезпечувала вмикання імпульсного джерела тільки після основного джерела живлення та збудження дуги. В імпульсних джерелах з нагромаджувачем енергії (конденсаторного типу) повинні бути пристрої для розрядки конденсаторів після закінчення роботи.

Конструкції сучасних джерел живлення виконуються в точній відповідності з діючою системою стандартів безпеки праці: ГОСТ 12.2.007.0-75 "Изделия электротехнические. Общие требования безопасности" та ГОСТ 12.2.007.8-75 "Устройства электросварочные и для



плазменної обробки. Требования безопасности". Стандарти встановлюють вимоги до конструкції, яка зменшує до припустимого рівня дію на людину електричного струму, шуму, ультразвуку, вібрації, теплового випромінювання та інших факторів або запобігає ним.

Стандартом (ГОСТ 14254-96) встановлені вимоги до системи захисту оболонок (кожухів) виробів. Для позначення ступеня захисту використовують дві букви IP (індекс захисту) та дві цифри. Перша цифра означає ступінь захисту персоналу від зіткнення з частинами обладнання, що перебувають під напругою або рухаються всередині оболонки, а також ступінь захисту виробів від потрапляння всередину твердих сторонніх тіл. Друга цифра означає ступінь захисту виробів від потрапляння води.

Значення та розшифровку першої цифри наведено в табл.10.1, а другої – в табл.10.2.

**Таблиця 10.1. Розшифровка першої цифри ступеня захисту обладнання згідно з ГОСТ 14254-96**

Перша цифра	Короткий опис	Визначення
0	Захист відсутній	Спеціальний захист відсутній
1	Захист від твердих тіл розміром більше 50 мм	Захист від доторкання до частин всередині кожуха великої ділянки поверхні людського тіла, наприклад руки, від проникнення твердих тіл розміром більше 50 мм
2	Захист від твердих тіл розміром більше 12 мм	Захист від проникнення всередину кожуха пальців або предметів довжиною не більше 50 мм та від проникнення твердих тіл розміром більше 12 мм
3	Захист від твердих тіл розміром більше 2,5 мм	Захист від проникнення всередину кожуха інструментів, дроту та інших предметів діаметром або товщиною більше 2,5 мм та від проникнення твердих тіл розміром більше 2,5 мм

**Таблиця 10.2. Розшифровка другої цифри ступеня захисту обладнання згідно з ГОСТ 14254-96**

Друга цифра	Короткий опис	Визначення
0	Захист відсутній	Спеціальний захист відсутній
1	Захист від краплин води	Краплі води, що вертикально падають на кожух, не повинні шкідливо діяти на виріб
2	Захист від краплин води при нахилі до 15°	Краплі води, що вертикально падають на кожух, не повинні шкідливо діяти на виріб при нахилі його оболонки на будь-який кут до 15° відносно нормального положення
3	Захист від дощу	Дощ, що падає на кожух під кутом 60° від вертикалі, не повинен шкідливо діяти на виріб

ГОСТ 12.2.007.8-75 встановлює для джерел зварювального струму, що працюють у закритих приміщеннях, мінімальний ступінь захисту IP 11, що працюють на відкритому повітрі під навісом, – IP 21. Практично ж усі зварювальні трансформатори та установки для ручного дугового зварювання мають ступінь захисту IP 22, для автоматичного – IP 21.

Щоб запобігати ураженню електричним струмом, підключати до мережі живлення та відключати від неї зварювальне обладнання, а також спостерігати за їх справним станом у процесі експлуатації повинен лише електротехнічний персонал підприємства. Як правило, ці роботи виконує наладник електрозварювального обладнання, призначений відповідним розпорядженням. Підключення джерел живлення (зварювальних трансформаторів, випрямлячів, установок тощо) до мережі (до розподільного щитка) повинно здійснюватися з використанням комутаційних та захисних апаратів з рознімними контактними з'єднаннями. Кабельна лінія первинного кола від комутаційного апарата до джерела зварювального струму повинна виконуватися переносним гнучким шланговим кабелем з алюмінієвими або мідними жилами, з ізоляцією та в оболонці (шлангу) з гуми чи пластмаси, які не поширюють горіння. Джерело зварювального струму повинно розміщуватися на такій відстані від комутаційного апарата, за якою довжина гнучкого кабелю, що з'єднує їх, не перевищує 10...15 м.

Схема вмикання кількох джерел зварювального струму при їх роботі на одну зварювальну дугу повинна виключати можливість виникнення між виробом та електродом напруги, що перевищує найбільше значення напруги холостого ходу одного з джерел.

Схема вмикання декількох джерел зварювального струму при зварюванні одного виробу повинна виключати можливість появи між електродами сусідніх джерел напруги, яка перевищує напругу холостого ходу одного з джерел.

Джерела зварювального струму, як правило, повинні розміщуватися на відстані не більше 15 м від зварювального поста. Здійснювати перемикання, підключення або відключення в електричних колах зварювального поста можна тільки після повного відключення джерела від мережі комутаційним апаратом на розподільному щиті. При цьому слід пам'ятати: при відключенні лише вимикача, який вбудовано в зварювальне джерело, вхідні затискачі джерела залишаються під напругою.

Не допускається виконувати ремонт зварювальних установок під напругою. Пересувні зварювальні джерела живлення під час їх пересування слід відключати від мережі.

Важливим моментом у створенні безпеки зварника та обслуговуючого персоналу є виконання основних вимог технічних описів обладнання. Ці вимоги полягають у наступному:

1. Необхідно підтримувати в чистоті всі пристрої, очищаючи їх від пилу, бруду, захищати від проникнення вологи. Виконувати огляди та чистку не рідше одного разу на місяць.

2. Перевіряти при встановленні після поточних та капітальних ремонтів опір ізоляції мегомметром на 500 В. Опір ізоляції має бути не менше 2,5 МОм. При цьому слід пам'ятати, що діоди і тиристори повинні бути зашунтовані.

3. Виконувати зварювальні роботи можна лише при наявності кожухів та при зачинених дверцятах на джерелах.

4. Підключати зварювальні кабелі як в одно-, так і в багатопостових системах тільки до безструмових рознімачів. Подавати до рознімачів напругу можна лише після того, як будеш впевнений, що кінці кабелю не торкаються один до другого і одночасно металевій поверхні.

5. При підключенні в установках з примусовою вентиляцією необхідно перевіряти напрям обертання електродвигуна вентилятора.

6. У багатопостових системах кожен зварювальний пост повинен бути захищений запобіжниками.

Правила техніки безпеки для кожного виду зварювальних робіт вказуються у відповідних технологічних картах.

## **10.2. Обмеження напруги холостого ходу трансформаторів**

Під час проведення зварювальних робіт в особливо небезпечних умовах (усередині ємностей, на відкритому повітрі тощо) для підвищення електробезпеки зварника при зміні електрода трансформатори для ручного дугового зварювання обладнуються пристроєм зниження напруги холостого ходу (ПЗНТ). ПЗНТ є допоміжним засобом захисту від ураження струмом.

Згідно з ГОСТ 12.2.007.8-75, ПЗНТ повинний знижувати діючу напругу холостого ходу на вихідних затискачах зварювального кола до значення, що не перевищує 12 В, не пізніше, ніж через 1 с після розмикання зварювального кола. Швидкодія спрацювання ПЗНТ повинна складати 0,02...0,05 с.

Як правило, ПЗНТ, призначені для комплектації трансформаторів з механічним регулюванням, виконуються у вигляді окремих блоків. В тиристорних трансформаторах функцію обмеження напруги холостого ходу виконує схема керування, що впливає на тиристорний фазорегулятор.

