

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
„КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ
СІКОРСЬКОГО”

ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОНІКИ
КАФЕДРА ПРОМИЛОВОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ

„На правах рукопису”
УДК 621.314

До захисту допущено
Завідувач кафедри

_____ Ю.С. Ямненко
(підпис) (ініціали, прізвище)

„_____” _____ 201_р.

МАГІСТЕРСЬКА ДИСЕРТАЦІЯ

зі спеціальності _____ 171 Електроніка _____
(код та назва напрямку підготовки або спеціальності)

на тему: «Забезпечення електромагнітної сумісності системи контактного зварювання»

Виконав: студент б курсу, групи ДС – 61м

_____ Спіцин Денис Олегович _____
(прізвище, імя, по батькові) (підпис)

Науковий керівник: доц., к.т.н. Бондаренко О.Ф. _____
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) (підпис)

Консультант: _____ _____
(назва розділу) (вчені ступінь та звання, прізвище, ініціали) (підпис)

Рецензент: доц., к.т.н. Гармаш О.В. _____
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цьому дипломному проекті немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань

Студент _____
(підпис)

Київ – 2018 року

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ
СІКОРСЬКОГО”**

Факультет електроніки
(повна назва)

Кафедра промислової електроніки
(повна назва)

Освітній ступінь магістр

Спеціальність 171 Електроніка
(шифр і назва)

Спеціалізація Електронні системи
(назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

Ю.С. Ямненко
(прізвище ініціали) (підпис)

« ____ » _____ 2018 року

**З А В Д А Н Н Я
НА МАГІСТЕРСЬКУ ДИСЕРТАЦІЮ СТУДЕНТУ**

Спіцину Денису Олегович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації: «Забезпечення електромагнітної сумісності системи контактного зварювання»

Науковий керівник: доц., к.т.н., Бондаренко Олександр Федорович,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «9» лютого 2018 року № 691-с

2. Строк подання студентом дисертації _____

3. Об'єкт дослідження: процес споживання струму від мережі живлення системою контактного зварювання.

4. Предмет дослідження: перетворювачі та алгоритми керування для забезпечення електромагнітної сумісності системи контактного зварювання з мережею.

5. Перелік питань, які потрібно розробити: 1) аналіз етапів процесу контактного зварювання та причин низького рівня ЕМС систем контактного зварювання. 2) аналіз електромагнітної обстановки в сучасних мережах живлення, порівняльний аналіз джерел живлення з прямим споживанням енергії та з накопиченням енергії; обґрунтування вибору предмету дослідження. 3) обґрунтування вибору структури з акумулюванням енергії та

використання в якості накопичувача батареї з суперконденсаторів, а також порівняльний аналіз базових топологій перетворювача вузла заряду. 3) пошук рішень для покращення характеристики окремих вузлів системи заряду в напрямку ЕМС і обґрунтування вибору модульної структури вузла заряду. 4) розробка алгоритму роботи комірок-перетворювачів та розрахунок і підбір основних їх компонентів. 5) розробка імітаційної моделі. 6) аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.

6. Перелік ілюстративного матеріалу _____

7. Перелік публікацій 2 статті за темою магістерської дисертації

8. Консультанти розділів проекту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1-4			
Розділ 5			

9. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів проекту	Примітка
1	Аналіз процесу контактного зварювання та його основних етапів	04.09.17-02.11.17	
2	Порівняльний аналіз існуючих підходів при проектуванні систем контактного зварювання	02.11.17-27.12.17	
3	Аналіз електромагнітної обстановки в сучасних мережах живлення і пошук методів її покращення	11.01.18-13.02.18	
4	Порівняльний аналіз існуючих топологій перетворювачів, вибір базової топології комірки перетворювача	13.02.18-12.04.18	
5	Розробка імітаційної моделі та розрахунок основних компонентів	12.04.18-14.05.18	
6	Написання стартап-проекту	14.05.18-21.05.18	

Студент

_____ (підпис)

_____ (прізвище та ініціали)

Науковий керівник проекту

_____ (підпис)

_____ (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Магістерська дисертація містить 88 сторінок друкованого тексту, 52 рисунка, 16 таблиць та 41 посилання літератури.

Метою роботи є розробка нових схемних рішень джерел живлення, які забезпечують кращу, порівняно з існуючими, електромагнітну сумісність устаткування контактного зварювання зі мережею живлення.

Поставлені у роботі задачі були вирішені за допомогою комп'ютерного моделювання в середовищі MATLAB Simulink, методу порівняльного аналізу, основних положень теорії автоматичного регулювання та теорії електричних і електронних кіл. В результаті вирішених задач було розроблено багатокомірковий вузол заряду з функцією корекції коефіцієнту потужності. За основу базової комірки-перетворювача обрано модифіковану топологію SEPIC перетворювача з імплементованим імпульсним трансформатором, що забезпечує узгодження напруг між мережею та накопичувачем. Комірок працюють за алгоритмом Interleaved в граничному режимі протікання струмів. Даний алгоритм забезпечує можливість уніфікації комірок і зниження енергетичних втрат.

Відповідно до результатів побудованої імітаційної моделі з кількістю комірок від 1 до 4 обрано двокоміркову структуру перетворювача, оскільки подальше збільшення комірок перетворювача не призводить до значного покращення досліджених показників, однак знижує загальну надійність перетворювача.

Основні наукові положення дисертації було представлено в трьох англomовних статтях, виданих у провідних міжнародних виданнях.

Основні наукові положення дисертації доповідались і отримали схвальні відгуки на міжнародному симпозіумі та докторській школі 16th International Symposium “Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering” and “Doctoral School of Energy and Geotechnology III”.

Роботу виконано за підтримки Міністерства освіти і науки України, грант ДБ №0116U006924 та за підтримки програми студентських грантів асоціації IEEE – IEEE Standards Education Grant for Student Application Papers Implementing Industry Standards.

Ключові слова: електромагнітна сумісність; коефіцієнт нелінійних спотворень; контактне зварювання; SEPIC; стандарти IEC; Interleaved.

SUMMARY

The master's dissertation comprises 88 pages of text, 52 figure's, 16 table's and 40 sources of literature.

The aim of the work is developing new circuit solutions for power supplies that provide better, compared with the existing, electromagnetic compatibility of the resistance spot welding equipment with the electrical grid.

The tasks presented in the work were solved by computer simulation in the MATLAB Simulink, by the method of comparative analysis, by the basic provisions of the theory of automatic regulation and the theory of electric and electronic circuits. On this basis was created combined multicell charging node with function of power factor correction. As the base cell of the converter was chosen a modified topology SEPIC converter with implemented pulse transformer. The cells work according to the Interleaved algorithm in the bioundary mode of current, this algorithm provides the possibility of unification cells and reducing energy losses.

The main scientific provisions of the dissertation were presented in three English-language articles published in the leading international editions.

The work has been supporting by the Ministry of Education and Science of Ukraine, grant DB 0116U006924 and was supported by the student grant program of the IEEE Association.

The main scientific provisions of the thesis were reported and received positive reviews at the 16th International Symposium "Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering" and "Doctoral School of Energy and Geotechnology III" at the International Symposium and the Doctoral School.

The work was carried out with the support of the Ministry of Education and Science of Ukraine, grant DB 0116U006924 and supported by IEEE Student Grants Program (IEEE Standards Education Grant for Student Application Papers Implementing Industry Standards).

Key words: electromagnetic compatibility; total harmonic distortion; resistance welding; multicell-type power supply; SEPIC; IEC standards, Interleaved

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ І. КОНТАКТНЕ ЗВАРЮВАННЯ ТА ЙОГО РІЗНОВИДИ....	15
1.1. Сутність процесу контактного зварювання	15
1.2. Різновиди контактного зварювання та їх застосування в промисловості	19
1.2.1. Точкове зварювання.....	20
1.2.2. Шовне (роликове) зварювання	22
1.2.3. Стикове зварювання	24
1.3. Форми імпульсів зварювання та вимоги до джерел живлення систем контактного зварювання.....	26
1.4. Висновки за першим розділом	29
РОЗДІЛ ІІ. ЕЛЕКТРОМАГНІТНА ОБСТАНОВКА В СУЧАСНИХ МЕРЕЖАХ ЖИВЛЕННЯ, ОСНОВНІ ПАРАМЕТРИ ТА НОРМИ.....	30
2.1. Вплив сучасних пристроїв силової електроніки на мережу живлення....	30
2.2. Основні параметри споживачів, які впливають на електромагнітну обстановку в мережах живлення.....	34
2.3. Методи дослідження та нормування показників ЕМС споживачів електричної енергії	37
2.4. Методи покращення ЕМС споживачів з мережею живлення	40
2.4.1. Використання LC – фільтрів	42
2.4.2. Використання активних ККП	46
2.5. Джерела живлення з прямим споживанням енергії електричної мережі	55
2.6. Джерела живлення з акумулюванням енергії електричної мережі	59
2.7. Висновки за другим розділом.....	63
РОЗДІЛ ІІІ. АНАЛІЗ ПІДХОДІВ ПРИ ПРОЕКТУВАННІ ВУЗЛА ЗАРЯДУ СИСТЕМИ КОНТАКТНОГО ЗВАРЮВАННЯ.....	65
3.1. Вибір топології коректора коефіцієнту потужності	65
3.2. Принцип роботи та часові діаграми обраної базової топології	70
3.3. Багатоланкова структура побудови перетворювачів, основні переваги та недоліки	74
3.4. Висновки за третім розділом	77

РОЗДІЛ IV. РОЗРАХУНОК ТА МОДЕЮВАННЯ ВУЗЛА ЗАРЯДУ СИСТЕМИ КОНТАКТНОГО ЗВАРЮВАННЯ.....	78
4.1. Моделювання багатокміркового вузла заряду в середовищі MATLAB Simulink.....	78
4.2. Розрахунок ємнісного накопичувача	80
4.3. Розрахунок та підбір компонентів SEPIC перетворювача	83
4.4. Створення друкованої плати.....	89
4.5. Висновки за четвертим розділом	90
РОЗДІЛ V. РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП – ПРОЕКТУ	92
5.1. Опис ідеї проекту	94
5.2. Технологічний аудит ідеї проекту.....	95
5.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту	96
5.4. Розроблення ринкової стратегії проекту.....	99
5.5. Розроблення маркетингової програми стартап - проекту	99
5.6. Висновки за п'ятим розділом	100
ВИСНОВКИ	101
СПИСОК ПОСИЛАНЬ.....	103
ДОДАТОК А.....	107
ДОДАТОК Б.....	108
ДОДАТОК В.....	109
ABSTRACT.....	110

ВСТУП

В 1881 році французький вчений Огюст де Меритан, проводячи дослідження в лабораторії Кебот у Франції, використав тепло електричної дуги для сплавлення свинцевих пластин акумуляторних батарей. В тому самому році у Франції вченому був виданий патент на технологію електродугового зварювання. Однак дана технологія не підходила для роботи зі сталлю, оскільки необхідна температура не досягалася при використанні вугільного електроду. В 1881 Микола Миколайович Бенардос розробив технологію дугового зварювання «Електрогефест», а в 1885 винахідник отримав російський патент. В 1884 році британський та американський інженер та винахідник Еліху Томсон розв'язав одну із вагомих проблем кінця XIX століття, а саме – проблему з'єднання телеграфних проводів. Винахідник створив необхідні для контактного стикового зварювання елементи обладнання, такі як: генератор змінного струму, струм якого за допомогою власноруч розробленого пристрою комутації протікав через трансформатор і спеціальні вугільні електроди - затискачі, які стискали зварювані деталі, до навантаження. У період з 1885 до 1886 роках Томсон вдосконалює техніку зварювання та зварювальне обладнання і в 1886 році подає заявку на патент, захищаючий принципово новий спосіб електричного зварювання, який був описаний наступним чином: «зварювані предмети приводяться до контакту в місці, яке повинно бути зварене, і через нього пропускається струм величезної сили – до 200 кА при низькій напрузі – 1 - 2 В. Місце контакту деталей сильно нагрівається і якщо в цей момент почати стискати зварювані частини, то після їх охолодження предмети виявляться звареними». Такий спосіб зварювання назвали «безвогневим методом зварювання».

З плином часу та розширення сфери застосування контактного зварювання, вдосконалювалась її технологія та розроблювалися нові схеми нагріву. Так, засновник фірми «General Electric» Чарльз А. Коффін, запропонував метод попереднього підігріву заготовки великого поперечного

перерізу за допомогою вібруючої короткої дуги. Ним же була розроблена технологія зварювання із проміжною вугільною пластиною – електродом, який підключався до вторинної обмотки. Ця пластина встановлювалася поміж зварюваними деталями задля їх розігріву і видалялася перед їх стисканням. Замість вугільної пластини також використовували металеві, матеріал якої обирали таким чином, щоб його питомий опір був більшим, ніж у зварюваних деталях [1, 2].

В 1929 році радянський інженер – винахідник Д. А. Дульчевський розробив спосіб автоматичного дугового зварювання із флюсом. Величезний вклад у розвиток зварювального обладнання та технології зварювання вніс київський інститут імені Є.О. Патона. Саме тут була розроблено електрошлакове зварювання, виготовлені високошвидкісне зварювальне обладнання для зварювання під флюсом. З 1948 року промисловість отримала нові способи зварювання: в середовищі захисних газів, ручне, механізоване та автоматичне із плавким та неплавким електродом. В 1950 – х роках французькими вченими було розроблено новий вид зварювання – електронно – променеве [2, 3].

Відкриті і розроблені в 1886 - 1887 році винахідниками Е. Томсоном та М. М. Бенардосом технології контактного, стикового та шовного зварювання широко використовуються в наш час. Кузов сучасного автомобіля, який складається із тонколистових штампованих деталей, зварений більш ніж 1000 точок. В літаку кількість зварювальних точок налічує декілька мільйонів. В даному випадку використання технології контактного зварювання обумовлено високим ступенем його автоматизації, що значно зменшує час, який витрачається на зварювання, а також зменшує професійні вимоги до зварювальника. При повній автоматизації процесу виключається негативний людський фактор, що підвищує якість зварювального з'єднання, зникає відсутність в зварювальнику, оскільки для роботи необхідний тільки оператор. Технологія контактного зварювання також широко використовується у виробництві електронних компонентів, завдяки високій точності

позиціонування електродів і точного відтворення форми зварювального імпульсу, що дозволяє зварювати тонкостінні мініатюрні деталі без перегріву, короблення і пропалу. Також до областей широкого застосування слід віднести приладобудування, мікроелектроніка та виготовлення інструментів, зокрема медичних. Постійна дослідницька робота наукових колективів та організацій збільшує область застосування контактного зварювання.

Одним із світових центрів, що працює у галузі розроблення, дослідження і розвитку науки, технологій і засобів для зварювання металів є Американське зварювальне товариство, що розташоване в Сполучених Штатах Америки. Товариство також розробляє технічні стандарти, відомі як «Зварювальні кодекси AWS» виходячи із найкращого досвіду, зібраного та описаного відповідними комітетами AWS.

В Україні найбільшими центрами дослідження і розробки установок контактного зварювання є Інститут електрозварювання імені Євгена Оскаровича Патона НАН України (В. М. Сидорець, І.В. Пентегов), кафедра промислової електроніки факультету електроніки Київського політехнічного інституту ім. Ігоря Сікорського (О.Ф. Бондаренко), Донбаський державний технічний університет (П.С. Сафронов, Ю.В. Бондаренко) та Приазовський державний технічний університет (С.К. Піднебенна, В.В. Бурлака, С.В. Гулаков). В роботах даних колективів велику роль виділено розробці джерел живлення, що забезпечують неперервність якості зварювальних з'єднань із якісними показниками джерела, виступаючого в ролі навантаження для мережі.

Серед світових лідерів виробництва систем контактного зварювання виділяють Nippon Avionics, Amada Miyachi та інші. Кожен із цих виробників розробляє свої продукти відповідно до стандартів в області споживання електричної енергії, оскільки важливо забезпечити високу електромагнітну сумісність установок із мережею живлення. Особливо це важливо на великих виробництвах, де кількість і потужність зварювального обладнання сягає значних величин.

Однак зазначені вище виробники займаються промисловою розробкою и виготовленням установок контактного точкового зварювання. Даний вид застосовуються для поєднання відносно великих заготовок товщиною не менше 0,51 мм. Для більш тонких деталей слід використовувати установки мікрозварювання, що навіть дають можливість роботи із деталями товщиною меншою за 0.1 мм. Установки даного типу повинні відтворювати форму зварювального імпульсу із високим ступенем подібності до еталонного сигналу. При цьому обов'язково є їх відповідність до стандартів міжнародної електротехнічної комісії ІЕС.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є розробка нових схемних рішень джерел живлення, які забезпечують кращу, порівняно з існуючими, електромагнітну сумісність устаткування контактного зварювання зі мережею живлення.

Задачі дослідження:

1. аналіз етапів процесу контактного зварювання; аналіз причин низького рівня ЕМС систем контактного зварювання;
2. аналіз електромагнітної обстановки в сучасних мережах живлення; порівняльний аналіз джерел живлення з прямим споживанням енергії та з накопиченням енергії; обґрунтування вибору в якості предмету дослідження вузла заряду;
3. обґрунтування вибору структури з акумулюванням енергії; обґрунтування використання в якості накопичувача батареї з суперконденсаторів; порівняльний аналіз базових топологій перетворювача вузла заряду; пошук рішень для покращення характеристики окремих вузлів системи заряду в напрямку ЕМС; обґрунтування вибору модульної структури вузла заряду; розробка алгоритму роботи комірок-перетворювачів;
4. розрахунок основних компонентів обраної топології; підбір компонентів та розробка друкованої плати вузла заряду; розробка імітаційної моделі;

5. аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту; розроблення ринкової стратегії; розроблення маркетингової програми.

Об'єкт дослідження: процес споживання струму від мережі живлення системою контактного зварювання.

Предмет дослідження: перетворювачі та алгоритми керування для забезпечення електромагнітної сумісності системи контактного зварювання з мережею.

Наукова новизна полягає в наступному:

1. вперше розроблено комбінований вузол заряду ємнісного накопичувача, що складається з коректору коефіцієнту потужності та системи заряду, виконаних за модульною структурою і забезпечує високий рівень ЕМС з мережею живлення при використанні в системах живлення контактного зварювання;

2. розроблено комбінований алгоритм роботи модулів (комірок-перетворювачів) вузла заряду, який полягає у використанні n -однакових комірок, що працюють із фазовим зсувом $2\pi/n$ у граничному режимі протікання струму дроселя $\gamma = 0,5$. Це дозволяє забезпечити високі показники електромагнітної сумісності навіть за умови використання двох комірок;

3. вдосконалено базову топологію SEPIC-перетворювача шляхом введення імпульсного трансформатора із заміною однієї з індуктивностей первинною обмоткою трансформатора та виключенням з топології конденсатора у вихідному колі у зв'язку з особливостями навантаження. Це дозволяє спростити базову комірку-перетворювач, збільшивши її надійність та зменшивши енергетичні втрати.

Практична цінність полягає в наступному:

1. розроблено схему електричну принципову комбінованого вузла заряду для системи мікрозварювання, яка може бути використана для заряду ємнісних накопичувачів, забезпечуючи при цьому високий рівень ЕМС з мережею живлення;

2. розроблено алгоритм роботи базових комірок – перетворювачів для забезпечення їх уніфікації та роботі в граничному режимі, при якому теоретично відсутні комутаційні втрати, а пульсації струму у вихідному колі знижуються;

3. адаптовано відому методику розрахунку компонентів базової топології;

4. створено модель для аналізу характеристик для перетворювача з кількістю комірок 1 – 4.

Публікації. Основний зміст магістерської дисертації відображено в 3 статтях:

- Bondarenko O., Verbytskyi I., **Spitsyn D.**, Kaloshyn O., “Multicell-type Charger for Supercapacitors with Power Factor Correction,” in 16th International Symposium “Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering” and “Doctoral School of Energy and Geotechnology III”, January 16 - 21, 2017, Pärnu, Estonia;

- **D. Spitsyn** and O. Bondarenko, “Method for improving EMC of Small Scale Resistance Spot Welding Equipment,” in IEEE Standards Education Grant for Student Application Papers Implementing Industry Standards, 2017. URL: https://www.standardsuniversity.org/wp-content/uploads/Report_IEEE_Spitsyn.pdf;

- O. Bondarenko, I. Verbytskyi, V. Prokopets, O. Kaloshyn, **D. Spitsyn**, T. Ryzhakova and Y. Kozhushko, “Modular Power Supply for Micro Resistance Welding,” “Electrical, Control and Communication Engineering” The Journal of Riga Technical University, 2017, vol. 12, pp. 20-26. doi: 10.1515/ecce-2017-0003.

Особистий внесок магістра. Наукові положення та результати, які викладено в дисертаційній роботі, отримано автором самостійно.

Роботу виконано за підтримки Міністерства освіти і науки України, грант ДБ №0116U006924 та за підтримки програми студентських грантів асоціації IEEE – IEEE Standards Education Grant for Student Application Papers Implementing Industry Standards.

РОЗДІЛ I. КОНТАКТНЕ ЗВАРЮВАННЯ ТА ЙОГО РІЗНОВИДИ

1.1. Сутність процесу контактного зварювання

Контактне зварювання є одним із найбільш розповсюджених видів зварювання металів. Контактне зварювання відноситься до видів зварювання з короткочасним нагрівом місця з'єднання деталей без або з оплавленням і проковкою розігрітих деталей. Характерною особливістю цих процесів є пластична деформація, під час якої відбувається видалення окислів із зони зварювання, усунення раковин та локальне ущільнення металу, тобто формується зварне з'єднання [2].

Тепло, яке необхідне для створення нероз'ємного з'єднання, генерується шляхом протікання електричного струму через деталі в місцях їх стискання електродами. Таким чином формування зварної точки передусім залежить від фізичних властивостей зварюваних заготовок – тепло та електропровідності, а також від їх зовнішнього покриття і прикладеної сили стискання електродами. Кількість теплоти, що виділяється в зоні зварювання в результаті проходження струму розраховується за законом Джоуля - Ленца:

$$Q = \int_0^{t_{зв}} i_{зв}^2(t) \cdot R_{зв}(t) dt, \quad (1.1)$$

де Q – це кількість виділеної теплоти в області зварювання, $i_{зв}(t)$ – миттєве значення струму зварювання, $R_{зв}(t)$ – миттєве значення загального опору в зоні зварювання, $t_{зв}$ - тривалість процесу зварювання. На рис.1.1 показана еквівалентна модель зварювального кола установки контактного зварювання. Як видно, вона складається з джерела напруги E , опору провідників R_{np1} , R_{np2} та їх індуктивності L_{np1} , L_{np2} , та загального опору зони зварювання $R_{зв}$.

Опір зони зварювання $R_{зз}$ є основним параметром зварювального ланцюга, він залежить від сили стискання деталей, їх матеріалу і температури при зварюванні. До його складу входять:

- Опори електродів R_{e1} і R_{e2} ;
- контактні опори між електродами та деталлю $R_{e1д1}$ і $R_{e2д2}$;
- контактний (перехідний) опір між двома зварюваними деталями $R_{д1д2}$;
- питомий Об'ємний опір електродів та деталей.

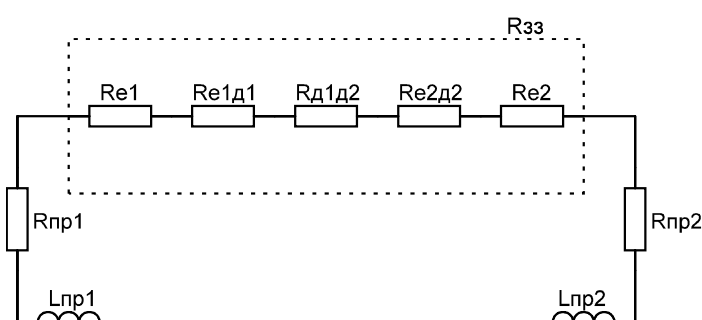


Рис. 1.1 Еквівалентна схема зварювального опору

Питомий об'ємний опір на відміну від контактного не залежить від сили стискання деталей, однак залежить від температури. Для всіх металів він збільшується при зрості температури, а оскільки електроди та зварювані деталі піддаються значному нагріву, то складова об'ємного опору в загальному опорі зварювальної зони може бути досить значною.

При збільшенні температури відбувається розширення металу, що також призводить до зросту опору, тому що збільшується відстань, яку повинен пройти струм. Контактний опір, на відміну від питомого об'ємного, залежить від сили стискання зварюваних деталей. На початкових етапах стискання деталей електродами до подачі струму контакт утворюється лише в окремих точках, оскільки поверхня деталей складається з мікронерівностей [4-9]. При цьому початковий опір зони зварювання $R_{зз}$ залежить від початкових значень опорів R_{e1} , R_{e2} , $R_{e1д1}$, $R_{e2д2}$, $R_{д1д2}$, які в свою чергу залежать від якості обробки деталей, умов і тривалості зберігання, сили стискання та форми електродів тощо. При подачі струму до зони зварювання максимальна концентрація

струму спостерігатися якраз в місцях мікроконтактів, а опори $R_{e1\partial 1}$, $R_{e2\partial 2}$, $R_{\partial 1\partial 2}$ почнуть зростати, оскільки температура в зоні зварювання буде збільшуватись. Далі, в результаті зросту температури поверхня зварюваних деталей почне очищатися від поверхневих окислів та забруднень іншого роду, а мікронерівності поступово будуть зникати. Оскільки площа контакту почне збільшуватись, а опори $R_{e1\partial 1}$, $R_{e2\partial 2}$, $R_{\partial 1\partial 2}$ – зменшуватись, то контактний опір буде зменшуватись. Почнеться процес плавлення металу в місці зварювання і значний зріст температури, контактний опір на далі буде знижуватись практично до 0 Ом, однак питомий об'ємний навпаки зростати. Залежність контактного та об'ємного опорів у будь який момент часу $t_{зв}$ зображено на рис.1.2 [10].

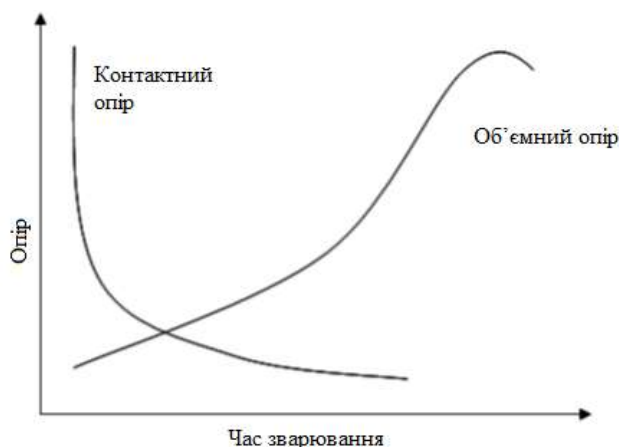


Рис. 1.2 Залежність контактної та питомої об'ємної опорів від часу зварювання

Зміна величини опору зони зварювання приведена на рис.1.3. [11].

