



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

ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОНІКИ  
КАФЕДРА ПРОМИСЛОВОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ

До захисту допущено

Завідувач кафедри

Ю.С. Ямненко

(підпис)

(ініціали, прізвище)

„\_\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2019р.

**Дипломний проект**  
на здобуття ступеня бакалавра

з напрямку підготовки 6.050802 Електронні пристрої та системи  
(код та назва напрямку підготовки або спеціальності)

на тему: **«Паралельна робота DC-DC перетворювачів»**

Виконав: студент 4 курсу, групи ДС-52

Ткач Денис Олександрович  
(прізвище, ім'я, по батькові)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Керівник: к.т.н., доц. Клен К. С.  
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Консультанти: Технічний розділ декан, д.т.н, проф. Жуйков В. Я.  
(назва розділу) (вчені ступінь та звання, прізвище, ініціали) (підпис)

Рецензент: доцент кафедри ЕІ, к.т.н., доц., Попов А.О.  
(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 – 2019 року



## 6. Консультанти розділів проекту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Технічний	Жуйков В. Я. декан, д.т.н, проф.	22.05.19	17.06.19

7. Дата видачі завдання: 22.05.19

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Строки виконання етапів проекту	Примітка
1	Консультація з керівником практики	23.05.19 - 24.05.19	
2	Огляд літератури	25.05.19 - 29.05.19	
3	Дослідження системи Smart Grid	30.05.19 - 31.05.19	
4	Дослідження роботи сонячних електростанцій	01.06.19-02.06.19	
5	Дослідження роботи декількох джерел на одне навантаження	03.06.19-04.06.19	
6	Розробка системи керування зі стабілізацією вихідної напруги та рівномірним розподілом струму	05.06.19-06.06.19	
7	Розрахунок елементів схеми	07.06 - 08.06.19	
8	Моделювання системи	09.06.19 - 10.06.19	
9	Підготовка пояснювальної записки та графічного матеріалу	11.06.19 - 17.06.19	

Студент

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Ткач Д.О.  
(ініціали, прізвище)

Керівник проекту

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Клен К.С.  
(ініціали, прізвище)

## **АНОТАЦІЯ**

У ході виконання роботи було розглянуто класифікацію та проведено порівняння різних типів паралельного з'єднання джерел напруги. Детально досліджено роботу та характеристики сонячних елементів. Зважаючи на проведені аналіз існуючих систем було розроблено новий тип системи керування для перетворювача постійної напруги в постійну нижчого рівня. Розраховано параметри та проаналізовано режими роботи. За допомогою моделювання в програмному середовищі Simulink досліджено роботу схеми на необхідне навантаження. Даний проект має високу ступінь актуальності, так як в наш час все частіше виникає питання про екологічно чистих установках, призначених для різних потреб людства.

## **SUMMARY**

During the execution of the work was investigated different types of parallel connections of voltage sources was performed. The work and characteristics of solar cells are investigated in detail. Taking into account the analysis of existing systems, a new type of control system was developed for the constant voltage converter to a constant lower level. The parameters are calculated and the operating modes analyzed. Simulink simulates the work of the circuit on the required load. This project has a high degree of relevance, as in our time the question of ecologically clean installations intended for different needs of mankind is becoming more and more frequent.

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП</b> .....	4
<b>1. ПАРАЛЕЛЬНА РОБОТА ДЕЖЕЛ ЕНЕРГІЇ В СИСТЕМІ SMART GRID</b> .....	5
1.1. Опис системи SMART GRID.....	7
1.2. Особливості роботи сонячних електростанцій.....	9
1.3. Паралельна робота декількох джерел на одне навантаження.....	19
1.4. Система керування зі стабілізацією вихідної напруги та рівномірним розподілом струму.....	26
<b>2. РОЗРАХУНОК ЕЛЕМЕНТІВ СХЕМИ</b> .....	30
<b>3. МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ З ДЕКІЛЬКОМА ДЖЕРЕЛАМИ</b> .....	33
3.1. Моделювання одного перетворювачів .....	33
3.2. Моделювання двох перетворювачів.....	36
3.3. Моделювання трьох перетворювачів.....	45
<b>ВИСНОКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ</b> .....	49
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ</b> .....	50

					<i>ДС52.521.024.001 ПЗ</i>			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Ткач Д.О.			Паралельна робота DC-DC перетворювачів  Пояснювальна записка	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.		Клен. К.С.					3	53
Реценз.						КПІ ім. Ігоря Сікорського, ФЕЛ, КПЕ, гр. ДС-52		
Н. Контр.		Батрак Л.М.						
Затверд.		Клен К.С.						

## ВСТУП

Останнім часом інтерес до системи Smart Grid зростає. Цей інтерес викликаний тим, що великі електростанції є економічно недоцільними в багатьох регіонах через збільшення системних і паливних витрат, а також з появою більш жорстких екологічних норм. Крім того, останні технологічні досягнення в області малих генераторів, енергетичної електроніки та пристроїв зберігання енергії надають нові можливості для розподілення енергетичних ресурсів.

Є багато джерел для систем розосередженої генерації (СРГ): звичайні технології (дизельні або газові двигуни), нові технології (мікротурбіни, паливні елементи або пристрої зберігання енергії) та відновлювальні технології (малі вітрові турбіни, сонячні батареї та малі гідротурбіни) [4]. Ці СРГ використовуються для застосування в автономному режимі [12], резервному, сітці, з'єднаному між собою [1], когенерації [8], і т.д. і мають багато переваг, таких як: екологічне та модульне виробництво електроенергії, підвищена надійність, висока якість електроенергії, безперебійне обслуговування, економія коштів, розширюваність тощо. Багато комунальних підприємств намагаються побудувати невеликі розподільні станції в поєднанні з кількома СРГ, доступними в регіонах, замість великих електростанцій.

Всі СРГ вимагають силових перетворювачів, методів взаємозв'язку та електронних блоків управління. Тобто вся потужність, що генерується СРГ, генерується у вигляді постійного струму, а потім вся потужність, що подається на шину розподілу, знову перетворюється в потужність змінного струму з фіксованою величиною і частотою за допомогою блоків управління. Тому вдосконалені електронні технології, що дозволяють з'єднати мережі асинхронних джерел генерації, стали темою цієї роботи.

					ДС52.521.024.001 ПЗ	Арк.
						4
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		





Після аналізу визначених вище визначень можна виділити такі характеристики розумних мереж:

- оптимізація для оптимального використання ресурсів та обладнання;
- адаптивні та масштабовані (для мінливих ситуацій);
- самовідновлення (може передбачати та розрізняти ситуації);
- надійний і безпечний (від загроз і стихійних явищ);
- відкритий для всіх типів і розмірів систем;
- екологічно чисті (з використанням відновлюваної енергії).

Три домінуючі фактори впливають на майбутні електричні системи світу політика уряду, ефективність потреб споживача, впровадження нових інтелектуальних комп'ютерних і апаратних технологій. Крім того, екологічні проблеми створили урядову політику в усьому світі, у тому числі на федеральному та державному рівнях, які ведуть всю енергетичну систему до ефективності, збереження та відновлюваних джерел електроенергії. Ці фактори є основними факторами, які розширюють використання всіх видів нових з одного боку, технологій енергозабезпечення та зберігання, а з іншого - нових енергоефективних та охоронних технологій. З'єднання невеликих генеруючих модулів, технологій зберігання і розподілу енергії на середньому і низькому рівні істотно може вплинути на продуктивність енергосистеми.

Малопотужні, модульні технології генерації електроенергії можуть бути об'єднані з розподільними системами низької напруги (НН), в цьому і полягає формування нового типу системи живлення Smart Grid [1, 2]. Елементи Smart Grid можуть бути підключені до основної мережі живлення так і працювати автономно, утворюючи свою енергетичну систему. Мікрогенератори мають невелику потужність, близько 100 кВт кожна одиниця, що живляться від відновлюваних джерел енергії або викопних видів палива. Ця технологія має вирішальне значення для скорочення викидів парникових газів і залежності від імпорту викопного палива. Концепція Smart Grid дозволить найбільш ефективно витратити викопне паливо.

					ДС52.521.024.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6



Розглянемо основні типи джерел енергії з якими працює СРГ:

- мікро-турбіни;
- сонячні/фотоелектричні системи;
- системи акумулювання енергії.

### **Проблеми Smart Grid**

Технології СРГ мають різні недоліки в порівнянні з традиційними централізованими джерелами енергії. Наприклад, вони застосовуються до електромережі або до навантажень напругою 480 вольт або менше; і вимагають перетворювачі потужності [3]. Усі ці технології забезпечують постійний струм на виході, який вимагає перетворювачів. У більшості випадків перетворення здійснюється за допомогою інвертора джерела напруги (ІДН) з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ), що забезпечує швидке регулювання величини напруги.

Силові електронні інтерфейси вводять нові складнощі, але в той же час нові можливості. Наприклад, система, яка складається з мікрогенераторів і акумулятора, може бути спроектована для роботи як в автономному режимі, так і в підключенні до електромережі [6]. Один великий клас проблем пов'язаний з тим, що джерела живлення, такі як мікротурбіни і паливні елементи, мають повільну реакцію на зміну навантаження.

Оскільки ці генератори стають більш компактними, необхідність зв'язувати їх з меншою напругою мережі значно зростає [15]. Однак, без будь-якої адаптації мереж середньої напруги, це швидке розширення може вплинути на якість постачання, а також на безпеку населення та обладнання, оскільки розподільні мережі не були розроблені для підключення значного обсягу виробництва. Тому необхідно розробити нову систему контролю напруги для полегшення підключення розподілених ресурсів виробництва до розподільчих мереж [13].

					<i>ДС52.521.024.001 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		8

Існує багато проблем при підключенні до малих систем генерації до розподільчої системи з меншою напругою, а саме:

- система контролю для полегшення з'єднання генератора з мережею;
- ефективне керування батареєю;
- інверторне управління на основі тільки локальної інформації;
- синхронізація з комунікативною мережею;
- компенсація реактивної потужності і вищої гармоніки компоненти;
- корекція коефіцієнта потужності;
- система захисту;
- спільне навантаження;
- надійність зв'язку;
- вимоги замовника.