### **10.2.1. Пристрої зниження напруги холостого ходу для трансформаторів з механічним регулюванням**

Для трансформаторів з механічним регулюванням використовуються різні схемні рішення пристроїв обмеження напруги холостого ходу. В СРСР серійно випускався пристрій УСНТ-06, до складу якого входить електромагнітний контактор, що керується релейною схемою. Замикальний контакт контактора вмикається послідовно у зварювальне коло між вихідним затискачем вторинної обмотки трансформатора та електродо-

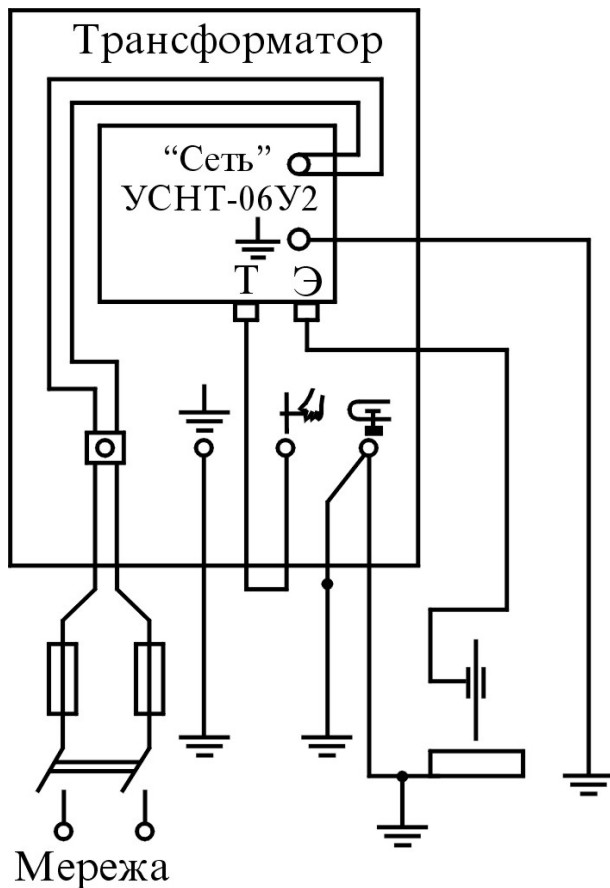


Рис. 10.1. Підключення обмежувача напруги УСНТ-06 до зварювального трансформатора

двома тиристорами VS1 та VS2, що ввімкнуті зустрічно-паралельно. Блок керування складається з діодів VD1 та VD2, резисторів R1 та R2 і контактних реле KV1 та KV2. Блок запалювання включає у себе реле KV1 та KV2, багатообмотковий трансформатор напруги TV2, випрямний міст VD5, діод VD3, тиристри VS3 та VS4, потенціометр RP і резистори R3 та R4.

Блок контролю зварювання складається з реле KV2, котушка якого зашунтована конденсатором C2, та випрямного мосту VD6, що підключений до вторинної обмотки підвищувального трансформатора TV3. Первинна обмотка цього трансформатора підключена до вторинної обмотки трансформатора струму ТА.

Робота пристрою здійснюється у наступному порядку.

тримачем (рис.10.1). Блок УСНТ-06 встановлюється на трансформаторах ТДМ-317-1, ТДМ-401-1 та ТДМ-503-1 і забезпечує зниження напруги холостого ходу трансформатора до 12 В за час не більше 1с після обриву дуги. Таким чином забезпечується безпека зварника протягом часу зміни електродів.

Прикладом розробленого в Україні універсального пристрою для обмеження напруги холостого ходу може служити пристрій, схему якого наведено на рис.10.2.

Пристрій складається з наступних блоків: тиристорного ключа 1, блока керування тиристорами 2, зварювального трансформатора 3, блока запалювання 4, трансформатора струму 5, трансформатора напруги 6, блока контролю 7.

Тиристорний ключ утворений

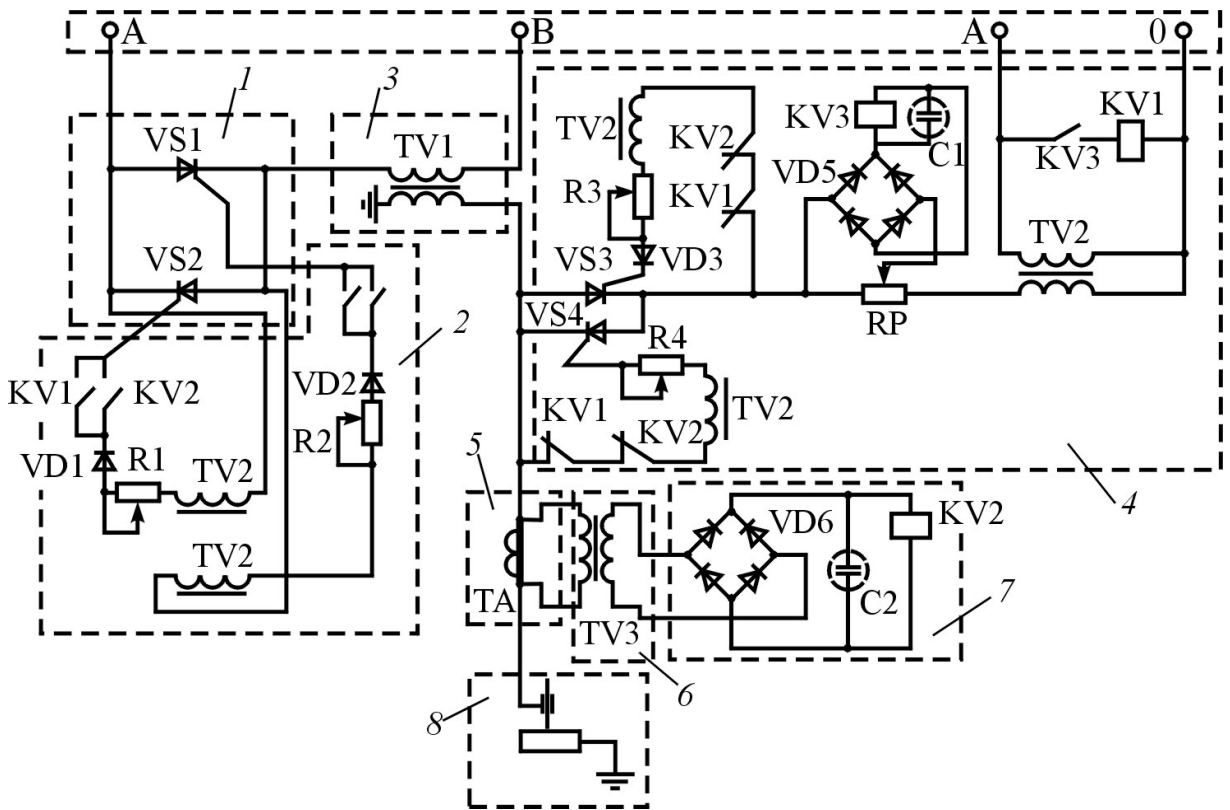


Рис. 10.2. Принципова електрична схема пристрою для обмеження напруги холостого ходу трансформатора

При підключенні первинної обмотки зварювального трансформатора до мережі живлення в ній не буде струму тому, що тиристорний ключ закритий. Коли до первинної обмотки буде подано напругу, відповідно з'явиться напруга й на його вторинних обмотках, внаслідок чого відкриваються тиристири VS3 або VS4. При цьому через потенціометр RP та вторинну обмотку зварювального трансформатора протікає струм силою 0,5 А, який створює падіння напруги в 1,6 В на потенціометрі і, відповідно, на вході випрямного мосту VD5. Такої напруги недостатньо для спрацювання реле KV3. Внаслідок цього напруга на тримачі електрода 8 складає 10,4 В, що задовольняє вимогам техніки безпеки.

При замиканні електрода на заземлений виріб, що зварюється, струм, який протікає через потенціометр, зростає до 3,75 А, а спад напруги збільшується до 12 В. При цьому спрацьовує реле KV3 та вмикає реле KV1. Останнє подає напругу на відпираючі електроди тиристорів VS1 та VS2, які підключають зварювальний трансформатор до живильної мережі.

Розпочинається процес зварювання. Одночасно з вмиканням реле KV1 тиристорний ключ (тиристори VS3, VS4) закривається і через деякий час (визначається ємністю конденсатора C1) реле KV3 вимикається та вимикає реле KV1. Процес зварювання при цьому не припиняється тому, що у роботу вступає реле KV2, яке шунтує контакти реле KV1.

Поки триває процес зварювання, через первинну обмотку трансформатора ТА тече струм, який наводить у вторинній обмотці ЕРС, що подається на котушку реле KV2 по колу: трансформатор TV3 – випрямний міст VD6. При згасанні дуги струм у трансформаторі ТА спадає до нуля і реле KV2 з витримкою часу 5 с (забезпечується конденсатором C2) вимикається, що приводить до зняття напруги з електродів керування тиристорами VS1 та VS2, закриття ключа 1 і відмикання зварювального трансформатора.

Для поновлення процесу зварювання достатньо доторкнутися електродом до зварного виробу.

Цей пристрій є універсальним тому, що може бути використаним як для всіх типів зварювальних трансформаторів, так і для керування трифазними випрямлячами при зварюванні постійним струмом.

### 10.2.2. Обмеження напруги холостого ходу тиристорних трансформаторів

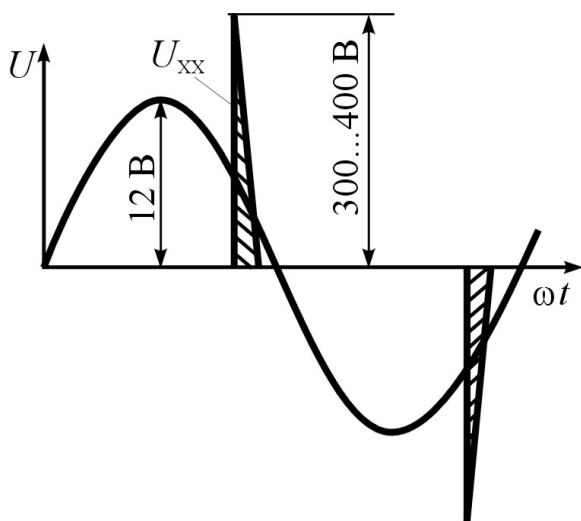


Рис. 10.3. Накладання вимірювального імпульсу напруги на криву напруги холостого ходу тиристорного трансформатора

Для обмеження напруги холостого ходу без шкоди для стабільного горіння зварювальної дуги в тиристорних трансформаторах використовується схема, що ґрунтується на імпульсному вимірюванні провідності міжелектродного проміжку.