В загальному процес контактної зварювання можна розділити на 5 основних етапів:

- етап 1 – зварювані деталі притискаються одна до одної за рахунок прикладеної сили стискання електродів. Напруга між електродами викликає протікання струму в точках мікроконтакту із заготовками. Опір між електродами в точці контакту дорівнює сумі об'ємного опору двох заготовок, контактної опору між електродом – деталлю $R_{e1\partial 1}$, $R_{e2\partial 2}$ і деталлю – деталлю $R_{\partial 1\partial 2}$. За нормальних початкових умов контактний опір буде високим, що

пов'язано із нерівністю зварюваних деталей та їх зовнішнім забрудненням оксидними плівками, масляними плівками тощо. Таким чином початкове виділення тепла буде зосереджено в місці їх мікроконтакту. Під час нагріву з поверхні заготовок вигоряють забруднення, що призводить до різкого зменшення контактного опору;

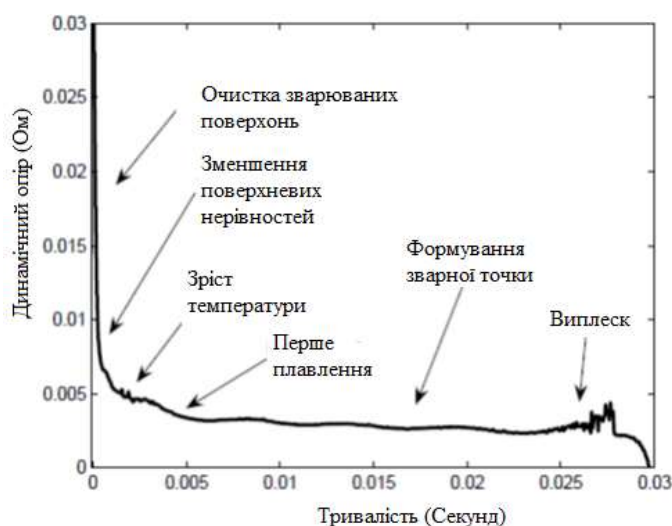


Рис. 1.3 Залежність динамічного опору від часу зварювання

- етап 2 – відразу, після очищення поверхні від забруднення, встановлюється безпосередній контакт між зварюваними деталями, а також між зварюваними деталями і електродами. Насправді, цей контакт складається з безлічі малих контактів, тому що на мікроскопічному рівні поверхня цих металів складається з великої кількості впадин і виступів. Саме тому фактична площа контакту є значно меншою. Найбільш інтенсивний нагрів відбувається в зоні мікроконтакту двох зварюваних деталей, при цьому зростає як температура, так і об'ємний опір. В процесі нагріву поверхні заготовок стають більш рівними, тим самим зростає корисна площа контакту і в результаті цього контактний опір зменшується ще більше. В той самий час, температура в місці контакту двох деталей буде зростати і питомий об'ємний опір також почне зростати, тим самим почне виникати протилежний ефект. В кінцевому результаті загальний опір в місці контакту почне зростати;

- етап 3 – протягом цього періоду зростаючий за рахунок зросту температури питомий об'ємний опір домінує над кривою опору;

- етап 4 – деталі продовжують нагріватися, що призводить до зростання питомого об'ємного опору i , як наслідок, загального опору в місці контакту. Але зріст температури також буде викликати збільшення розміру розплавленої області, через яку протікає зварювальний струм, що в свою чергу призведе до зменшення опору. Подальше розм'якшення металу призведе до скорочення шляху протікання струму, що призведе до зменшення опору;

- етап 5 – збільшення розплавленої області буде тільки продовжуватися, що призведе до ще більшого зменшення опору. В решті решт відбудеться виплеск розплавленого металу в момент, коли сили електродів стане недостатньо для його утримання в стиснутому стані [12].

1.2. Різновиди контактного зварювання та їх застосування в промисловості

В сучасному світі контактне зварювання широко застосовується в різноманітних областях промисловості, від великогабаритних будівельних конструкцій до мініатюрних напівпровідникових елементів та мікросхем. Контактним зварюванням можна з'єднувати практично всі відомі конструкційні матеріали – низьковуглецеві та леговані сталі, жаростійкі та корозійностійкі сплави, сплави на основі алюмінію, магнію, титану тощо. За типом зварного з'єднання контактне зварювання розподіляють на (рис.1.4):

1. точкове;
2. стикове;
3. шовне (роликове);
4. мікрозварювання.

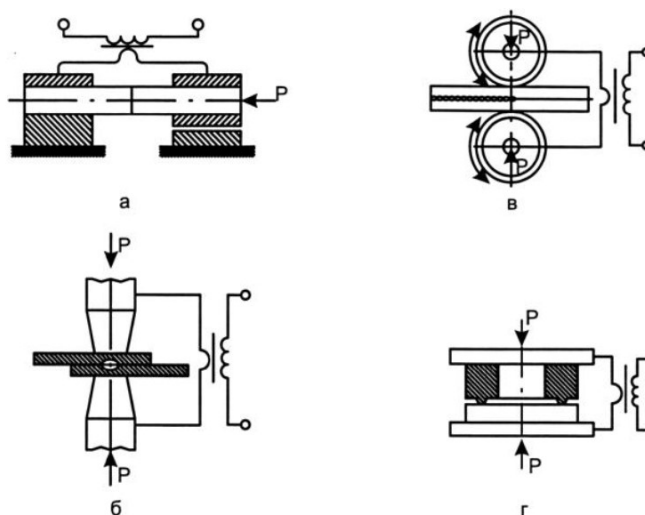


Рис. 1.4 Види технологій контактної зварювання: а – стикове; б – точкове; в – шовне (роликкове); г – рельєфне.

1.2.1. Точкове зварювання

Точкове зварювання – один з найбільш поширених способів контактної зварювання. Цей спосіб широко застосовується в автомобілебудуванні, авіабудуванні, будівництві, радіоелектроніці тощо. Мінімальна товщина зварюваних деталей сягає декількох мікрметрів.

Точкове зварювання – різновид контактної зварювання, під час якого заготовки об'єднуються разом в місцях, які умовно називаються точками. Розмір та структура точки, яка визначає міцність з'єднання, залежать від різноманітних факторів, в тому числі і від параметрів джерела живлення системи зварювання. До основних технологічних параметрів точкового зварювання слід віднести: матеріал, форму та розмір контактної поверхні електродів, характер, силу та форму зварювального імпульсу, час зварювання, силу стискування та стан поверхні зварюваних заготовок.

При такому способі зварювання поєднувані деталі розміщуються внапусток і стискаються електродами. При проходженні електричного струму скрізь електроди заготовки розігріваються у місцях їх контакту з електродами та між собою. Електроди крім функції передачі струму виконують ще одну важливу функцію – стискають зварювані деталі між собою для зменшення контактної опору в місці точки зварювання, що значно підвищує якість

зварного з'єднання оскільки зварювальний шов після завершення процесу нагрівання охолоджується і затвердіває без деформації. Зазвичай в якості матеріалу для електродів обирають мідь, тому що вона володіє низьким питомим опором та високою теплопровідністю, що дозволяє зменшити їх нагрів під час процесу зварювання та імовірність прилипання до деталі, що значно підвищує якість зварювального з'єднання. Величина імпульсу зварювання і час зварювання визначається розміром з'єднуваних деталей та технологією [2]. Схематично зона зварювальної установки представлена на рис.1.5 [13].

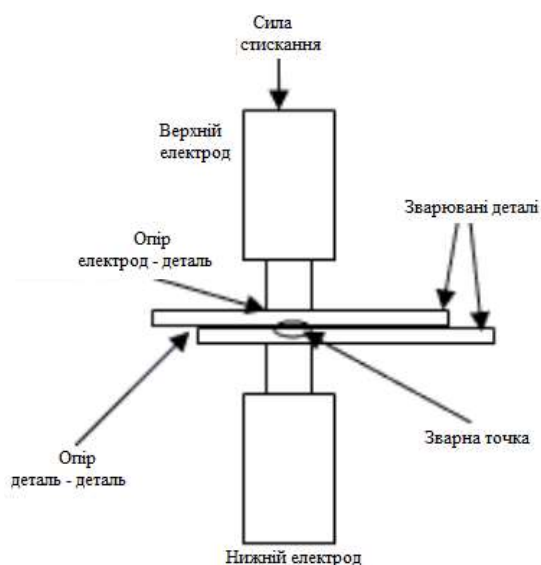


Рис. 1.5 Загальний вид зони зварювання

Точкове зварювання використовуються для поєднання заготовок із сталей різних марок, а також для кольорових металів і їх сплавів. За допомогою точкового зварювання можна зварювати листові заготовки однакової або різної товщини, стержні, листові заготовки та стержні чи спеціальні заготовки, такі як кутники, швелери, таври тощо.

Використання тривіального точкового зварювання неможливе через його високу потужність і низьку технологічність, тому почався розвиток нового способу точкового зварювання – мікрозварювання. Розвиток установок для мікрозварювання дав значний поштовх у мініатюризації автомобільної, медичної, телекомунікаційної електроніки тощо. В літературі частіше

зустрічається інформація про точкове контактне зварювання, ніж про мікрозварювання, хоча між ними є суттєві відмінності [11]. Насамперед це пов'язано з тим, що оброблювані деталі набагато менші, тому вимоги до точності позиціонування електродів значно більші. Іншою важливою особливістю мікрозварювання є коротка тривалість процесу (порядок величин одиниці - десятки мілісекунд) і менша, у порівнянні із точковим контактним зварюванням, сила струму, що дозволяє використовувати в якості формувача імпульсу зварювання високочастотні інвертори та імпульсні перетворювачі і накладає обмеження на використання електрично інерційних трансформаторів. Менша площа контакту електродів із зварюваними деталями забезпечує той самий тиск при меншій прикладеній до електродів силі. В залежності від товщини зварюваних деталей контактне зварювання можна розділити на два типи Додаток А [14].

Отже, основними відмінностями мікрозварювання від точкового зварювання є коротка тривалість процесу, під час якого контактний опір змінюється нелінійно за складною залежністю, впливаючи на характер навантаження, низька робоча напруга і високі вимоги до відтворення форми зварювального імпульсу. Такий метод зварювання не підходить до створення герметичним з'єднань, на відміну від шовного зварювання.

1.2.2. Шовне (роликове) зварювання

Шовне (роликове) зварювання – один із різновидів контактного зварювання, при якому заготовки з'єднують щільним швом, який складається із ряду зварних точок, які перекривають одна одну. Електроди мають вид роликів (дисків) діаметром 400 мм. Форму робочої поверхні обирають в залежності від товщини, форми та матеріалу зварюваних заготовок. Ролики для зварювання роблять із струмопровідних матеріалів, з високою теплопровідністю, наприклад з міді чи спеціальних сплавів.

В процесі шовного зварювання (рис. 1.6.) листові заготовки з'єднуються внапусток, затискають поміж роликами – електродами і пропускають струм

від трансформатора. Під час руху роликів по заготовкам формується зварні точки, що перекривають одна одну, в результаті чого утворюється суцільний герметичний зварний шов (рис.1.6).

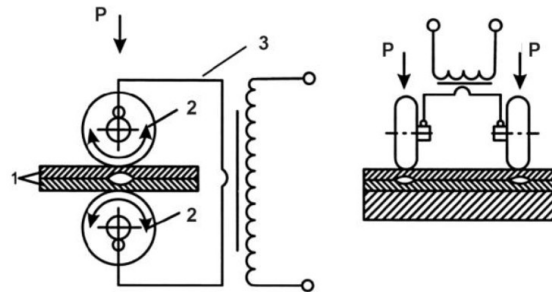


Рис. 1.6 Схема шовного зварювання і розріз зварного шва:
1 – заготовки; 2 – ролики; 3 – зварювальний трансформатор; P – сила стискання.

Безперервне шовне зварювання отримало обмежене використання через швидкий знос роликів та сильного перегріву контактуючих з ними поверхнями деталей. Важливим значенням при безперервному шовному зварюванні є ретельна підготовка поверхонь зварюваних деталей, їх однакова товщина та однорідність складу.

Завдяки меншому перегріву роликів та зварюваних деталей більш широке застосування отримала переривчасте шовне зварювання (рис.1.7) там, де немає необхідності в безперервному герметичному шву.

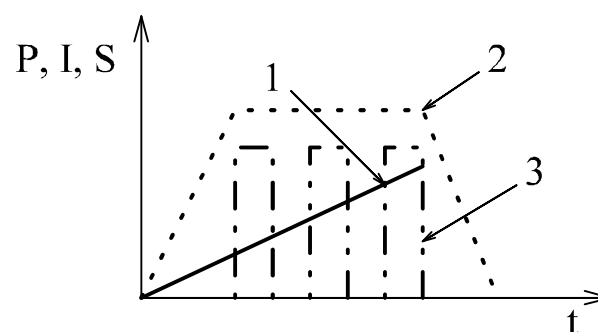


Рис. 1.7 Зміна параметрів переміщення роликів (1), сили їх стискання (2) та струму зварювання (3) при переривчастому шовному зварюванні

В цьому випадку деталі зварюються за рахунок протікання імпульсного струму та безперервному переміщенні деталей при постійному тиску роликів.

При кожному зварювальному імпульсі формується одинична лита зона. Для створення герметичного шва з перекриваючимися зварними точками підбирається відповідне співвідношення швидкості обертів дискових електродів та частоти імпульсів струму. Різновидом переривчастого шовного зварювання є шагове шовне зварювання.

При шаговому шовному зварюванні (рис.1.8) до роликів прикладається постійна сила стискання, а деталі переміщуються покроково (переривчасто). Струм на заготовки подається лише під час нерухомого стану роликів. В цьому випадку контактуючі поверхні роликів та деталей перегріваються менше. Однак таке обладнання конструктивно більш складне і менш продуктивне.

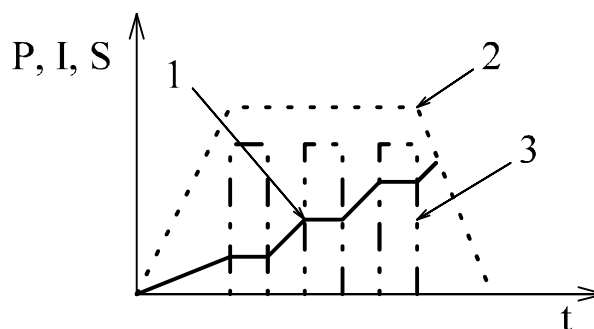


Рис. 1.8 Зміна параметрів переміщення роликів (1), сили їх стискання (2) та струму зварювання (3) при кроковому шовному зварюванні

Шовне зварювання використовують для отримання герметичних швів при виготовленні різноманітних герметичних баків, наприклад паливних баків автомобілів чи літальних апаратів, радіаторів, ємностей тощо. Міцність зварного шва забезпечує високу надійність роботи зварювальних конструкцій в умовах дуже низького вакууму чи великому тиску.

1.2.3. Стикове зварювання

Стикове контактне зварювання опором — різновид контактного зварювання, при якому заготовки, вставлені та закріплені в стиковій машині, притискають одну до іншої із силою деякої величини, після чого пропускають

по ним електричний струм. При нагріванні металу в зоні зварювання до пластичного стану відбувається осадка.

Одним із недоліків даної технології полягає в тому, що їм неможливо зварювати деталі малого перерізу (до 100 мм²) з простим периметром (круг, квадрат, прямокутник і т.п.). Деталі при цьому потребують ретельної очистки.

Розрізняють наступні способи стикового зварювання:

1. стикове зварювання опором;
2. стикове зварювання оплавленням.

Стикове зварювання оплавленням – різновид стикового зварювання, при якому деталі повільно зближають при увімкненні джерела живлення. Контакт поверхонь зварюваних деталей при повільному зближенні призводить до появи окремих мікроконтактів, через які протікає струм високої величини. Відбувається вибухове оплавлення мікроконтактів. При цьому під дією магнітного поля розплавлений метал виплескується назовні. Послідовне стискання заготовок призводить до формування зварного шва. Осадку деталей починають при увімкненому джерелі живлення і закінчують при вимкненому. При цьому використовують безперервне або переривчасте оплавлення місця зварювання. Такий вид стикового зварювання в основному використовується при зварюванні дротів, стержнів та труб з низьковуглецевої сталі відносно малих поперечних перерізів. Це пов'язано з тим, що досить складно забезпечити рівномірний нагрів стику через наявність на поверхні зварюваних деталей плівок окислів.

Зварювання оплавленням має ряд переваг перед зварюванням опором. Так, при оплавленні вирівнюються всі нерівності стику, а оксиди і забруднення видаляються. Саме тому зварювані деталі за даним методом не потребуються спеціальної підготовки. Також однією із переваг є те, що можна зварювати деталі із перерізом складної форми. Зварювання оплавленням поєднують різномірні метали – вуглецеві сталі, мідь, алюміній. Найбільш поширеними виробами, які виготовлені із використанням технології стикового зварювання оплавленням є елементи трубчастих конструкцій, колеса, рейки,

арматура будівельних конструкцій. Такий тип зварювання забезпечує економію легованої сталі при виготовленні ріжучого інструменту. Наприклад даним способом зварюється робоча частина свердла з інструментальної сталі з хвостовою частиною виконаної з простої сталі [2,15].

Використання того чи іншого способу контактного зварювання обумовлене фізичними властивостями зварюваних деталей, наприклад їх формою і матеріалом, вимогами до зварного з'єднання, наприклад його герметичність, а також якістю зварного з'єднання, яке характеризується кількістю непроварів, виплесків чи короблень зварюваних деталей. Однак ці параметри залежать не тільки від обраного способу зварювання, але й від більш глибоких умов. Забезпечення зварюваного з'єднання високої якості є основною вимогою до систем контактного зварювання, а пошук методів покращення – основною задачею для більшості дослідницьких груп, що працюють в цій області.

1.3. Форми імпульсів зварювання та вимоги до джерел живлення систем контактного зварювання

Вимоги до якості зварного з'єднання, виконаного способом контактного зварювання, постійно зростають із розвитком та поширенням даного виду зварювання, що в свою чергу викликає необхідність розробки спеціальних керованих джерел живлення установок контактного зварювання, які на відміну від джерел живлення некерованого типу забезпечують розподіл температури в зоні зварювання за законами, що встановлені технологічними нормами. Це досягається за рахунок регулювання зварного струму, напруги на електродах, потужності в області зварювання або за допомогою одночасного регулювання кількох електричних. Наприклад, при плавному наростанні зварного струму зменшується імовірність локального перегріву який призводить до виплесків, а при плавному спаді досягається поступове зниження температури зварного ядрі і зниження імовірності появи порожнин

в зварному ядрі [16]. Однією з основних задач формування переднього фронту зварного імпульсу є зниження щільності струму на початкових етапах зварювання, коли поверхні деталей вкриті оксидною плівкою із мікроступами. Автори [6] вважають, що це призводить до більш спокійного формування зварного з'єднання. Автори [6, 17] вважають, що для підвищення стабільності процесу контактного зварювання необхідно застосовувати комбінований цикл зварювання, що включає в себе попередній підігрів зварюваних деталей і тільки потім зварювання. Автори [17] вважають, що такий підхід стабілізує перехідні контактні опори і відповідно зменшує інтенсивність тепловиділення в області зварювання, що в свою чергу знижує імовірність появи виплесків металу. Відповідно до результатів дослідів [18] імпульс підігріву звужує діапазон можливих значень контактного опору в зоні зварювання.

Отже, можна зробити висновок, що формування зварювального імпульсу, який змінюється відповідно до спеціально встановленого закону є важливою задачею. При його правильному підборі відповідно до конкретних умов зварювання, що залежать від матеріалів деталей, станом їх поверхні, товщин і форми, можна забезпечити покращення якості зварювання.

За формою зварювальні імпульси можуть бути як змінного, так і постійного струму [2, 6, 17], комбіновані або не комбіновані. Останні являють собою імпульсну послідовність, яка складається з імпульсів змінного та постійного струму. Такий тип зварювальних імпульсів не отримав широкого застосування і відомий тільки як експериментальні спроби [2, 18]. Відповідно до ділянки, на якій формується зварювальний імпульс, виділяють імпульси з формуванням фронту, формуванням фронту і спаду а також з формуванням на кожній ділянці імпульсу. Узагальнена класифікація наведена на рис. 1.9.

Одними із найбільш поширених форм зварювальних імпульсів є форми з лінійним та експоненціальним законом зростання і/або спадання фронту. Однак в залежності від умов зварювання та поставлених цілей також обирають більш складні закони зміни форми, наприклад квадратичний, проте

технічна реалізація такої системи є більш складною [4, 8]. Форми зварювальних імпульсів для регульованих та нерегульованих джерел живлення наведено на рис. 1.10. Слід зазначити, що для підвищення якості зварювального з'єднання на інтервалі $t_{ст}$ зварювальний імпульс стабілізують.

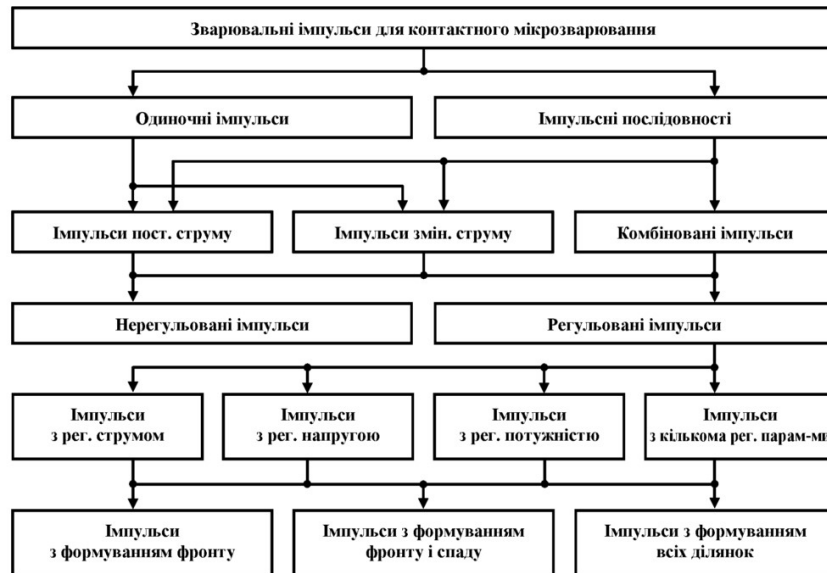


Рис.1.9 Класифікація імпульсів точкового зварювання

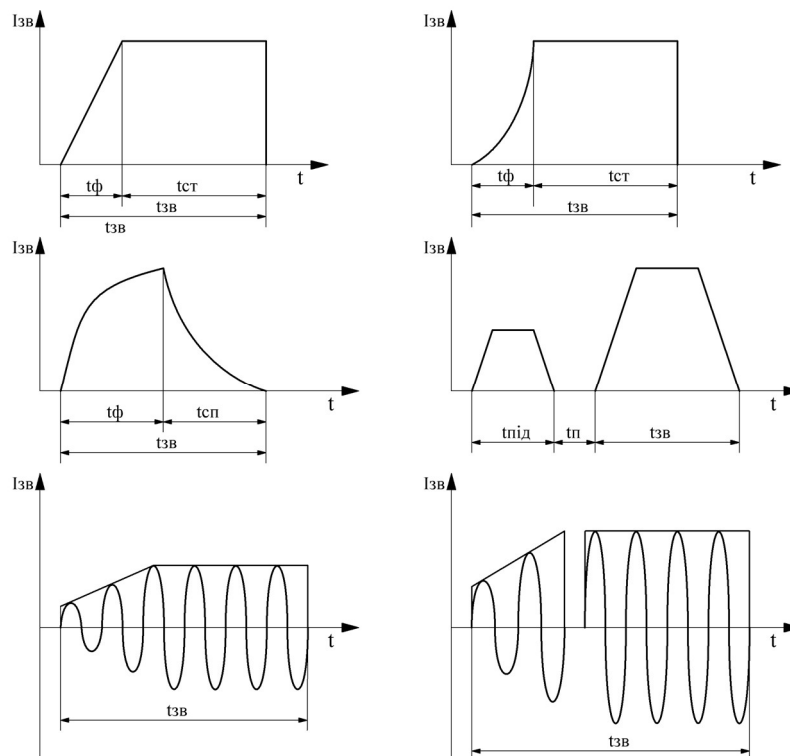


Рис.1.10 Основні форми імпульсів точкового зварювання

1.4. Висновки за першим розділом

Отже, основною властивістю системи контактного зварювання є складна нелінійна зміна характеру опору, що викликає негативний впливає на мережу живлення і всіх її користувачів. Передчасно спрогнозувати зміну опору навантаження досить складно, оскільки він залежить від великої кількості чинників, найголовнішими з яких є матеріал та форма зварюваних деталей та електродів, прикладена до деталей сила стискування, дефекти матеріалів та їх зовнішнє забруднення окислами, масляними плівками тощо.

Найбільш помітний цей вплив створюють установки мікрозварювання, що пов'язано з надзвичайно короткою тривалістю процесу зварювання при відносно високих струмах. Знизити негативний вплив, тобто підвищити електромагнітну сумісність системи контактного зварювання, можна наприклад розробивши джерело живлення за топологією, яка завідомо створює менший негативний вплив на мережу живлення. Однак при такому підході не завжди можна досягти високих параметрів електромагнітної сумісності. А вимоги до прецизійного відтворення зварювального імпульсу з короткою тривалістю та складною формою накладають додаткові обмеження на використання деяких топологій та схемотехнічних рішень для зменшення негативного впливу системи контактного зварювання.

РОЗДІЛ II. ЕЛЕКТРОМАГНІТНА ОБСТАНОВКА В СУЧАСНИХ МЕРЕЖАХ ЖИВЛЕННЯ, ОСНОВНІ ПАРАМЕТРИ ТА НОРМИ

2.1. Вплив сучасних пристроїв силової електроніки на мережу живлення

До характерних особливостей сучасних систем електроживлення слід віднести високу насиченість мережі споживачами з нелінійною вольт – амперною характеристикою до яких відносяться різноманітні напівпровідникові імпульсні перетворювачі силової електроніки, призначені для перетворення електричної енергії одного виду в інший з ціллю узгодження потреб споживачів. Однак відповідно до специфіки перетворювальної силової електроніки, виконаної на напівпровідникових керованих вентилях, які працюють в ключовому режимі, енергія від мережі живлення споживається дискретно, тому електрична мережа працює не в оптимальному режимі. Таке споживання електричної енергії призводить до негативного впливу споживача на мережу живлення, на самого споживача та інших споживачів, що під'єднані до цієї мережі живлення. Спотворення форми струму та напруги пов'язано із посиленням взаємного впливу різноманітних видів електричного обладнання, обумовленого нелінійним навантаженням. Саме тому було введено термін «електромагнітна сумісність», який визначає ступінь взаємного впливу електрообладнання, при якому воно не виходить із нормального режиму роботи, а його ефективність не знижується до певного встановленого рівня. Електромагнітна сумісність залежить від особливостей (параметрів та топології) мережі живлення. Наприклад, електромагнітна сумісність вентиляльного перетворювача із мережею живлення залежить не тільки від його параметрів (частоти перемикання вентилів, топології тощо), але й від схеми мережі живлення і потужністю короткого замикання на шинах живлення перетворювачів. В залежності від цих параметрів, навіть при незначному спотворенні форми напруги, навантаження можуть бути електромагнітно

несумісні [19, 20]. Наявність у структурі перетворювачів випрямлячів, які виступають нелінійним навантаженням по відношенню до мережі живлення, обумовлює суттєву несинусоїдальність споживаних струмів з широким амплітудним та спектральним складом вищих гармонік. Використання безтрансформаторних транзисторних джерел живлення, в основі яких покладено топологію мостового випрямляча з ємнісним фільтром, які характеризуються імпульсним характером споживання струму, також негативно впливає на мережу живлення. Це призводить до значного спотворення форми напруги мережі живлення, що в свою чергу призводить до погіршенню режиму роботи силових перетворювачів і негативного взаємного впливу споживачів.

Поява вищих гармонік в системах електроживлення обумовлена нелінійним характером навантаження обладнання, що підключене до цієї мережі. До такого обладнання відносяться електричні машини, трансформатори, нелінійність яких обумовлена в основному характеристиками магнітних ланцюгів, дугові сталеплавильні печі та зварювальне обладнання, яке спотворює форму вхідних струмів та напруг за рахунок нелінійного характеру електричної дуги.

Найбільший вплив на ступінь несинусоїдальності струмів та напруг в промислових мережах живлення складає обладнання, що працює на постійному струмі. Використання керованих та некерованих випрямлячів великої потужності для живлення електричних приводів, а також перетворювачів різного функціонального призначення призводить до збільшенню вмісту вищих гармонік струму та напруги в електричній мережі. Окрім потужних споживачів електричної енергії, широке застосування отримали споживачі малої потужності низьковольтних мереж живлення загального призначення. Передусім до них відносяться напівпровідникові перетворювачі, наприклад зварювальні інвертори або імпульсні джерела живлення. Джерелами вищих гармонік в низьковольтних мережах живлення також виступають радіотелевізійне навантаження, пристрої освітлення та обігріву, які керуються

електронними системами. Хоча потужність таких пристроїв порівняно низька, їх висока популярність і масовість стає причиною того, що форми напруг можуть значно спотворюватись.

При дослідженні проблеми спотворення форми струму і напруги низьковольтної мережі живлення слід враховувати деякі особливості її побудови. Оскільки більшість споживачів такої мережі є однофазними, а сама мережа побудована трифазною із нульовим проводом, то при аналізі несинусоїдальності струмів і напруг мереж низької напруги загального призначення треба враховувати їх несиметрію. При цьому в залежності від номера гармоніки в її складі переважає одна із симетричних складових. Так, для гармонік, кратним трьом, переважаючою буде нульова симетрична складова. Крім того, її частина буде входити до складу інших вищих гармонік, в яких переважають пряма чи зворотна послідовність. В результаті в нульовому проводі будуть протікати струми всіх вищих гармонік нульової послідовності. При цьому виникає проблема перенавантаження нульового проводу в чотирьохпроводних схемах мереж живлення низької напруги, що викликана нерівномірним навантаженням фазних проводів при підключенні до них однофазних лінійних споживачів. Іноді величини гармонічних складових кривої струму можуть величину струму в фазному струмі.