СРГ потребує вирішення багатьох додаткових інженерних завдань. Крім того, електричні та економічні відносини між клієнтами та дистриб'юторськими підприємствами можуть відрізнятися від тих, які ми знаємо сьогодні [14]. Наприклад, замість пристроїв, які окремо з'єднані між собою паралельно з мережею, вони можуть бути згруповані з навантаженнями в напівавтономному районі, який можна було б назвати мікромережею - це кластер малих джерел, систем зберігання і навантажень, який представляє собою мережу, як єдину сутність. Отже, майбутня дослідницька робота буде зосереджена на вирішенні вищезазначених питань.

## 1.2. Особливості роботи сонячних електростанцій

Сонячна батарея - структура, здатна перетворювати енергію сонячного випромінювання в електричну енергію, використовуючи фотоелектричний ефект. Являє собою нерозбірний прилад (модуль), що складається з декількох сонячних осередків (елементів) [3]. Перші сонячні елементи (СЕ або також

					ДС52.521.024.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

фотоелектричні перетворювачі) були створені майже через 50 років після відкриття фотогальванічного ефекту Беккерелем. У 1883 році Чарльз Фрітц запропонував структуру селену (Se), покритого тонким шаром золота (Au). І хоча йому вдалося досягти вкрай малу ефективність, вважається, що саме цим винаходом був дан старт сонячній енергетиці. Однак до створення перших СЕ, що віддалено нагадують сучасні конструкції, було проведено ще чимало досліджень і зроблено безліч відкриттів. Після розробки методу вирощування монокристалічного кремнію (Si) Чохральського в 1918 році, погляд людства стрімко кидався в сторону цього матеріалу. І коли було встановлено, що кремній, легований потрібними домішками, володіє чутливістю до світла багато більше селену, в 1954 році фізиками Дж. Пірсоном, Д. Чапін і К. Фуллером був запропонований перший СЕ на основі кремнію, що володіє ефективністю майже 5%. Саме такі структури сонячних модулів на монокристалічній кремнії прийнято вважати сонячними батареями першого покоління [1].

Таким чином, кремнієві СЕ першого покоління за своєю суттю представляють звичайні напівпровідникові діоди з тією лише різницею, що у них повинна бути велика площа поверхні. Конструкція елемента представлена на рис. 1.3.

Основою є пластина монокристалічного кремнію р-типу, тобто з дірковою провідністю. Для цього кремній можна легувати елементами III групи періодичної системи хімічних елементів (інакше кажучи, таблиці Менделєєва), наприклад, бором. На пластині методом високотемпературної дифузії створюється шар напівпровідника n-типу. Щоб це здійснити, використовується домішка V групи таблиці Менделєєва. В основному беруть фосфор. Залишилося на утворений р-n-перехід нанести металеві контакти.

Тут слід мати на увазі той факт, що сонячне світло повинен потрапляти безпосередньо на напівпровідник. Тому з освітленого боку контакт наноситься тонкими смужками, утворюючи сітку з струмопровідними шинами.

					ДС52.521.024.001 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

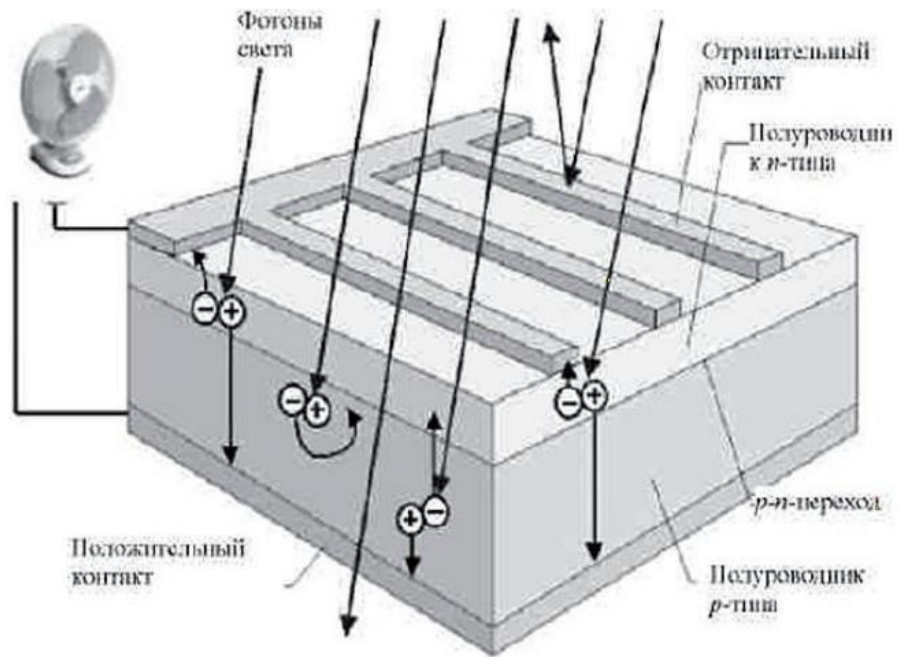


Рис. 1.3 Структура сонячного елемента першого покоління

Готовий пристрій має вигляд (рис. 1.4).



Рис. 1.4 Вид монокристалічного кремнієвого модуля

Перетворення сонячної енергії в модулі коротко пов'язано з наступним. В кристалі кремнію існує дві області - з електронною провідністю (n-типу) і дірковою провідністю (p-типу). Однак концентрація неосновних носіїв заряду в області n-типу електропровідності, тобто дірок, у багато разів перевищує концентрацію основних носіїв заряду - електронів. В p-області ситуація зовсім протилежна. Це означає що градієнт концентрацій легко викликає дифузію носіїв заряду. Дифундуючий електрон або дірка залишають на своєму місці нерухомі заряджені іони, жорстко пов'язані з кристалічною решіткою вихідного матеріалу. В результаті цього важливо, що дотримується електрична нейтральність системи, тобто число тих, що пішли носіїв заряду зрівнюється числом утворили іонів, які в свою чергу перешкоджають подальшому процесу дифузії. Як наслідок, іонами створюється електричне поле, зване дифузійним, а енергетичний бар'єр для електронів і дірок має назву контактна різниця потенціалів.

При опроміненні елемента сонячним світлом відбувається поглинання фотонів в області n- і p-типу електропровідності. Природно, край поглинання не може лежати в області енергій менших, ніж ширина забороненої зони, але може змінюватися в залежності від температури кристала. Після поглинання фотона генерується електронно-діркова пара, яка під дією дифузії переміщається до p-n-переходу [11]. Там, під дією поля, утворення якого було розглянуто вище, пара розділяється, і негативний заряд залишається в області n-типу, а позитивний - в області p-типу. Це означає, що якщо ми під'єднаємо модуль в електричний ланцюг з навантаженням, то він буде працювати в якості джерела живлення [5].

Як вже було сказано, ККД сонячних батарей першого покоління на монокристалічному кремнії досягає 25%, теоретично можливо досягти ~ 31%. Для того щоб зрозуміти, що конкретно означають ці цифри, дсть пояснити те, як вони підраховуються [19]. Так як при освітленні СЕ на його контактах з'являється різниця потенціалів, при підключенні навантаження в ланцюг із

					ДС52.521.024.001 ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		





катодного напилення, термічне випаровування в вакуумі [22]. Варто відзначити, що технологія отримання такого матеріалу набагато дешевше, так як відсутні технологічні витрати і втрати матеріалу при його різанні і полірування, що неможливо в разі отримання монокристалічних кремнієвих СЕ. Основна особливість аморфного кремнію, з огляду на те, що його структура хаотична, полягає в більш високому значенні коефіцієнта поглинання  $\alpha$ , ніж в кристалі, що використовується для сонячних батарей першого покоління. Коефіцієнт поглинання чисельно дорівнює відношенню потоку поглиненого світла кристалом потоку сонячного випромінювання. Для компенсації обірваних зв'язків аморфний кремній, застосовуваний в сонячній енергетиці, часто роблять гідрогнізовані, тобто насичують атомами водню. При цьому виявляється вплив на оптичні та електричні властивості матеріалу. Наприклад, значення коефіцієнт поглинання зростають в область більших значень енергій, за рахунок збільшення ширини забороненої зони (оптична ширина щілини  $\sim 1,6$  eV), що робить матеріал більш ефективним для перетворення сонячного випромінювання [9].

Технологія отримання полікристалічного кремнію «сонячного» якості простіше і трохи дешевше технології отримання монокристала. За своєю суттю вона полягає в очищенні технічного кремнію, тобто операція витягування кристала з розплаву, як в разі отримання монокристалічного кремнію, повністю опускається [24]. Однак від здешевлення конструкції страждає якість: в сонячному модулі є місця з зернистими межами [5].

У порівнянні між технологіями аморфного і полікристалічного кремнію існує також важлива деталь. При виготовленні СЕ на основі аморфного матеріалу температури робіт не перевищують 300 °С, що дає можливість використовувати більш дешеві скляні і тонкі гнучкі підкладки, до того ж зменшити потребу в кремнії приблизно в 20-21 раз і скоротити термін окупності [9].

					ДС52.521.024.001 ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Як можна помітити, крім всіх вище викладених плюсів технології отримання сонячних батарей другого покоління, досить помітні недоліки, основним з яких є низька ефективність перетворення сонячного випромінювання в порівнянні з монокристалічними модулями. Якщо в разі полікристалічних кремнієвих СЕ падіння ККД відбувається приблизно на 2% (згідно з останніми даними ~ 5%, тому що отримані монокристалічні СЕ на основі кремнію з ККД ~ 25% [3]), що можна пояснити втратами якості структури, зернистістю кордонів, то в разі модулів на основі аморфного кремнію ефективність зменшується практично в 2 рази.

На даний момент ККД СЕ на аморфному гідрогенізовані кремнії, який можна реально придбати споживач, як і раніше становить 10%. До того ж існує кілька проблем, основна з яких є деградація властивостей таких модулів при постійному тривалому опроміненні. Але у цих неприємностей є свої рішення, які вже викладені в деяких роботах [26]. Згідно з цими працями ефективність перетворення випромінювання сонячними модулями на основі аморфного кремнію можна підняти до 14-15%, а знизити деградацію можна зменшуючи товщину СЕ. Але в підсумку на даний момент сонячні батареї другого покоління поступаються за ефективністю батареям першого покоління [9].