У режимі холостого ходу у зварювальне коло інжектуються короточасний (10...20 мкс) імпульс напруги з амплітудою 300...400 В

(рис.10.3). Діюче значення напруги холостого ходу при частоті накладання імпульсів 100 Гц не перевищує 12 В. Через свою малу тривалість вимірювальні імпульси безпечні для людини, але забезпечують проходження у зварювальному колі імпульсів струму з амплітудою декілька ампер при високому опорі між електродом та виробом. Висока швидкість зростання імпульсного струму дає змогу легко виділити його за допомогою трансформатора струму з одним первинним витком, який навантажений на послідовно з'єднані конденсатор і резистор.

Імпульсний сигнал з резистора подається у схему керування тиристорного трансформатора, а низькочастотний сигнал, пропорційний зварювальному струму, виділяється на конденсаторі. Високовольтний вимірювальний імпульс сприяє пробою міжелектродного проміжку та поліпшенню збудження зварювальної дуги.

Описане схемне рішення доцільно використовувати в тиристорних трансформаторах з колом імпульсної стабілізації, в яких стабілізуючий імпульс виконує й функцію вимірювання.

### **Контрольні питання**

1. Якими нормативними документами регламентуються правила техніки безпеки та охорони праці при роботі зі зварювальними джерелами живлення?
2. Як позначаються ступені захисту кожухів джерел живлення?
3. У чому полягають основні правила техніки безпеки при експлуатації джерел зварювального струму?



## СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. *Александров А.Г., Заруба И.И., Пиньковский И.В.* Эксплуатация сварочного оборудования: Справочник. – К.: Будівельник, 1990. – 224 с.
2. *Александров А.Г., Милютин В.С.* Источники питания для дуговой сварки. – М.: Машиностроение, 1982. – 79 с.
3. *Андреев В.В.* Источники питания сварочной дуги. (Общие сведения. Классификация источников питания, области применения) // Сварщик. – 1999. – № 2 (6). – С.26–28.
4. *Андреев В.В.* Источники питания сварочной дуги. (Источники питания переменного тока. Сварочные трансформаторы) // Сварщик. – 1999. – № 3 (7). – С.26–28.
5. *Андреев В.В.* Источники питания сварочной дуги. (Источники питания постоянного тока. Сварочные выпрямители) // Сварщик. – 1999. – № 4 (8). – С.26–28.
6. *Андреев В.В.* Источники питания сварочной дуги. (Агрегаты и преобразователи. Сварочные генераторы) // Сварщик. – 1999. – № 5 (9). – С.25–28.
7. *Андреев В.В.* Источники питания сварочной дуги. (Инверторные источники питания) // Сварщик. – 1999. – № 6 (10). – С.25–28.
8. *Андреев В.В., Москович Г.Н.* Однофазные сварочные выпрямители промышленной частоты // Автоматическая сварка. – 1997. – № 2. – С.39–41.
9. *Браткова О.Н.* Источники питания сварочной дуги: Учебник. – М.: Высшая школа, 1982. – 182 с.
10. *Бункин П.Я., Донской А.В.* Многопостовые сварочные системы. – Л.: Судостроение, 1985. – 227 с.
11. *Гецкин О.Б., Яров В.М.* Опыт создания высокоэффективного сварочного оборудования в НПП "Технотрон" // Сварочное производство. – 2000. – № 5. – С.28–32.
12. *Горбач В.Д.* Технология сварки и сварочное оборудование в судостроении // Сварочное производство. – 1995. – № 5. – С.8–10.
13. *Горбачев Г.Н., Чеплыгин Е.Е.* Промышленная электроника. – М.: Энергоиздат, 1988. – 320 с.
14. *Джендубаев З.Р.* Асинхронный сварочный генератор // Автоматическая сварка. – 1992. – № 1. – С.53–54.
15. *Дюргеров Н.Г., Сагиров Х.Н., Ленивкин В.А.* Оборудование для импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 80 с.
16. *Закс М.И., Каганский Б.А., Печенин А.А.* Трансформаторы для электродуговой сварки. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр.отделение, 1988. – 136 с.

17. Инверторные источники питания сварочной дуги ПО "Коммунар" // *Н.А. Горяинов, Г.В. Печенкин, В.К. Рисованный* и др. // Сварщик. – 2000. – № 4 (14). – С.8–10.
18. К вопросу разработки отечественных сварочных агрегатов / *И.И. За-руба, В.В. Андреев, Г.Н. Москович* и др. // Автоматическая сварка. – 1999. – № 12. – С.50–52.
19. *Корниенко А.Н.* Развитие источников питания и аппаратов управления электрической сваркой // Автоматическая сварка. – 1997. – № 8. – С.41–49.
20. *Короткова Г.М.* Источники питания для сварки. – Куйбышев: КАИ, 1980. – 56 с.
21. *Лебедев В.К.* Тенденции развития источников питания для дуговой сварки // Автоматическая сварка. – 1995. – № 5. – С.3–6.
22. *Милютин В.С., Коротков В.А.* Источники питания для сварки: Учеб. пособие. – Челябинск: Металлургия Урала, 1999. – 368 с.
23. Оборудование для дуговой сварки: Справ. пособие / Под ред. *В.В. Смирнова*. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отделение, 1986. – 656 с.
24. *Патон Б.Е., Дудко Д.А., Коротынский А.Е.* Источники питания на основе аккумуляторов для дуговой сварки // Автоматическая сварка. – 1999. – № 1. – С.29–33.
25. *Пейсахович В.А.* Оборудование для высокочастотной сварки металлов. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отделение, 1988. – 208 с.
26. *Резницкий А.М., Коцюбинский В.С.* Электротехника для сварщиков. – М.: Машиностроение, 1987. – 144 с.
27. *Розаренов Ю.Н.* Оборудование для электрической сварки плавлением. – М.: Машиностроение, 1987. – 208 с.
28. *Солнцев Ю.П., Пряхин Е.И., Войткун Ф.* Материаловедение. – М.: МИСИС, 1999. – 600 с.
29. Схемотехника инверторных источников питания для дуговой сварки: Учеб. пособие / *Е.Н. Верецаго, В.Ф. Квасницкий, Л.Н. Мирошниченко* и др. – Николаев: УГМТУ, 2000. – 283 с.
30. Технология и оборудование сварки плавлением / *Г.Д. Никифоров, Г.В. Бобров, В.М. Никитин* и др. – М.: Машиностроение, 1986. – 320 с.
31. Электросварочное оборудование фирмы "СЭЛМА" // Сварочное производство. – 1993. – № 5 – С.10–13.

## ДОДАТОК 1

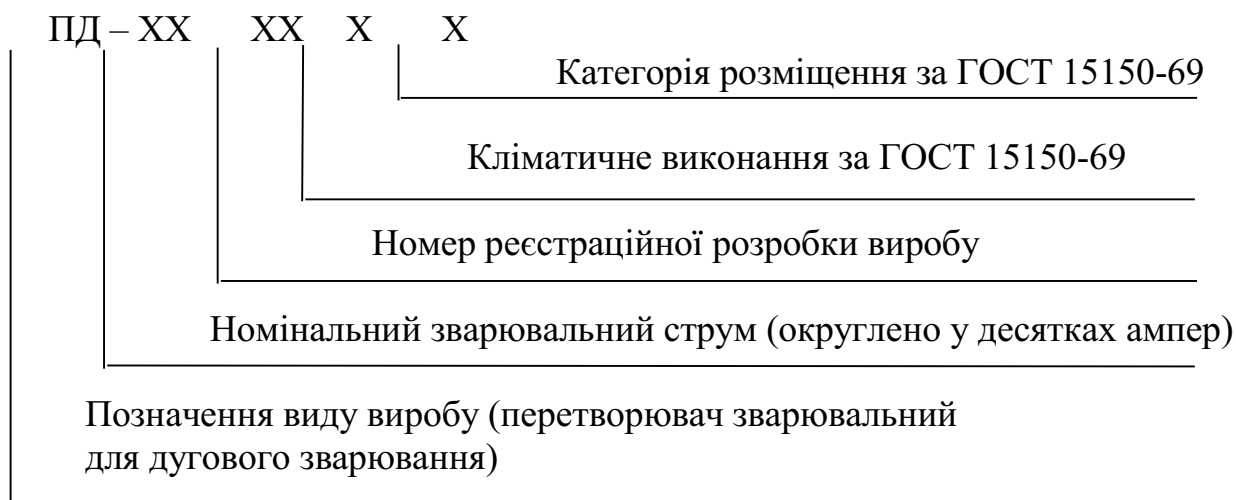
### СТРУКТУРИ УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ЗВАРЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ЖИВЛЕННЯ