В автономних електричних системах живлення значну долю навантаження складають різноманітні перетворювачі – випрямлячі, інвертори, регулятори тощо. Відповідно до аналізу, проведеного в [21], вхідний струм перетворювачів із ланцюгом підвищеної частоти містить широкий спектр вищих гармонік. В таких системах в якості первинного джерела змінного струму зазвичай використовуються дизель – електричні станції, потужність генераторів яких може бути такою самою, як і потужність навантаження. В цьому випадку спотворення форми напруги живлення буде збільшуватись зі збільшенням потужності перетворювача.

Вищі гармоніки негативно впливають на тепловий режим роботи енергетичного обладнання, генераторів, трансформаторів тощо, оскільки

викликають ефекту підвищеного нагріву даного устаткування. У випадку, коли потужність джерела живлення співрозмірна з потужністю перетворювачів, спотворення форми кривої струму може призвести до додаткових втрат в статорах і роторах синхронних генераторів. Для забезпечення нормального теплового режиму роботи устаткування необхідно знижувати їх корисне навантаження. Це особливо проявляється в автономних системах електроживлення, де втрати, що викликані вищими гармоніками, накладають додаткове обмеження на допустиму потужність навантаження перетворювачів, працюючих в цих системах [21]. Крім того вищі гармоніки призводять до збільшених шумів та вібрацій обладнання.

При несинусоїдальності форми напруги пришвидшується деградація властивостей ізоляції електричних машин, трансформаторів, кабелів тощо. Також в таких режимах роботи збільшується складова активної потужності, яка зазвичай складає декілька відсотків від втрат при синусоїдальній формі напруги, однак в електромережах великих підприємств або в промислових центрах ці втрати можуть сягати до 15% [22].

Низькі рівні вищих гармонік можуть викликати порушення режимів роботи у деяких видів вимірювального, захисного та контрольного обладнання, оскільки спотворюється форма кривої вимірюваних напруги і струму на вторинних обмотках вимірювальних трансформаторів [23, 24].

Для електротехнічних пристроїв на першому місці стоїть енергетичний аспект електромагнітної сумісності. Отже, електромагнітна сумісність – це здатність споживачів електричної енергії функціонувати одночасно в реальних умовах в одній мережі живлення і не створювати на цю мережу та інших споживачів цієї мережі електромагнітних завад.

2.2. Основні параметри споживачів, які впливають на електромагнітну обстановку в мережах живлення

Як відомо, змінний струм ділиться на активну та реактивну складові. Активною називають ту складову струму, котра витрачається на корисну роботу, наприклад енергія, яка використовується в електродвигунах, перетворювачах, нагрівачах тощо. Реактивною складовою струму називають ту складову, яка затрачується на намагнічування індуктивних (асинхронні двигуни, трансформатори) та ємнісних (батареї конденсаторів) споживачів.

Активна складова струму розраховується за формулою:

$$I_{акт} = I \cdot \cos \varphi. \quad (2.1)$$

Реактивна складова струму розраховується за формулою:

$$I_{реак} = I \cdot \sin \varphi. \quad (2.2)$$

На діаграмі рис.2.1 графічно показано розкладання струму на активну та реактивну складові для ланцюга змінного струму зі споживачами, які мають активний, індуктивний та ємнісний характер опору.

На рис.2.1а показано випадок переваги індуктивного опору над ємнісним, коли вектор струму I відстає від вектора напруги U на кут φ . На рис.2.1б показано протилежну ситуацію, коли вектор струму I навпаки випереджає вектор напруги U на кут φ .

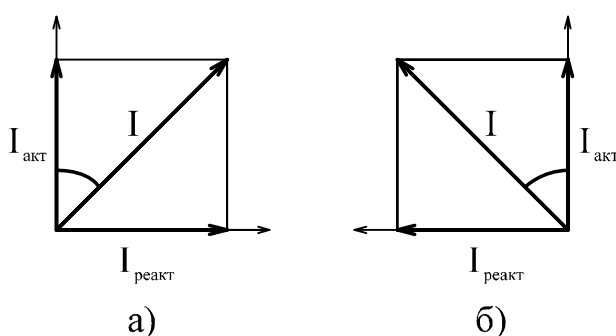


Рис.2.1

В колах змінного струму виділяють три види потужності: активну, реактивну та повну. Активною потужністю називають енергію, яка

виділяється в одиницю часу у вигляді теплоти на ділянці кола з опором R і має розмірність Ват (Вт):

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi. \quad (2.3)$$

Реактивною потужністю називають енергію, яка необхідна для створення змінної складової електричного та магнітного поля індуктивної катушки та конденсатора. Розраховується за формулою і має розмірність вольтамперах реактивних (вар):

$$Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi = P \cdot \operatorname{tg} \varphi. \quad (2.4)$$

Повною потужністю називають комбінацію активної та реактивної потужностей:

$$S = U \cdot I. \quad (2.5)$$

Повна потужність вимірюється в В·А

Для повної потужності справедливо:

$$P^2 + Q^2 = S^2. \quad (2.6)$$

Графічно цей зв'язок можна представити у вигляді прямокутного трикутника рис.2.2 – трикутника потужності, катети якого – потужності P та Q і гіпотенуза S .

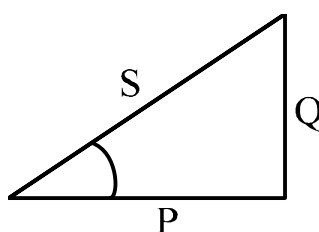


Рис.2.2 Трикутник потужності

Для лінійних ланцюгів величина $\cos \varphi$ називається коефіцієнтом потужності, де φ – фазовий зсув між напругою та струмом. У випадку чисто активного характеру навантаження $\varphi=0$, а у випадку реактивного навантаження $\varphi \neq 0$, як показано на рис.2.3

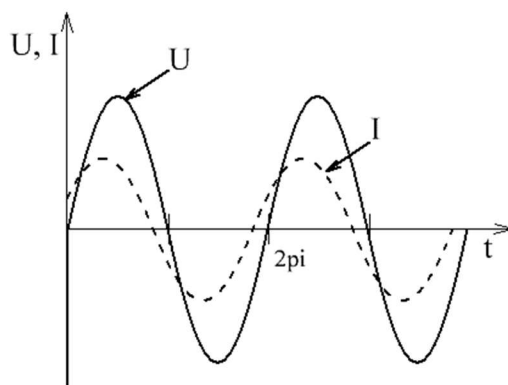


Рис.2.3 Фазовий зсув між напругою та струмом на кут φ

Однак при нелінійному навантаженні для оцінки якості споживаної електроенергії окрім коефіцієнту потужності також необхідно враховувати гармонічний склад споживаного струму, оскільки кут зсуву φ може бути незначним, але форма споживаного струму сильно відрізняється від синусоїди (рис.2.4), що значно підвищує негативний вплив на мереже живлення та на інших користувачів, спричиняючи різке просідання напруги в момент максимального споживання струму споживачем, що особливо помітно в мережах живлення низької потужності та в автономних системах, в основі яких покладено генератор з деякою низькою кінцевою потужністю.

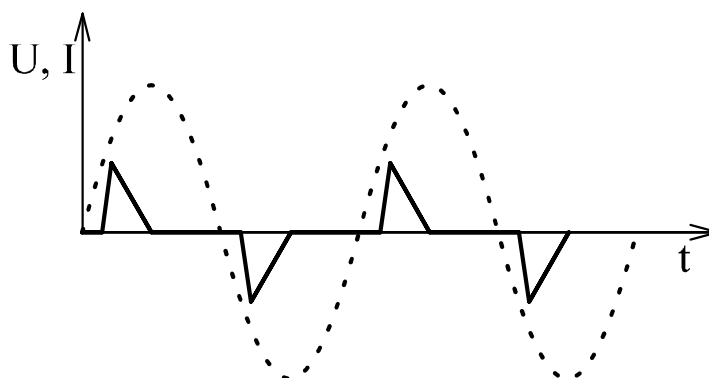


Рис.2.4 Форму струму та напруги при низькому КНС

Для цього введено поняття Коефіцієнту нелінійних спотворень (Total Harmonic Distortion), який характеризує ступінь відмінності форми сигналу від синусоїдальної. В силовій електроніці КНС зазвичай характеризує форму

вхідного сигналу, наприклад струму споживання. Формула для розрахунку КНС відповідно до міжнародного визначення КНС і стандарту EN 62040-3:

$$K_H = THD = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + \dots + U_n^2}}{U_1}. \quad (2.7)$$

2.3. Методи дослідження та нормування показників ЕМС споживачів електричної енергії

З точки зору енергетики електромагнітна сумісність досягається шляхом обмеження спотворення форми струму споживання за допустимою величиною. Критерії, за якими оцінюється спотворення, прописані в стандартах, розробкою і впровадженням яких займаються такі великі центри, як:

- CENELEC – Європейська комісія по стандартизації в області електротехніки;
- IEEE – Інститут інженерів по електротехніці та електроніці;
- IEC – міжнародна рада з питань великих електричних систем високої напруги.
- CCITT – міжнародна консультативний комітет в справах телефонії та телеметрії
- IEC – міжнародна електротехнічна комісія

На сьогоднішній день Міжнародна електротехнічна комісія (International Electrotechnical Commission - IEC) вважається одним із найголовніших осередків стандартизації в області електричних, електронних та суміжних технологій. Цим займається ТК 77 «Електромагнітна сумісність» та підкомітет SC 77C «Перехідні явища високої енергії». Стандарти відносяться до двох видів електромагнітного впливу: випроміненими променями ЕМІ та наведеними імпульсними струмами та напругами, виникаючих в електричних ланцюгах об'єктів при взаємодії полів ЕМІ. Вимоги до параметрів ЕМІ,

методам та засобам досліджень розроблені як для полів, так і для наведених струмів та напруг.

Деякі стандарти розроблюються сумісно з Міжнародною організацією по стандартизації (ISO). До складу ІЕС, яка була заснована в 1906 році, на сьогоднішній момент входять 83 країни, серед яких є Україна [25].

До стандартів, що встановлюють норми стійкості до електромагнітних завад технічних засобів, норми гармонічних складових струму, обмеження зміни коливань напруги та струму, а також регламентують норми та методи випробувань ЕМС споживачів електричної енергії відносять серії стандартів Додаток Б [26]. Останні два стандарти особливо актуальні для нормування параметрів систем контактного зварювання саме з енергетичного аспекту. Наприклад стандарт ІЕС 62135-2 встановлює вимоги і методи оцінки електромагнітної сумісності обладнання, призначеного для контактного зварювання, що підключене до мережевих джерел живлення із номінальною напругою до 1000 В змінного струму. Вимоги даного стандарту розповсюджуються на смугу частот від 0 Гц до 400 Гц. З однієї сторони стандарт включає в себе опис умов випробувань, вимоги до вимірювального обладнання, установки для випробування та додаткового обладнання, з іншої сторони – умови випробувань на електромагнітну емісію та завадостійкість. Розділ, що стосується норм випробувань електромагнітної емісії містить умови випробувань на високочастотні та низькочастотні електромагнітні завади, норми електромагнітних завад в різних режимах роботи, норми завад на мережевих затискачах, випромінені завади та норми низькочастотних завад в різних режимах роботи обладнання з їх детальним описом. Розділ завадостійкості містить окрім умов випробувань критерії якості функціонування та рівні досліджуваних чинників впливу, серед яких величина електростатичного розряду, імпульсних завад, провали напруги. Даний стандарт має пріоритет над всіма аспектами загальних стандартів в області електромагнітної сумісності і при відповідності обладнання вимогам даного

стандарту проведення будь яких додаткових досліджень з електромагнітної сумісності не вимагається [27].

Стандарт ІЕС 61000-3-3 охоплює більш широкий спектр пристроїв, оскільки охоплює будь яке електричне обладнання, яке використовується в громадських низьковольтних електромережах для обладнання з номінальним струмом споживання не більше 16 А в одній фазі при ввімкненні без особливих умов. Даний стандарт нормує обмеження зміни напруги, коливання напруги та флікера – чинники, які впливають на громадські низьковольтні мережі електроживлення. Стандарт встановлює норми зміни напруги та флікера, які можуть бути викликані при роботі обладнання в певних умовах та містить вказівки для методів оцінювання. Стандарт розповсюджується на електричне та електронне обладнання зі струмом споживання не більше 16 А в одній фазі, призначені для використання в мережах живлення з номінальною напругою фаза – нейтраль від 220 до 250 В з частотою 50 Гц. Стандарт описує методи оцінювання відносної зміни напруги та його норми, термінологію, методіку та умови випробувань обладнання [28].

Норми гармонічного спектру струму споживання електричного, електронного та радіоелектронного обладнання, що подібне до обладнання, описаного в стандарті ІЕС 61000-3-3, обмежується стандартом ІЕС 61000-3-2. Норми даного стандарту також застосовують до обладнання зварювання зі струмом споживання не більше 16 А в одній фазі, що не відноситься до професійного обладнання, та для іншого обладнання, яке розподілене на 4 класи відповідно до застосування. Даний стандарт встановлює норми гармонічних складових струму (до 40 гармоніки) для пристроїв різного класу, значень нелінійних спотворень струму, максимальну відносну та усталену відносну зміну напруги [29].

2.4. Методи покращення ЕМС споживачів з мережею живлення

Основною причиною зниження якості електричної енергії та погіршення її роботи обумовлена самими споживачами, а точніше їх низькою якістю, як споживачів. Низька якість споживання вентиляного перетворювача насамперед пов'язана з нелінійним характером його навантаження з великою часткою реактивної потужності в навантаження. В результаті цього в електричній мережі, яка створена джерелами кінцевої потужності, виникають спотворення напруги, які в свою чергу викликають додаткові проблеми у інших споживачів даної електричної мережі.

Для прикладу коефіцієнт потужності мостового випрямляча з ємнісним фільтром знаходиться в межах 0.5 – 0.7 і залежить від величини ємності конденсатора і опору навантаження. Більш того, в безтрансформаторних джерелах живлення напруга мережі одразу випрямляється та згладжується за допомогою фільтра великої ємності. В цьому випадку в мережу генерується цілий спектр гармонік струму, обумовлений імпульсом струму заряду конденсатора, а також процесами височастотного перетворення енергії. Таким чином, використання безтрансформаторних джерел живлення без спеціальних засобів зменшення негативного впливу призводить до значного погіршення параметрів напруги електромережі та електромагнітної сумісності в цілому.

В багатьох практичних випадках спостерігається спотворення форми напруги мережі до практично трапецевидної форми (синусоїда з обрізаною вершиною). При цьому зсув фази струму відносно фази напруги може бути мінімальним, тобто $\cos\varphi=1$, однак через низький коефіцієнт несинусоїдальності напруги загальне значення коефіцієнту потужності виявляється низьким.

Як відомо електропостачання підприємств, офісів, квартир та інших об'єктів зазвичай здійснюється за допомогою трифазного трансформатора 10/0.4 кВ в формі трифазної напруги змінного струму. Обмотки

трансформатора зі сторони низької напруги, як правильно, з'єднані за схемою «зірки з заземленою нейтраллю», тобто з нульовим проводом. Кожна з фазних обмоток разом з нульовим проводом підключається до окремої групи споживачів, таким чином напруга їх однофазної мережі 220 В змінного струму. Групи споживачів, підключених то тієї чи іншої фази, обирають однаковими за потужністю споживання. У такому випадку в нульовому провіднику загальний струм близький або рівний нулю за рахунок сумування струмів трьох фаз, які зміщені один відносно одного на 120° . Однак третя гармоніка струму в нульовому провіднику при такому сумуванні не знищується, а навпаки потроюється. В результаті виникає велика кількість негативних процесів, наприклад розігрів нульового проводу або навіть його відгоряння. В цьому випадку напруга на навантаженні найменш навантаженої фази може сягати 380 В.

Крім того відстань, на яку передається електрична енергія до споживача в загальному випадку складає сотні кілометрів. Потужність електромереж, тобто ліній електропередачі, пристроїв комутації та перетворення на підстанціях в значній мірі визначається повною потужністю S , ВА. Це означає, що частина потужності первинних джерел живлення та обладнання електромереж використовується нераціонально. Тому необхідно забезпечувати електромагнітну сумісність з мережею живлення всіх її споживачів, оскільки окрім економічного аспекту для постачальників енергії, це також дозволяє значно довше зберігати електронне обладнання в робочому стані.

Пристрої, призначені для зменшення негативного впливу нелінійного навантаження на мережу, зокрема для підвищення КП, часто називаються коректорами коефіцієнту потужності, рідше конденсаторами або регенераторами мережі. За допомогою цих пристроїв також виконуються інші функції, не пов'язані з обмеженням впливу навантаження на мережу, зокрема, пригнічення завад або стабілізація напруги [24, 25].

Для зниження негативного впливу на мережу, обумовленого реактивним характером навантаження, її нелінійністю та іншими причинами широко застосовуються методи, які використовують пасивні LC – фільтри, компенсатори реактивної потужності, компенсатори потужності спотворень – «активні фільтри», компенсатори потужності несиметрії та інших неактивних складових повної потужності.

2.4.1. Використання LC – фільтрів

Вхідний струм імпульсних джерел живлення має несинусоїдальну форму, тому покращення електромагнітної сумісності джерела живлення з мережею передусім вимагає покращення форми струму, який споживається з мережі, що можна зробити за допомогою вхідних LC – фільтрів. Схеми пасивної корекції КП працюють на промислових частотах 50 (60) Гц і складаються з конденсаторів та дроселів, виконаних на сердечниках з електротехнічної сталі. Дані схеми представляють собою вхідні фільтри трьох різних типів: фільтр нижніх частот, смуговий та резонансний фільтри.

Одним з найпростіших методів підвищення КП є паралельне підключення до мережі косинусних конденсаторів. З їх допомогою фаза струму споживання здвигається в сторону випередження по відношенню до напруги мережі. Таким чином, шляхом компенсації відбувається зменшення зсуву фази φ сумарного струму, обумовленого індуктивним характером навантаження. Більш складним, дорогим та громіздким рішенням є застосування LC – фільтрів.

Використання LC – фільтрів дозволяє отримати більш кращі показники електромагнітної сумісності. Наприклад фільтр нижніх частот призначений для ослаблення всіх гармонік струму з частотами вище частоти першої гармоніки. В найпростішому варіанті цей фільтр складається з батареї конденсаторів, яка підключена до вузла мережі, індуктивності мережі по відношенню до цього вузла та індуктивності розсіювання трансформатора на вході перетворювача. Ємність конденсаторів обирається з умови, щоб

резонансна частота контура мережа – конденсатор була меншою за частоту найменшої гармоніки спектра вхідного струму перетворювача для запобігання резонансного підвищення напруги на частотах гармонік струму перетворювача. При цьому потужність батареї конденсаторів співрозмірна з потужністю перетворювача, що означає високу вартість такого рішення проблеми електромагнітної сумісності.

Смугові фільтри, які широко застосовують в малопотужних схемах радіотехніки, в силовій електроніці не знайшли широкого застосування в силу складності реалізації.

Детермінований дискретний характер спектра вхідних струмів імпульсних перетворювачів в якому домінують окремі гармоніки робить найбільш раціональним по вартості використання резонансних фільтрів, налаштованих на окремі гармоніки. Основні схеми резонансних фільтрів для трифазної мережі живлення показано на рис. 2.5. В шестипульсних випрямлячах трифазного струму вхідні струми містять гармоніки порядку $6n+1$, тобто 5, 7, 11, 13. На рис. 2.5а зображено трифазний резонансний фільтр для однієї гармоніки, а на рис. 2.5б – зі спільним резистором для двох гармонік. Резистори забезпечують сталу смугу пропускання резонансного контуру, яка може змінюватись в зв'язку з відхиленням частоти напруги мережі, труднощами при підборі необхідних номіналів компонентів та їх відхилення від реальних значень.

Комбінований фільтр призначений для фільтрації двох (трьох) гармонік струму одночасно. На рис. 2.5в показано такий фільтр для компенсації 3-ї та 7-ї гармонік струму вентильного перетворювача. Резонансний контур для 3-ї гармоніки включає в себе дві індуктивності L_k (опір конденсатора C_k все ще досить великий для 3-ї гармоніки). Резонансний контур для 7-ї гармоніки складається з двох конденсаторів $C_k/2$, які ввімкнені паралельно та ввімкненого послідовно з ними одного конденсатора C_k та індуктивності L_k . Конденсатор C_k шунтує індуктивність L_k . Такі схеми дозволяють створювати

фільтри на різні частоти за допомогою одних і тих самих номіналів компонентів.

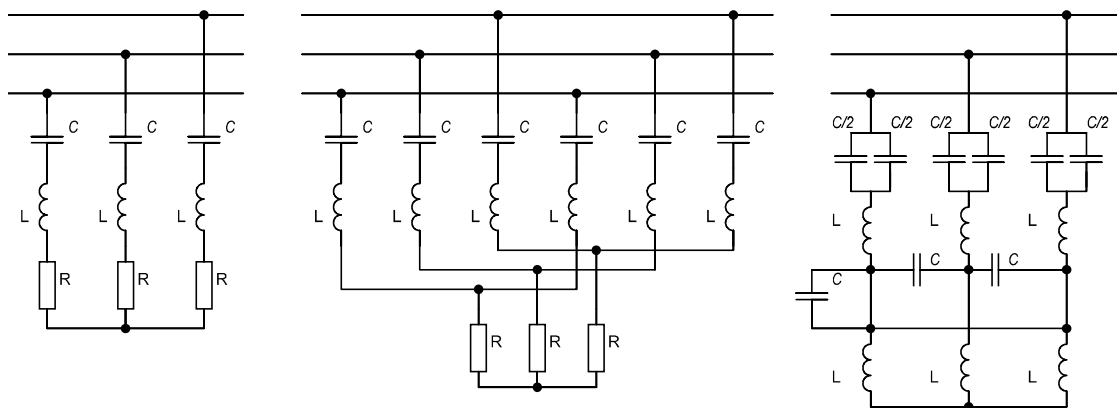


Рис. 2.5 Схеми LC фільтрів

Окрім кондуктивних низькочастотних завад в мережі, вплив яких знижується за допомогою розглянутих вище методів, існують також високочастотні завади радіочастотного діапазону, які генеруються в мережі при комутаціях. Такі завади супроводжуються швидкою зміною струмів та напруг. Тому на вхід перетворювача необхідно встановлювати мережевий фільтр. Схема такого фільтру для однофазного перетворювача представлена на рис.2.6а, а його частотна характеристика на рис.2.6б (крива 1 – асиметричні завади, 2 – симетричні завади) для споживача з $U=220$ В, $I=1$ А ($C_1=0.1$ мкФ, $C_2=C_3=3$ нФ, $L=3.7$ мГн)

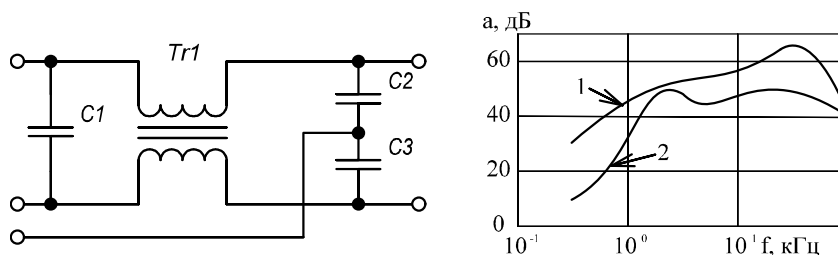


Рис.2.6: а) схема мережевого фільтру; б) його частотна характеристика

Ємність C_1 демпфує симетричні напруги мережі живлення, а C_2 – асиметричні [25].

Для малопотужних ($P < 24-40$ Вт) безтрансформаторних джерел живлення однією з рекомендованих схем пасивного фільтра є схема представлена на рис.2.7.

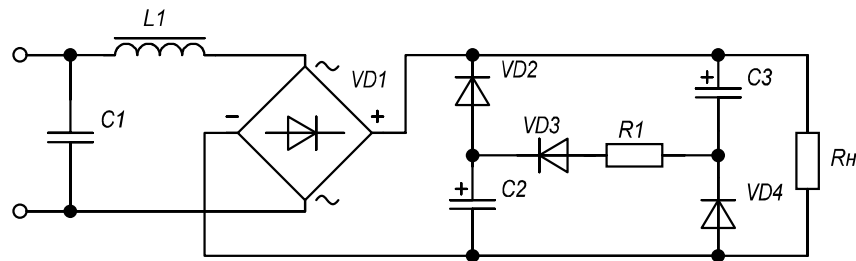


Рис.2.7 Схема пасивного фільтра для безтрансформаторних джерел

Тут заряд конденсаторів C_2 та C_3 фільтра відбувається через резистор R_1 та діод VD_3 . На етапі заряду конденсатори ввімкнені паралельно відносно випрямляча VD_1 . Резистор R_1 обмежує амплітуду зарядного струму конденсаторів, кожен з яких заряджається до половини амплітудної напруги мережі (мінус падіння напруги на VD_1 та VD_3).

Розряд конденсаторів на навантаження відбувається через діоди VD_2 та VD_4 , в такому випадку конденсатори ввімкнені паралельно по відношенню до навантаження. Оскільки кожен конденсатор заряджається до половини амплітудного значення напруги мережі, то їх розряд на навантаження починається в момент, коли напруга мережі знизиться до цього значення. Тривалість інтервалу розряду конденсаторів при навантаженні до 40 Вт складає приблизно 37% від величини напівперіода. В решту часу напівперіода напруги мережі навантаження живиться безпосередньо від випрямляча VD_1 . Такий спосіб дозволяє досягати значення КП до 95% при номінальному навантаженні 40 Вт. Однак такі пасивні методи підвищення ЕМС не підходять для використання в потужних джерелах живлення. В таких випадках доцільно використовувати активні методи, які дозволяють досягати високого рівня придушення завад при одночасно малих габаритах та високій енергетичній ефективності [24].

2.4.2. Використання активних ККП

Оскільки традиційні рішення з пасивними фільтрами у джерелах живлення середньої та великої потужності не забезпечують високий коефіцієнт потужності та високу енергоефективність, то доцільно використовувати активні коректори коефіцієнту потужності (ККП), які створені на основі імпульсних регульованих перетворювачів і забезпечують необхідну синусоїдальну форму струму у навантаженні. Такий перетворювач зазвичай вмикається на вході джерела живлення.

Методи активної корекції КП можна умовно розділити на низькочастотні та високочастотні. На рис. 2.8 представлена схема низькочастотного ККП, що працює на частоті 100 Гц. До складу схеми входить низькочастотний дросель L_1 та ключ змінного струму (випрямляч VD_3, VD_4, VD_7, VD_8 та транзистор VT_1). На рис. 2.9 показано спрощені часові діаграми заряду ємності фільтра за допомогою низькочастотного коректора.

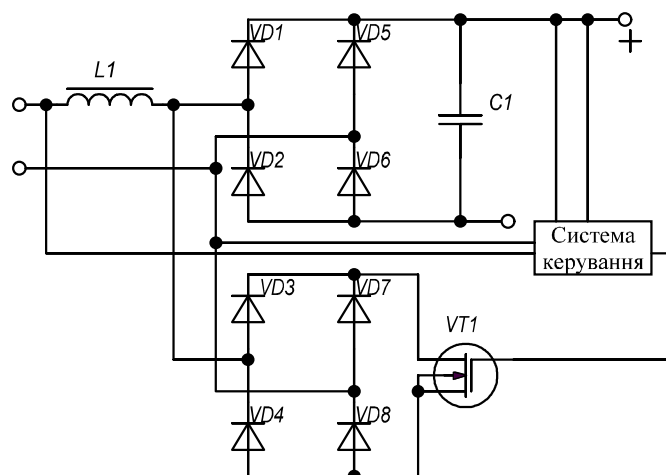


Рис. 2.8 Схема низькочастотного ККП

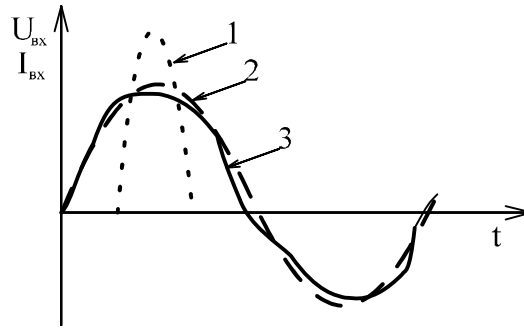


Рис. 2.9 Криві напруги та струму мережі в ККП: 1 – форма струму споживання без ККП, 2 – ідеалізована форма вхідної напруги мережі, 3 – форма струму споживання при використанні ККП

Принцип дії коректора заснований на додатковому відборі струму мережі під час інтервалів часу, коли миттєве значення напруги мережі відносно мале, тобто під час переходу через нуль. В інтервалі часу $t_{\text{від}}$, після переходу напруги мережі через нуль, відкривається транзистор VT_1 , струм протікає через обмотку дроселя L_1 та діоди VD_3, VD_8 . В цей час відбувається накопичення енергії в дроселі. При вимкненні транзистора VT_1 в інтервалі часу $t_{\text{зак}}$, енергія, накопичена в дроселі, передається в конденсатор фільтра та на навантаження через діоди VD_1, VD_6 . Під час напівперіода від'ємної напівхвилі напруги мережі процес повторюється, тільки струми протікають крізь інші пари діодів.