Крім традиційної розвиненою кремнієвої технології в якості СЕ застосовувалися і інші матеріали. Одним з головних претендентів на витіснення «монополіста» кремнію в сонячній енергетиці є арсенід галію (GaAs). Він уже прямозонний напівпровідник з практично оптимальної для застосування в якості СЕ шириною забороненої зони  $E_g \sim 1,43$  еВ. Тут важливо розуміти, чому цей зазор енергії між вершиною зони валентних зарядів і нижнім рівнем вільної зони (провідності) величиною в 1,43 еВ буде оптимальним [23]. За логікою речей зі зменшенням  $E_g$  більше спектра від Сонця виявляється захопленим, а значить, тут батареї від кремнію перевершують арсенід галієві. Однак якщо  $E_g$  буде вище, то спектр поглинання матеріалу буде ближче до точки максимуму сонячного

					ДС52.521.024.001 ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



використання їх на населеній нами планеті необхідно сильно здешевлювати конструкцію: використовувати дешеві підкладки, тонкі полікристалічні плівки. Все це неодмінно вдарить по ефективності перетворення, і з існуючими технологіями виробництва арсенід галієвих батарей поки не вирішує проблеми сонячної енергетики [10].

### Характеристики сонячних панелей

Електричні параметри модуля представлені у вольтамперній характеристиці (рис. 1.7), визначеної у стандартних умовах (тобто при потужності сонячного випромінювання рівній  $1000 \text{ Вт / м}^2$ , температурі панелей  $25^\circ \text{C}$  і сонячному спектрі на широті  $45^\circ$ ) Точка, у якій перетинається вісь напруги з кривою, називається напругою холостого ходу  $V_{х.х.}$ , а перетин кривої осі струму струмом короткого замикання  $I_{к.з}$  [9]. На тому ж графіку представлена крива потужності, яку виробляють сонячні елементи в залежності від навантаження [21].

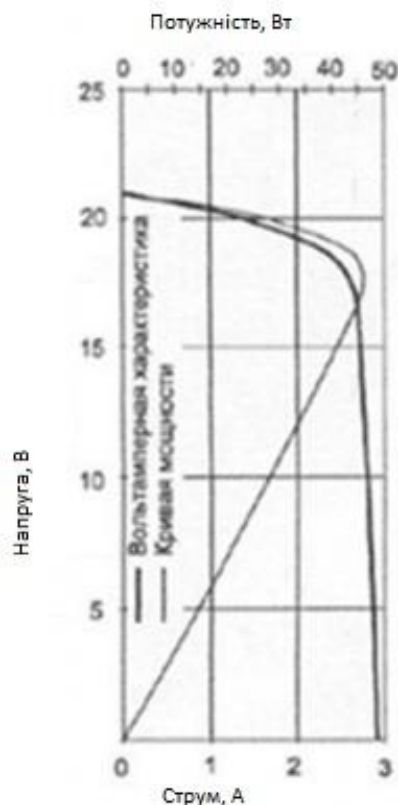


Рис.1.7 Вольт-амперна характеристика сонячного модуля

Номинальна потужність модуля визначається як максимальна потужність при нормальних умовах. Робоча напруга  $V_p$  – це напруга, що відповідає максимальній потужності, а відповідний струм робочий струм  $I_p$  [7].

Робоча напруга модуля, що складається з 36 елементів, приблизно дорівнює 31В (0,83 В / елемент) при 25 ° С [27]. Даний запас по напрузі служить компенсацією зменшення робочої напруги при розігріві модуля сонячною радіацією. Коефіцієнт температури при напрузі х.х. для кремнію становить мінус 0,4% / градус. Температурний коефіцієнт струму плюс 0,07% / градус [14]. Напруга х.х. сонячного елемента малопомітно змінюється при зменшенні або збільшенні освітленості, проте струм к.з. прямо пропорційний її зміни [7]. Коефіцієнт корисної дії сонячного елемента розраховується з відношення максимального значення потужності модуля до загального значення потужності випромінювання, що потрапляє на поверхню модуля при нормальних умовах, і знаходиться в діапазоні від 12 до 15%, в окремих зразках (які знаходяться на стадії розробки) до 40%.

Проаналізувавши характеристики стає очевидна необхідність регулювати опір навантаження, що живиться від модуля, для забезпечення максимальної ефективності його роботи [7]. Орієнтація площині модулів під прямим кутом до сонячного випромінювання так само необхідна, так як, джерело енергії Сонце переміщається по небосхилу, у зв'язку з чим кількість енергії, що потрапляє на перетворювач, змінюється з плином доби.

Сонячні / фотоелектричні системи можуть використовуватися в різних варіантах, але встановлення великої кількості фотоелектричних систем небажано через високі витрати на землю і в багатьох географічних районах з низькою інтенсивністю і надійністю сонячного світла. Загалом, для забезпечення 150 кВт електроенергії буде потрібно майже один акр землі [18].

					<i>ДС52.521.024.001 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		<i>18</i>

### 1.3. Паралельна робота декількох джерел на одне навантаження

Принцип дії перетворювача напруги понижуючого типу показано на рис.

1.8.

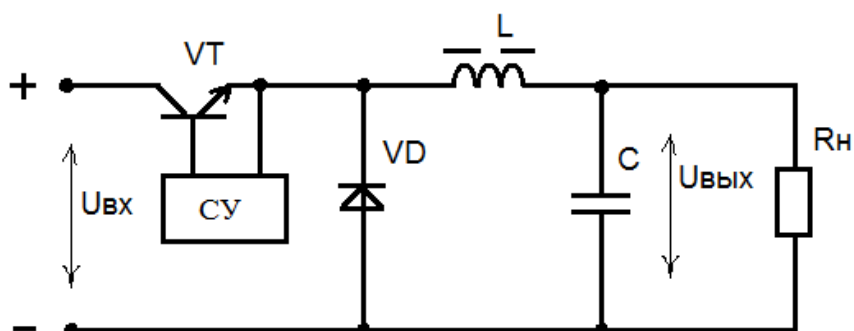


Рис. 1.8 Перетворювач понижуючого типу

Ключовий елемент  $VT$  здійснює високочастотну комутацію струму. Крім цього, в складі перетворювача є розрядний діод  $VD$ , дросель  $L$ , конденсатор  $C$  утворюють вихідний LC-фільтр, а також схема управління  $CU$ , що здійснює стабілізацію напруги або струму навантаження з опором  $R_n$ . Ключовий елемент може перебувати в двох станах - повної провідності і відсічення [14]. Якщо ці стани змінюють один одного з постійною періодичністю, яка дорівнює  $T$ , то, позначивши час знаходження ключа в відкритому стані - як час провідності ( $t_u$ ), а час перебування ключа в закритому стані - як час паузи ( $t_n$ ), можна ввести поняття коефіцієнта заповнення (duty cycle), рівний:

$$\gamma = \frac{t_u}{t_u + t_n} = \frac{t_u}{T} = t_u \cdot f. \quad (1.1)$$

На рис.1.9 показана графічна інтерпретація цього параметра.

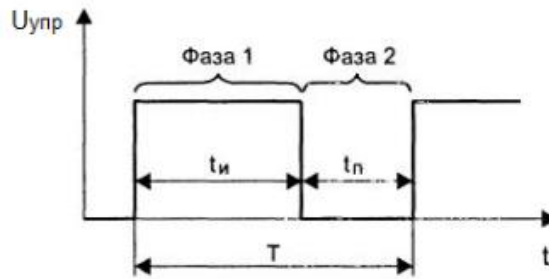


Рис. 1.9 Графічна інтерпретація коефіцієнта заповнення

Фаза накачування енергії протікає протягом часу  $t_{и}$ , коли ключовий елемент VT відкритий, тобто проводить струм (рис. 1.10 а). Цей струм далі проходить через дросель L до навантаження, шунтуватися конденсатором C. Накопичення енергії відбувається як в дроселі, так і в конденсаторі. Струм IL збільшується [16]. Після того, як ключовий елемент VT переходить в стан відсічення, настає фаза розряду (рис. 1.11б), що триває час  $t_{п}$ . Оскільки будь-який індуктивний елемент прагне перешкодити зміни напрямку і величини струму, що протікає через його обмотку, в даному випадку струм дроселя IL миттєво зменшитися до нуля не може, і він замикається через розрядний діод VD [1]. Джерело живлення в фазі розряду відключений, і дроселя нізвідки поповнювати спад енергії, тому розряд відбувається по ланцюгу "діод-навантаження".

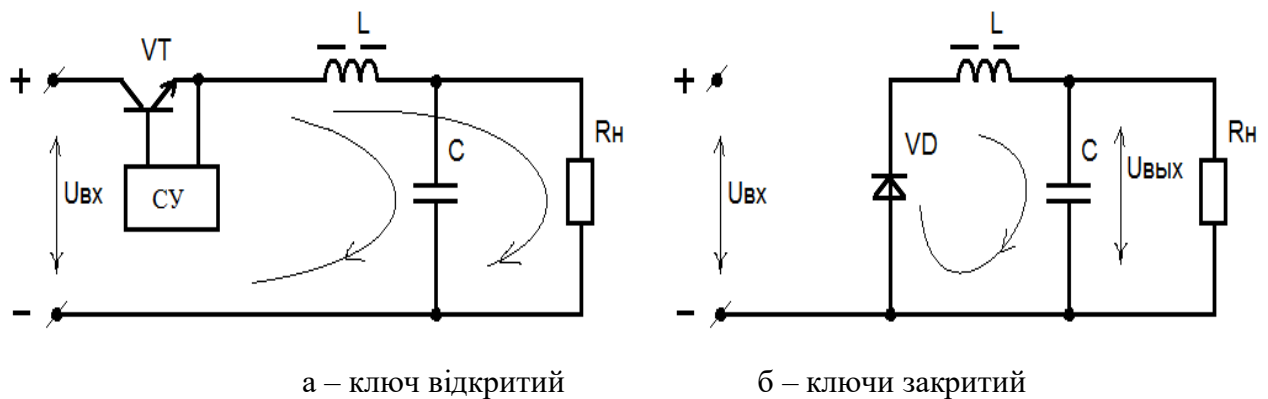


Рис. 1.10 Фази роботи перетворювача

Після закінчення часу  $T$  процес повторюється - знову настає фаза накачування енергії. Напруга на виході перетворювача:

$$U_{вих} = \gamma \cdot U_{ex}. \quad (1.2)$$

На перший погляд, очевидним і легким способом паралельного об'єднання джерел буде просте з'єднання їх виходів. Але в більшості випадків це не працюватиме, тому що кожен блок живлення має свою схему стабілізації вихідної напруги, яка не тільки буде прагнути відновити цю напругу при змінах навантаження, але і спробує протидіяти контурам регулювання інших джерел.