#### 1. Структура умовного позначення агрегатів (ГОСТ 2402-82)

АД	Х – ХХ	ХХ	Х	Х
				<p>Категорія розміщення за ГОСТ 15150-69</p> <p>1 – для роботи на відкритому повітрі; 2 – у приміщеннях, де коливання температури й волога неістотно відрізняються від коливань на відкритому повітрі; 3 – у зачинених приміщеннях, де коливання температури й вологості, дія піску та пилу істотно менше ніж на відкритому повітрі; 4 – у приміщеннях із штучним регулюванням кліматичних умов; 5 – у приміщеннях із підвищеною вологістю)</p> <p>Кліматичне виконання за ГОСТ 15150-69</p> <p>(ХЛ – для експлуатації в районах з холодним кліматом, У – у районах із помірним кліматом, Т – у районах із тропічним кліматом)</p> <p>Номер реєстраційної розробки виробу</p>
				<p>Номинальний зварювальний струм (округлено у десятках ампер)</p>
				<p>Умовне позначення типу приводного двигуна (Б – карбюраторний, Д – дизель)</p>
				<p>Позначення виду виробу (агрегат зварювальний із двигуном внутрішнього згорання)</p>

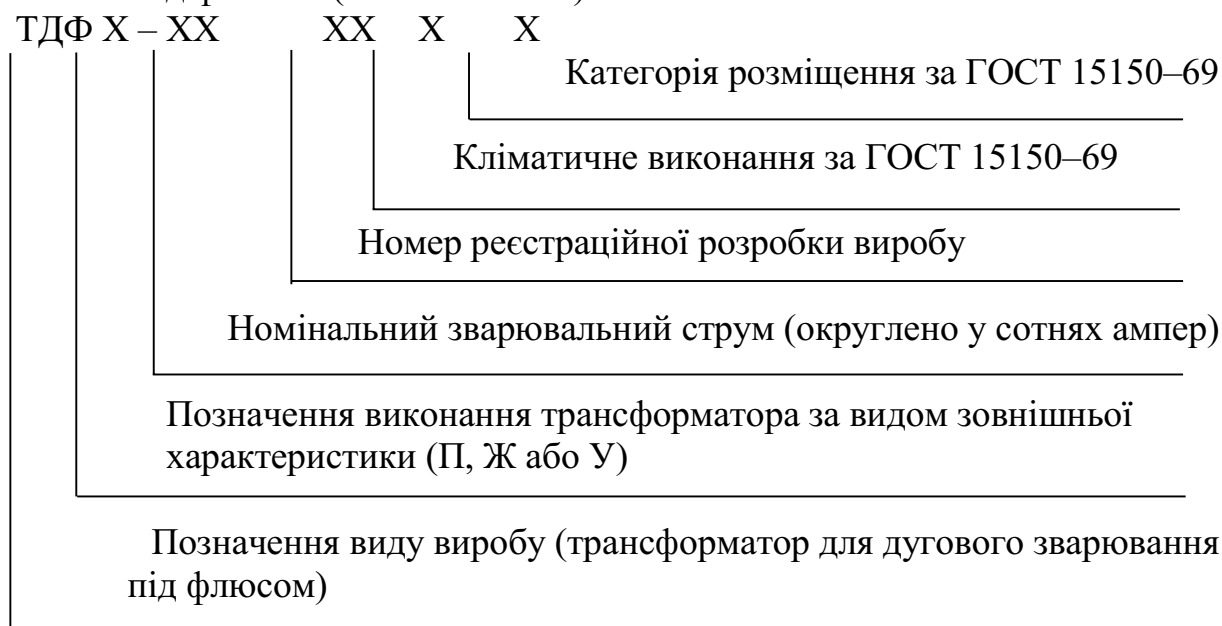
*Примітка.* Значення номінального зварювального струму в десятках ампер округлюють до найближчого цілого числа.

## 2. Структура умовного позначення перетворювачів (ГОСТ 7237-82)



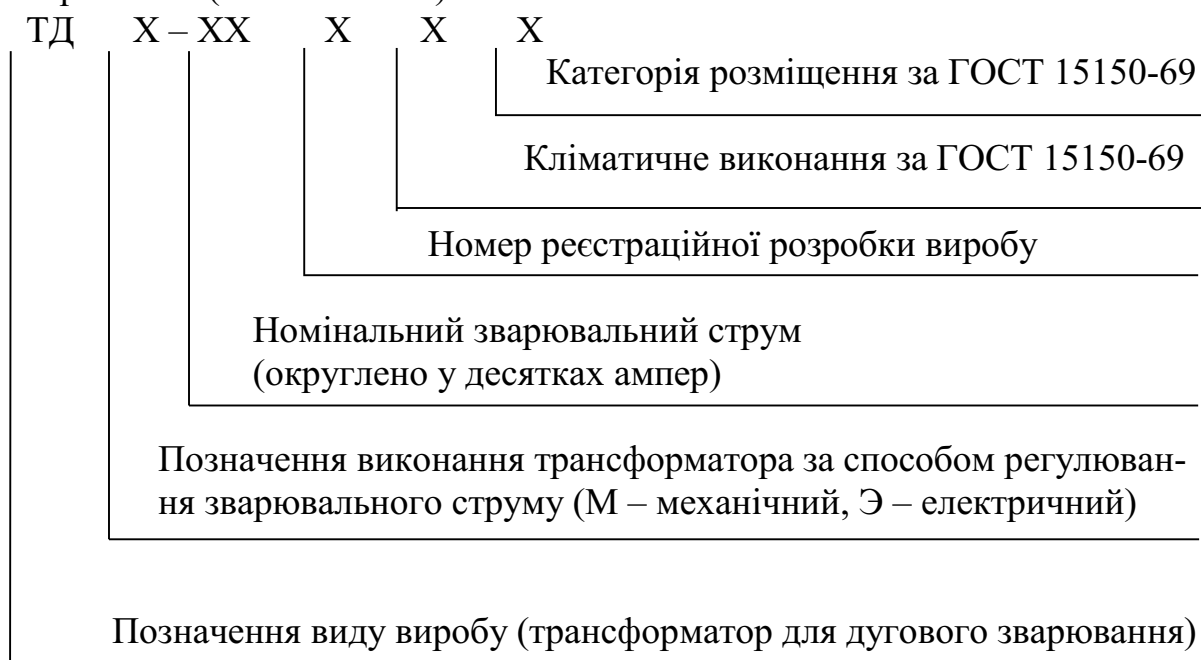
*Примітка.* Значення номінального зварювального струму в десятках ампер округлюють до найближчого цілого числа.

## 3. Структура умовного позначення трансформаторів для автоматичного зварювання під флюсом (ГОСТ 7012-77)



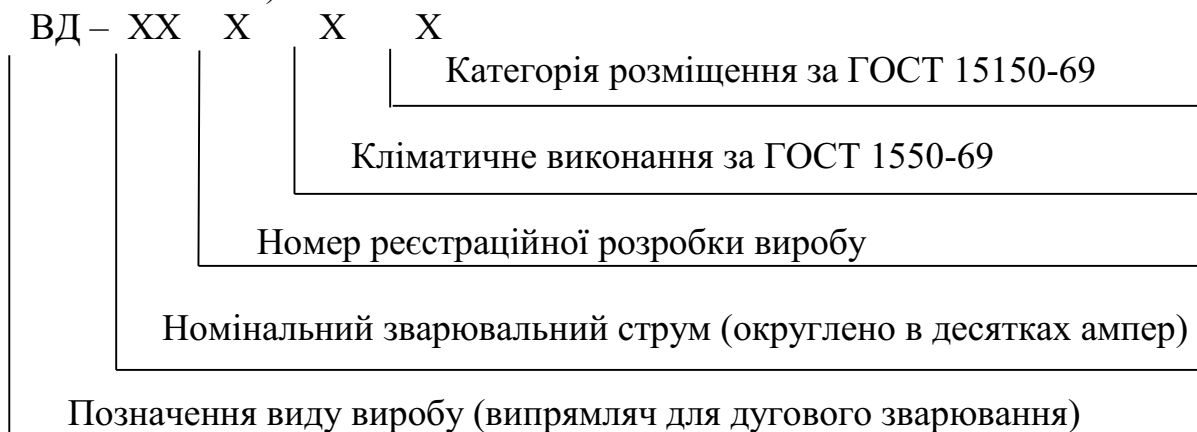
*Примітка.* Значення номінального зварювального струму у сотнях ампер для трансформаторів на 630 А округлюють до 6.