Використання низькочастотних ККП дозволяє отримати показник КП до 0.96 при повному навантаженні. Однак в спектрі струму мережі містяться низькочастотні складові, а дросель має досить великі масу та розміри. До переваг слід віднести їх порівняно невисоку вартість, простоту та надійність. Однак ККП, які працюють на високих частотах дозволяють отримати більш високі показники та якість струму мережі.

В загальному випадку ККП можна назвати стабілізатором зарядного струму конденсатора. При цьому струм, який споживається від мережі, практично дорівнює струму заряду, а опорним (задаючим) сигналом коректора, як правило є сигнал вхідної напруги. ККП працює в слідкуючому режимі, оскільки вхідний сигнал не змінюється.

В багатьох випадках ККП побудовані в формі окремого вузла перетворювача. При цьому для формування синусоїдальної форми струму споживання використовується, як правило, схема імпульсного перетворювача постійної напруги підвищуючого типу (рис.2.10).

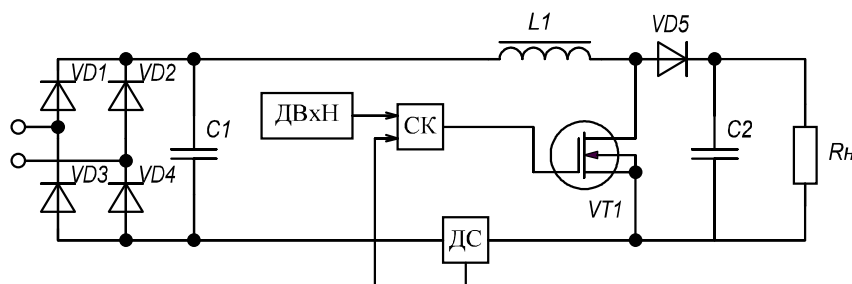


Рис.2.10 Схема ККП на основі ІППН підвищувального типу

В стабілізаторах підвищуючого типу споживання струму i_C від мережі відбувається на всіх робочих інтервалах, а пульсації струму в порівнянні з другими схемами є найменшими. Крім того, в ланцюзі споживання струму включена індуктивність L_1 , що виключає можливість різкої зміни струму i , відповідно, знижує вміст вищих гармонік вхідного струму.

Як відомо, робота ІППН підвищуючого типу має два основні режими роботи. В першому режимі, коли транзистор VT_1 відкритий, в дроселі L_1 відбувається накопичення енергії $W_L = \frac{L \cdot i_L^2}{2}$. При цьому діод VD_5 закритий напругою на конденсаторі C_2 . В другому режимі, коли ключ закритий, в навантаження та на зарядку конденсатора надходить енергія, накопичена в дроселі та енергія джерела живлення. Напруга ЕРС самоіндукції дроселя U_L додається до напруги $U_{вх}$ джерела живлення. Вихідна напруга перетворювача (підвищуючого типу) виявляється вищою за напругу $U_{вх}$ джерела живлення:

$U_{вих} = \frac{U_{вх}}{\gamma}$, де коефіцієнт заповнення $\gamma = \frac{t_{від}}{T}$, $t_{від}$ - тривалість відкритого стану транзистора, T – період роботи перетворювача.

Формування кривої вхідного струму $I_{вср}$ (рис.2.11) відбувається за рахунок двох датчиків: датчику струму ДС в мережі індуктивності та датчика

вхідної напруги ДВхН. При цьому за допомогою датчика струму створюється позитивний зворотний зв'язок за струмом споживання, а сигнал датчика вхідної напруги є задаючим (задає форму напруги електромережі).

За допомогою системи керування СК реалізується ШІМ, в даному випадку релейного типу. Ввімкнення ключового транзистора V_{T1} відбувається в момент, коли сигнал на виході датчика струму ДС досягає нуля, а вимкнення – в момент рівності вихідного сигналу датчика струму з сигналом датчика вхідної напруги ДВхН, який в цьому випадку є модулюючим ($U_{\text{Мод}}$ на рис.2.11).

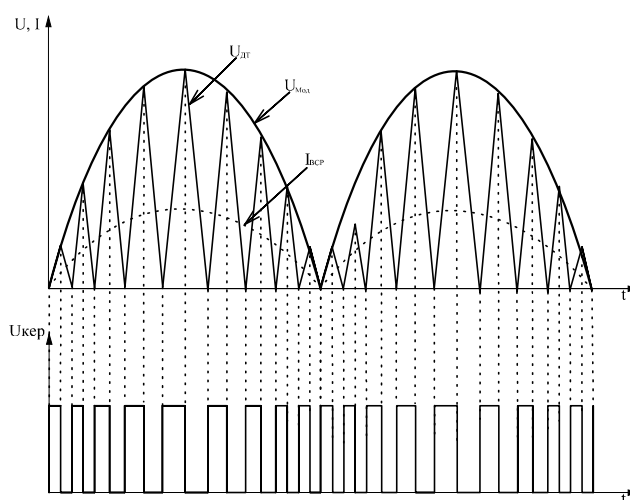


Рис.2.11 Форми кривих струму в ККП

На кожному циклі перемикання струм споживання з мережі i_c має форму, схожу на трикутну, його максимальне значення:

$$I_c = k_{ДС} \cdot U_{\text{Мод}}, \quad (2.8)$$

де $k_{ДС}$ – коефіцієнт передачі струму ДС, $U_{\text{Мод}}$ – сигнал датчика вхідної напруги ДВхН.

Середнє за період перетворення $T_{\text{пер}}$ значення струму, споживаного з мережі рівно:

$$I_{c\text{Сер}} = 0.5 \cdot k_{ДС} \cdot U_{\text{Мод}}. \quad (2.9)$$

Крива середнього струму заряду конденсатора зображена в вигляді пунктирної кривої i_{BCp} на рис.2.11.

Силова частина ККП виконана по схемі стабілізатора підвищуючого типу з дроселем на стороні постійного струму не являється єдиним технічним рішенням, існує аналогічна схема, однак з дроселем на стороні змінного струму.

В тому випадку, коли дросель розміщений до випрямляча, значно збільшуються вимоги до діодів випрямляча. З однієї сторони ці діоди повинні бути високовольтними та потужними, з іншої – забезпечувати роботу на високій частоті комутації.

В схемі на рис.2.12а протягом часу, коли відкритий ключ VT_2 , діоди VD_1 , VD_2 , VD_5 , VD_6 закриті напругою на конденсаторі C_1 . В цей час один із діодів VD_7 , VD_8 відкритий (діод VD_7 відповідає додатній напівхвилі напруги мережі). Після запирання ключа VT_2 відкриваються діоди VD_1 , VD_6 . Далі процес повторюється, тобто відбувається відкривання VD_7 і закриття VD_1 , VD_6 .

Частота комутації в ККП з дроселем на стороні змінного струму вибирається меншою, ніж частота комутації в схемах з дроселем на стороні постійного струму.

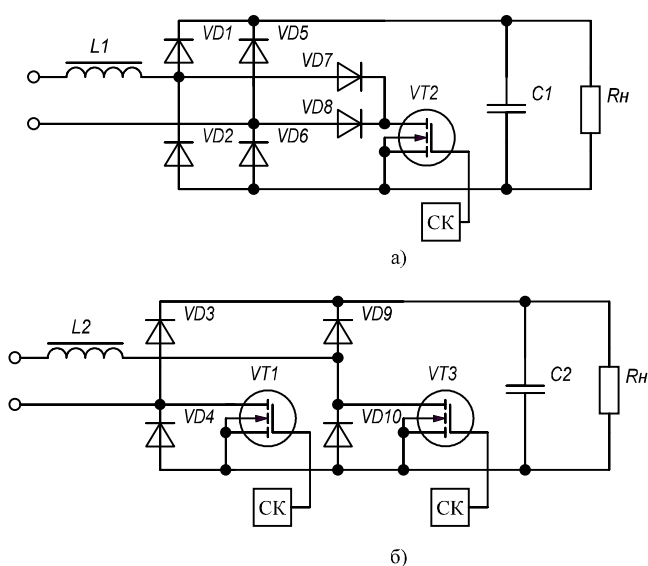


Рис.2.12 Схеми комутації дроселя ККП на стороні змінного струму: а) схема з одним ключем, б) схема з двома ключами

В схемі рис.2.12 вихідна напруга коректора нестабільна і буде змінюватись як при зміні вхідної напруги, так і при зміні величини струму навантаження. З ціллю стабілізації напруги на накопичувальному конденсаторі C_1 і для зниження пульсацій в контролерах ККП є додатковий ланцюг зворотного зв'язку по напрузі (рис.2.13).

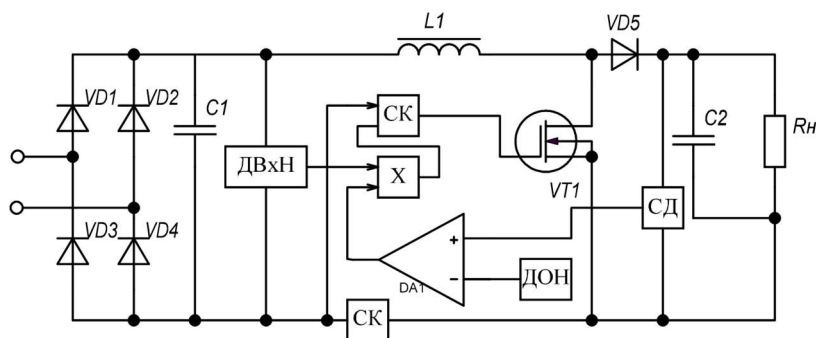


Рис.2.13 Схема ККП з стабілізацією напруги

Сигнал від'ємного зворотного зв'язку по напрузі $U_{\text{вих}}$ порівнюється з опорною напругою $U_{\text{дон}}$, в результаті операції віднімання формується сигнал помилки $U_{\text{пом}}$. Далі сигнал помилки вихідної напруги і сигнал датчика вхідної напруги перемножуються. Таким чином відбувається амплітудна модуляція опорного сигналу контуру регулювання струму дроселя L_1 . В результаті разом з формуванням синусоїдальної форми струму відбувається стабілізація вихідної напруги.

Часові діаграми в такому коректорі не відрізняється від діаграм на рис.2.11, а модулююча напруга $U'_{\text{мод}}$ рівна:

$$U'_{\text{Мод}} = k_{\text{ДС}} \cdot U_{\text{Мод}} \cdot U_{\text{Пом}} \approx k_{\text{ДС}} \cdot U_{\text{Мод}} \cdot k_{\text{пер}} \cdot (U_{\text{вих}} - U_{\text{дон}}), \quad (2.10)$$

де $U_{\text{Пом}}$ – сигнал помилки, $k_{\text{пер}}$ – коефіцієнт передачі сигналу помилки

В контролерах ККП зазвичай використовується ШІМ з фіксованою частотою. При цьому модуляція ширини імпульсів (рис.2.14) у відповідності до сигналу помилки $U_{\text{Пом}}$ відбувається шляхом використання напруги фіксованої частоти, яка змінюється лінійно.

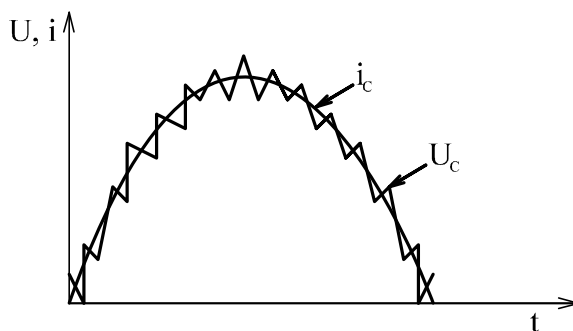


Рис.2.14 Формування вхідного струму в ККП з фіксованою частотою ШІМ

Синусоїдальна форма струму коректора обумовлює його роботу в двох режимах: режимі неперервного та переривчастого (на інтервалі переходу синусоїди через нуль) струму дроселя. При цьому більшу частину періоду напруги мережі (для номінального значення навантаження) дросель коректора працює в режимі неперервного струму.

В джерелах вторинного живлення найбільш широке розповсюдження отримали коректори коефіцієнту потужності, побудовані на ІППН підвищуючого типу. Після коректору, який встановлюється на вході джерела, як правильно встановлюється стабілізований перетворювач напруги (рис.2.15). Для оптимального узгодження двох послідовних вузлів обирають їх однакову робочу частоту.

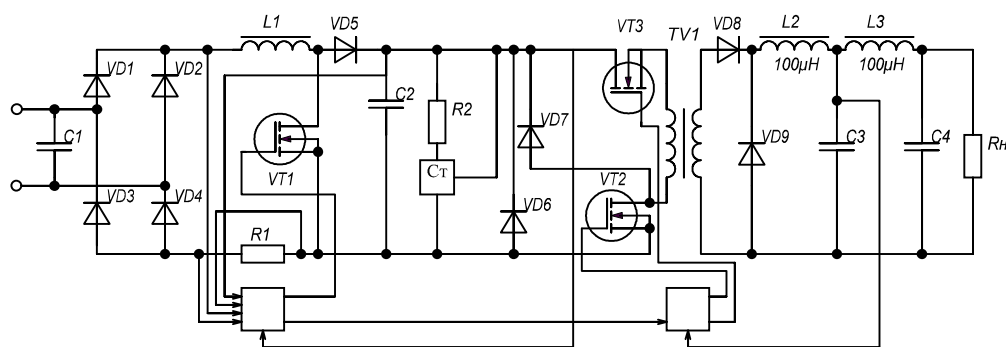


Рис.2.15 Схема ККП з суміщеним стабілізованим ІППН

У разі узгодження інтервалів роботи обох вузлів знижуються пульсації напруги на конденсаторі C_2 і відповідно на виході стабілізатора. Напруга на конденсаторі C_2 пульсуюча, одна із складових пульсацій визначається

частотою роботи перетворювача. Напряга на виході коректора зростає під час інтервалу, коли ключ VT_1 закритий, а енергія дроселя заряджає конденсатор C_2 . Протягом цього інтервалу ключ VT_2 перетворювача замкнений, що призводить до одночасного розряду конденсатора C_2 тобто живлення перетворювача струмом дроселя L_1 .

На рис.2.16 зображено діаграми комутації ключа VT_1 коректора та комутації ключа VT_2 перетворювача. За допомогою ламаної лінії 1 спрощено зображено напругу на конденсаторі C_2 для умовного навантаження активного характеру, а за допомогою ламаної лінії 2 – напругу на конденсаторі C_2 , навантаженого на синхронізований перетворювач.

В загальному випадку коефіцієнт заповнення γ_K стабілізатора підвищуючого типу може змінюватись в межах від 0 до 0.9, а коефіцієнт заповнення γ_{Π} одноктного перетворювача обмежений значенням 0.5. На рис.2.16 зображено процеси, які відповідають $\gamma_K = 0.5$ та $\gamma_{\Pi} = 0.33$. Тут $t_{ик}$, $t_{пк}$ – відповідно тривалість імпульсів і паузи ключа коректора, $t_{ип}$, $t_{пп}$ – відповідно тривалість відкритого та закритого стану ключа перетворювача. Для узгодження часових інтервалів комутації ключів в загальному випадку можна обмежити коефіцієнт заповнення коректора величиною $\gamma_K = (0.5 - 0.6)$, а коефіцієнт заповнення перетворювача - величиною $\gamma_{\Pi} = 0.4 - 0.45$.

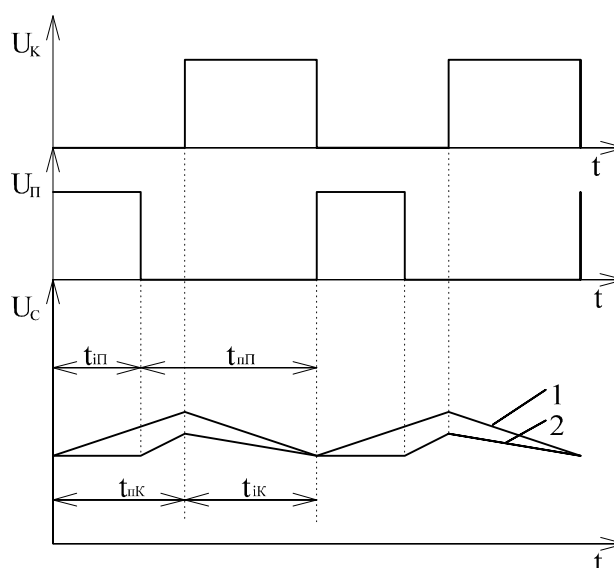


Рис.2.16

Однією з особливостей імпульсних стабілізаторів підвищуючого типу є їх принципова можливість необмеженого підвищення вихідної напруги при різкому зниженні струму навантаження до величин близьких або рівних нулю. Оскільки вихідна напруга ККП складає як правильно значну величину ($U_{амп}=400$ В), то некерований зріст цієї напруги може вивести з ладу обладнання та компоненти. Тому в джерелах живлення великої та середньої потужності встановлюють компенсаційний стабілізатор (рис.2.15) з регулюючим елементом паралельного типу і напругою стабілізації:

$$U_{стаб} = U_{ККП} + \Delta U_{доп}, \quad (2.11)$$

де $U_{доп}$ – допустиме підвищення $U_{ККП}$.

Широким класом пристроїв електроживлення є стабілізатори напруги та джерела безперебійного живлення (ДБЖ). Оскільки в таких пристроях використовуються імпульсні методи перетворення енергії і вхідні кола «безтрансформаторного типу», тому в них також використовуються ККП (рис.2.13).

Обов'язковим вузлом ДБЖ є пристрій формування напруги синусоїдальної форми. Для формування двополярної синусоїдальної напруги, як правило, використовується двополярне симетричне живлення, наприклад +400 В та -400 В.

В структурах однофазних ДБЖ змінного струму (UPS) широке застосування знайшла напівмостова схема інвертора, яка містить в якості одного з двох плеч два послідовно ввімкнених конденсаторів. Напруга на кожному з конденсаторів підтримується стабільною в межах +400 В та -400 В шляхом високочастотного широтно – імпульсного керування силового транзистора VT_1 з фіксованою частотою комутації, яка складає величину до 20 кГц і більше (рис.2.17а).

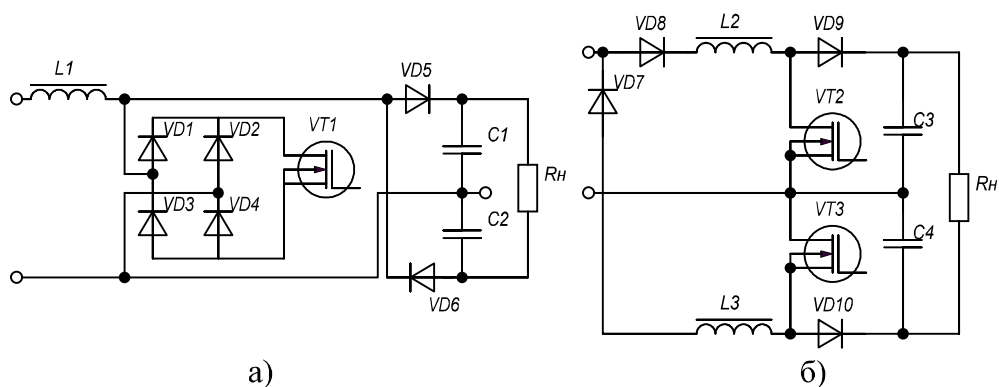


Рис.2.17 Схеми ККП: а) зі спільним ключем; б) здвоєний ККП на основі двох підвищувальних ІППН

На рис.2.17а наведена схема силової частини високочастотного ККП з диференційним виходом та спільним ключем. Схема містить один дросель L_1 та один силовий транзистор VT_1 . Разом з цим розповсюджена аналогічна схема, в якій використовується два однотактних підвищувачів на силових транзисторах VT_2 , VT_3 (Рис.2.17б). В обох схемах комутація електричної енергії відбувається на високій частоті протягом відповідного напівперіода мережевої напруги [24, 25, 30].

2.5. Джерела живлення з прямим споживанням енергії електричної мережі

Джерела живлення такого типу можна назвати відносно простими, оскільки складаються лише з одного джерела живлення, яке виконує функцію формування імпульсу зварного струму. Установки контактного зварювання з прямим споживанням енергії отримали широку класифікацію, оскільки їх можна виділити в окремі групи за великою кількістю параметрів. Автори [31] відповідно за кількістю фаз та видом джерела живлення виділили такі групи:

1. однофазні;
 - 1.1. трифазні;
2. за видом джерела живлення:
 - 2.1. змінного струму;

- 2.2. постійного струму;
- 2.3. низькочастотні;
- 2.4. імпульсні;
- 2.5. конденсаторні;
- 2.6. електромагнітні.

Автори [32] виділили 4 типи установок, в залежності від способу живлення:

1. установки з живленням від мережі через тиристорний контактор;
2. установки з живленням від конденсаторної батареї;
3. комбіновані установки з підгрівом з'єднаних деталей за допомогою методу (1) і безпосередньо зварюванням за допомогою методу (2);
4. установки з живленням струмом підвищеної частоти.

Оскільки вищенаведені класифікації не дають чіткого загального поняття про джерело живлення, автори [33] створили класифікацію, відповідно до способів передачі електричної енергії до навантаження. Вони виділили дві великі групи джерел живлення: перша – джерела живлення з прямим споживанням електричної енергії від мережі живлення, друга – із споживанням електричної енергії з накопичувача, енергія в якому акумулюється в паузах між зварюванням .

До першої групи відносять перетворювачі на основі: тиристорних регуляторів змінної напруги (Рис.2.18), керованих випрямлячів (Рис.2.19), інверторів (Рис.2.20), транзисторних регуляторів постійної напруги (Рис.2.21).

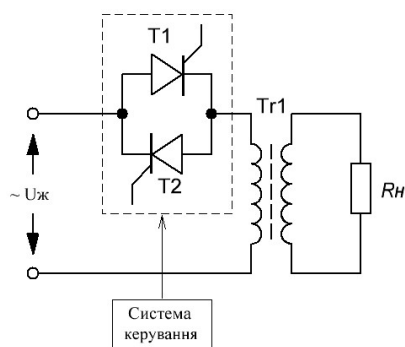


Рис. 2.18 Тиристорний регулятор

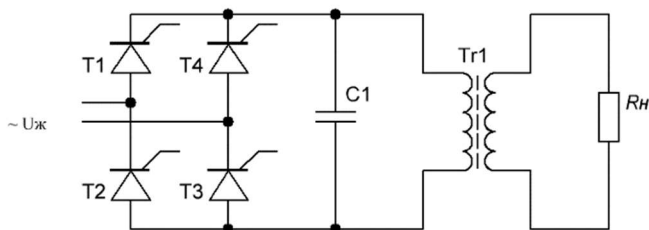


Рис. 2.19 Формувач на основі керованого випрямляча

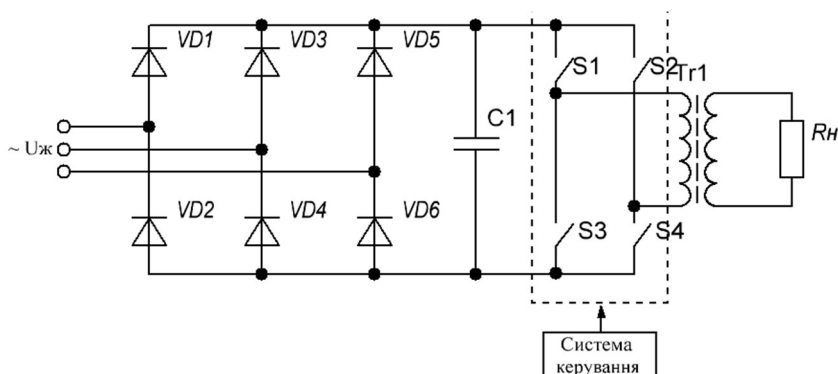


Рис. 2.20 Інверторний регулятор

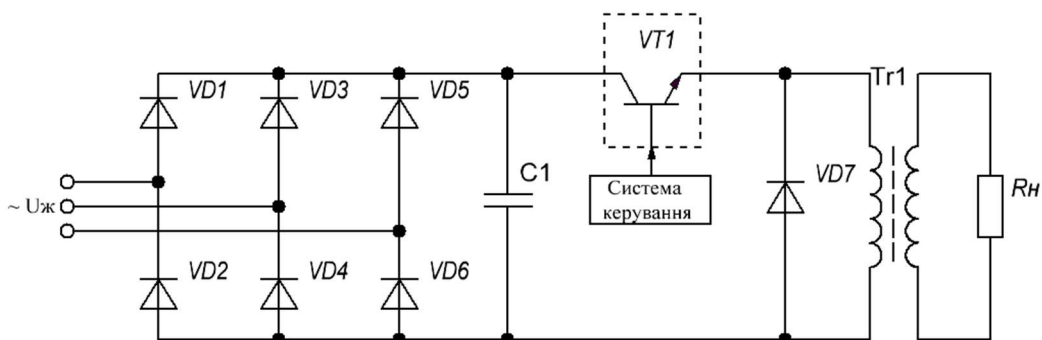


Рис. 2.21 Транзисторний регулятор

Зазвичай всі схеми на основі тиристорного регулятора містять зварювальний трансформатор, що працює на частоті мережі живлення. Це призводить до збільшення його розмірів у порівнянні із формувачами на основі транзисторних регуляторів та інверторів. Наявність електрично інерційного трансформатора негативно впливає на точність відтвореного формувачем імпульсу струму зварювання. Також до недоліків тиристорного регулятора слід віднести нижчу, у порівнянні з інверторним та транзисторним перетворювачами, керованість, а висока чутливість до нелінійної зміни контактної опору може призвести до значного спотворення форми імпульсу

струму зварювання. Інверторні та транзисторні регулятори менш чутливі до зміни навантаження, оскільки система керування таких перетворювачів за рахунок сигналів зворотного зв'язку формує сигнал керування силовими ключами задля забезпечення необхідної форми імпульсу струму зварювання. Це особливо важливо для отримання високоякісного зварного з'єднання, відсутності дефектів, таких як виплеск металу або його короблення. Однак такі перетворювачі значно дорожчі, а їх система керування значно складніша у порівнянні з тиристорним регулятором, до того ж при високочастотному імпульсному регулюванні наявність у контурах зворотного зв'язку фільтруючих елементів знижує швидкодію та стійкість системи в цілому.

Однак дана група джерел живлення має суттєвий недолік - низьку електромагнітну сумісність із мережею живлення. Насамперед це пов'язано із особливостями контактного зварювання, зокрема мікрозварювання. По перше у зв'язку з короткою тривалістю зварювального імпульсу, який при роботі системи зварювання в жорсткому режимі складає $t_{зв} < 0,01$ с, джерелом споживається імпульс струм високої амплітуди по – друге зварне з'єднання характеризується складною нелінійною зміною характеру опору. Саме тому зазвичай джерела живлення даного типу володіють низькими показниками коефіцієнту потужності та коефіцієнту нелінійних спотворень. Одним із тривіальних методів покращення цих показників є введення до структури джерела живлення додаткових вузлів корекції коефіцієнту потужності та фільтрації електромагнітних завад. Однак збільшення функціональних вузлів і, як наслідок, ускладнення структури перетворювача, призводить до зменшення його основних переваг – відносної простоти та дешевизни.