Просте паралельне з'єднання традиційних джерел живлення з внутрішнім опорною напругою і підсилювачем помилки, не призведе до підвищення вихідної потужності всього масиву [4]. Відмінності в параметрах блоків живлення завжди будуть призводити до того, що тільки один з них, з найменшим опором джерела, буде прагнути віддавати весь струм в навантаження, в той час як інші не будуть навантажені зовсім.

У цьому випадку, як тільки навантаження перевищить можливості цього «ведучого» джерела живлення, він може або увійде в режим обмеження струму (який може бути, а може і не бути передбачений його конструкцією), або буде інтерпретувати перевантаження як аварійний режим, і відключиться. Залежно від типу джерела, ця ситуація може призвести до дисбалансу системи живлення, особливо, якщо вона виникає під час звичайної роботи пристрою [16]. Надалі, в разі відключення джерела через перевантаження, все навантаження прийме на себе наступний джерело з найбільшою опорною напругою, і воно точно також відключиться. Це швидко призведе до обвалення всієї шини живлення.

### **Комбіноване (CV-CC) з'єднання**

Одним з варіантів вирішення проблеми є варіант з'єднання коли одне джерело працює в режимі стабілізації напруги (CV - constant-voltage mode), а

					<i>ДС52.521.024.001 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		<i>21</i>



решта - в режимі стабілізації струму (CC - constant-current mode) з трохи більшою вихідною напругою. Відзначимо, що далеко не у всіх джерелах живлення передбачена можливість вибору вихідного режиму [14]. Джерела живлення, на виходах яких встановлено більш високу вихідну напругу, забезпечать стабільність вихідного струму, а напруга на виході кожного з них буде знижуватися до тих пір, поки не зрівняється з напругою джерела CV [7]. Навантаження повинно споживати струм, достатній для того, щоб гарантувати, що джерела, які повинні працювати в режимі CC, залишатимуться в цьому режимі. Слід звернути увагу, що використання двох режимів означає, що джерела вже не є строго ідентичними, і тим самим одне з переваг паралельної конфігурації зводиться нанівець.

Пряме з'єднання стає практичним, якщо джерела живлення спеціально розроблені для підтримки такої топології, або якщо є єдиний підсилювач помилки петлі зворотного зв'язку, що виробляє сигнал неузгодженості для всіх інших джерел живлення, щоб дозволити їм розподілити між собою віддається в навантаження потужність [2]. Однак такий метод вимагає наявності «загальної шини» для передачі сигналів управління від провідного джерела живлення до веденим.

### **Балансування джерел**

Інший підхід полягає в додаванні невеликих баластних резисторів послідовно з виходом кожного джерела живлення (рис 1.1), які вирівнюють розподіл струмів навантаження між джерелами в групі навіть тоді, коли їх схеми управління відстежують різні вихідні напруги [3]. Баластні резистори кілька погіршують якість стабілізації навантаження, причому ступінь цього погіршення залежить від величини розкиду помилок уставок, для компенсації яких використовуються резистори [18]. Однак ці баластні резистори також розсіюють тепло, що погіршує ККД системи та їх неможливо підлаштовувати

					<i>ДС52.521.024.001 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		22

під різні зовнішні фактори, робить систему непридатною в використанні з джерелами альтернативної енергії.

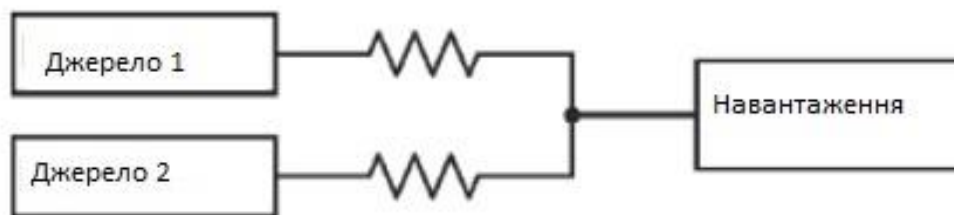


Рис. 1.11 Метод підключення балансних резисторів

### Діодне «АБО»

Здавалося б, «просте» рішення дилеми прямого підключення полягає в тому, щоб всього лише використовувати діод між кожним джерелом живлення і загальною точкою, яка об'єднує всі джерела (рис. 1.12) [4]. Діодне «АБО» дуже ефективно тоді, коли потрібно виключити можливість протікання струму поза загального навантаження, але, як правило, недостатньо для усунення помилок розподілу між джерелами живлення з незалежними підсилювачами помилки, оскільки злам характеристики провідності діода досить різкий для того, щоб параметричні відмінності в уставках як і раніше залишалися причиною значного дисбалансу джерел.

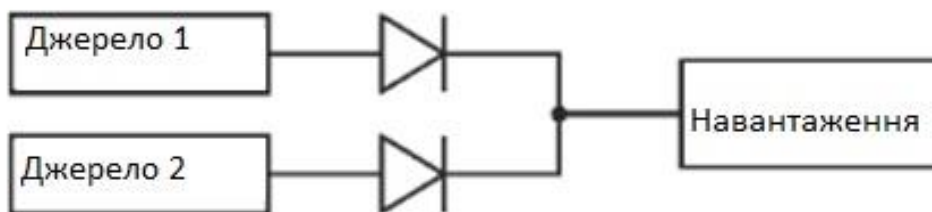


Рис. 1.12 Метод підключення діодів

Як правило, діодне «АБО» потрібне для працюючих незалежно джерел живлення, вихідні струми яких можуть бути як витікаючими, так і втікаючими (робота в двох квадрантах) [23]. Ефект прямого паралельного з'єднання таких джерел живлення без використання діодів буде набагато гірше, ніж в разі

одноквадратичних джерел. У той час як одноквадратичні джерела живлення лише втрачають точність при підключенні до загальної навантаженні, двухквадратичні джерела будуть активно боротися за контроль над загальною вихідною напругою [20]. Це призведе до перевищення струмів, що циркулюють в групі джерел живлення, над струмом в навантаженні, і, можливо, стане причиною негайної перевантаження одного або декількох джерел.

Крім того, якщо діоди мають негативний температурний коефіцієнт порогу провідності, вони навіть будуть сприяти порушенню розподілу струмів в групі джерел [2]. Один із способів пом'якшення цієї проблеми полягає у використанні випрямлячів з позитивним температурним коефіцієнтом - на діодах Шоттки, або на польових транзисторах, що виконують функції діодів в схемі активного «АБО», проте діоди можуть знизити загальний ККД за рахунок прямого падіння напруги, а активне «АБО» може збільшити вартість і складність схеми.

У деяких випадках діодне «АБО» може сприяти підвищенню надійності на системному рівні. Особливо цікавий випадок, коли в одному з блоків живлення відбувається коротке замикання вихідного польового транзистора або конденсатора, що може поставити під загрозу роботу загальної шини вихідної напруги [6]. Діоди схеми «АБО» швидко відсічуть коротке замикання від загальної вихідної шини і забезпечать стійкість і надійність системи.

#### **1.4. Система керування зі стабілізацією вихідної напруги та рівномірним розподілом струму**

Основною вимогою для винаходу було спрощення підключення джерел, які працюють на одне навантаження. Головною умовою поставленої задачі була відсутність будь-яких додаткових шин між перетворювачами, будь-яких спільних сигналів помилок тощо. Кожен перетворювач має мати власну

					ДС52.521.024.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

систему керування. Система керування має зворотній зв'язок по напрузі і струму (рис 1.1).

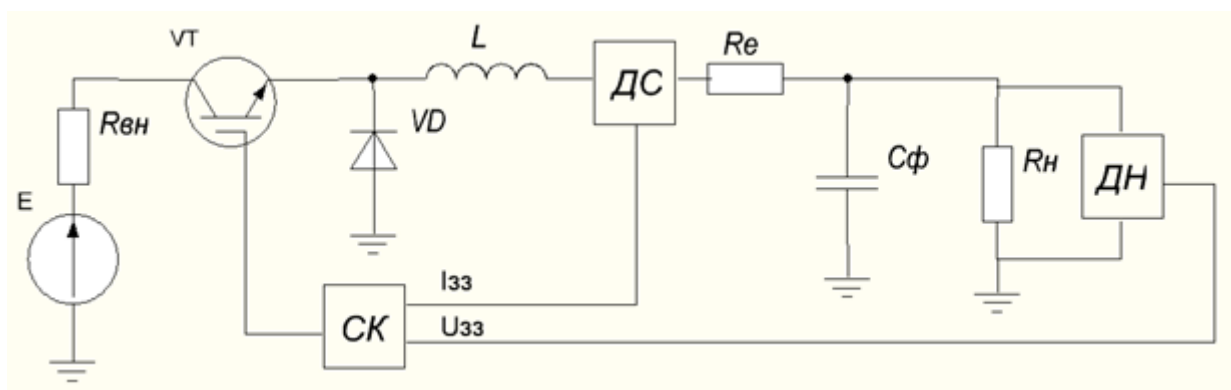


Рис 1.14 Функціональна схема перетворювача з системою керування зі зворотнім зв'язком по напрузі та струму

Схема містить наступні елементи:

- E – джерело напруги;
- $R_{вн}$  – еквівалентний опір джерела напруги;
- VT – IGBT транзистор, що працює в ключовому режимі;
- VD – діод;
- L – індуктивність;
- $R_e$  – еквівалентний опір перетворювача (опір відкритого стану транзистора, опір шини, тощо);
- Cф – конденсатор фільтру;
- $R_n$  – активне навантаження;
- ДС – датчик струму;
- ДН – датчик напруги;
- СК – Система керування ШПП перетворювача (рис. 1.14).

### Принцип роботи системи керування

Структурна схема системи керування перетворювачем показана на рис. 1.14. Сигнал зворотнього зв'язку по напрузі ( $U_{зз}$ ) віднімається від опорного

сигналу ( $U_{оп}$  – задана напруга на навантаженні). Утворюється сигнал помилки по напрузі ( $\Delta U$ ), який множиться на коефіцієнт підсилення  $K_1$ , який має розмірність провідності [ $См$ ]. В результаті множення утворюється задаючий сигнал струму  $I_{зад}$ . Сигнал зворотнього зв'язку по струму ( $I_{зз}$ ) віднімається від опорного сигналу ( $I_{зад}$ ). В результаті віднімання утворюється сигнал помилки який підсилюється та подається на компаратор.