4. Структура умовного позначення трансформаторів для ручного дугового зварювання (ГОСТ 95-77Е)



*Примітка.* При позначенні трансформаторів з номінальним струмом 125 і 315 А значення номінального струму округлюють до 12 та 31 відповідно.

5. Структура умовного позначення випрямлячів для дугового зварювання (ГОСТ 13821-77Е)

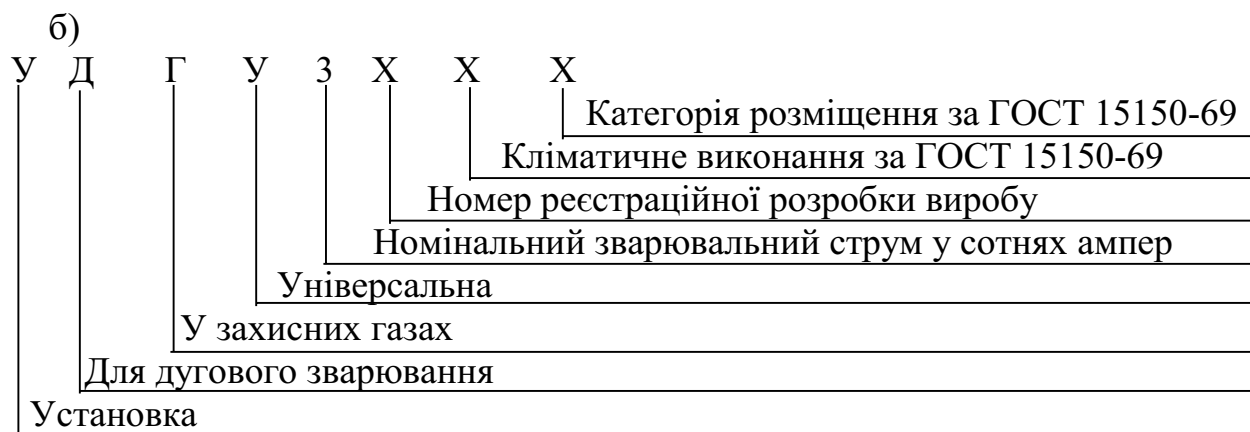
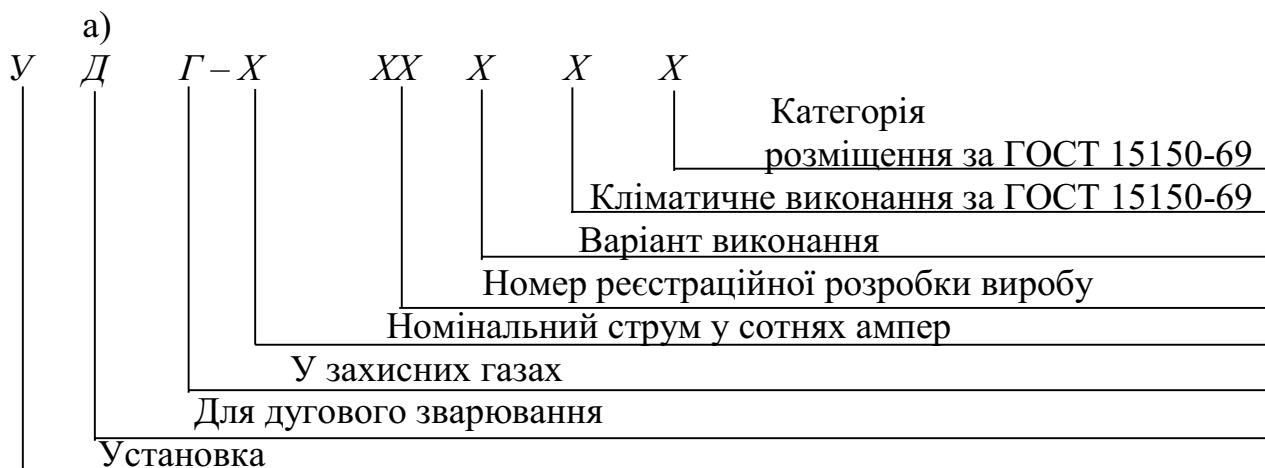


*Примітки:*

1. Для випрямлячів на струми 125, 315 та 1250 А у десятках ампер значення струмів округлюють до 12, 30 та 120.

2. Випрямлячі для зварювання в середовищі активних та інертних газів мають таку саму структуру умовного позначення з додаванням до позначення виду виробу позначення способу захисту дуги: Г – активні гази; И – інертні.

6. Структура умовного позначення установок для зварювання неплавким (вольфрамовим) електродом: а) (ТУ 539.073-78); б) (ТУ 739.302-82)



## ДОДАТОК 2

Таблиця 2.1. Технічні характеристики однополюсних трансформаторів для дугового зварювання

Спосіб зварювання	Марка (модель)	Номинальний зварювальний струм, А	Номинальна робоча напруга, В	Напруга холостого ходу, В	Межі регулювання зварювального струму, А	Межі регулювання робочої напруги, В	Режим роботи, ПН %	ККД, %	Коефіцієнт по-тужності
Ручне дугове покритими електродами	ТД-102	160	26,4	80	60...175	22...27	20	72	0,48
	ТД-306	250	30,0	80	100...300	24...32	20	78	0,5
	ТД-502	500	40,0	80	100...560	24...42	60	88,5	0,85
	ТДМ-121	125	—	50	50...125	—	15*	—	—
	ТДМ-165	160	26,0	62	55...170	22...27	25	68	0,54
	ТДМ-180	180	—	75	45...180	—	20*	—	—
	ТДМ-250	250	—	72	20...285	—	20*	—	—
	ТДМ-254	250	30,0	62	30...250	23...30	25	76	0,56
	ТДМ-259	250	30	75	90...260	-	20	70	—
	ТДМ-317	315	33,0	80	60...370	23...34	60	86	0,56
	ТДМ-317-1	315	33,0	12	60...360	23...34	60	86	0,56
	КИ009-315	315	32,0	—	90...315	—	60*	63	—
	ТДМ-401	400	36,0	80	80...460	23...38	60	86	0,60
	ТДМ-401-1	400	36,0	12	80...460	23...38	60	86	0,60
	ТДМ-411	400	—	80	50...420	—	10*	—	—
	ТДМ-503	500	40,0	80	90...560	24...42	60	88	0,65
ТДМ-503-1	500	40,0	80	90...560	24...42	60	86	0,65	
ТДМ-503-2	500	40,0	80	90...560	24...42	60	86	0,85	
КИ002-500	500	40,0	63	100...500	—	60*	85	—	

Продовж. табл.2.1

Спосіб зварювання	Марка (модель)	Номинальний зварювальний струм, А	Номинальна робоча напруга, В	Напруга холостого ходу, В	Межі регулювання зварювального струму, А	Межі регулювання робочої напруги, В	Режим роботи, ПН %	ККД, %	Коефіцієнт продуктивності
Ручне дугове покритими електродами	ТДМ-505	500	-	75	80...420	-	60	88	0,65
	СТШ-250	250	25,0	60	70...250	-	20	86	0,57
	СТШ-500	500	30,0	60	145...650	-	60	90	0,53
	СТШ-500-80	500	30,0	80	60...650	-	60	92	0,62
	ТСМ-250	250	20,0	60	92...250	-	20	69	0,55
	ТСМ-500	500	40,0	68	60...700	-	40	82	0,69
	ТДЭ-101	100	24,0	42	40...110	22...24	20	60	0,90
	ТДЭ-251	250	30,0	50	90...260	24...30	20	65	0,80
Автоматичне під флюсом	ТДЭ-402	400	44,0	12	80...430	25...46	60	86	0,61
	ТДФ-1001	1000	44,0	80	400...1200	36...44	100*	87	-
	ТДФ-1601	1600	60,0	110	600...1800	34...60	100*	88	-
	ТДФ-2001	2000	50,0	80	600...2200	-	100*	89	-
	ТДФЖ-1002	1000	56,0	-	300...1200	30...56	100*	86	-
	ТДФЖ-2002	2000	76,0	-	600...2200	32...76	100*	88	-

Примітка. Характеристики, позначені \*, відповідають режиму роботи джерела ПВ.