Отже, до переваг перетворювачів із прямим споживанням електричної енергії слід віднести їх відносну простоту у порівнянні із перетворювачами с проміжним накопиченням енергії. Це пов'язано із тим, що до їх структури не входить вузол заряду накопичувача і власне сам накопичувач. Немає потреби у розробці складних систем балансування, контролю ступеня заряду і розряду елементів накопичувача. Зменшуються масо – габаритні характеристики

перетворювача. Система керування та силова частина тиристорного регулятора не є складною для відтворення. Такі формувачі доцільно використовувати для роботи із деталями, до зварних з'єднань яких не встановлено високих вимог якості та немає необхідності у зниженні імовірності появи дефектів, а характер споживаного струму не нормується відповідними стандартами та нормами. Однак даний підхід неможливий при розробці установок із високим рівнем електромагнітної сумісності з мережею живлення. Для цього необхідно використати цілком інакший підхід до розробки джерел живлення, що за класифікацією авторів [33] відносяться до другої групи, а саме джерел живлення із проміжним накопиченням електричної енергії.

2.6. Джерела живлення з акумулюванням енергії електричної мережі

Одним з найбільш поширених методів зварювання з використанням джерел, які акумулюють енергію, став метод конденсаторного зварювання. В даному методі в якості накопичувача енергії використовується один або декілька конденсаторів, що об'єднані в батарею. Окрім даного методу автори [34, 35] виділяють також: електромагнітну, акумуляторну (електрохімічну), кінетичну (інерційну). Однак жоден із цих методів не знайшов практичного застосування оскільки виявилось, що всі вони більш складні за реалізацією і менш ефективні, ніж конденсаторне зварювання. На рис.2.22 зображена класифікація способів конденсаторного зварювання [36].

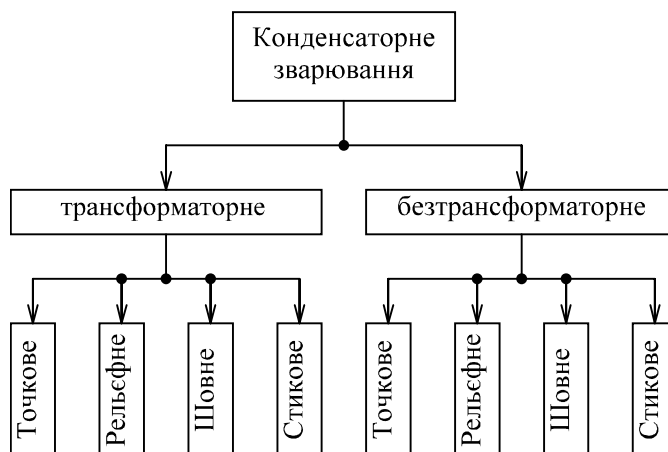


Рис.2.22 Спрощена класифікація способів конденсаторного зварювання

Слід зазначити, що дана класифікація відповідає основному принципу зварювання із накопиченням енергії, тобто енергія для виконання зварювання спочатку накопичується (під час пауз між операціями зварювання), а потім витрачається на зварювання деталей, але при умові, що перед цим накопичувач повністю вимикається від мережі живлення (електричної мережі, генератора постійного струму тощо), саме тому до даної класифікації не включено резонансно – імпульсне зварювання, та зварювання зарядним імпульсом струму конденсаторів. У першому випадку накопичує в собі енергію через резонансний ланцюг одночасно із споживанням електричної енергії з мережі живлення, у другому випадку конденсатор виступає в ролі переривника імпульсного зварного струму, що проходить крізь нього [35].

Принципова схема взаємозв'язку накопичувача ємністю C_p , зарядженого до напруги U_c з системою заряду і контуром зварювання для кожного із методів зварювання має вигляд рис.2.23

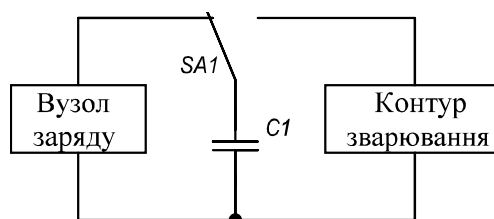


Рис. 2.23 Спрощена структура системи конденсаторного зварювання

З рис.2.23 видно, що енергія для виконання кожної зварної операції (комутатор К в правому положенні) надходить тільки із зарядженого накопичувача C_p .

Зарядка конденсатора C_p (комутатор SA₁ в лівому положенні) до напруги U_c обумовлює накопичення в ньому енергії :

$$W_{нак} = \frac{C_{нак} \cdot U_{нак}^2}{2} \cdot 10^{-6}, \quad (2.12)$$

де $C_{нак}$ - ємність накопичувача, а $U_{нак}$ - напруга накопичувача.

Конденсаторне зварювання розділяється на дві групи: безтрансформаторне, коли ємнісний накопичувач розряджається безпосередньо на зварювані деталі і трансформаторне, коли конденсатор розряджається на первинну обмотку зварювального трансформатора, а зварювані деталі – на вторинну обмотку. Безтрансформаторний метод зварювання за рахунок відсутності у вторинному колі електрично інерційного трансформатора дозволяє формувати короткі імпульси зварювального струму і точно відтворювати їх форму [36].

В цілому конденсаторне зварювання має суттєвий недолік – значні масо-габаритні параметри накопичувача, що значно обмежує використання таких систем в приміщеннях невеликої площі. Однак конденсаторне зварювання отримало новий імпульс застосування із розвитком технології виготовлення суперконденсаторів. До основних недоліків конденсаторних накопичувачів належать їх мала питома ємність у порівнянні з суперконденсаторами, в свою чергу акумуляторні батареї мають великий внутрішній опір у порівнянні із суперконденсаторами та конденсаторами, що знижує загальну ефективність установки зварювання. Також до переваг суперконденсаторів слід віднести високий показник циклу заряд/розряд, який в середньому складає $5 \cdot 10^5$ разів при 100% глибині розряду, акумулятор при такому ступені розряду має в середньому від 200 до 1000 циклів.

Джерела живлення даного типу володіють завідомо кращою електромагнітною сумісністю з мережею живлення. Насамперед це пов'язане із тим, що енергія від мережі живлення споживається за час t_3 в паузах між зварюванням $t_{п}$, для яких справедливо: $t_{п} \gg t_3$. Внаслідок цього енергія споживається за довший проміжок часу більш рівномірно, у порівнянні із джерелами з прямим споживанням енергії. Це дозволяє знизити перенавантаження мережі та негативний вплив на інших користувачів.

Для систем малої потужності заряд ємнісного накопичувача зазвичай відбувається за допомогою випрямлячів, виконаних за однофазною двонапівперіодною мостовою схемою (Рис. 2.24а) [36]. Керуючий елемент V2 вимикається при встановленні рівності напруги на ємнісному накопичувачі та пороговій напрузі.

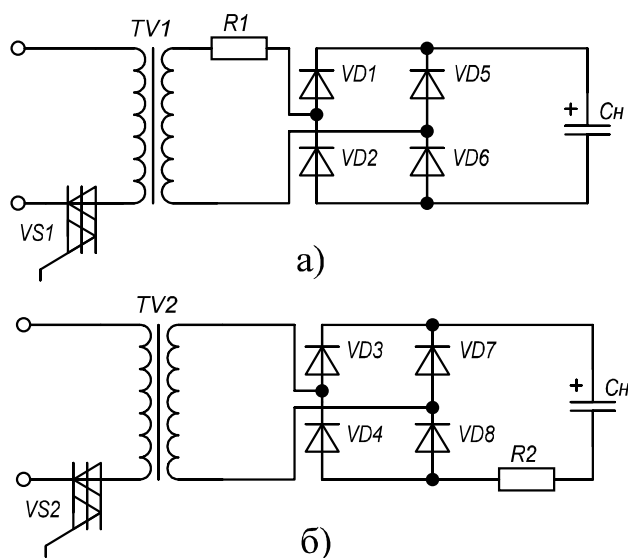


Рис.2.24 Базові топології схем заряду накопичувача

Для систем середньої та високої потужності слід використовувати системи контролю зарядного струму, для рівномірно розподіленого споживання струму. В якості таких джерел можна використовувати перетворювачі довільної топології із виходом на постійному струмі та низькою вихідною напругою, наприклад схеми понижуючого перетворювача

постійної напруги, перетворювачі, виконані за топологіями SEPIC, Cuk або Zeta.

2.7. Висновки за другим розділом

Отже, електромагнітна сумісність – це здатність споживачів електричної енергії функціонувати одночасно в реальних умовах в одній мережі живлення і не створювати на цю мережу та інших споживачів цієї мережі електромагнітних завад. Актуальність проблеми забезпечення електромагнітної сумісності споживачів з мережею живлення невпинно зростає, оскільки щоденно збільшується кількість споживачів нелінійного характеру, які не завжди відповідають стандартам ЕМС. Це призводить до виходу споживачів мережі живлення з номінального режиму роботи, що погіршує електромагнітну обстановку і призводить до виходу мережі живлення з номінального режиму роботи. Це в свою чергу може призвести до пошкодження її споживачів, наприклад за рахунок відгоряння нульового проводу. Як показують дослідження, для вирішення проблеми підвищення ефективності використання обладнання, пов'язаної з покращенням електромагнітної сумісності, необхідний комплексний підхід, який враховує режими роботи всіх вузлів системи вторинного електроживлення, які безпосередньо відповідають за перетворення електроенергії. Виділяють два основні підходи корекції коефіцієнту потужності – пасивний та активний. Пасивний метод корекції полягає на використанні фільтрів, які зазвичай розраховуються для конкретного пристрою, що значно знижує їх уніфікацію. Кардинально іншим підходом до корекції КП є підхід використання активних ККП. Зазвичай в основі таких коректорів покладено топологію підвищувального перетворювача, який за допомогою відповідної системи керування формує близький за формою до синусоїди струм споживання і виступає джерелом для навантаження. До підходу підвищення електромагнітної сумісності також слід віднести метод вибор структур систем

контактного зварювання, які володіють завідомо вищим рівнем ЕМС. До таких структур належать системи з акумулюванням енергії. Даний тип перетворювачів є більш складним за структурою, оскільки до його складу додатково входить вузол заряду і контролю за накопичувачем і власне сам накопичувач. Однак більш складна структура є виправданою значно кращими показниками коефіцієнту потужності на коефіцієнту нелінійних спотворень. Також при правильному розрахунку і підборі компонентів вузла заряду можливе виключення із структури перетворювача фільтра електромагнітних завад. Ще одним кроком до спрощення перетворювача є об'єднання коректору коефіцієнту потужності та зарядного пристрою в один спільний блок. Ці кроки дозволяють отримати відносно нескладну структуру, яка володіє високим рівнем електромагнітної сумісності і одночасно забезпечує високу якість зварювання.

РОЗДІЛ III. АНАЛІЗ ПІДХОДІВ ПРИ ПРОЕКТУВАННІ ВУЗЛА ЗАРЯДУ СИСТЕМИ КОНТАКТНОГО ЗВАРЮВАННЯ

3.1. Вибір топології коректора коефіцієнту потужності

Як було зазначено в попередньому розділі, на практиці для корекції коефіцієнту потужності використовують ККП на основі топології підвищувального перетворювача, яка представлена на рис.3.1.

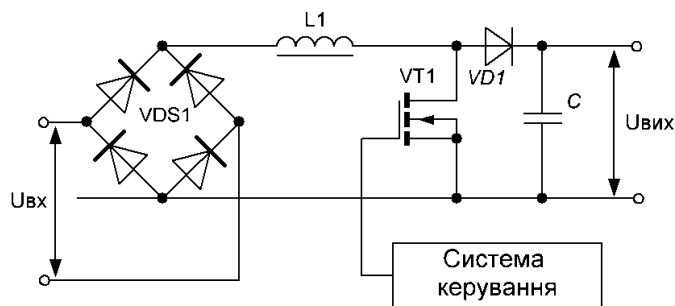


Рис.3.1 ККП на основі підвищувального ППН

В її основу покладено некерований випрямляч VDS1 та імпульсний транзисторний регулятор підвищувального типу, який складається з дроселя L_1 , ємності C , діода VD_1 та транзистора VT_1 . Принцип дії базується на високочастотній комутації транзисторного ключа VT_1 , за рахунок чого здійснюється накопичення енергії в магнітному полі дроселя L_1 і подальшу її передачу через роздільний діод VD_1 до вихідного фільтру C і в навантаження. Корекція коефіцієнту потужності відбувається за рахунок формування струму споживання форми, яка найбільш подібна до синусоїдальної. Це досягається шляхом роботи системи керування за алгоритмом, відповідно до якого спочатку вхідна напруга коректора, яка випрямлена діодним мостом і за формою представляє собою половинки синусоїди контролюється датчиком вхідної напруги. Далі системою керування генерується сигнал відкриття транзистора і струм в індуктивності L_1 почне лінійно зростати. Величина вхідного струму коректора фіксується датчиком вхідного струму, сигнал з якого пропорційно перетворюється у напругу. Величина індуктивності L_1

обрана таким чином, щоб зріст і спад струму в ній відбувався швидше, ніж відповідний зріст і спад вхідної напруги. В момент, коли величина напруги, яка знімається з датчика струму стає еквівалентною до величини сигналу датчика вхідної напруги, система керування формує сигнал закриття силового транзистора і починаючи з цього моменту струм в індуктивності починає спадати лінійно до нульового значення за рахунок ЕРС самоіндукції. В цей момент струм протікає в протилежному напрямку крізь діод VD_1 та конденсатор C . Процес повторюється при падінні напруги до 0 в первинному колі. Таким чином формується крива струму, середнє значення якого за формою відповідає синусоїді. На рис.3.2 проілюстровано граничний режим протікання струму в дроселі коректора, даний режим володіє такими перевагами, як:

1. силовий ключ відкривається при нульовому струмі через дросель, тому відсутні комутаційні втрати, а також втрати, що пов'язані з часом відновлення діодів;
2. сумарний струм через дросель в деякі моменти стає рівним нулю, тобто дросель повністю розмагнічується;
3. потрібен дросель меншої індуктивності, у порівнянні із дроселем схеми, що працює в режимі неперервного струму;
4. нижчий рівень пульсацій струму у вихідному колі.

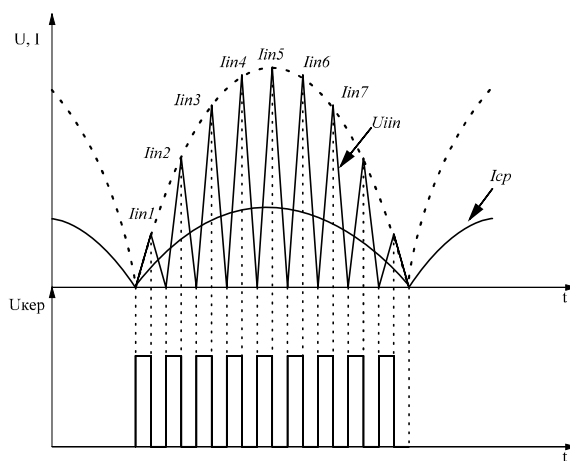


Рис.3.2 Форми кривих струму в ККП

Такий підхід в створенні ККП в більшості дозволяє отримати пристойні показники коефіцієнту потужності, однак не завжди. Наступним кроком до покращення характеристик такого ККП є запровадження багатокоміркової структури. В такому випадку зберігаються всі переваги класичного ККП і зменшуються деякі недоліки, зокрема КП і КНС. Технологія багатокоміркової структури основана на розподіленій у часі паралельній роботі окремих комірок, що побудовані на основі топології класичного ККП. Всі комірки працюють з деяким фазовим зсувом і перекриттям у граничному режимі протікання струму в дроселі. Часові діаграми двохкоміркового ККП показані на рис.3.3.

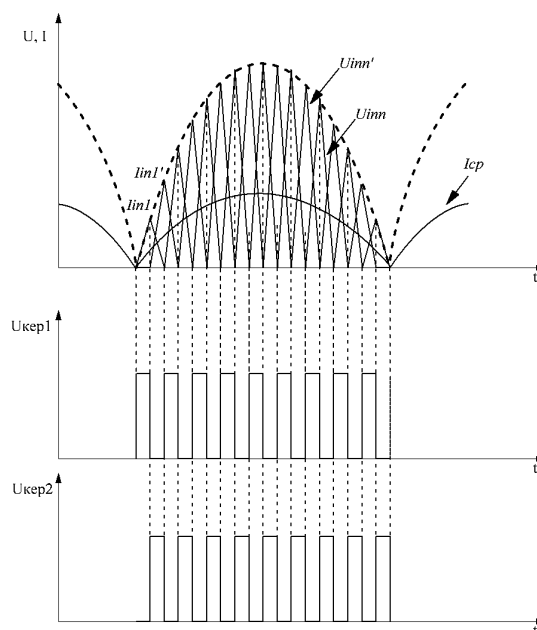


Рис.3.3 Форми кривих струму в ККП з двома комірками – перетворювачами

ККП побудований на основі топології підвищуючого перетворювача потребує додаткового вузла узгодження напруг з накопичувачем. Насамперед це пов'язано з низькою робочою напругою суперконденсаторів, яка зазвичай становить 2.5 В. У разі використання в якості вузла узгодження понижуючого трансформатора отримуємо функціональну схему рис.3.4а. Зі схеми видно, що вузол корекції та вузол узгодження розділені між собою конденсатором C_f , який розраховується на частоту живлячої мережі і в такому випадку

призводить до збільшення габаритів, а головне до збільшення втрат енергії в системі.

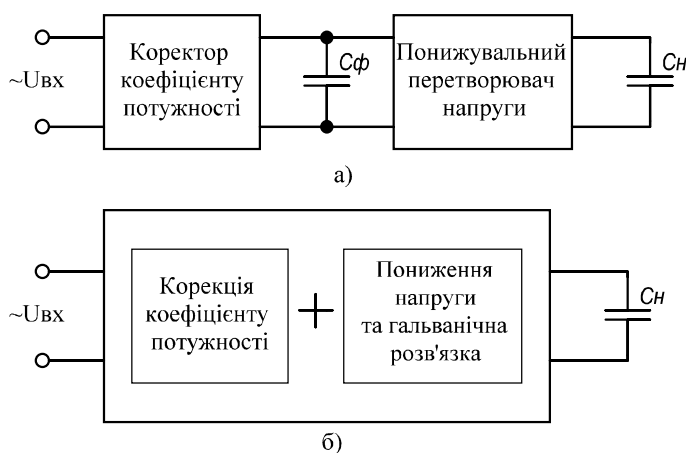


Рис.3.4 Функціональна схема: а) ККП і вузла заряду; б) суміщеного вузла заряду

Тому для покращення технічних показників перетворювача доцільно вилучити даний конденсатор зі схеми, об'єднавши дві ланки перетворення енергії в одну, що дозволяє знизити не тільки енергетичні втрати в системі, але й габаритні розміри комірки перетворювача. Однак така комірка повинна одночасно виконувати функції гальванічної розв'язки між мережею та навантаженням (роль понижуючого трансформатора), формувати синусоїдальний струм (роль коректора) та заряджати ємнісний накопичувач постійним або пульсуючим струмом (роль понижуючого трансформатора та системи заряду). Відповідно до вищезазначених вимог схемотехніка базової топології комірки повинна мати такі особливості, як:

1. наявність індуктивного елемента у первинному ланцюзі для безперервного протікання струму від мережі;
2. можливість плавного пуску та плавного регулювання струму споживання;
3. наявність в структурі трансформатора чи можливість його інтеграції до структури;
4. вихід на постійному струмі.

Аналізуючи класичну топологію ККП на основі підвищувального перетворювача можна зробити висновок, що вона не відповідає умовам 2 і 3. На перший погляд за базову топологію ККП слід обрати топологію понижуючого перетворювача, однак дана топологія теж не забезпечує відповідність всім вимогам. При більш глибокому аналізі перетворювачів типу SEPIC, Cuk, інвертувального, понижаючого та підвищуючого до поставлених вимог маємо:

1. індуктивний вхідний елемент мають перетворювачі підвищувального перетворювача SEPIC та Cuk. Для безперервності протікання струму на вході інших перетворювачів можливо поставити LC-фільтр, однак це є небажаним оскільки погіршує керуваність перетворювача, збільшує габарити і втрати;

2. можливість плавного пуску мають всі перетворювачі окрім перетворювача підвищувального типу;

3. трансформатор легко інтегрувати до структури всіх перетворювачів крім підвищувального, при цьому аналог понижувального перетворювача – прямоходовий трансформатор повинен мати обмотку розмагнічування, що збільшує габарити і обмежує режими його роботи;

4. вихід на постійному струмі мають всі аналізовані перетворювачі.

Топології прямо- та зворотньоходового перетворювачів не були розглянуті, оскільки перетворювачі типу SEPIC та Cuk є їх подальшим розвитком. В табл.3.1 зазначено відповідність вимогам всіх аналізованих типів перетворювачів. Можна зробити висновок, що вимогам поставленої задачі найбільше відповідають перетворювачі типу SEPIC та Cuk. Однак аналіз даних перетворювачів свідчить, що SEPIC володіє меншою пульсацією вхідного струму і кращу керуваність на відміну від Cuk перетворювача.

Табл.3.1

Перетворювач	Вимоги			
	1	2	3	4
<i>Понижувальний</i>	-	+	+/-	+
<i>Підвищувальний</i>	+	-	-	+
<i>Інвертувальний</i>	-	+	+	+
<i>SEPIC</i>	+	+	+	+
<i>Cuk</i>	+	+	+	+

Отже, для підвищення рівня електромагнітної сумісності системи мікрозварювання слід доповнити його функціональну схему додатковим вузлом корекції. В такому випадку можна дещо спростити функціональну схему комірки, знизивши її габарити та втрати енергії. Класичний ККП, в основі якого покладено топологію підвищуючого перетворювача не відповідає поставленим вимогам, деякі з яких впливають на рівень ЕМС а інші пов'язані з особливостями ємнісного накопичувача. Саме тому було обрано найбільш відповідну на думку автора топологію SEPIC перетворювача [37].

3.2. Принцип роботи та часові діаграми обраної базової топології

Перетворювач постійного струму з несиметрично навантаженою первинною індуктивністю (SEPIC – Single Ended Primary Inductance Converter) забезпечує стабільний рівень напруги в навантаженні незалежно від напруги мережі живлення. За рахунок обмеження амплітуди та тривалості перехідних процесів такий перетворювач генерує низький рівень завад, тому цей тип перетворювачів цікавий до аналізу та використання для в системах з високим рівнем ЕМС. Спрощена структурна ККП на основі топології SEPIC перетворювача представлена на рис.3.5.

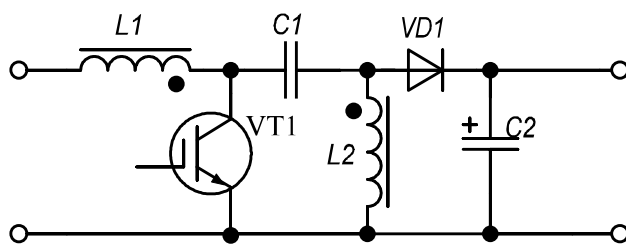
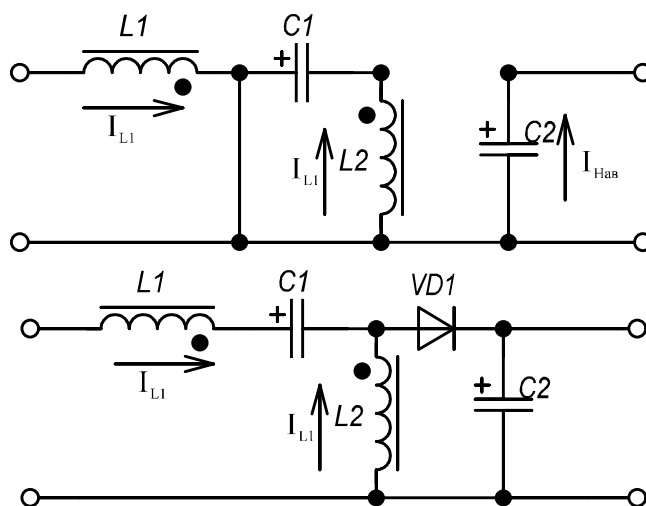


Рис.3.5 Спрощена топологія SEPIC перетворювача

В основі будь якого SEPIC знаходяться два дроселі L_1 та L_2 . Конструктивно вони можуть бути виконані на спільному осердді, що зменшує пульсації вхідної напруги та забезпечує більш низьку індуктивність розсіювання. Також особливістю даного виду перетворювачів є розв'язуючий конденсатор C_3 , який об'єднує обмотки. Конденсатор C_4 окрім функції фільтрації вихідної напруги також виконує функцію живлення навантаження в момент закритого стану силового транзистора VT_1 . Еквівалентні схеми заміщення при роботі перетворювача в режимі неперервного протікання струму в навантаженні наведені на рис. 3.6 [38].

Рис.3.6 Стани схеми при: а) силовий ключ замкнений;
б) силовий ключ розімкнений

Алгоритм роботи такого перетворювача (рис.3.7) наступний: при відкриванні силового транзистора VT_1 відбувається накопичення енергії в дроселі L_1 від мережі живлення. В свою чергу дросель L_2 накопичує енергію від конденсатора C_3 , який підключений паралельно. В замкнутому стані

силового ключа навантаження живиться виключно за рахунок енергії, накопиченої в конденсаторі C_3 , оскільки діод VD_1 зміщений в зворотному напрямку. Коли транзистор VT_1 закритий, струм дроселя L_1 протікає через конденсатор C_3 і далі разом зі струмом дроселя L_2 через діод VD_1 в конденсатор C_4 та навантаження. Обидва конденсатори C_3 та C_4 перезаряджаються і забезпечують енергією навантаження та дросель L_2 при наступному відпиранні транзистора VT_1 .

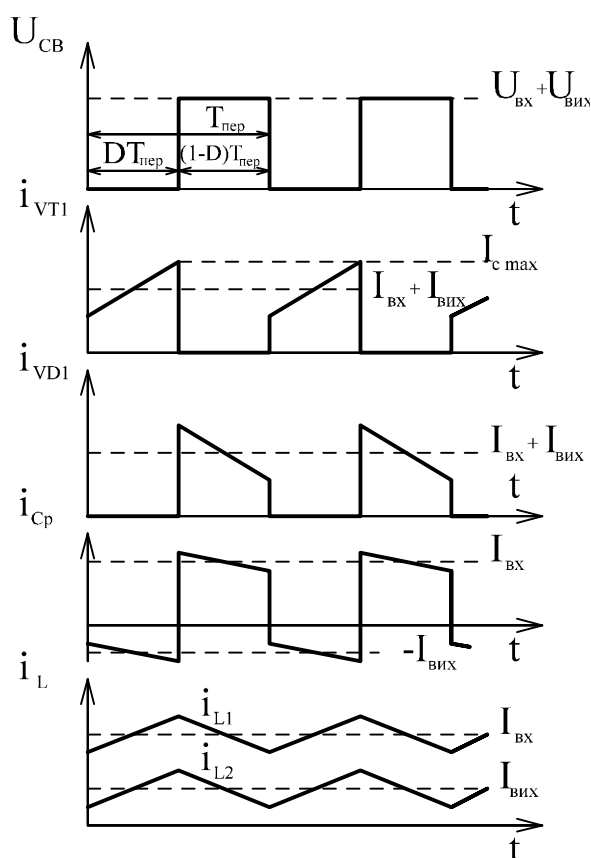


Рис.3.7 Спрощені часові діаграми струмів та напруг SEPIC перетворювача

Для забезпечення гальванічної розв'язки навантаження та мережі живлення до структури перетворювача слід імплементувати трансформатор. Окрім прямого підходу, при якому паралельно дроселю L_2 встановлюється трансформатор TV_1 , можливий підхід при якому дросель L_2 об'єднується з первинною обмоткою імпульсного трансформатора. При такому підході зменшується кількість компонентів схеми і, як наслідок, підвищується

надійність пристрою в цілому. Однак такий підхід не позбавлений недоліків, основний з яких – зниження налаштованості перетворювача, оскільки при зміні параметрів первинної обмотки для досягнення необхідних параметрів перетворювача, необхідно також змінювати вторинну обмотку імпульсного трансформатора. При розміщенні дроселів L_1 та L_2 на різних осердях необхідно забезпечити баланс швидкості наростання напруги в кожному з дроселів. Тобто при відкритому та закритому станах силового ключа значення добутків напруги на кожному дроселі з часом повинні мати однакову амплітуду и протилежну полярність. Використання трансформатора окрім забезпечення гальванічної розв'язки, виконує ще одну важливу роль – узгоджує напругу мережі з робочою напругою накопичувача. Це дозволяє перетворювачу працювати в режимі неперервного струму в дроселі при коефіцієнті заповнення $D = 0.5$ і одночасно забезпечувати необхідну напругу у вторинному ланцюзі. Оскільки в якості навантаження виступає ємнісний накопичувач, схему комірки – перетворювача можна додатково спростити, прибравши конденсатор у вторинному ланцюзі, кінцева схема комірки представлена на рис.3.8.