Компаратор порівнює сигнал з генератора пилкоподібної напруги з підсиленим сигналом помилки. На виході компаратора утворюються імпульси керування ключем силової частини перетворювача.

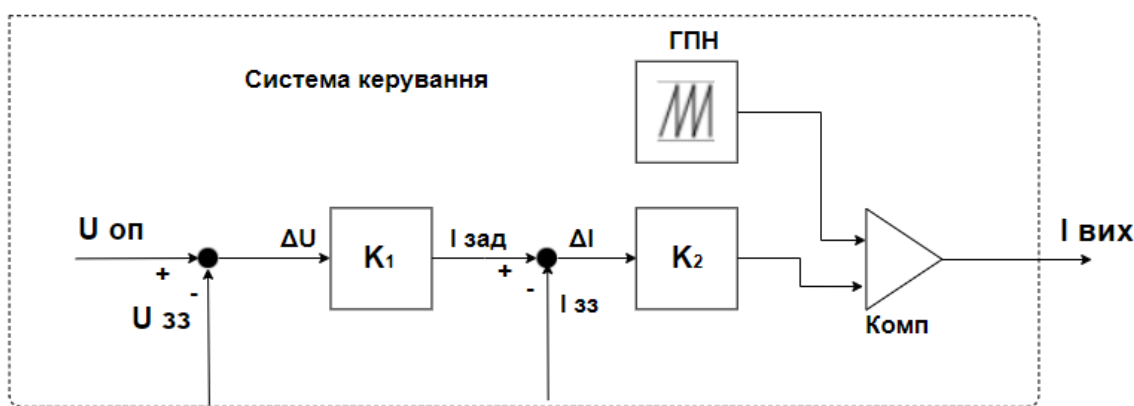


Рис. 1.14 Структурна схема системи керування перетворювачем

Система керування складається з наступних блоків:

- $U_{оп}$  – задана напруга на виході перетворювача;
- $U_{зз}$  – зворотній зв'язок по напрузі;
- $\Delta U$  сигнал помилки по напрузі;
- $K_1$  [ $См$ ] – коефіцієнт підсилення;
- $I_{зз}$  – зворотній зв'язок по струму;
- $\Delta I$  – сигнал помилки по струму;
- $K_2$  – коефіцієнт підсилення;
- ГПН – генератор пилкоподібної напруги;
- Комп – компаратор.

Як видно на рис. 1.15 обидва перетворювача не мають спільних шин і підключені до власних систем керування.

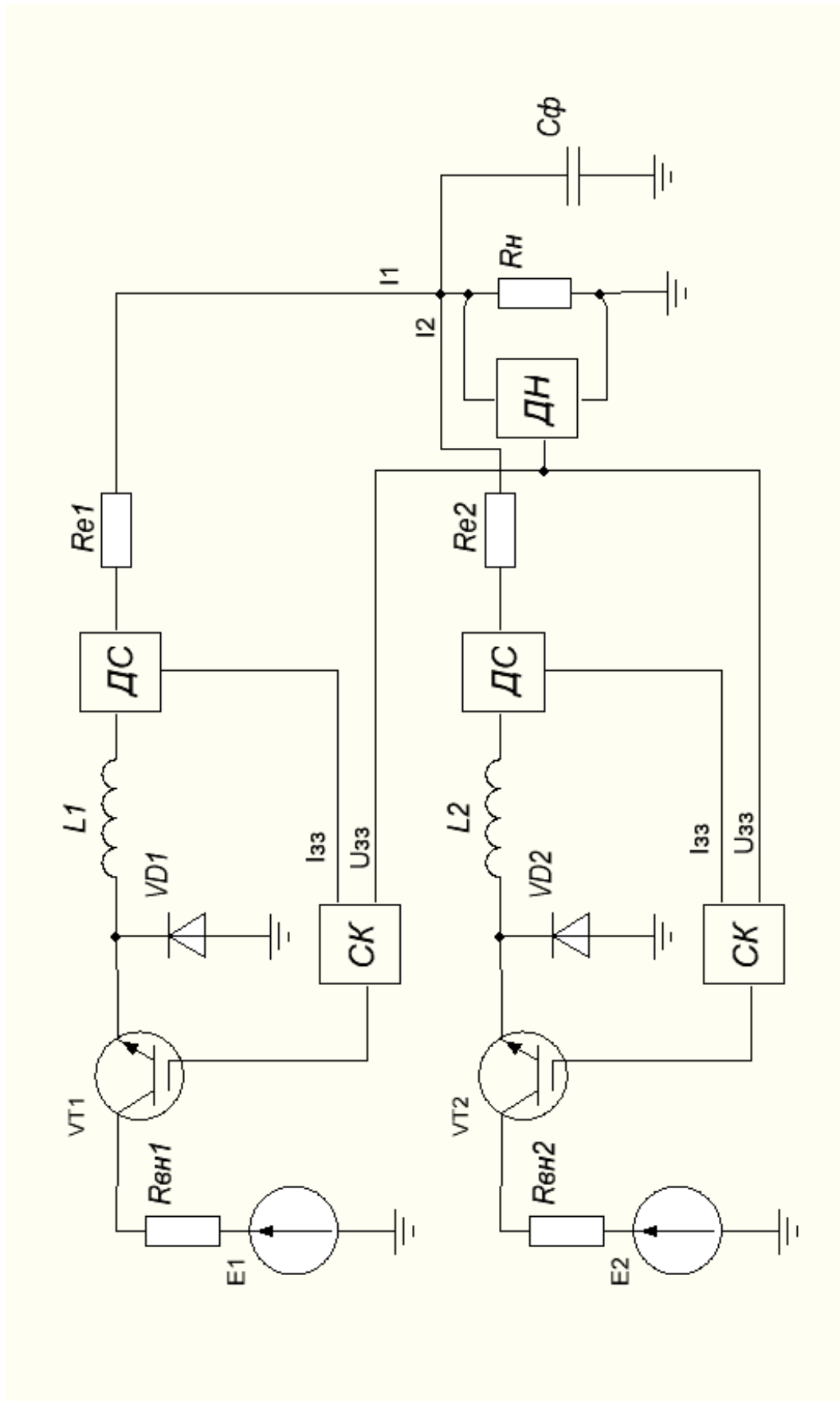


Рис. 1.15 Функціональна схема підключення двох перетворювачів до спільного навантаження

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДС52.521.024.001 ПЗ

Арк.

27

Схема містить наступні елементи:

- E1 – джерело напруги;
- E2 – джерело напруги;
- R<sub>вн1</sub> – еквівалентний опір джерела напруги;
- R<sub>вн2</sub> – еквівалентний опір джерела напруги;
- VT1 – IGBT транзистор, що працює в ключовму режимі;
- VT 2– IGBT транзистор, що працює в ключовму режимі;
- VD1 – діод;
- VD2 – діод;
- L1 – індуктивність;
- L2 – індуктивність;
- Re1 – еквівалентний опір перетворювача (опір відкритого стану транзистора, опір шини, тощо);
- Re2 – еквівалентний опір перетворювача (опір відкритого стану транзистора, опір шини, тощо)
- С<sub>ф</sub> – конденсатор фільтру;
- R<sub>н</sub> – активне навантаження;
- ДС – датчик струму;
- ДН – датчик напруги;
- СК – Система керування перетворювачами (структурна схема роботи обох систем керування показана на рис. 1.16).

					ДС52.521.024.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

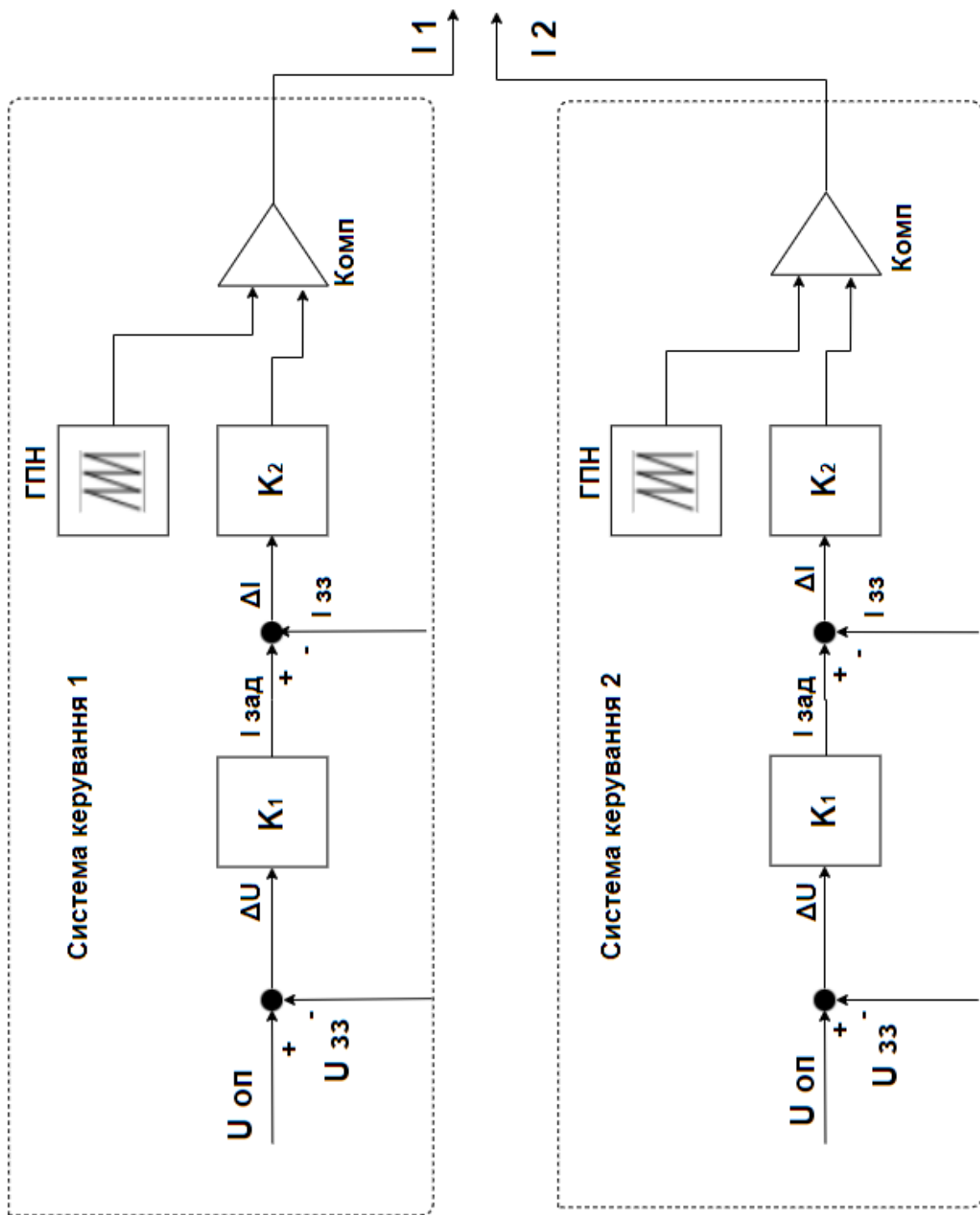


Рис. 1.16 Структурна схема паралельної роботи систем керування перетворювачами

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДС52.521.024.001 ПЗ

Арк.