Таблиця 2.2. Технічні характеристики однопостових перетворювачів і агрегатів для дугового зварювання

Спосіб зварювання	Марка (модель)	Параметри						Тип генератора
		Номинальний зварювальний струм, А	Межі регулювання зварювального струму, А	Напруга холостого ходу генератора, В	Номинальна робоча напруга, В	Режим роботи, ПН %		
Ручне дугове покритими електродами, механізоване під флюсом	ПСО-300-2	315	45...315	90	32	60	ГСО-300	
	ПСО-315 М	315	45...315	90	32	60	ГСО-300 М	
	ПД-502	500	75...500	90	40	60	ГД-502	
Механізоване та автоматичне в середовищі захисних газів	ПСГ-500-1	500	60...500	-	60	60	ГСГ-500-1	
	АСБ-300-7	315	45...315	Не більше 100	32	60 (315 А) 100 (240А)	ГСО-300-5	

*Перетворювачі з колекторними генераторами*

*Агрегати з колекторними генераторами*

Спосіб зварювання	Марка (модель)	Номинальний зварювальний струм, А	Межі регулювання зварювального струму, А	Напрята холостого ходу генератора, В	Номинальна робоча напруга, В	Режим роботи, ПН %	Тип генератора
Ручне дугове покритими електродами	ПАС-400	400	120...600	Не більше 100	40	45 (500 А) 100 (400 А)	СПП-3
	АДБ-309	315	15...350	Не більше 100	32	35 (350 А) 60 (315 А) 100 (240 А)	ГД-303
	АДБ-311	315	15...315	Не більше 100	32	60 (315 А) 100 (240 А)	ГД-305
	АДД-303	315	45...315	Не більше 100	32	60 (315 А) 100 (240 А)	ГСО-300-12
Ручне дугове покритими електродами та механізоване в середовищі захисного газу	АСД-3-1, АСДП-500	500	120...500	Не більше 100	40	60 (500 А) 100 (400 А)	СПП-3

<i>Агрегати з вентильними генераторами</i>							
Ручне дугове покритими електродами	АДБ-318	315	45...350	Не більше 100	32	35 (350 А) 60 (315 А) 100 (240 А)	ГД-312
	АДБ-3120	315	15...350	Не більше 100	32	35 (350 А) 60 (315 А) 100 (240 А)	ГД-314
	АДД-4001 С	400	60...450	Не більше 100	36	60 (400 А)	–
Ручне дугове покритими електродами, (2 поста) механізоване під флюсом (1 пост)	АДД-502	2×315/500	2 (60...330) 250...500	Не більше 100	2х32/40	60 (2×330 А) 80 (2×315 А) 100 (500 А)	–
	<i>Перетворювач з вентильним генератором</i>						
Ручне дугове покритими електродами	ПД-305	315	40...350	90	32	60	ГД-312



Таблиця 2.3. Технічні характеристики однополюсових зварювальних випрямлячів

Спосіб зварювання	Марка (модель)	Номинальний зварювальний струм, А	Номинальна робоча напруга, В	Напруга холостого ходу, В	Межі регулювання зварювального струму, А	Межі регулювання робочої напруги, В	Режим роботи, ПН %	ККД, %	Примітка
Ручне дугове покритими електродами	ВД-131	$\frac{130}{180}$	$\frac{25}{27}$	$\frac{100}{80}$	$\frac{35...130}{38...180}$	–	20*	–	У чисельнику – для постійного струму, у знаменнику – для змінного струму
	ВД-306	315	32	70	45...315	–	60	72	
	ВД-306 М	315	31	75	45...315	–	15*	–	
	ВД-396 С	315	32	75	80...320	–	60*	–	
	ВД-401	400	36	80	50...450	–	60	69	
Ручне дугове покритими електродами, механізоване під флюсом	ВД-502-2	500	40	80	50...500	–	60	78	–
	ВС-300 А	315	34	–	50...135	16...34	60*	75	
Механізоване у середовищі захисного газу	ВС-600 М	630	50	–	100...630	20...50	60*	83	
	КИГ-302	315	–	63	50...350	16...32	60*	–	
	ВДГ-303	315	40	–	50...315	16...40	60*	76	

Спосіб зварювання	Марка (модель)	Номинальний зварювальний струм, А	Номинальна робоча напруга, В	Напруга холостого ходу, В	Межі регулювання зварювального струму, А	Межі регулювання робочої напруги, В	Режим роботи, ПН %	ККД, %	Примітка
Механізоване у середовищі захисного газу	ВДГ-304	315	32	45	50-350	—	80*	—	
	ВДГ-303-3	315	40	60	40-325	—	60*	—	
	ВДГ-401	400	42	75	80-500	—	60*	—	—
	ВДГ-601	630	66	90	100-700	18-66	60*	82	
	ВСЖ-303	315	34	—	50...315	16...34	60*	76	
Ручне дугове покритими електродами, механізоване під флюсом та в середовищі захисних газів	ВДУ-506	500	$50 \frac{50}{46}$	80	$60...500$ $50...500$	$18...50$ $22...46$	60*	79	У чисельнику при роботі на жорстких характеристиках, у знаменнику – на спадних характеристиках
	ВДУ-506 С	500	$50 \frac{50}{46}$	85	$60...500$ $50...500$	$18...50$ $22...46$	60*	—	
	ВДУ-601	630	$56 \frac{52}{52}$	90	$65...630$ $50...630$	$18...56$ $22...52$	60*	75	
	ВДУ-601 С	630	$52 \frac{50}{50}$	85	$60...630$ $50...500$	$18...52$ $22...50$	60*	—	

Ручне дугове по- критими електро- дами, ме- ханізоване під флюсом та в се- редовищі захис- них газів	КИУ-301	315	$\frac{32}{38}$	72	$\frac{50...315}{60...315}$	$\frac{22...32}{18...38}$	60*	—	У чисельнику при роботі на жорстких характеристиках, у знаменнику – на спадних характе- ристиках
	КИУ-501	500	$\frac{50}{46}$	85	$\frac{60...500}{50...500}$	$\frac{18...50}{22...46}$	60*	83	
	ВДУ-1203С	1250	—	—	25...1250	—	100*	—	
Механізоване під флюсом та в се- редовищі захис- них газів	ВДУ-1201	1250	56	85	300...1250	24...56	100*	—	
	ВДУ-1202	1250	56	—	250...1250	24...56	100*	—	
	ВДУ-1250	1250	44	55	250...1250	24...56	100*	—	

*Примітка.* Характеристики, позначені \*, відповідають режиму роботи джерела ПВ.

Таблиця 2.4. Технічні характеристики джерел живлення для імпульсно-дугового зварювання

Марка	Частота імпульсів, імп/с	Амплітуда струму імпульсу, А	Тривалість імпульсу, мс	Кількість ступенів регулювання	
				струму імпульсу	тривалості імпульсу
ИИП-1	50	450...850	1,5...2,0	4	3
ИИП-2	50	500...1000	1,6...2,8	3	3
ГШИ-3	28...94	240...800	0,9...1,2	–	4
ГИ-ИДС-1	50, 100	400...1200	1,4...2,5	–	3
ГИ-ИДС-2	100	200...1200 ± 10 %	0,8...3,0	4	–
ГИД-1	50, 100	400...1200	1,5...3,5	3	3
ВДГИ-301	50, 100	300...1000	до 4	–	–
ИУП-1	50, 100	0...800	0...6	6	–
ВДГИ-302	50, 100	300...750	1,5...5,0	–	–
И-169	30...300	450...800	1,5...5,0	–	–



Таблиця 2.5. Технічні характеристики джерел живлення для аргондугового зварювання

Марка	Рід струму	Номинальний зварювальний струм, А	Напруга холостого ходу, В	Номинальна робоча напруга, В	Межі регулювання зварюального струму, А	Межі регулювання робочої напруги, В	Режим роботи, ПН %	Примітка
УДГ-301-1	Змінний (АС)	315	72	16	15...315	–	60*	Плавне регулювання часу зниження сили струму
УДГ-501-1	АС	500	72	16	40...500	–	60*	
УДГ-81	Постійний (DC)	50	–	–	8...80	–	–	–
УДГ-82	DC	80	80	–	8...80	–	20*	
УДГ-161	DC	150	40	–	5...150	–	–	
УДГ-180	АС	180	80	–	35...180	–	20*	
УДГ-350	DC	315	80	–	12...315	–	60*	
УДГ-251	АС/DC	250	80	–	5...250	–	35*	
УДГ-351	АС/DC	315	80	–	5...350	–	60*	
УДГУ-301	АС/DC	315	72/65	16/12	15...315	–	60	
УДГУ-302	АС/DC	315	80/100	–	10...315	–	60*	
ТИР-300Д	АС/DC	315	65	30	10...315	–	100	
ТИР-630	АС/DC	630	65	–	30...630	–	60*	

Продовж. табл.2.5

Марка	Рід струму	Номинальний зварювальний струм, А	Напруга холостого ходу, В	Номинальна робоча напруга, В	Межі регулювання зварюального струму, А	Межі регулювання робочої напруги, В	Режим роботи, ПН %	Примітка
ВСП-160	DC	160	—	—	40...180	16...34	60	Автоматичне регулювання амплітуди та швидкості наростання сили струму на початку зварювання та плавне зниження в кінці зварювання
ВСП-315	DC	315	—	—	50...350	16...34	60	
ВСП-1000	DC	1000	—	—	150...1100	16...60	60	
ВСВ-1000	DC	1000	45	30	25...1000	—	60	—
ВСВ-2000	DC	2000	45	30	25...2000	—	60	
ВСВУ-40	DC	40	—	30	2...50	2...15	60	Модуляція форми імпульсів струму від прямокутної до трикутної
ВСВУ-80	DC	80	—	30	3...90	3...30	60	
ВСВУ-160	DC	160	—	30	5...180	5...60	60	
ВСВУ-315	DC	315	—	30	8...350	8...120	60	
ВСВУ-630	DC	630	—	30	10...700	10...200	60	
ИСВУ-315	АС/DC	315	60	—	20...350	20...150	60*	
ИСВУ-630	АС/DC	630	80	—	30...700	—	—	

Примітка. Характеристики, позначені \*, відповідають режиму роботи джерела ПВ.