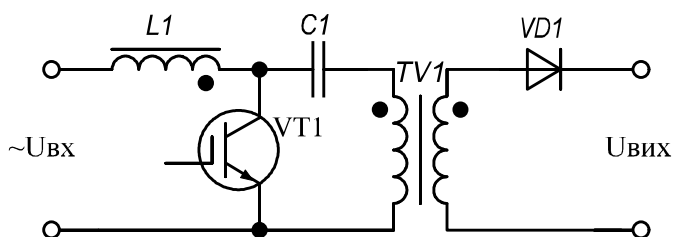


Рис.3.8 Схема SEPIC перетворювача з гальванічною розв'язкою

Отже, ККП на основі SEPIC топології забезпечують високий рівень ЕМС за рахунок особливостей топології. За рахунок наявності розділюючого конденсатора C_3 первинний ланцюг перетворювача захищений від короткого замикання у вторинному ланцюгу та вигорання силового ключа. Також до переваг даної топології слід віднести мінімальну кількість активних

компонентів і відносно просту систему керування та можливість об'єднання у модульну структуру, що додатково підвищує рівень ЕМС перетворювача з мережею живлення.

3.3. Багатоланкова структура побудови перетворювачів, основні переваги та недоліки

Багатокоміркові (модульні) перетворювачі складаються з однотипних взаємозамінних комірок (модулів), які по входу та по виходу можуть бути з'єднані як паралельно, так і послідовно. Перетворювачі такої структури окрім вищого рівня ЕМС з мережею живлення володіє також рядом інших переваг, серед яких:

- Висока надійність, внаслідок того, що декілька комірок можуть бути додані як функціонально надлишкові і в разі відмови основних комірок – перетворювачів можуть працювати замість них;
- Збільшення вихідної потужності чи вхідної напруги без необхідності паралельного чи послідовного ввімкнення силових транзисторів і введення систем вирівнювання струмів та напруг між ними;
- Зменшення розміру перетворювача, оскільки більш малі комірки можуть працювати на більш високих частотах, завдяки чому зменшуються габаритні розміри реактивних компонентів (трансформаторів, дроселів та конденсаторів);
- Уніфікація комірок, оскільки при паралельному з'єднанні N комірок по виходу збільшується в N разів вихідна потужність, а при послідовному з'єднанні по виходу – в N разів вихідна напруга, а при послідовному з'єднанні по входу – в N разів вхідна напруга.

При паралельному з'єднанні комірок – перетворювачів по входу та по виходу (рис.3.9а) в якості комірок можуть використовуватись як однотактні, так і двотактні перетворювачі постійної напруги. При з'єднанні комірок

паралельно по входу та послідовно по виходу (рис.3.9б) повинні використовуватись комірки – перетворювачі з гальванічною розв’язкою входу та виходу, а вихідний ланцюг комірки при вимкнених транзисторах повинен володіти низьким опором для зменшення втрат при протіканні крізь комірку вихідного струму. В якості комірки перетворювача може бути використаний двотактний перетворювач з двонапівперіодним випрямлячем на виході. При з’єднанні комірок по входу послідовно, а по виходу паралельно (рис.3.9в) комірки як і в попередньому випадку повинні мати вихідний трансформатор і, крім того, при вимиканні повинен мати низький опір вхідного ланцюга для зниження втрат при протіканні струму. Для цього паралельно входу комірки встановлюється транзистор, який закорочує вхід або необхідно забезпечувати одночасне відкривання всіх транзисторів комірки [39].

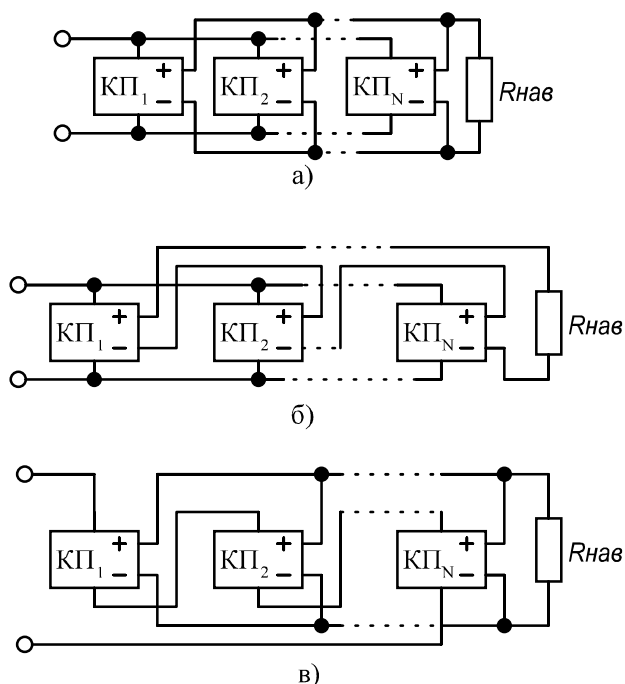


Рис.3.9 Схеми з'єднання комірок - перетворювачів

У зв'язку з особливостями обраної топології комірки при побудові багатокоміркового перетворювача обрано підхід паралельного з'єднання комірок по входу та по виходу. При обраному підході з'єднання, комірки – перетворювачі можуть працювати за двома алгоритмами:

1. використання $2n$ комплементарних комірок – перетворювачів, які згруповані попарно. Вони розраховані на однаковий струм, перша комірка працює з коефіцієнтом заповнення γ , а друга $1-\gamma$;

2. використання n однакових комірок – перетворювачів, які працюють з деяким фазовим зсувом $2\pi/n$ і перекриттям.

Алгоритм роботи (1) наведено на рис.3.10а. До переваг даного алгоритму роботи слід віднести відсутність пульсацій сумарного струму кожної групи комірок, а також можливість зменшення вхідної індуктивності комірок за рахунок того, що максимальний струм комірки не перевищує значення вхідного струму. Однак комірки – перетворювачі при такому підході працюють не в оптимальному режимі, а їх уніфікація не є можливою, на відміну від комірок – перетворювачів в ККП, побудованих за принципом (2). На рис.3.10б показано принцип формування струму споживання на основі трьох однакових комірок.

Однак при роботі кожної з комірок з $\gamma = 0.5$ можна об'єднати обидва підходи в один, зберігши всі переваги та усунувши вищезазначені недоліки.

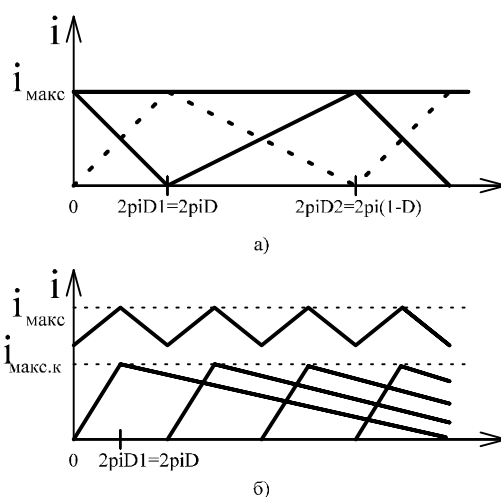


Рис.3.10 Принцип формування струму:

а) компліментарними комірками; б) однаковими комірками

3.4. Висновки за третім розділом

Отже, відповідно до вимог, встановлених до зарядного пристрою, серед топологій підвищувального, понижувального, інвертувального, Cuk та SEPIC перетворювачів було обрано остатню. Насамперед це пов'язано з характером та особливостями навантаження. В якості навантаження виступає накопичувач з суперконденсаторів, які з'єднані паралельно, тому немає необхідності встановлювати вихідний конденсатор у вторинному колі. Така структура накопичувача має низьку робочу напругу, але знижений еквівалентний внутрішній опір. Саме тому класичне рішення ККП на основі підвищувального перетворювача не підходить, оскільки в такому випадку необхідний додатковий вузол узгодження напруг, що викликає додаткові втрати та ускладнює систему заряду в цілому. Імплементований до топології SEPIC-перетворювача імпульсний трансформатор, окрім узгодження напруг виконує важливу функцію гальванічної розв'язки, забезпечуючи безпеку користувачів.

Подальшим розвитком зарядного пристрою за топологію SEPIC перетворювача є модульна (багатокоміркова) структура. Виділяють два алгоритми роботи комірок – з $2n$ однаковими комірками, що працюють з різним коефіцієнтом заповнення (алгоритм повної компенсації пульсацій) та алгоритм, при якому використовують n однакових комірок, які працюють з однаковим коефіцієнтом заповнення, однак з фазовим зсувом $2\pi/n$. Подальшим розвитком цих алгоритмів є алгоритм роботи Interleaved, при якому комірка-перетворювач працює в граничному режимі протікання струмів. Даний алгоритм забезпечує збереження всіх переваг вищезазначених алгоритмів, а також володіє додатковими перевагами, що викликані роботою перетворювача в граничному режимі протікання струмів.

РОЗДІЛ IV. РОЗРАХУНОК ТА МОДЕЮВАННЯ ВУЗЛА ЗАРЯДУ СИСТЕМИ КОНТАКТНОГО ЗВАРЮВАННЯ

4.1. Моделювання багатокоміркового вузла заряду в середовищі MATLAB Simulink

Для дослідження параметрів коефіцієнту нелінійних спотворень та коефіцієнту потужності у програмному середовищі MATLAB Simulink було створено модель і отримано параметри для перетворювача з кількістю комірок 1 – 4 (рис.4.1). На рис.4.2 зображено базову комірку – перетворювач.

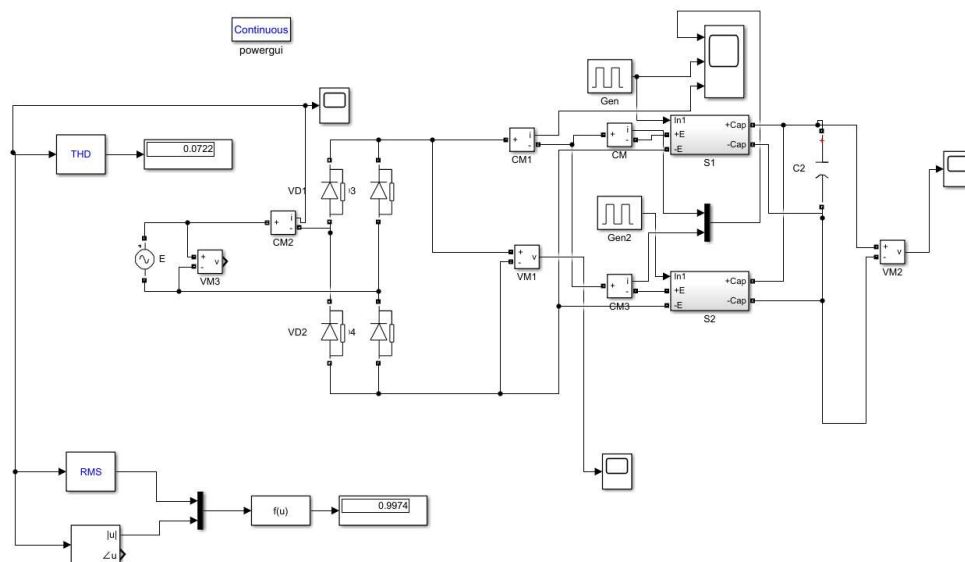


Рис.4.1 Симуляційна модель зарядного пристрою з кількістю комірок $n=2$

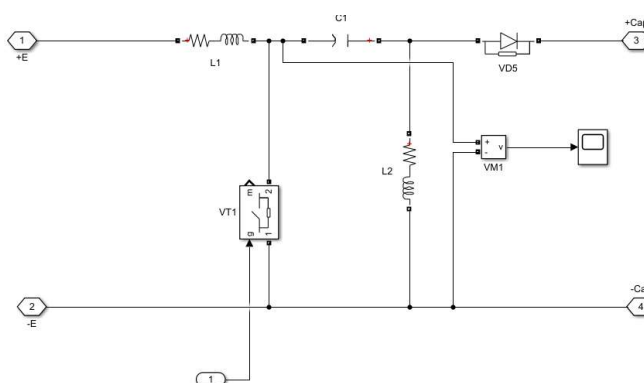


Рис.4.2. Модель базової комірки – перетворювача зарядного пристрою

За початкові умови було обрано:

- $U_{вх.амп} = 311 \text{ В}$;
- ємність навантаження $C_2 = 1 \text{ Ф}$;
- робоча частота $f_{роб} = 100000 \text{ кГц}$;
- тривалість симуляції $t_{сим} = 1 \text{ с}$
- коефіцієнт заповнення $\gamma = 0.5$.

В залежності від кількості комірок перераховувалися номінали компонентів базової комірки – перетворювача, її параметри, а також результати моделювання для кількості комірок 1 – 4 наведено в табл. 4.1,

Табл. 4.1

Кількість комірок	THD, %	PF	C1	L1	L2	φ°
1	35.22	0.9429	0.1 мкФ	2 мГн	6 мГн	0
2	7.22	0.9974	0.05 мкФ	1 мГн	3 мГн	180
3	6.74	0.9977	0.025 мкФ	0.5 мГн	1.5 мГн	120
4	2.1	0.998	0.012 мкФ	0.25 мГн	0.75 мГн	90

де φ – фазовий зсув між комірками.

Відповідно до результатів моделювання було обрано структуру перетворювача з кількістю комірок 2. Перетворювач даної конфігурації забезпечує високий рівень показників коефіцієнту нелінійних спотворень та коефіцієнту потужності, які відповідають стандартам. У порівнянні з однокомірковою схемою приріст досліджуваних показників складає 388% та 5.78% відповідно. Подальше збільшення кількості комірок не призводить до відповідного збільшення показників, однак зменшує надійність системи перетворювача в цілому. Форма струму споживання для двохкоміркового перетворювача представлено на рис. 4.3 [40].

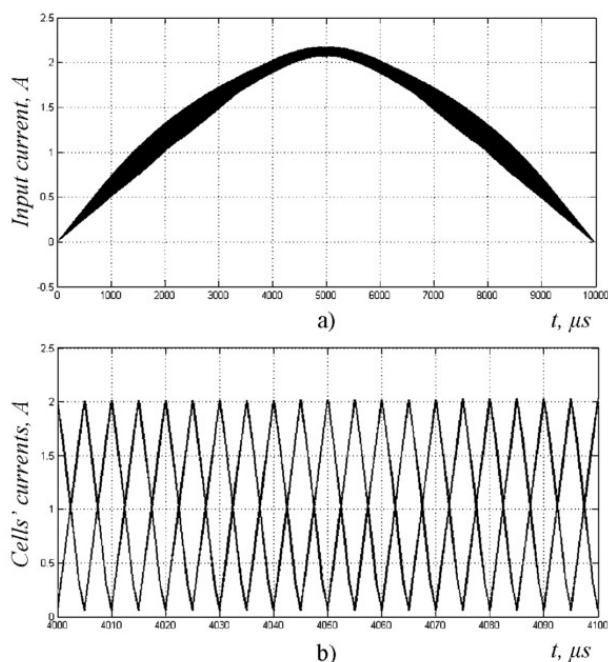


Рис.4.3. а) форма струму споживання двохкоміркового зарядного пристрою; б) струм комірок-перетворювачів

4.2. Розрахунок ємнісного накопичувача

Одним з найбільш суттєвих недоліків суперконденсаторів є їх високий внутрішній опір, що призводить до значних втрат енергії під час процесу заряду та особливо під час процесу розряду накопичувача на навантаження. Саме тому необхідно зменшити даний негативний параметр. Досягти цього можна у випадку використання паралельного з'єднання елементів накопичувача. В його основі покладено суперконденсатори моделі BCAP0350 E270 T11 виробника Maxwell, основні характеристики яких наведені в табл. 4.2:

Табл. 4.2

Назва параметра	Величина
Номінальна ємність	350 Ф
Максимальне значення ESR_{DC}	3.2 мОм
Номінальна напруга	2.7 В
Максимальний струм	170 А
Робочий діапазон температур	Від -40°C до $+65^{\circ}\text{C}$

У випадку з'єднання трьох суперконденсаторів моделі ВСАР0350 E270 T11 у паралельну структуру отримаємо:

- загальна напруга накопичувача дорівнює максимальні напрузі на кожному з його елементів і складає:

$$U_{заг} = U_1 = U_2 = U_3 = 2.7 В, \quad (4.1)$$

де U_1, U_2, U_3 напруга на кожному суперконденсаторі накопичувача;

- загальна ємність накопичувача дорівнює:

$$C_{заг} = 350 \cdot 3 = 1050 \text{ Ф}; \quad (4.2)$$

- еквівалентний внутрішній опір накопичувача складає:

$$R_{вн} = \frac{3 \cdot 2 \cdot 10^{-3}}{3} = 1.067 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}. \quad (4.3)$$

З формули (4.3) видно, що падіння напруги на внутрішньому опорі накопичувача з паралельною структурою у 3 рази менше, ніж падіння напруги накопичувача, створеного одним суперконденсатором;

- загальна накопичена енергія дорівнює:

$$W_{заг} = \frac{U^2 \cdot C}{2} = \frac{2.7^2 \cdot 1050}{2} = 3827.25 \text{ Дж}. \quad (4.4)$$

Накопичувач на основі послідовної і паралельної структур запасє однакову кількість енергії, але падіння напруги першого буде більшим за рахунок більшого внутрішнього опору, що збільшує витрати енергії та знижує загальний ККД.

Перегрів суперконденсаторів значною мірою впливає на його показники внутрішнього опору та ємності, саме тому важливо дотримувати роботу накопичувача у встановленому в технічній документації тепловому режимі. Відповідно до технічного завдання, для джерела живлення існує два граничні температурні режими роботи:

1. при температурі оточуючого середовища $t_{\min} = +5^\circ \text{C}$;
2. при температурі оточуючого середовища $t_{\max} = +40^\circ \text{C}$.

З технічної документації відомо, що суперконденсатор моделі ВСАР0350 E270 T11 при напрузі $U_{нак} = 2.7 В$ не втрачає своїх властивостей до

температури $t_{\max}=+65^{\circ}\text{C}$. В першому допустимому режимі роботи різниця між температурою накопичувача і оточуючого середовища складає:

$$\Delta T = t_{\text{накоп}} - t_{\text{серед}} = 65 - 5 = 60^{\circ}\text{C}, \quad (4.5)$$

де $t_{\text{накоп}}$ - максимально допустима температура накопичувача, $t_{\text{серед}}$ - мінімальна температура оточуючого середовища.

Для такого режиму роботи максимальний середньоквадратичний струм заряду розраховується за формулою і складає:

$$i_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{\Delta T}{ESR \cdot R_{CA}}} = \sqrt{\frac{60^{\circ}\text{C}}{1.067 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \cdot 10.9 \frac{\text{ }^{\circ}\text{C}}{\text{Вт}}}} = 71.65 \text{ А}, \quad (4.6)$$

де ESR - внутрішній еквівалентний опір накопичувача, R_{CA} - термічний опір.

Для другого режиму роботи різниця температур складає:

$$\Delta T = t_{\text{накоп}} - t_{\text{серед}} = 65 - 40 = 25^{\circ}\text{C}, \quad (4.7)$$

де $t_{\text{накоп}}$ - максимально допустима температура накопичувача, $t_{\text{серед}}$ - мінімальна температура оточуючого середовища.

Для цього режиму роботи максимальний середньоквадратичний струм заряду розраховується за формулою і складає:

$$i_{\text{макс}} = \sqrt{\frac{\Delta T}{ESR \cdot R_{CA}}} = \sqrt{\frac{25^{\circ}\text{C}}{1.067 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \cdot 10.9 \frac{\text{ }^{\circ}\text{C}}{\text{Вт}}}} = 46.36 \text{ А}, \quad (4.8)$$

де ESR - внутрішній еквівалентний опір накопичувача, R_{CA} - термічний опір

Відповідно до технічного завдання до однієї зварної точки передається $E_{зв} = 2 \text{ Дж}$ енергії за час $t_{зв} = 10 \text{ мс}$ з паузою $t_{пауз} = 1 \text{ с}$. Мінімальний струм заряду після одного зварного з'єднання при ККД формувача імпульсів струму зварювання $\eta=0.95$ складає:

- енергія, витрачена на одне зварювання $E = 2.1 \text{ Дж}$;
- нехай струм заряду протікає за час $t_{зар} = 0.5 \cdot t_{пауз} = 0.5 \text{ с}$, тоді

$$P_{\min} = U_{\text{нак}} \cdot I_{\text{зар.мін}} = \frac{E}{t_{\text{зар}}} = \frac{2.1 \text{ Дж}}{0.5 \text{ с}} = 4.2 \text{ Вт}, \quad (4.9)$$

звідки

$$I_{\text{зар.мін}} = \frac{P_{\min}}{U_{\text{нак}}} = \frac{4.2 \text{ Дж}}{2.7 \text{ В}} = 1.55 \text{ А}. \quad (4.10)$$

Вибір величин струму заряду $I_{\text{зар}}$ залежить від двох параметрів – загальних втрат перетворювача вузла заряду на одне або декілька зварювань та часу вводу пристрою в роботу, тобто часу, за який накопичувач повністю заряджається. Обравши струм заряду $I_{\text{зар}} = 20 \text{ А}$ час повного заряду накопичувача складає:

$$t_{\text{вводу}} = \frac{W_{\text{заг}}}{P_{\text{зар}}} = \frac{W_{\text{зар}}}{I_{\text{зар}} \cdot U_{\text{нак}}} = \frac{3827.75 \text{ Дж}}{20 \text{ А} \cdot 1.55 \text{ В}} = 123.46 \text{ с}. \quad (4.11)$$

Заряд накопичувача може відбуватися за двома алгоритмами. У першому випадку, коли $I_{\text{зар}} \geq I_{\text{мін}}$ дозаряд відбувається після кожного зварювання, у другому випадку, коли $I_{\text{зар}} \gg I_{\text{мін}}$ дозаряд накопичувача відбувається після n зварних точок.

Оскільки імпульсний трансформатор окрім гальванічної розв'язки, також виконує роль узгодження напруг вторинного кола перетворювача з напругою накопичувача. Струм первинної обмотки імпульсного трансформатора розраховується зі співвідношення:

$$I_{\text{перв}} = \frac{I_{\text{втор}}}{k} = \frac{I_{\text{зар}} \cdot U_2}{U_1} = \frac{20 \text{ А} \cdot 2.7 \text{ В}}{220 \text{ В}} = 0.245 \text{ А}. \quad (4.12)$$

4.3. Розрахунок та підбір компонентів SEPIC перетворювача

Як було зазначено в Розділі 3, переваги алгоритму Interleaved роботи комірок – перетворювачів зберігаються при в граничному режимі протікання

струмів (при $D=0.5$). В загальному випадку коефіцієнт заповнення SEPIC перетворювача розраховується за формулою:

$$D = \frac{U_{вих} + U_{\partial.лр}}{U_{вих} + U_{вх.мін} + U_{\partial.лр}}, \quad (4.13)$$

де $U_{вих}$ - вихідна напруга перетворювача, $U_{вх.мін}$ - мінімальна вхідна напруга перетворювача, $U_{\partial.лр}$ - пряме падіння напруги діода вихідного кола.

В розділі 3 було прийнято обрати конструкцію дроселів L_1 та L_2 , як виконаних на окремих осердях та $L_1 = L_2$. У такому випадку індуктивність дроселів розраховується за формулою:

$$L_1 = L_2 = \frac{U_{вх.мін}}{\Delta I_L \cdot f_{роб}} \cdot D, \quad (4.14)$$

де $f_{роб}$ - робоча частота перетворювача, ΔI_L - розмах пульсацій струму в дроселі, який зазвичай обирається на рівні 30% від максимального вхідного струму і розраховується за формулою:

$$\Delta I_L = 0.3 \cdot I_{вх} = 0.3 \cdot \frac{I_{перв}}{\eta} = 0.3 \cdot \frac{0.245 A}{0.95} = 0.077 A. \quad (4.15)$$

Отже, відповідно до формул індуктивність $L_1 = L_2 = 12.14$ мкГн.

Максимальний струм індуктивності L_1 розраховується за формулою:

$$I_{L1.макс} = I_{вих} \cdot \frac{U_{вих}}{U_{вх.мін}} \cdot \left(1 + \frac{0.3}{2}\right) = 0.245 \cdot \frac{220}{187} \cdot \left(1 + \frac{0.3}{2}\right) = 0.345 A. \quad (4.16)$$

Максимальний струм індуктивності L_2 (первинної обмотки імпульсного трансформатора) розраховується за формулою:

$$I_{L2.макс} = I_{перв} \cdot \left(1 + \frac{0.3}{2}\right) = 0.245 \cdot \left(1 + \frac{0.3}{2}\right) = 0.293 A. \quad (4.17)$$

Максимальний струм індуктивності L_3 (вторинної обмотки імпульсного трансформатора) розраховується за формулою:

$$I_{L3.макс} = k \cdot I_{перв} \cdot \left(1 + \frac{0.3}{2}\right) = 81.48 \cdot 0.245 \cdot \left(1 + \frac{0.3}{2}\right) = 23 A. \quad (4.18)$$

Отже, параметри індуктивності L_1 :

- максимальний струм $I_{L1_{\max}} = 0.345 \text{ A}$;
- мінімальна індуктивність $L_{1_{\min}} = 12.14 \text{ мкГн}$.

У відповідності до параметрів дросель L_1 обрано моделі CDRH4D28NP-220NC з параметрами:

- індуктивність $L_1 = 22 \text{ мкГн}$;
- робочий струм $I_{L1} = 0.7 \text{ A}$.

Імпульсний трансформатор необхідно розраховувати, виходячи з умов: коефіцієнт передачі $k=81.48$, максимальний струм первинної обмотки $I_{L2_{\max}} = 0.293 \text{ A}$, індуктивність первинної обмотки $L_{2_{\min}} = 12.14 \text{ мкГн}$, максимальний струм вторинної обмотки $I_{L3_{\max}} = 23 \text{ A}$.

За основу імпульсного трансформатора обрано феритове кільце з порошкового заліза Т80-12 розміром $20.19 \times 12.57 \times 6.35 \text{ мм}$ з коефіцієнтом індуктивності $A_L = 2.2 \text{ нГ}$, ефективною площею перерізу магнітопроводу 23.1 мм^2 , ефективною довжиною магнітопроводу 51.4 мм .

Індуктивність первинної обмотки трансформатора залежить від кількості витків, які для заздалегідь відомої індуктивності розраховується за формулою:

$$N_{\text{перв}} = \sqrt{\frac{L}{A_L}} = \sqrt{\frac{15 \cdot 10^{-6}}{2.2 \cdot 10^{-9}}} = 82.58 \approx 83. \quad (4.19)$$

Густина струму в обмотках прийнята на рівні $j = 4 \frac{\text{A}}{\text{мм}^2}$. Для зниження появи скін – ефекту в якості дроту для намотування обрано літцендрат ЛЕЛ, який складається з 12 провідників діаметром 0.1 мм з еквівалентною площею перерізу 0.0942 мм^2 , зовнішній діаметр такого дроту складає 0.54 мм .

Кількість витків вторинної обмотки розраховується зі співвідношення:

$$N_{\text{втор}} = \frac{N_{\text{втор}}}{k} = \frac{83}{81.48} = 1.02 \approx 1. \quad (4.20)$$

В якості дроту вторинної обмотки обрано літцендрат ЛЕЛ – 180, який складається з 75 провідників діаметром 0.315 мм з еквівалентною площею перерізу 5.8448 мм².