29



## 2. РОЗРАХУНОК ЕЛЕМЕНТІВ СИЛОВОЇ ЧАСТИНИ ПЕРЕТВОРЮВАЧА

Задані параметри для розрахунку елементів перетворювача:

Вхідна напруга

$$U_{вх} = 400 - 500В.$$

Для розрахунків було обране середнє значення 450 В.

Вихідна напруга

$$U_{вих} = 360 В;$$

Частота

$$f = 50кГц.$$

Опір навантаження

$$R_H = 42.8 Ом.$$

Відносна довжина  $\gamma$  відкритого стану транзистора

$$\gamma = \frac{U_{вих}}{U_{вх}}; \quad \gamma = \frac{360В}{450В} = 0.8. \quad (2.1)$$

Струм у навантаженні

$$I_H = \frac{U_{вих}}{R_H}; \quad I_H = \frac{360В}{42.8Ом} = 8.41А. \quad (2.2)$$

Для забезпечення роботи в режимі рівномірного розподілу струму  $\Delta I_L < 0.05$ .

Граничне значення індуктивності, яке забезпечує режим неперервного струму

$$L_{зр} = \frac{(U_H - U_{вх}) \cdot t_{вкл}}{\Delta I_L} = 0.048 Гн, \quad (2.3)$$

за умови, що:  $L > L_{зр}$ , оберемо  $5^{-2} Гн$ .

Кількість витків дроселя

					ДС52.521.024.001 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$N = 100 \cdot \sqrt{\frac{L}{A_L}}, \quad (2.4)$$

де  $A_L$  - коефіцієнт індуктивності.

Оберемо порошковий тороїдальний сердечник (так як  $f < 100 \text{ кГц}$ ), у якого наступні параметри.

Коефіцієнт індуктивності:

$$A_L = 81 \text{ мГн на } 100 \text{ витків.}$$

Довжина магнітопроводу:

$$L_{mn} = 8.28 \text{ см.}$$

Площа перерізу:

$$S = 0.361 \text{ см}^2.$$

Об'єм:

$$V = 2.99 \text{ см}^3.$$

Кількість витків обмотки при діаметрі провідника:

$$d = 1.162 \text{ мм } n = 32.$$

$$N = 100 \cdot \sqrt{\frac{0.05}{0.081}} = 78.59 \Phi; N = 79.$$

Намотку на сердечник буде здійснено в 3 шари.

Ємність конденсатора вихідного фільтру:

$$C = \frac{L \cdot (I_n + \frac{\Delta I_L}{2})^2}{(\Delta U + U_{вих})^2 - U_{вих}^2} = 5 \cdot 10^{-3} \Phi. \quad (2.5)$$

Напруга на конденсаторі: 360 В.

Оберемо танталовий конденсатор К8-68 8.7 мФ  $\pm 20\%$ .

Максимальна напруга прикладена до транзистора в закритому стані:

$$U_{\max} = U_{вх} = 500 \text{ В.}$$

Максимальне значення струму протікаючого через транзистор:

					ДС52.521.024.001 ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$I_{vt} = I_n + \frac{\Delta I}{2} = 15A. \quad (2.6)$$

Оберемо транзистор VT - RJH60F7DPQ з наступними параметрами:

- матеріал: кремній;
- тип: NPN;
- $U_{ce} = 600 \text{ В};$
- $I_{ce} = 15A$

Максимальне значення струму протікаючого через діод:

$$I_{vt} = I_n + \frac{\Delta I}{2} = 8.5 \text{ А}. \quad (2.7)$$

Зворотня напруга прикладена до діода VD:

$$U_{\max} = U_{ex} = 500 \text{ В}.$$

Оберемо кремнієвий діод – 1N5408, який має наступні характеристики:

- Максимальна постійна зворотня напруга 1000В;
- Максимальний прямий струм 20 А.

					<b>ДС52.521.024.001 ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

### 3. МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ З ДЕКІЛЬКОМА ДЖЕРЕЛАМИ

Дослідження процесів у широтно-імпульсних перетворювачах, що мають систему керування зі зворотнім зв'язком по напрузі та струму, було проведено в програмному середовищі Matlab R2019a Simulink який реалізує імітаційне моделювання динамічних систем з використанням графічних блоків із заданими параметрами.

#### 3.1. Моделювання одного перетворювача

На рис. 3.1 зображено модель перетворювача зі зворотнім зв'язком по напрузі та струму.

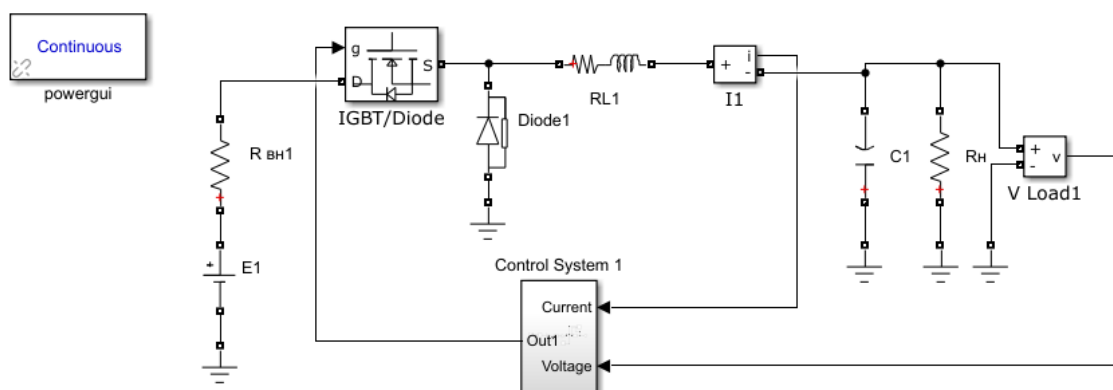


Рис 3.1. Модель перетворювача

Модель містить

- $E1=450\text{В}$  - джерело напруги з внутрішнім опором  $R_{вн1}$ ;
- $R_{вн1} = 1\text{ Ом}$  – внутрішній опір джерела  $E1$ ;
- IGBT/Diode – транзистор MOSFET, що працює в ключовому режимі;
- Diode1– напівпровідниковий діод;

- RL1 ( $L= 5 \cdot 10^{-2}$  Гн,  $R=1$  Ом) – індуктивність та еквівалентний опір перетворювача;
- $C1=5 \cdot 10^{-3}$  Ф – ємність фільтру;
- $R_H=42.8$  Ом – активне навантаження;
- П1– блок вимірювання струму;
- V Load1 – блок вимірювання напруги;
- Control System - система керування широтно-імпульсним перетворювачем зі стабілізацією вихідної напруги та рівномірним розподілом струму. Схема моделі якої зображена на рис. 3.2., де:

- $U_{зад} = 360$  В – задаюче значення напруги;
- Voltage – сигнал зворотнього зв'язку напруги;
- Current – сигнал зворотнього зв'язку струму;
- Subtract1, Subtract2 – блок віднімання,
- $K [C_m]= 1$  Cм – коефіцієнт підсилення;
- K – коефіцієнт підсилення;
- Repeating Sequence=50 кГц– генератор пилоподібного струму;
- Relational operator – оператор порівняння.

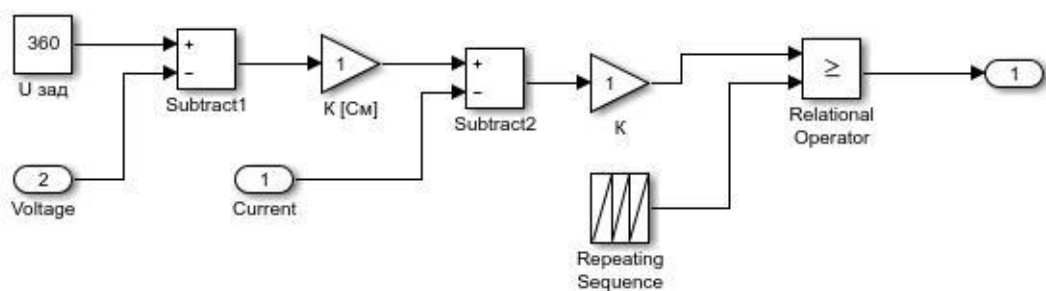


Рис 3.2. Модель системи керування перетворювачем

На рис. 3.3 показано часову залежність сигналів системи керування. Було визначено, що система знаходиться в стійкому режимі роботи.