Таблиця 2.6. Технічні характеристики трансформаторів для електрошлакового зварювання

Марка	Номинальний зварювальний струм, А	Напруга холостого ходу, В	Діапазон регулювання робочої напруги, В	Кількість ступенів регулювання напруги	Режим роботи, ПН %	Кількість фаз
ТШС-1000-1	1000	56	38...62	18	80	1
ТШС-1000-3	1000	56	38...62	18	80	3
ТШС-3000-1	3000	46	5...46	10	100	3
ТШС-3000-3	3000	56	8...63	48	100	3
ТШП-10000-1	10000	72	40...72,4	4	100	1
ТРМК-1000-1	1000	62	21...57	3	100	1
ТРМК-3000-1	3000	61	18...57	3	100	1
ТЭШ-3001	3000	–	15...55	–	100	1

Таблиця 2.7. Технічні характеристики електромашинних перетворювачів частоти

Тип перетворювача	Частота струму, Гц	Потужність, кВт	Напруга, В	Зварювальний струм, А	Коефіцієнт потужності навантаження (ємнісний)	Послідовний конденсатор: ємність, мкФ/напруга, В	ККД при номінальному у навантаженні, %
ВПЧ 100-8000	8000	100	800/400	139/278	0,9	–	75
ППЧВ-250-10	10000	250	800	329	0,95	6,2/835	82,3

Таблиця 2.8. Технічні характеристики високочастотних генераторів

Тип генератора	Частота струму, МГц	Потужність коливальна, кВт	Число генераторних ламп	Анодна напруга, кВ	ККД, %	Схема генератора	Схема випрямлення
ВЧГ4-10/0,44	0,44	10	1	7	76	ОК	Рис.7.4, <i>а</i>
ВЧГ4-60/0,066	0,066	60	1	10	80	ДК	
ВЧГ9-60/0,44	0,44	60	1	10	77	ДКВК	
ВЧГ2-100/0,066	0,066	100	1	10,5...11,5	77	ДК	–
ВЧГ3-100/0,44	0,44	100	1	10	77	ДКВК	
ВЧГ3-160/0,066	0,066	160	1	10,5...11,5	72	ДК	
ВЧС4-160/0,44	0,44	160	1	11	78	ДКВК	Рис.7.4, <i>б</i>
ВЧС5-160/0,44	0,44	160	1	11	79	ОКВК	
ВЧС2-400/0,44	0,44	400	1	11,5	76	ДКВК	
ВЧС2-600/0,44	0,44	600	2	11,5	76		
ВЧС2-1000/0,44	0,44	1000	2	11,5	76		

*Примітка.* ОК – одноконтурна без виносного контуру; ДК – двоконтурна без виносного контуру; ДКВК – двоконтурна з виносним контуром; ОКВК – одноконтурна з виносним контуром.

Таблиця 2.9. Технічні характеристики джерел живлення установок для плазмового зварювання та різання

Марка установки та призначення	Номинальний зварювальний струм, А	Напруга холостого ходу, В	Номинальна робоча напруга, В	Межі регулювання струму, А
УПС-301 (зварювання)	315	80	40	25...315
УПС-403 (зварювання)	400	90	–	70...400
УПС-504 (зварювання)	500	180	–	100...500
УПС-804 (зварювання)	800	180	90	300...800
УПВ-301 (наплавлення)	315	–	18...40	20...315
КАРАТ-60 (різання)	60	300	70...120	20...60
АПР-201 (різання)	200	–	180	150...250
АПР-403 (різання)	400	300	200	150...400
АПР-404 (різання)	400	320	270	200...500
УВПР-0401 (різання)	40	250	125	–
УВПР-0901 (різання)	90	300	100...150	40...90
Київ-4М (різання)	300	200	120...200	100...300
Київ-6М (різання)	315	330	140...260	100...315
УПО-302 (зварювання, наплавлення, напилення)	315	–	20...80	60...315

Таблиця 2.10. Технічні характеристики інверторних джерел живлення

Марка джерела та спосіб зварювання	Номінальний зварювальний струм, А	Напруга холостого ходу, В	Номинальна зварювальна напруга, В	Межі регулювання струму, А	Межі регулювання напруги, В	Режим роботи, ПН %	Коефіцієнт потужності	ККД, %
ВДЧ-91 (ММА) ВДЧ-122 (ММА) ВД-161 (ММА) ПІРС-160 (ММА, ТІГ, МІГ/МАГ) ПІРС-315 (ММА, ТІГ, МІГ/МАГ) ПІРС-500 (ММА, ТІГ, МІГ/МАГ) TRANSPOCKET: 1400 (ММА, ТІГ) 330 (ММА, ТІГ) 2000 (ММА, ТІГ) TRANSSYNERGIC: 330 (МІГ/МАГ) 4000 (МІГ/МАГ) 5000 (МІГ/МАГ)	90	100	–	50...90	–	–	–	–
	125	90	25	20...125	–	20*	–	–
	160	–	–	20...180	20...30	60*	–	85
	150	65	–	5...150	12...28	60*	–	85
	315	80	–	15...350	14...38	–	–	85
	500	80	–	15...500	14...42	–	–	85
	140	–	–	5...140	–	35	–	–
	300	–	–	3...330	–	60*	–	–
	200	–	–	3...200	–	35	–	–
	300	50	40	3...330	0...40	60	0,97	88
	400	–	–	3...400	–	50*	–	–
	500	–	–	3...500	–	40*	–	–

TRANSPULSSYNERGIC: 2700 (MIG/MAI) 5000 (MIG/MAI)	250	-	-	-	3...270	-	40*	-	-
	500	-	-	-	3...500	-	40*	-	-
	450	-	-	-	3...450	-	60*	-	-
TIME SYNERGIC (MAI)	160	-	-	-	2...160	-	40	-	-
	200	-	-	-	3...200	-	35	-	-
	150	95	-	-	5...150	-	25*	0,9	85
TRANSTIG: 1600 (MMA, TIG) 2000 (MMA, TIG)	350	109	-	-	20...350	-	60*	0,9	91
	250	106	-	-	5...250	-	60*	0,85	89
	450	65	-	-	5...450	-	60*	0,85	91
TIG 250 DC/AC (MMA, TIG)	250	78	-	-	$\frac{5...250(DC)}{7...250(AC)}$	-	60*	0,9	85
	450	78	-	-	$\frac{5...450(DC)}{7...450(AC)}$	-	60*	0,9	85
	250	106	-	-	5...250	10...26,5	60*	0,9	85
MIG 350 (MIG, TIG)	350	70	-	-	5...350	10...33,5	60*	0,9	89
	500	70	-	-	5...500	10...41	60*	0,9	91
	Aristo 2000:								
LUD 320 (MMA, TIG, MIG/MAI)	320	50	31	-	8...320	-	100*	-	-
	400	50	34	-	8...450	-	60*	-	-
	500 390	80	$\frac{40}{35,6}$	$\frac{10...40}{40...500}$	$\frac{10...500}{40...500}$	$\frac{10...40}{12...40}$	60*	0,9	85
PSS 5000 (MMA, TIG, MIG)	500	80	$\frac{40}{35,6}$	-	$\frac{10...500(DC)}{15...450(AC)}$	-	60*	-	-
	500	80	35,6	-	-	-	60*	-	-

Примітка. Характеристики, позначені \*, відповідають режиму роботи джерела ПВ

Таблиця 2.11. Технічні характеристики баластних реостатів (тривалість циклу роботи 5 хв, ПВ 60 %)

Тип реостату	Номинальний струм, А	Межі регулювання зварювального струму, А	Опір, Ом	Різниця між струмами двох ступенів, А
РБ-201	200	12...200	0,15...2,5	10
РБ-301	315	10...315	0,095...3,0	12
РБ-501	500	25...500	0,06...1,25	25
РБС-300-1	300	40...300	0,1...0,75	10

Таблиця 2.12. Технічні характеристики багатопостових зварювальних випрямлячів

Марка джерела	Номинальний зварювальний струм, А		Діапазон регулювання зварювального струму поста, А	Напруга, В		Число зварювальних постів	ККД, %
	випрямляча	зварювального поста		холостого ходу	номинальна робоча		
ВДМ-1001	1000	315	12...315	70	60	7	90
ВДМ-1601	1600	315	12...315	70	60	9	84
ВДМ-3001	3000	315	12...315	70	60	10	90
ВДМ-1202 С	1250	–	–	75	65	8	93
ВДМ-6303 С	630	–	–	85	70	4	92
ВДМ-4x301	4x315	–	–	80...100	32	4	–
ВДУМ-4x401	4x400	–	100...400	75	36...45	4	75
ВДГМ-1602	1600	200	120...250	40	30	9	–
ВДГМ-1602-1	1600	400	200...400	60	50	5	–
ВДГМ-1602-2	1600	600	400...630	70	60	3	–
ВМГ-5000	5000	315	12...315	70	30...60	30	0,92

*Примітка.* Для випрямлячів номінальний режим роботи – тривалий; для зварювального поста номінальний режим роботи ПВ 60 %.