Оскільки струм первинного ланцюга перетворювача досить низький, а напруга навпаки висока, в якості силового ключа обрано високовольтний IGBT транзистор. Основні параметри ключа:

- максимальний струм переходу колектор – емітер

$$I_{KE.макс} = I_{L1.макс} + I_{L2.макс} = 0.345 + 0.293 = 0.638 \text{ A};$$

- напруга переходу колектор – емітер $U_{KE} = U_{вх.макс} + U_{вих} = 462 \text{ В};$
- робоча частота $f_{роб} = 100 \text{ кГц}.$

Транзистор повинен мати низьку затворну ємність для зниження втрат на керуванні та низький опір каналу у відкритому стані для зниження витрат провідності. На основі встановлених вимог було обрано транзистор IGP01N120H2 з параметрами при $t_{нав} = 25^\circ\text{C}$:

- максимальний струм переходу колектор – емітер $I_{KE} = 3.2 \text{ A};$
- максимальна напруга переходу колектор – емітер $U_{KE} = 1200 \text{ В};$
- максимальна напруга переходу затвор – емітер $U_{3E} = \pm 20 \text{ В};$
- заряд затвору $q_3 = 8.6 \text{ нКл};$
- час відкривання $t_{відк} = 19.3 \text{ нс};$
- час запирання $t_{закр} = 398 \text{ нс}.$

Максимальний час, за який система керування повинна перезаряджати затворну ємність транзистора складає:

$$t_{кер.макс} = \frac{1}{f_{роб}} = \frac{1}{10^5} = 10 \text{ мкс}. \quad (4.21)$$

Нехай система керування формує сигнал керування час:

- $t_{к.відк} = 40 \cdot t_{відк} = 40 \cdot 19.3 = 772 \text{ нс}$
- $t_{к.закр} = 2 \cdot t_{закр} = 2 \cdot 398 = 796 \text{ нс}$

Мінімальний опір каналу К – Е силового транзистора при $U_{3E} \geq 9B$, нехай $U_{3E} = 12B$, тоді затворна ємність, яку необхідно перезарядити складає:

$$C_3 = q_3 \cdot U_3 = 8.6 \cdot 10^{-9} \cdot 12 = 103.2 \text{ нФ}. \quad (4.22)$$

Отже, система керування повинна забезпечувати струм сигналу керування відкриття транзистора:

$$I_{\text{відк}} = C_3 \cdot \frac{\Delta U}{\Delta t} = \frac{103.2 \cdot 10^{-9} \cdot 12}{772 \cdot 10^{-9}} = 1.6 \text{ A}, \quad (4.23)$$

та сигнал замикання транзистора зі струмом:

$$I_{\text{зак}} = C_3 \cdot \frac{\Delta U}{\Delta t} = \frac{103.2 \cdot 10^{-9} \cdot 12}{796 \cdot 10^{-9}} = 1.55 \text{ A}. \quad (4.24)$$

Для підвищення завадостійкості та збереження системи керування в цілісності в разі виходу з штатного режиму роботи силових ключа, необхідно забезпечити гальванічну розв'язку між затвором транзистора та СК. При використанні додаткової оптопари знижується загальна швидкодія та надійність системи керування, тому слід використовувати гальванічно ізолюваний драйвер, наприклад 1EDI20H12AH, з параметрами:

- вихідний струм сигналу керування $I_{\text{кер}} = \pm 2A$;
- рівень сигналу керування $U_{\text{кер.макс}} = 13B$;
- максимальний час формування сигналу відкриття $t_{\text{відк}} = 162 \text{ нс}$;
- максимальний час формування сигналу закриття $t_{\text{закр}} = 169 \text{ нс}$.

Типова схема електрична принципова підключення драйвера 1EDI20H12AH з уніполярним живленням представлена на рис. 4.4,

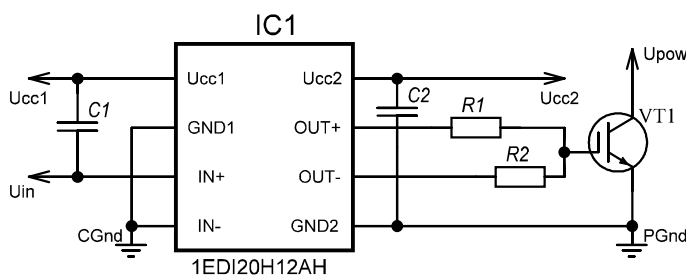


Рис.4.4 Типова схема ввімкнення драйверу затвору силового транзистора

де U_{cc1} та U_{cc2} – напруги живлення логіки та формувача імпульсу керування відповідно, U_{in} – сигнал керування зовнішньої системи керування, через виводи OUT+ OUT- та струмообмежуючі резистори R_1 та R_2 на затвор силового транзистора подаються керуючі сигнали відкриття та запирання відповідно. Оскільки обрано $t_{к.відк} \approx t_{к.закр} = 796 \text{ нс}$, тоді:

$$R_1 = R_2 = \frac{U_{3E}}{I_{зак}} = \frac{12 \text{ В}}{1.55 \text{ А}} = 7.74 \text{ Ом}. \quad (4.25)$$

Номінали резисторів R_1 та R_2 обрано з ряду E96, $R_1 = R_2 = 7.68 \text{ Ом}$. Відповідно до рекомендацій виробника по ланцюгам живлення логіки та формувача сигналу керування слід встановити керамічні шунтуючі конденсатори $C_1 = 0.1 \text{ мкФ}$ та $C_2 = 1 \text{ мкФ}$ відповідно.

Вихідний діод SEPIC перетворювача обирається відповідно до максимального струму силового ключа і у випадку використання трансформатора розраховується за формулою:

$$I_{\text{діод}} = k \cdot I_{KE.макс} = 81.48 \cdot 0.638 = 51.98 \text{ А}, \quad (4.26)$$

та відповідно до зворотної напруги:

$$U_{зв.діод} = 2 \cdot U_{вих} = 2 \cdot 2.7 = 5.4 \text{ В}. \quad (4.27)$$

На основі цих даних обрано діод Шотки 60СРТ045 з параметрами:

- максимальний прямий струм $I_{пр.діод} = 60 \text{ А}$;
- зворотна напруга $U_{зв} = 45 \text{ В}$;
- пряме падіння напруги $U_{над.пр} = 0.5 \text{ В}$.

Вибір конденсатора залежить від рівня пульсацій та протікаючого крізь нього струму, середньоквадратичне значення якого розраховується за формулою:

$$I_{\text{конд}} = I_{вих} \sqrt{\frac{U_{вих}}{U_{вх.мін}}} = 0.245 \sqrt{\frac{220}{187}} = 0.265 \text{ А}. \quad (4.28)$$

Ємність розраховується за формулою:

$$C_{\text{розд.кond}} = \frac{I_{\text{перв}} \cdot D}{\Delta U \cdot f_{\text{роб}}}, \quad (4.29)$$

де ΔU - пульсація напруги на розділюючому конденсаторі.

Максимальна напруга на конденсаторі складає: $U_{\text{кond}} > U_{\text{вх.макс}}$

Нехай $\Delta U = 0.5 \text{ В}$, тоді $C_{\text{розд.кond}} = 2.45 \text{ мкФ}$. Оберемо плівковий конденсатор МКР10-2.2U/630 з параметрами:

- ємність $C = 2.2 \text{ мкФ}$;
- максимальна напруга $U_{\text{кond}} = 630 \text{ В}$.

Загальний вхідний струм вузла заряду складає суму вхідних струмів всіх базових комірок – перетворювачів і у випадку двохкоміркової структури складає:

$$I_{\text{вх.заг}} = I_{\text{вх1.макс}} + I_{\text{вх2.макс}} = 2 \cdot 0.345 = 0.69 \text{ А}, \quad (4.30)$$

де $I_{\text{вх1.макс}}$ та $I_{\text{вх2.макс}}$ максимальний струм споживання кожної з комірок, який чисельно дорівнює:

$$I_{\text{вх1.макс}} = I_{\text{вх2.макс}} = I_{L1.макс} = 0.345 \text{ А}. \quad (4.31)$$

4.4. Створення друкованої плати

В програмному середовищі Altium Design у відповідності до обраних компонентів було печатну плату дослідного зразка (рис.4.5).

Обрано ширину сигнальних ліній 1 мм, ширину силових ліній первинного і вторинного кіл 1 мм та 2.54 мм відповідно. В якості силових конекторів обрано 2EDGR-5.0-02P-14-00АН з максимальним струмом 25 А. Загальний вигляд друкованої плати показано на рис.4.6.

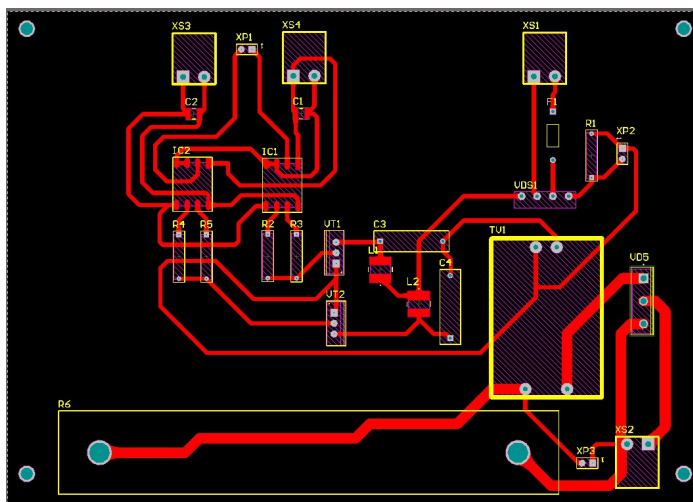


Рис.4.5 Друкована плата дослідного зразка двохкоміркового зарядного пристрою

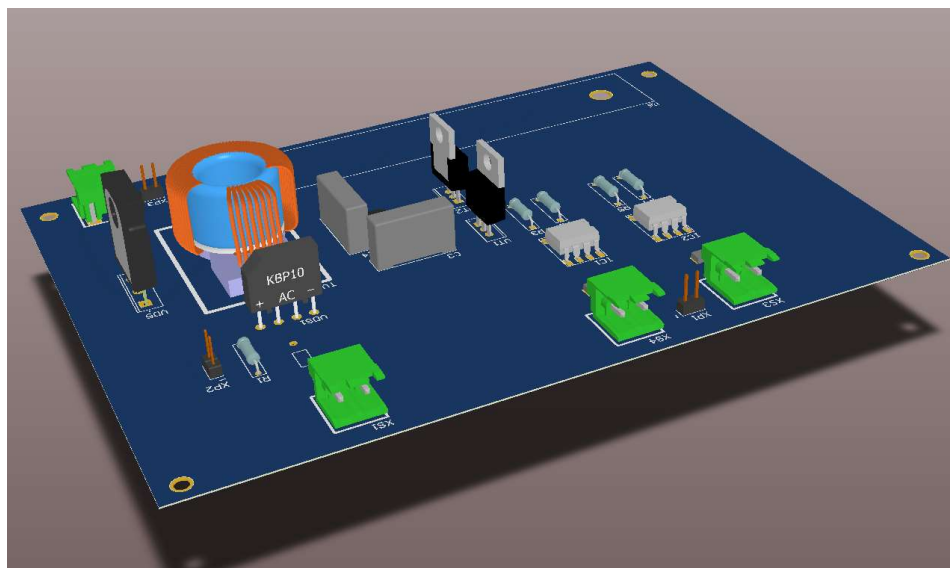


Рис.4.6 Загальний вигляд друкованої плати у 3D

4.5. Висновки за четвертим розділом

Отже, відповідно до результатів моделювання було обрано двокоміркову структуру перетворювача зарядного пристрою. Перетворювач даної конфігурації забезпечує високий рівень показників коефіцієнту нелінійних спотворень та коефіцієнту потужності, які відповідають стандартам. У порівнянні з однокомірковою схемою приріст досліджуваних показників складає 388% та 5.78% відповідно. Подальше збільшення кількості комірок не призводить до відповідного збільшення показників, однак зменшує надійність системи перетворювача в цілому.

Відповідно до адаптованих розрахункових співвідношень для двокоміркової структури перетворювача було підбрано компоненти з сучасної елементної бази. Спеціалізовані драйвери керування IGBT транзисторів забезпечують швидке керування навіть потужними силовими транзисторами з великою ємністю бази. В основі силового імпульсного трансформатора було обрано тороїд з розпиленого заліза, а в якості обмоточного дроту – літцендрат. Таке рішення дозволяє мінімізувати скін ефекти та збільшити ефективну робочу площу обмоточного дроту.

РОЗДІЛ V. РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП – ПРОЕКТУ

Метою даного розділу є формування підприємницького духу та формування здатностей щодо оцінювання ринкових перспектив і можливостей комерціалізації основних науково-технічних розробок, сформованих у попередній частині магістерської дисертації у вигляді розроблення концепції стартап-проекту в умовах висококонкурентної ринкової економіки глобалізаційних процесів.

Упродовж остатнього десятиліття стартап, як форма малого ризикового (венчурного) підприємництва набула широкого розповсюдження. Насамперед це пов'язано зі зростом доступності інтернету, як інструменту для комунікацій та збуту. Це полегшило вирішувати проблеми пошуку споживачів, інвесторів та ресурсів.

Однак створення та ринкове впровадження стартап – проектів відзначається підвищеним ризиком, ринково успішними за різними оцінками стають лише 10 – 20%. Насамперед це пов'язано із тим, що керівник проекту на початковому етапі не здатний перетворити ідею на робочу бізнес – модель. Для розроблення та виведення стартап – проектів на ринок необхідно виконати низку кроків, серед яких: визначення ринкових перспектив проекту, графік та принципи організації виробництва, фінансовий аналіз та аналіз ризиків і заходи щодо просування пропозиції для інвесторів. Узагальнено етапи розроблення стартап – проекту можна показати наступним чином:

1. Маркетинговий аналіз стартап-проекту

В межах цього етапу:

- розробляється опис самої ідеї проекту та визначаються загальні напрями використання потенційного товару чи послуги, а також їх відмінність від конкурентів;
- аналізуються ринкові можливості щодо його реалізації;
- на базі аналізу ринкового середовища розробляється стратегія ринкового впровадження потенційного товару в межах проекту.

2. Організація стартап-проекту

В межах цього етапу:

- складається календарний план-графік реалізації стартап-проекту;
- розраховується потреба в основних засобах та нематеріальних активах;
- визначається плановий обсяг виробництва потенційного товару, на основі чого формулюється потреба у матеріальних ресурсах та персоналі;
- розраховуються загальні початкові витрати на запуск проекту та планові загальногосподарські витрати, необхідні для реалізації проекту.

3. Фінансово-економічний аналіз та оцінка ризиків проекту

В межах цього етапу:

- визначається обсяг інвестиційних витрат;
- розраховуються основні фінансово – економічні показники проекту (обсяг виробництва продукції, собівартість виробництва, ціна реалізації, податкове навантаження та чистий прибуток) та визначаються показники інвестиційної привабливості проекту (запас фінансової міцності, рентабельність продажів та інвестицій, період окупності проекту);
- визначається рівень ризикованості проекту, визначаються основні ризики проекту та шляхи їх запобігання (реагування на ризики).

4. Заходи з комерціалізації проекту

Цей етап спрямовано на пошук інвесторів та просування інвестиційної пропозиції (оферти). Він передбачає:

- визначення цільової групи інвесторів та опису їх ділових інтересів;
- складання інвест – пропозиції (оферти): стислої характеристики проекту для попереднього ознайомлення інвестора із проектом;
- планування заходів з просування оферти: визначення комунікаційних каналів та площадок та планування системи заходів з просування в межах обраних каналів;

Дотримання всіх етапів розвитку стартап проекту створює передумови до успішного виходу стартап – проекту із залученням інвесторів. Однак необхідно розуміти, що для збільшення імовірності успішного розвитку стартап проекту необхідні спеціальні маркетингові знання [41].

5.1. Опис ідеї проекту

В таблиці 5.1 наведено опис ідеї запропонованого стартап – проекту.

Табл 5.1

<i>Зміст ідеї</i>	<i>Напрямки застосування</i>	<i>Вигоди для користувача</i>
Розробка вузла заряду системи контактного зварювання з високим рівнем ЕМС	Виготовлення електронних компонентів, медичних інструментів, ювелірних виробів.	Відсутня необхідність у використанні додаткових матеріалів (присадочний пруток, флюс та ін.). Висока продуктивність за рахунок короткої тривалості процесу зварювання, високого ступеня автоматизації та зменшення імовірності появи дефектів.
	Заміна процесу пайки при монтажі електронних компонентів на друкованих платах та суміжних процесах	Покращені електричні показники зварюваного з'єднання за рахунок відсутності припою. Більша термо- та вібростійкість. Можливість мініатюризації пристроїв за рахунок більш точного позиціонування зварюваних електродів. Нижчі витрати електричної енергії.

В таблиці 5.2 наведено перелік сильних, слабких та нейтральних характеристик запропонованої ідеї стартап – проекту

Табл 5.2

№ п/п	Техніко-економічні характеристики і ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів			W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	Конкурент №1	Конкурент №2			
1	Модульна структура	+	+	-			+
2	Робота в граничному режимі протікання струму	+	-	-			+
3	Уніфікація комірок - перетворювачів	+	-	-			+
4	Суміщений з вузлом заряду ККП	+	-	-			+
5	Кількість компонентів силової частини	Двомодульне виконання: 10	Двомодуль не виконання з ККП: 10	3 ККП: 7	-		

5.2. Технологічний аудит ідеї проекту

Технологічну здійсненність ідеї стартап – проекту подано в таблиці 5.3

Табл. 5.3

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Суміщена модульна структура системи заряду з ККП	Розробка, дослідження	Наявна	Доступна

5.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

До аналізу ринкових можливосте запуску стартап проекту відносять попередню характеристику потенційного ринку стартап – проекту, що наведено в табл. 5.4, характеристику потенційних клієнтів, що наведено в табл.5.5.

Табл. 5.4

<i>№ n/n</i>	<i>Показники стану ринку (найменування)</i>	<i>Характеристика</i>
1	Кількість головних гравців, од	20
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	200
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Відсутність масового виробника
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Немає
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	150

Табл. 5.5

<i>№ n/n</i>	<i>Потреба, що формує ринок</i>	<i>Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)</i>	<i>Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів</i>	<i>Вимоги споживачів до товару</i>
1	Зниження втрат електроенергії на виробництві, здешевлення обладнання, відповідність стандартам	Підприємства з виробництва обладнання для контактного зварювання.	Експлуатація як у динаміці так і у статичі, в різних, як складних, так і у умовах спокою	Надійність Якість Дешевизна Пунктуальність Відповідальність

Можливі фактори загроз та можливостей наведені в табл.5.6 та 5.7 відповідно.

Табл. 5.6

<i>№ n/n</i>	<i>Фактор</i>	<i>Зміст загрози</i>	<i>Можлива реакція компанії</i>
1	Подача електроенергії	Припинення подачі електроенергії на виробництво	Підключення автономного генератора.

Табл. 5.7

<i>№ n/n</i>	<i>Фактор</i>	<i>Зміст можливості</i>	<i>Можлива реакція компанії</i>
1	Якість виготовленого обладнання	Якісно виготовлене обладнання, без дефектів.	Залучення нових клієнтів.

Обґрунтування факторів конкурентоспроможності стартап – проекту наведено в табл. 5.8, а його SWOT аналіз в табл. 5.9.

Таблиця 5.8

<i>№ n/n</i>	<i>Фактор конкурентоспроможності</i>	<i>Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)</i>
1	Модульна суміщена система заряду з функцією корекції коефіцієнту потужності.	Модульна структура дозволяє підвищити рівень ЕМС з мережею живлення, що зменшує втрати на електроенергію.

Табл. 5.9

<p><i>Сильні сторони:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Модульна структура, • Суміщена система заряду та ККП • Менше споживання енергії, • Менші габарити схеми. 	<p><i>Слабкі сторони:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Збільшена кількість компонентів на друкованій платі • більш складна система керування.
<p><i>Можливості:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Підвищення рівня ЕМС, • легке нарощування потужності перетворювача за рахунок модульності 	<p><i>Загрози:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Дефекти на виробництві.

Ступеневий аналіз конкуренції на ринку наведено в табл.5.10.

Таблиця 5.10

<i>Особливості конкурентного середовища</i>	<i>В чому проявляється дана характеристика</i>	<i>Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)</i>
Вказати тип конкуренції: • чиста	В кого краще – в того купують.	Покращення товару та обслуговування.
За рівнем конкурентної боротьби: • локальна	Належить до вузького ринку збуту.	Розширення функціоналу та орієнтації користувачів.
За галузевою ознакою: • міжгалузєва	Притаманна декільком суміжним галузям.	Розширення функціоналу та галузей застосування.
Конкуренція за видами товарів: • товарно-видова	Відрізняється модульною топологією силової частини системи заряду з корекцією коефіцієнту потужності	Розширення функціоналу пристрою.
За характером конкурентних переваг: • цінова та нецінова	Чим дешевше – тим привабливіше, чим краще – тим рентабельніше.	Зниження собівартості та покращення якості товару.
За інтенсивністю: • не марочна	Не жорстка конкуренція.	Не агресивні форми піару.

5.4. Розроблення ринкової стратегії проекту

Базова стратегія конкурентної поведінки визначена в табл.5.11

Табл. 5.11

<i>№ n/n</i>	<i>Чи є проект «першопрохідцем » на ринку?</i>	<i>Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів ?</i>	<i>Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?</i>	<i>Стратегія конкурентно ї поведінки</i>
1	Так	Так	Ні	Помірна, іноді агресивна.

5.5. Розроблення маркетингової програми стартап - проекту

Ключові переваги концепції потенційного товару наведені в табл.5.12, а в табл.5.13 визначено межі встановлення ціни.

Табл. 5.12

<i>№ n/n</i>	<i>Потреба</i>	<i>Вигода, яку пропонує товар</i>	<i>Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити</i>
1	Зниження споживання електричної енергії, відповідність стандартам.	Комбінований модульний вузол заряду дозволяє досягати високого рівня ЕМС	Модульна система заряду з корекцією коефіцієнту, виконаного на базі одного перетворювача

Таблиця 5.13

<i>№ п/п</i>	<i>Рівень цін на товари- замінники</i>	<i>Рівень цін на товари- аналоги</i>	<i>Рівень доходів цільової групи споживачів</i>	<i>Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу</i>
1	160-190% від ціни свого продукту	130-170% від ціни свого продукту	34000 - 100000 грн з 200 проданих од.	800/1400 грн

5.6. Висновки за п'ятим розділом

В результаті проведеного маркетингового аналізу перспектив реалізації запропонованих науково-технічних рішень та пропозицій, оцінювання можливостей їх ринкового впровадження можна стверджувати, що розроблюваний проект має можливість ринкової комерціалізації та може бути рентабельним проектом на ринку. Зростання попиту на аналогічні товари додає масовості придбання подібних пристроїв, але створює жорсткі конкурентні умови виходу на ринок.

Проект має високі перспективи впровадження з огляду на сучасний стан промисловості, яка потребує нових потужних та економних рішень. Бар'єрами входження на ринок може бути відсутність масового виробника, сильний конкурентний тиск з боку великих фірм аналогічних продуктів, потреба у великій кількості кваліфікованих кадрів та дорогої точної апаратури. Але якщо правильно розставити пріоритети, зарекомендувати себе на ринку і грамотно вести бізнес, то проект має великі шанси на ріст та гідний прибуток.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі були розроблені нові схемні рішення джерела живлення, які забезпечують кращу, порівняно з існуючими, електромагнітну сумісність устаткування контактного зварювання зі мережею живлення.

Проведено аналіз особливостей контактного зварювання та на основі цього аналізу встановлено, що це складний процес, основна складність для зварювального обладнання полягає в складній нелінійній зміні характеру опору навантаження та забезпечення електромагнітної сумісності. Існуючі форми імпульсів вирішують задачу отримання якісного зварного з'єднання, а електромагнітна сумісність потребує додаткового аналізу.

Проведено аналіз впливу сучасних джерел живлення для контактного зварювання. Встановлено, що цей вплив є суттєвим. Проаналізовано шляхи зменшення цього впливу і покращення рівня електромагнітної сумісності. Найбільш ефективні з них – це використання топології з акумулювання енергії та використання спеціальних схемних рішень.

Обґрунтовано вибір топології ККП, як вхідної частини зарядного пристрою. Проведено аналіз його роботи та розрахунок основних компонентів. Встановлено, що в залежності від кількості комірок змінюються його характеристики, що потребує більш глибоко аналізу дослідження кількості комірок зарядного пристрою.

Проведений розрахунок вхідного вузла, проведено аналіз кількості комірок і встановлено, що достатня кількість комірок для отримання показників, які відповідають нормам стандартів складає 2. Подальше збільшення кількості комірок призводить до приросту кількості елементів та зменшення надійності перетворювача в цілому. У порівнянні з однокомірковою схемою приріст досліджуваних показників складає 388% та 5.78% відповідно.

Виконаний стартап-проект, за яким встановлену економічну привабливість ідеї та можливості виходу на ринок. Можливість виходу

залежить від продажу та залучення інвестицій до проекту. В результаті проведеного маркетингового аналізу перспектив реалізації запропонованих науково-технічних рішень та пропозицій, оцінювання можливостей їх ринкового впровадження можна стверджувати, що розроблюваний проект має можливість ринкової комерціалізації та може бути рентабельним проектом на ринку. Зростання попиту на аналогічні товари додає масовості придбання подібних пристроїв, але створює жорсткі конкурентні умови виходу на ринок.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. В.А. Фролов, В.В. Пешков, А.Б. Коломенский, В.А. Казаков. "Сварка. Введение в специальность". - М.: 2004
2. Банников, Е. А. (2014). Сварка. Москва: АСТ.
3. Бенардос и его знаменитое изобретение [Электронный ресурс]. URL: <http://kpi.ua/ru/node/10917> (Дата звернення: 12.11.2017)
4. V. E. Ataush; V. P. Leonov; E. G. Moskvina, Micro welding in instrument making, Riga: RTU, 1996.
5. К. А. Kochergin, Kontaknaia svarka [Resistance welding], Leningrad: Mashinostroenie, 1987.
6. V. E. Moravskii; D. S. Vorona, Tekhnologiya i oborudovanie dlia tochechnoi i reliefnoi kondensa-tornoj svarki [Technology and equipment of spot and projection resistance welding], Kyiv: Naukova dumka, 1985
7. U. Polis, "Influence of Surface Parameter upon the Initial Contact Resistance of Metal Plates in Micro-welding," in Metināšana un radnieciskās tehnoloģijas: starptautiskais seminārs, Riga, 1996.
8. O. F. Bondarenko, "Formuvacho Impulsiv strumu dlia ustanovok kontaktnogo mikrozvaryvannia [The formers of current pulses for micro resistance welding equipment]," Donetsk, 2008
9. E. Bumbieris и U. Polis, «O voznikovenii nachalnogo elektricheskogo kontakta pri tochechnoi mikrosvarke plastinok [About initial electrical contact appearance in micro resistance spot welding of plates],» in Metināšana. Tehnoloģija, iekārtas, materiāli, radnieciskās tehnoloģijas: III starptautiskā konference, Riga, 1999
10. Zhou Y., Dong S. J., Ely K. J. Weldability of thin sheet metals by small-scale resistance spot welding using high-frequency inverter and capacitor-discharge power supplies //Journal of electronic materials. – 2001. – Т. 30. – №. 8. – p. 1012-1020.
11. Dickinson D. W., Franklin J. E., Stanya A. Characterization of spot welding behavior by dynamic electrical parameter monitoring //Welding Journal. – 1980. – Т. 59. – №. 6. – p. 170.

12. Salem, M. (2011). Meranda Ahmed Salem Control and Power Supply for Resistance Spot Welding (RSW). Electronic Thesis and Dissertation Repository, 130.
13. Li W., Hu S. J., Ni J. On-line quality estimation in resistance spot welding //Journal of manufacturing Science and Engineering. – 2000. – Т. 122. – №. 3. – p. 511-512.
14. Steinmeier D. Downsizing in the world of resistance welding //Welding journal. – 1998. – Т. 77. – №. 7. – p. 39-47.
15. Шовная (роликовая) сварка [Электронный ресурс]. URL: http://www.rudetrans.ru/o-svarke/shovnaya_rolikovaya_svarka/ (Дата звернення 12.11.2017)
16. Бондаренко, О. Ф. (2017). Класифікація форм імпульсів для контактного мікрозварювання. Electronics and Communications, 22(3), 46–54.
17. B. D. Orlov; A. A. Chakalev; Yu. V. Dmitriev; A. L. Marchenko; V. A. Sidiakin, Tekhnologiia i oborudovanie kontaktnoi svarki [Technology and equipment of resistance welding], 2nd ed. ред., Moscow: Mashinostroenie, 1986.
18. Рудзит Бумбиерис Влияние импульса подогрева на процесс образования сварки
19. Шидловский, А. К., Козлов, А. В., Комаров, Н. С., & Москаленко, Г. А. (1993). Транзисторные преобразователи с улучшенной электромагнитной совместимостью. Киев: Наукова думка.
20. Розанов Ю. К. Полупроводниковые преобразователи со звеном повышенной частоты.— М. : Энергоатомиздат, 1987.— 184 с.
21. Жежеленко И. В. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях.— М. : Энергоатомиздат, 1986,— 168 с.
22. Борисов Б П., Вагин Г. Я Электроснабжение электротехнологических установок.— Киев : Наук, думка, 1985.— 248 с.
23. Мирский Г. Ф. Электронные измерения.— М. : Радио и связь, 1986. - 440 с.