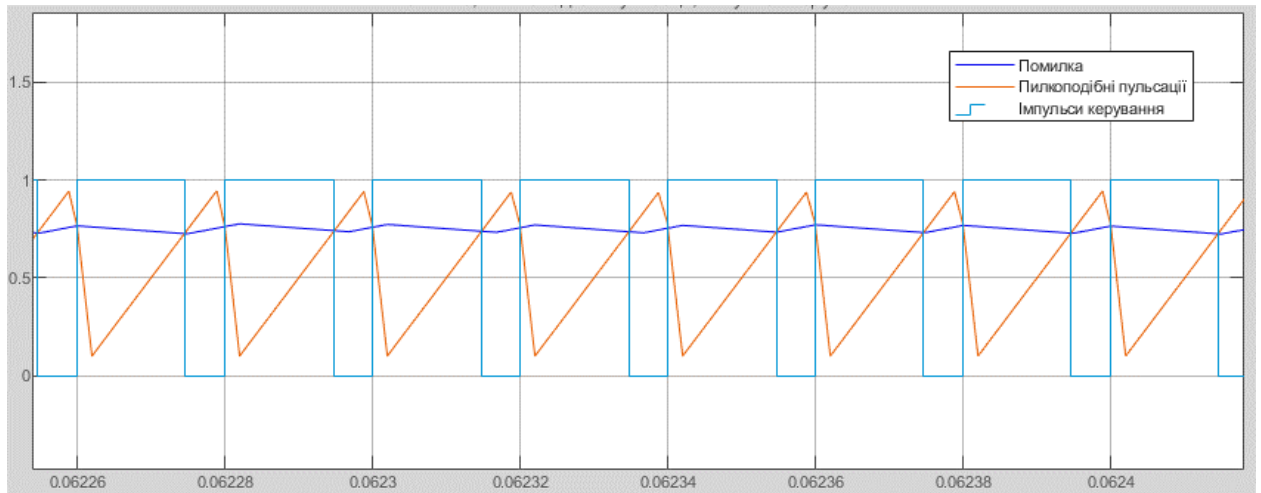


Рис. 3.3. Сигнали системи керування

На рис. 3.4 показано часову залежність струму в навантаженні. Діюче значення струму  $I=8.19A$ .

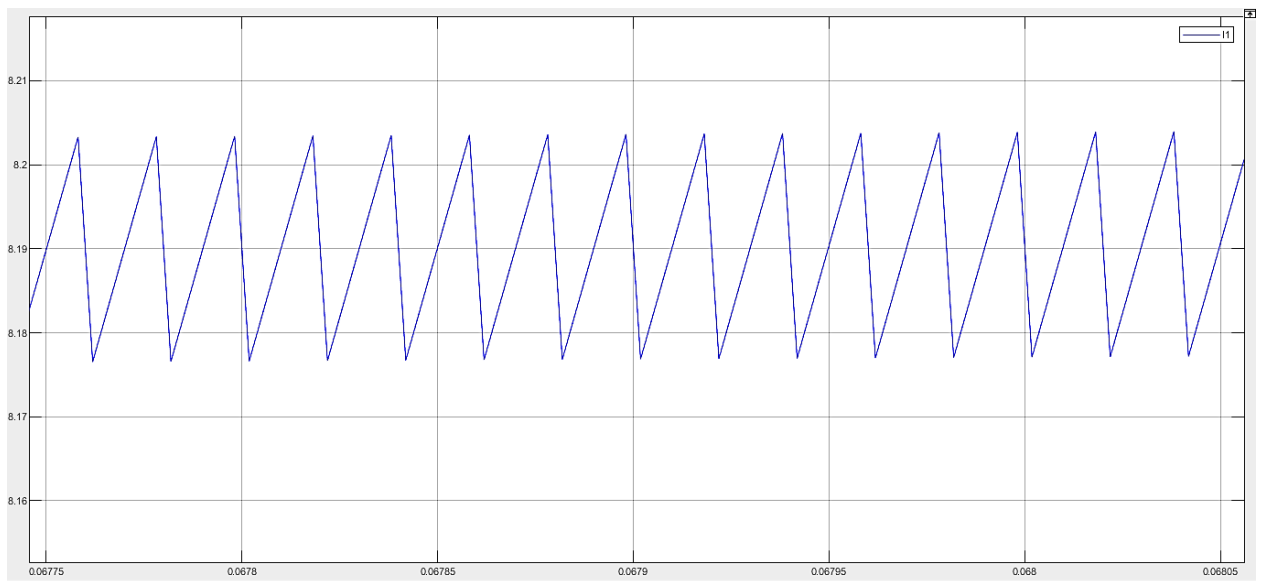


Рис. 3.4 Форма пульсацій струму на навантаженні

З отриманих результатів моделювання видно, що тривалість перехідного процесу 0.05с. Значення напруги після закінчення перехідного процесу дорівнює 351.8В (рис. 3.5).



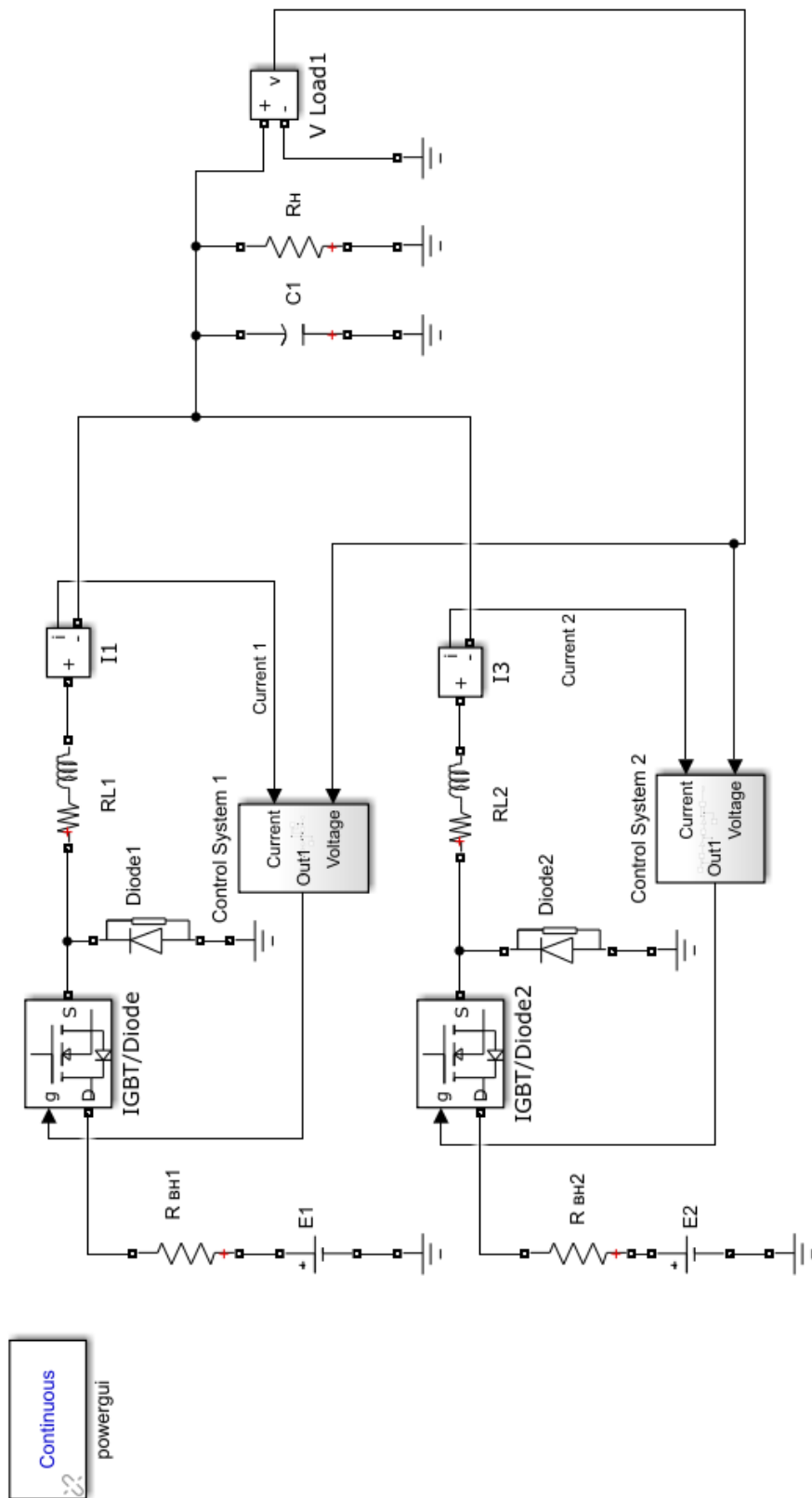


Рис.3.6 Модель роботи двох перетворювачів на спільне навантаження

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДС52.521.024.001 ПЗ

Арк.

37



- I1, I3 – блоки вимірювання струму;
- V Load1 – блок вимірювання напруги;
- Control System, Control System 2 - система керування широтно-імпульсним перетворювачем зі стабілізуванням вихідної напруги та рівномірним розподілом струму. Схема моделі якої зображена на рис. 3.2.

Часові залежності струму в навантаженні, отримані в результаті моделювання при  $E1 = E2 = 450 \text{ В}$ ;  $R_{вн1} = R_L = 1 \text{ Ом}$ ,  $R_{вн1} = R_L = 3 \text{ Ом}$  наведені на рис. 3.7.

Імпульси керування ШІП при  $E1=E2=450\text{В}$ ;  $R_{вн1}=R_L=1 \text{ Ом}$ ,  $R_{вн1}=R_L=3 \text{ Ом}$  показано на рис. 3.9.

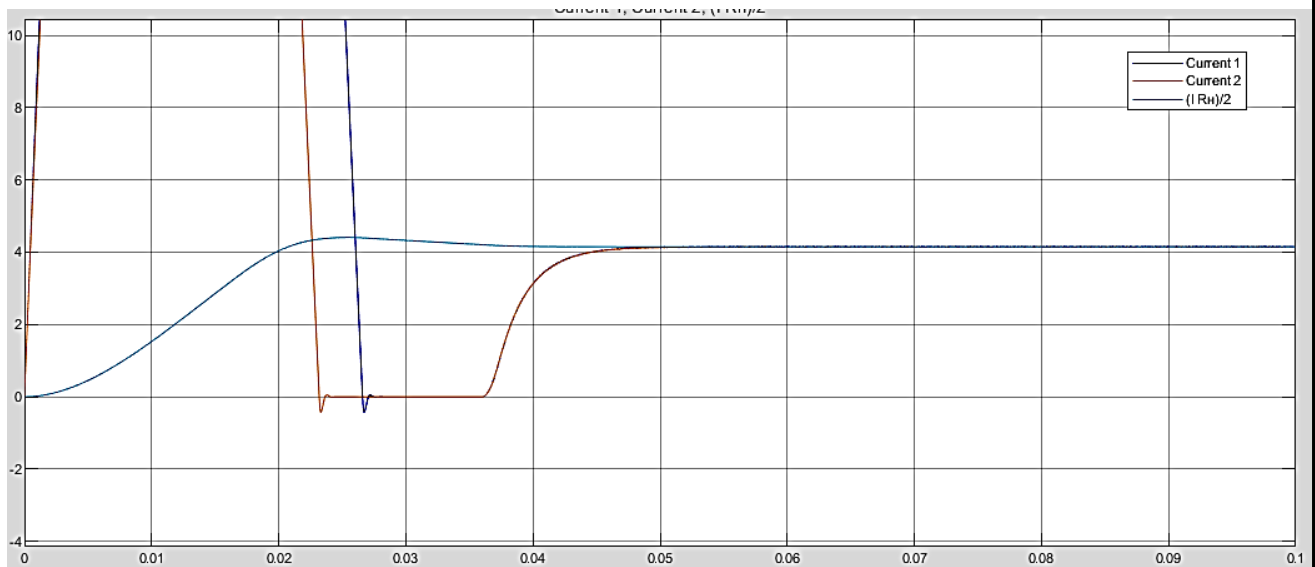


Рис. 3.7. Часова залежність струму при  $E1=E2=450\text{В}$ ;  $R_{вн1}=R_L=1 \text{ Ом}$ ,  $R_{вн1}=R_L=3 \text{ Ом}$

Характер залежності струму наведено в збільшеному масштабі на рис. 3.8. у збільшеному масштабі при  $E1 = E2 = 450\text{В}$ ;  $R_{вн1} = R_L = 1 \text{ Ом}$ ,  $R_{вн1} = R_L = 3 \text{ Ом}$ . Виміряні діючі значення струму значення струму  $I1=4.15\text{А}$ ;  $I2=4.14\text{А}$ ;  $U_H=355.7 \text{ В}$ .