## ЗМІСТ

<b>ВСТУП</b> .....	3
<b>Глава 1. ЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЗВАРЮВАЛЬНОЇ ДУГИ</b> .....	6
1.1. Збудження дугового розряду .....	6
1.2. Процеси у зварювальній дузі постійного струму. Розподіл потенціалу вздовж дуги .....	7
1.3. Статичні вольт-амперні характеристики зварювальної дуги .....	11
1.4. Стійкість енергетичної системи "джерело живлення – дуга – ванна" .....	16
1.4.1. Стійкість системи при малих відхиленнях струму .....	17
1.4.2. Стійкість системи при відхиленнях довжини дуги .....	21
1.4.3. Стійкість системи при коливаннях напруги живильної мережі .....	25
1.5. Особливості дуги, що живиться однофазним змінним струмом .....	27
1.6. Трифазна зварювальна дуга .....	34
1.7. Класифікація та загальна характеристика зварювальних джерел живлення .....	35
Контрольні питання .....	45
<b>Глава 2. ЗВАРЮВАЛЬНІ ТРАНСФОРМАТОРИ</b> .....	46
2.1. Елементи теорії зварювального трансформатора .....	49
2.2. Трансформатори з механічним регулюванням .....	55
2.2.1. Трансформатори з пересувними обмотками .....	56
2.2.2. Трансформатори з рухомими магнітними шунтами .....	59
2.2.3. Трансформатори з дроселями з повітряним зазором .....	62
2.3. Трансформатори з магнітним регулюванням .....	64
2.4. Тиристорні трансформатори .....	69
2.5. Система фазового керування тиристорних трансформаторів .....	77
2.6. Трансформатори для живлення трифазної дуги .....	82
2.7. Вибір трансформаторів для різних способів зварювання .....	84
Контрольні питання .....	86
<b>Глава 3. МАШИННІ ДЖЕРЕЛА ЖИВЛЕННЯ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ</b> .....	87
3.1. Теоретичні основи роботи зварювальних колекторних генераторів .....	88
3.2. Принцип роботи та характеристики вентильних зварювальних генераторів .....	94
3.3. Динамічні властивості генераторів .....	98
3.4. Загальна характеристика типових промислових зварювальних машинних джерел живлення постійного струму .....	101
3.4.1. Зварювальні перетворювачі і агрегати з колекторними генераторами .....	102
3.4.2. Зварювальні перетворювачі і агрегати з вентильними генераторами .....	105
3.4.3. Агрегати на базі асинхронних, безщіткових генераторів .....	107
Контрольні питання .....	107
<b>Глава 4. ВИПРЯМЛЯЧІ ДЛЯ ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ</b> .....	108
4.1. Принциповий склад зварювального випрямляча .....	109
4.2. Умови роботи напівпровідникових вентилів у зварювальних випрямлячах .....	112
4.3. Багатофазні схеми випрямлення .....	115

4.4. Принципи формування зовнішніх характеристик та регулювання вихідних параметрів зварювальних випрямлячів .....	122
4.5. Однопостові випрямлячі .....	127
4.5.1. Випрямлячі зі спадними зовнішніми характеристиками .....	127
4.5.2. Випрямлячі з жорсткими зовнішніми характеристиками .....	131
4.5.3. Тиристорні зварювальні випрямлячі .....	138
4.6. Вибір випрямлячів для різних способів зварювання .....	146
Контрольні питання .....	148
<b>Глава 5. ДЖЕРЕЛА ЖИВЛЕННЯ ДЛЯ ІМПУЛЬСНО-ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ .....</b>	<b>149</b>
5.1. Електричні характеристики і стабільність процесу імпульсно-дугового зварювання .....	149
5.2. Вимоги до джерел живлення для імпульсно-дугового зварювання .....	154
5.3. Способи формування імпульсного струму та типові схеми імпульсних джерел .....	157
5.4. Імпульсні джерела живлення з нагромаджувачами енергії .....	163
5.5. Імпульсні джерела живлення без нагромаджувачів енергії .....	166
5.6. Особливості настроювання та регулювання вихідних параметрів імпульсних джерел живлення .....	174
Контрольні питання .....	175
<b>Глава 6. ДЖЕРЕЛА ЖИВЛЕННЯ ДЛЯ АРГОНОДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ НЕПЛАВКИМ ЕЛЕКТРОДОМ .....</b>	<b>176</b>
6.1. Спеціалізовані функціональні пристрої джерел живлення .....	178
6.1.1. Початкове запалювання дуги .....	178
6.1.2. Імпульсна стабілізація горіння дуги .....	181
6.1.3. Обмеження постійної складової змінного струму .....	184
6.1.4. Заварювання кратера шва .....	187
6.2. Джерела живлення для зварювання змінним струмом .....	189
6.3. Джерела живлення для зварювання постійним струмом .....	191
6.4. Універсальні джерела живлення для зварювання змінним та постійним струмом .....	196
Контрольні питання .....	202
<b>Глава 7. СПЕЦІАЛІЗОВАНІ ДЖЕРЕЛА ЖИВЛЕННЯ ДЛЯ ЗВАРЮВАННЯ ТА СПОРІДНЕНИХ ПРОЦЕСІВ .....</b>	<b>203</b>
7.1. Джерела живлення для електрошлакового зварювання .....	203
7.2. Джерела живлення для зварювання струмом високої частоти .....	210
7.3. Джерела живлення для електронно-променевого зварювання .....	221
7.4. Джерела живлення для плазмових технологій обробки матеріалів .....	223
Контрольні питання .....	229
<b>Глава 8. ІНВЕРТОРНІ ДЖЕРЕЛА ЖИВЛЕННЯ ДЛЯ ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ .....</b>	<b>230</b>
8.1. Принцип роботи та схемні рішення інверторів струму і напруги .....	231
8.2. Схеми інверторних перетворювачів зварювальних джерел живлення .....	240
8.3. Типові зварювальні інверторні джерела живлення .....	244
8.4. Інверторні джерела живлення на основі акумуляторів .....	258
Контрольні питання .....	261
<b>Глава 9. БАГАТОПОСТОВІ СИСТЕМИ ТА ДЖЕРЕЛА ЖИВЛЕННЯ ...</b>	<b>262</b>
9.1. Визначення параметрів багатопостових систем живлення .....	262

9.2. Схеми живлення зварювальних постів .....	267
9.3. Багатопостові джерела живлення .....	271
9.4. Регулювання струму і напруги на зварювальних постах .....	275
9.5. Особливості багатопостового живлення при імпульсно-дуговому зварюванні .....	280
Контрольні питання .....	282
<b>Глава 10. ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ ТА ОХОРОНА ПРАЦІ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЗВАРЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ЖИВЛЕННЯ .....</b>	<b>283</b>
10.1. Загальні положення техніки безпеки .....	283
10.2. Обмеження напруги холостого ходу трансформаторів .....	288
10.2.1. Пристрої зниження напруги холостого ходу для трансформаторів з механічним регулюванням .....	288
10.2.2. Обмеження напруги холостого ходу тиристорних трансформаторів .....	291
Контрольні питання .....	292
<b>СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ .....</b>	<b>293</b>
<b>ДОДАТОК 1 .....</b>	<b>295</b>
<b>ДОДАТОК 2 .....</b>	<b>299</b>

ДРАГАН Станіслав Володимирович

**ДЖЕРЕЛА ЖИВЛЕННЯ  
ДЛЯ ЗВАРЮВАННЯ ПЛАВЛЕННЯМ**  
Навчальний посібник

Редактор І.А. Маркович  
Комп'ютерна правка Т.В. Пономаренко, О.С. Нойнець  
Комп'ютерна верстка О.С. Нойнець  
Дизайн обкладинки Д.Б. Старощук  
Коректор Н.О. Шайкіна

---

Підписано до друку 09.09.2002. Формат 60×84/16. Папір офсетний.  
Ум. друк.арк. 18,5. Обл.-вид. арк. 19,9. Тираж 300 прим. Вид.№ 16.  
Зам. № 146. Ціна договірна.

---

Видавництво УДМТУ. 54002, м.Миколаїв, вул. Скороходова, 5