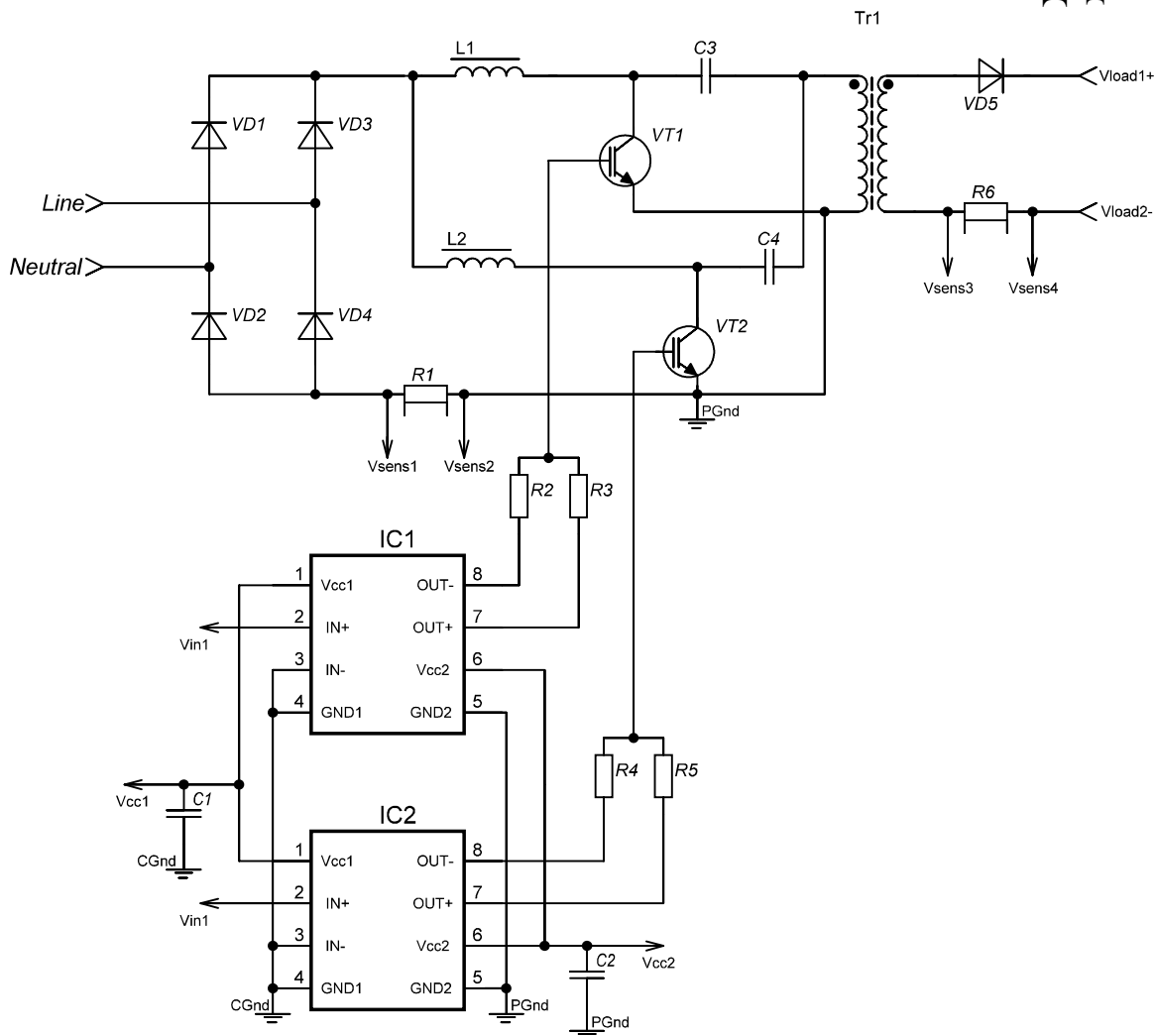
24. Гейтенко, Е. Н. (2008). Источники вторичного электропитания. Схемотехника и расчет (Солон-пр). Москва.
25. Зиновьев, Г. С. (1998). Электромагнитная совместимость устройств силовой электроники. Новосибирск.
26. Product families for EMC standards [Электронный ресурс]. URL: http://www.iec.ch/emc/emc_prod/prod_main.html (Дата звернення 23.03.2018)
27. IEC 62135-2:2015 Resistance welding equipment - Part 2: Electromagnetic compatibility (EMC) requirements [Электронный ресурс]. URL: <https://webstore.iec.ch/publication/21865> (Дата звернення 23.03.2018)
28. IEC 61000-3:2018 SER Series Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3: Limit - ALL PARTS [Электронный ресурс]. URL: <https://webstore.iec.ch/publication/62426> (Дата звернення 24.03.2018)
29. IEC 61000-3-2:2018 RLV Redline version Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-2: Limits - Limits for harmonic current emissions (equipment input current ≤ 16 A per phase) URL: <https://webstore.iec.ch/publication/62553> (Дата звернення 24.03.2018)
30. Семенов, Б. Ю. (2005). Силовая электроника. Москва: СОЛОН - Пресс.
31. Глебов Л. В., Филиппов Ю. И., Чулошников П. Л. Устройство и эксплуатация контактных машин //Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-е. – 1987.
32. Пат. 72571 України, 15.01 2004. Спосіб контактного точкового мікрозварювання з автоматичним керуванням / В. К. Лебедев, О. О. Письменний.
33. Патент 6303894 США. Resistance welding with an electrochemical capacitor as the current power source / D. Laser, N. Klein, C. Yarnitzky. - 16.10 2001.
34. Моравский В.Э. Конденсаторная сварка металлов малых толщин. Москва; Киев: Машгиз, 1960. 148 с

35. Моравский В.Э. Сварка аккумулированной энергией. Киев: Гостехиздат УССР, 1963. 298 с.
36. Моравский, В. Э., Ворона, Д. С. (1985). Технология и оборудование для точечной и рельефной конденсаторной сварки. Киев: Наукова думка.
37. Bondarenko, O., Verbytskyi, I., Prokopets, V., Kaloshyn, O., Spitsyn, D., Ryzhakova, T., Kozhushko, Y. (2017). Modular Power Supply for Micro Resistance Welding. *Electrical, Control and Communication Engineering*, 12(1).
38. Application Note 1484 “Designing A SEPIC Converter” фирмы National Semiconductor
39. Ромаш, Э. М., Драбович, Ю. И., & Юрченко, Н. Н. (1988). Высокочастотные транзисторные преобразователи. Москва: Радио и связь.
40. Spitsyn, D., Bondarenko, O. (2017). Method for improving EMC of Small Scale Resistance Spot Welding Equipment. *IEEE Standards Education Grant for Student Application Papers Implementing Industry Standards*, 1–6. https://www.standardsuniversity.org/wp-content/uploads/Report_IEEE_Spitsyn.pdf
41. Розроблення стартап-проекту: Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / За заг. ред. О.А. Гавриша. – Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – 28 с.

Назва	Товщина деталей	Вид металу	Застосування
Точкове контактне зварювання	> 0.5 мм	Латунь, срібло, платина та їх сплави	Електроніка
		Холодний прокат	Автомобільна промисловість
		Сталь	Сталева фурнітура, будівельні конструкції
Мікрозварювання	<= 0.5 мм	Мідь, вольфрам, золото, платина, нікель, срібло та їх сплави	Електроніка
		Сплави міді	Біметалеві компоненти
		Інконель	Авіа компоненти
		Молібден та вольфрам	Освітлення
		Ніхром	Біметалеві сенсори
		Сталь та нітінол	Малий хірургічний інструмент
		Сталь	Ріжучий мікро інструмент

1. IEC 60034 – «Машини електричні рухомі»
2. IEC 62236 – «Системи та обладнання залізничного транспорту»
3. IEC 62477 - «Вимоги безпеки до систем силових електронних перетворювачів та обладнанню»
4. IEC 61204 – «Низьковольтні джерела живлення, які генерують постійний струм»
5. IEC 61800 – «Системи силових електроприводів з регульованою швидкістю»
6. IEC 62493 – «Оцінка освітлювального обладнання, зв'язаного з впливом на людину електромагнітних полів»
7. IEC 62040 – «Системи безперебійного живлення»
8. IEC 62310 – «Статичні системи перемикання»
9. IEC 62080 – «Пристрої звукової сигналізації для побутового та аналогічного застосування»
10. IEC 60934 – «Автоматичні вимикачі для обладнання»
11. IEC 61543 – «Пристрої захисного вимкнення побутового та аналогічного призначення, керовані диференційним струмом»
12. IEC 60044 – «Вимірювальні трансформатори»
13. IEC 61967 – «Інтегральні мікросхеми. Вимірювання електромагнітної емісії»
14. IEC 62132 – «Інтегральні мікросхеми. Вимірювання електромагнітної завадостійкості»
15. IEC 60335 – «Побутові та аналогічні електричні пристрої»
16. IEC 60601 – «Електричні медичні пристрої діагностування»
17. IEC 60364 – «Низьковольтне устаткування»
18. IEC 62066 – «Імпульсна перенапруга та захист від перенапруги в низьковольтних системах змінного струму»
19. IEC 62135 – «Обладнання для контактного зварювання»
20. IEC 61000 – «Електромагнітна сумісність»

Додаток В



XS1		XS2		XS3		XS4	
Конт.	Цель	Конт.	Цель	Конт.	Цель	Конт.	Цель
1	Line	1	Vload1+	1	Vcc2	1	Vcc1
2	Neutral	2	Vload2-	2	PGnd	2	CGnd

XP1		XP2		XP3	
Конт.	Цель	Конт.	Цель	Конт.	Цель
1	Vin1	1	Vsens1	1	Vsens3
2	Vin2	2	Vsens2	2	Vsens4

ABSTRACT

The main aim. The aim of this work is to choose the most efficient topology for constructing the input circuit of power supply for resistance welding, which provides improvement of electromagnetic compatibility of welding equipment with the electrical grid.

Solved tasks:

1. analyzed the stages of the resistance welding process; analysis causes of low level of EMC of resistance welding systems;
2. analyzed electromagnetic environment in modern electrical grids; comparatively analyzed power supplies with direct consumption and energy storage; substantiation of the choice as a subject of study of the node of charge;
3. substantiated of the choice of the structure with the accumulation of energy; substantiated use of a supercapacitor battery as a storage device; comparatively analyzed of base topologies of the node converter; search for solutions to improve the characteristics of individual nodes of the charge system in the direction of EMC; substantiation of the choice of modular structure of the charge node; development of the algorithm of cell-converters operation;
4. calculation of the main components of the chosen topology; selection of components and development of the printed circuit board of the charge node; development of simulation model;
5. analysis of market startup opportunities; development of a market strategy; development of a marketing program.

Object of study: process of current consumption from the power supply for charging the system of resistance spot welding system.

Subject of study: converters and control algorithms to ensure the electromagnetic compatibility of the system of resistance spot welding system with the electrical grid.

The scientific novelty is as follows:

1. in first time developed a combined node of a capacitive modular energy storage charge combined with power factor corrector that provides a high level of EMC with an electrical grid;
2. developed combined control algorithm of each cell of the charge node, that consisting of n - identical cells, working in parallel with the phase shift $2\pi / n$ in the boundary current mode $\gamma = 0.5$. In this operation mode saving all advantages of parallel and series cells work;
3. modified base SEPIC topology of the cell-converter in accordance with the set tasks by introducing a pulse transformer with the replacement of one of the inductances by the primary transformer winding and the exclusion of the topology the capacitor in the output circuit in connection with the feature of the load.

Practical value is as follows:

1. has been developed the circuit diagram of the combined charge node for resistance spot welding system, which can be used for charging of capacitive drives and providing a high level of EMC with a electrical grid;
2. has been synthesized the control algorithm of the basic cells-converters for the purpose of their unification and work in boundary current mode, in which there is no theoretical loss on switching, and current pulsations in the initial circle are reduced.

Publications. The main scientific provisions of the dissertation were presented in three English-language articles published in the leading international editions.

The main scientific provisions of the thesis were reported and received positive reviews at the 16th International Symposium "Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering" and "Doctoral School of Energy and Geotechnology III" at the International Symposium and the Doctoral School.

Master's personal contribution. Scientific positions and results in the dissertation are presented by the author alone.

The work has been supported by the Ministry of Education and Science of Ukraine, grant DB 0116U006924 and was supported by the student grant program of the IEEE - IEEE Standards Education Grant for Student Application Papers Implementing Industry Standards.

In order to get highly reliable permanent joints in heavy engineering industry as well as in manufacturing the miniature electronic components, resistance welding is widely used now due to its low cost and simplicity. A type of resistance welding for joining small-scale parts is called micro resistance spot welding. The technological feature of implementing the resistance spot welding is pulsed energy consumption from the electrical grid that causes non-sinusoidal input current and worsens the electromagnetic compatibility (EMC) of welding equipment.

There are a lot of methods to improve electromagnetic compatibility of power supplies for resistance welding with the electrical grid. Among them, the following methods:

- using the intermediate energy storage;
- using the power factor corrector (PFC);
- applying the multiphase topology of input circuit;
- applying the special control algorithms.

As for the way of energy consumption from the electrical grid, the power supplies for resistance welding may be divided into two large groups: with direct power consumption from the electrical grid – Direct Energy Type and with intermediate energy storage – Energy Storage Type. The first one highly influences the electrical grid and has low energy efficiency. That is why the second one becomes more widely used recently. The power supplies based on the Energy Storage topology usually have more complicated structure and require using the multicell-type storage with low internal resistance and high energy capacity, such as supercapacitors. Applying the PFC, especially the ones of multiphase interleaved type, makes it possible to improve EMC of welding power supplies, as well as to reduce weight and size of the equipment.

The futures of micro resistance welding

The basis of resistance welding is a physical phenomenon of resistive heating with subsequent melting the welded parts in the place of their contact while the electric current flows through them. One of the main parameters of welding contact is its dynamic resistance. It is composed of contact and bulk resistances. The contact resistance is determined by contaminants and roughness of welded surfaces. The bulk resistance depends on temperature. The changes of these parameters over the welding time are illustrated in Fig.1a. The figure shows that the contact resistance quickly decreases during the welding process. This is due to purification from grease contaminants and surface oxides and reducing the surface roughness of welded parts at high temperature. The bulk resistance conversely increases over the temperature rise that is typical for metals overall. However, it weakly influences the final dynamic resistance of the welding contact. The change of the last one is shown in Fig. 1 b.

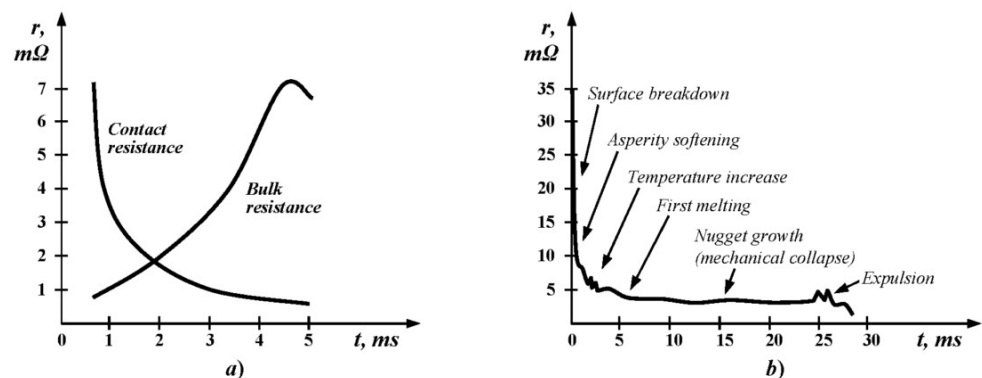


Fig. 1. The character of Contact and Bulk resistances' changes (a) and the character of Dynamic resistance change (b)

It demonstrates that for the first 2% of the time, the resistance 6 times decreases. This change is due to a sharp decline of a contact resistance. Further heating leads to an increase of a bulk resistance. However, the subsequent metal melting causes the reduction of a contact resistance and dynamic resistance as a whole.

To take into account the electrophysical processes in the welded contact described above and to provide the high-quality joints without such common defects as splashes, burnouts or lacks of penetration, the welding current pulses should be formed according to special laws, which depend on specific welding conditions. Some typical forms of welding pulses are shown in Fig. 2.

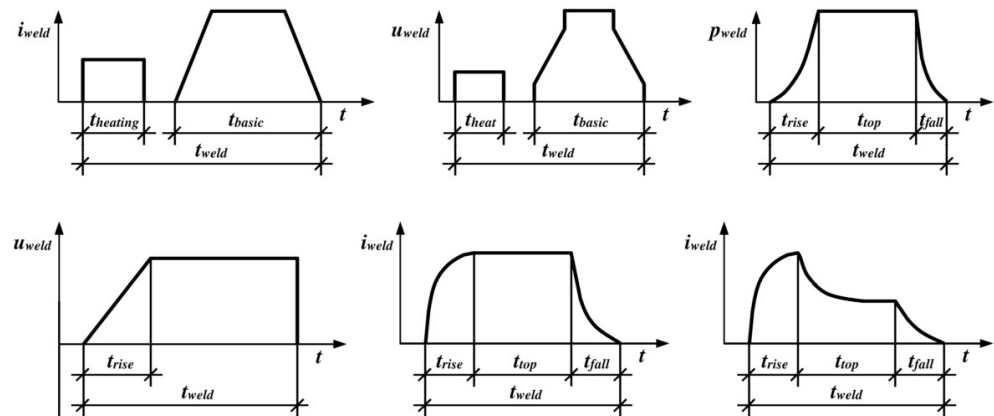


Fig. 2. The special laws of welding pulses

Because of pulsed character of resistance welding process, the input current of power supply is sharply distorted and non-sinusoidal. This leads to a distortion of the electrical grid voltage and is able to cause a negative impact on apparatus that works simultaneously with the welding equipment. In addition, the welding devices running in parallel are exposed to a negative impact of each other. Therefore, the issue of improving the electromagnetic compatibility with the electrical grid is one of the major matters of designing the resistance welding equipment.

The design of power supply for micro resistance welding

The generalized block diagram of the power supply for micro resistance welding is shown in Fig. 3.

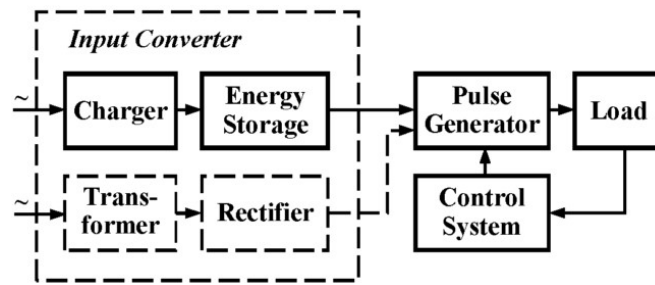


Fig. 3. Generalized block diagram of the power supply for micro resistance welding

The blocks of the power supply perform the following functions. The input converter provides necessary energy for welding. It is represented in Fig. 3 in two variants: charger + energy storage (Energy Storage Type) or matching transformer + rectifier (Direct Energy Type). For the considered power supply, the first variant was chosen. The pulse generator provides the current pulses for the load, according to the required profile specified by the control system. The parameters of welding pulses are controlled during the welding process with feedback signals from the sensors in the load. Below, the possible topologies of the input circuit of the power supply for resistance welding will be analyzed and the most effective one will be suggested.

As an energy storage of the input circuit of the power supply it is expediently to choose a supercapacitor battery because of its low internal resistance, high energy capacity and small dimensions.

The charger for supercapacitor storage module should performs the following functions: to form the sinusoidal input current; to separate the electrical grid and the load galvanically; to charge the storage with direct or pulsating current.

To form the sinusoidal input current, the power factor corrector is required. The basic circuit of PFC is quite simple but it does not provide the acceptable values of total harmonic distortion (THD) of the input current. To improve the values of THD, the multiphase topology of PFC is applied. The multiphase PFC may include an unlimited number of unified cells (phases) connected in parallel, which operate with some phase shift. The input current in this case is a sum of the currents of PFC cells and its ripples are smaller than in the basic single-phase topology.

Because of intention to use the supercapacitors (which have maximal voltage 2.7 V) as the energy storages, the step - down transformer is required to decrease the input voltage and to isolate the electrical grid and the load galvanically.

To charge the supercapacitor storage with direct or pulsating current, it is necessary to use the converter, which should meet the following requirements:

- the availability of the input inductor, which forms the continuous current, consumed from the electrical grid;
- the possibility of soft start and soft regulation of the input current;
- the possibility of the transformer integration into the structure of the converter.

At nowadays, several basic PFC converter topologies are known. The simplest are Boost and Buck [9]. The Buck-Boost topology combines the advantages of both. However, to get better values of THD and power factor (PF) the attention should be paid for SEPIC and Cuk topologies. The Table I shows the compliance of the converters of different types to the above requirements.

Table I. Compliance of the converters to the specified requirements

Converter type	Requirements		
	1	2	3
<i>Buck</i>	-	+	+/-
<i>Boost</i>	+	-	-
<i>Buck - boost</i>	-	+	+
<i>SEPIC</i>	+	+	+
<i>Cuk</i>	+	+	+

It may be concluded that the most appropriate converter types for the considered task are SEPIC and Cuk. The analysis of these types of converters showed that the SEPIC has lower input current ripples and better controllability than Cuk. Therefore, SEPIC is preferable to choose as basic topology for designing the charger cell.

The main circuit of SEPIC is shown in Fig. 4. The circuit of the charger based on SEPIC cells is represented in Fig. 5.

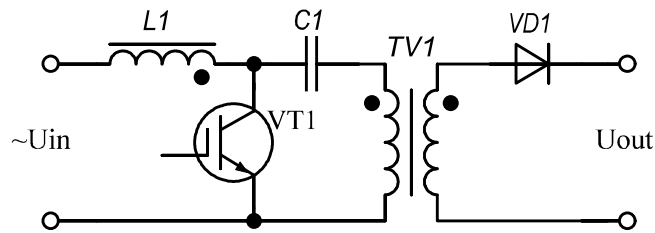


Fig. 4. The main circuit of the SEPIC converter

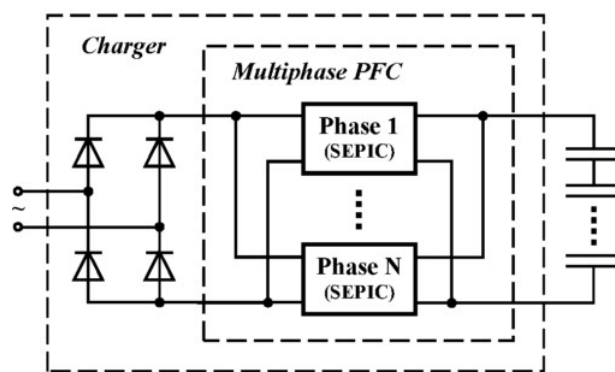


Fig. 5. The input circuit of the power supply

The simulation of SEPIC topology charger

It is necessary to provide the boundary current mode in the inductor L_1 , because it has the following advantages:

- the transistor opens at zero current through the inductor, that's why there are no switching losses or the losses associated with the diode recovery time,
- the total current through the inductor at some moments falls to zero, and the inductor is fully demagnetized,
- the inductor may be smaller comparing to the inductor used at continuous current mode.

The charger based on SEPIC topology with integrated PFC was investigated with different number of phases (cells) in MATLAB/Simulink. The main results are represented in the Table II.

Table 2. Simulation results of SEPIC topology charger with different number of cells

Number of cells	THD, %	PF
1	35.22	0.9429
2	7.22	0.9974
3	6.74	0.9977
4	2.104	0.998

The simulation models of two-phase charger and a charger cell, created in MATLAB Simulink, are shown in Fig. 6. The input current form and the current of the cells in large scale are shown in Fig. 7.

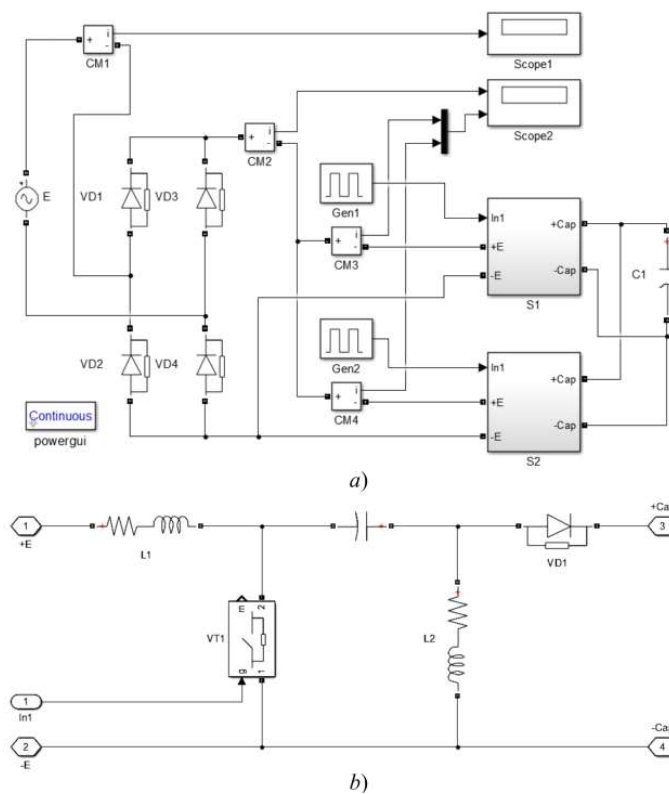


Fig. 6. The multiphase charger model (a) and one cell model (b)

As shown in Fig. 7 a, the input current has some ripples, explained by nonlinearity of the real current form of a cell that shown in Fig. 7b in a large scale.

As we can see from the Table III, in case of using the two-phase structure of the charger, the value of THD of input current amounts to $\approx 7\%$, which provides the value of the power factor $> 99\%$. Therefore, even two-phase charger can provide

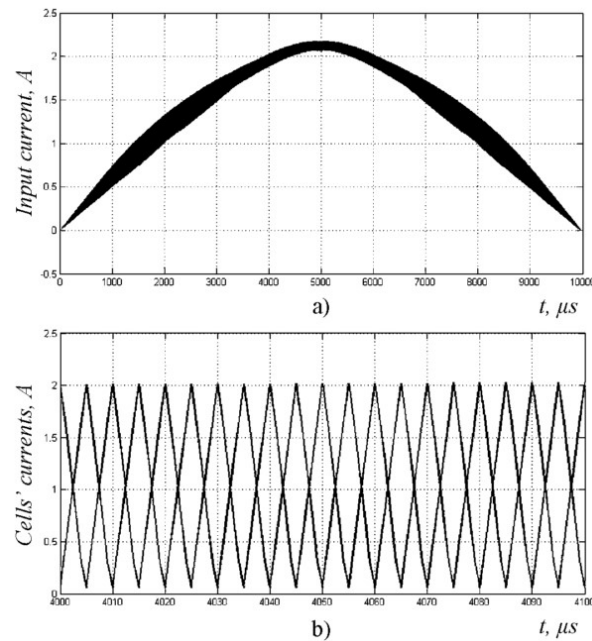


Fig. 7. The input current form (a) and the cells' currents in large scale (b)

excellent electromagnetic compatibility with the electrical grid in the above mode. The high-frequency ripples may be additionally decreased by installing the input small power LC-filter that improves the power factor.

Conclusions

The study, which was carried out, confirmed the effectiveness of suggested circuit solutions for designing the input converter of the power supply for micro resistance welding. The multiphase principle of PFC construction based on SEPIC and use of Energy Storage topology of the input converter provide high quality of the input current form. A two-phase structure of the input converter may be considered as optimal, because it provides high enough values of THD and PF, which meet the limits established in the current standards. Further increase of phase number improves the parameters of energy efficiency, but at the same time makes the circuit topology much more complicated.