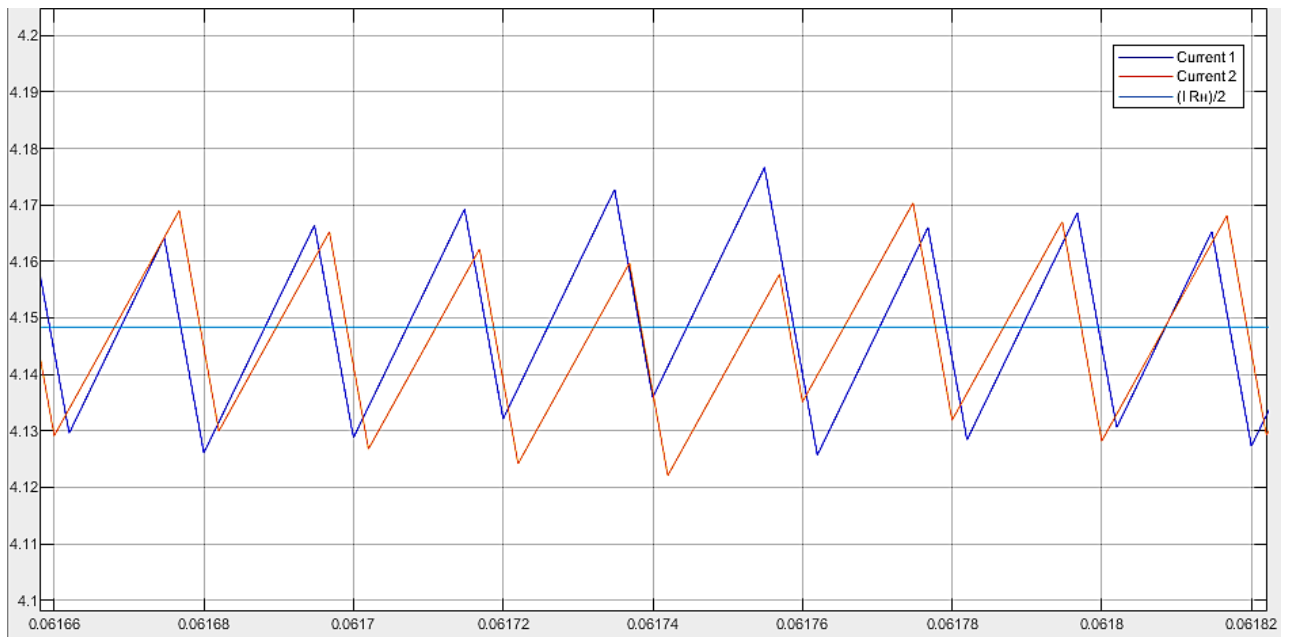


Рис. 3.8. Часова залежність струму при  $E_1=E_2=450\text{В}$ ;  $R_{вн1}=R_L=1\ \text{Ом}$ ,  $R_{вн1}=R_L=3\ \text{Ом}$

На рис. 3.9 зображено часову залежність сигналів системи керування перетворювачем. З результатів можна зробити висновок, що система знаходиться в стійкому режимі.

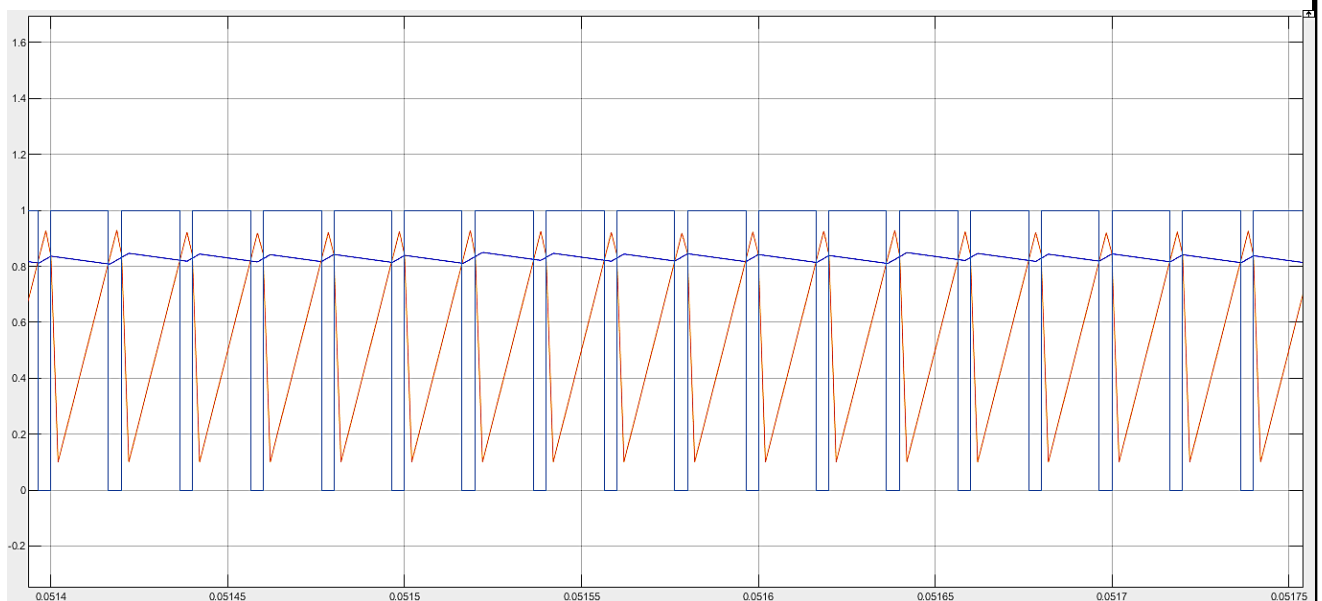


Рис. 3.9. Часові діаграми системи керування при  $E_1=E_2=450\text{В}$ ;  $R_{вн1}=R_L=1\ \text{Ом}$ ,  
 $R_{вн1}=R_L=3\ \text{Ом}$

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

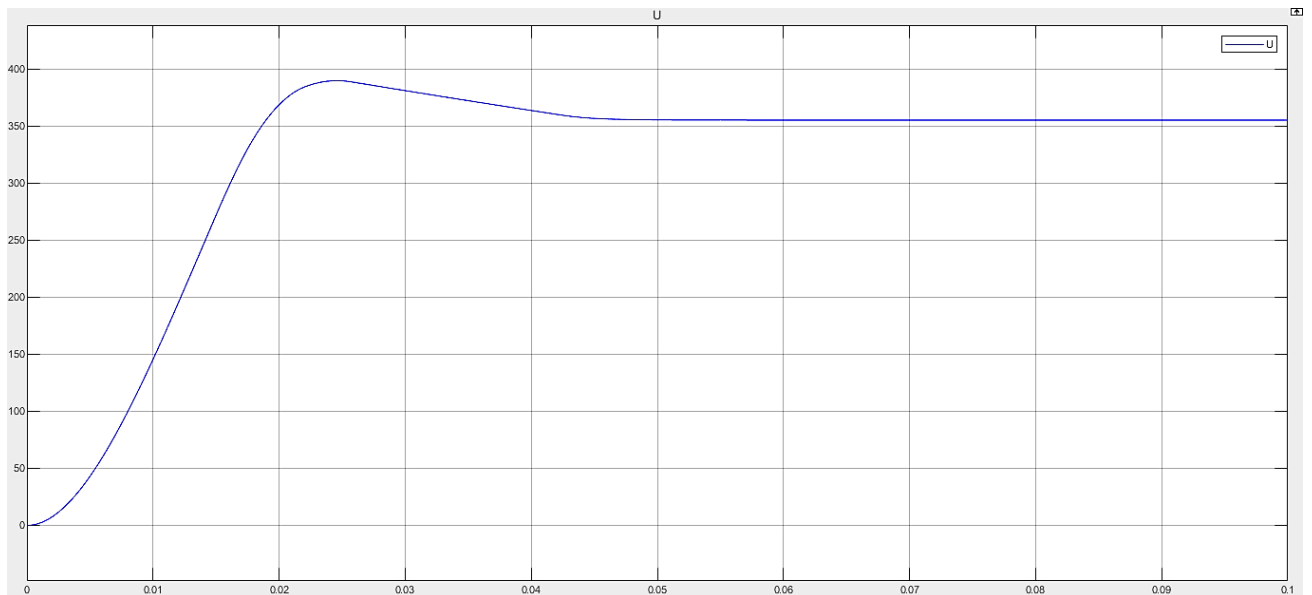


Рис. 3.10. Часова залежність напруги на навантаженні при  $E_1=E_2=450\text{В}$ ;  $R_{вн1}=R_L=1\ \text{Ом}$ ,  
 $R_{вн1}=R_L=3\ \text{Ом}$

Проведено моделювання при різних значеннях  $E_1$ ,  $E_2$ . Графіки зображені на рис 3.11 демонструють здатність системи підлаштуватися під зміну вхідної напруги.

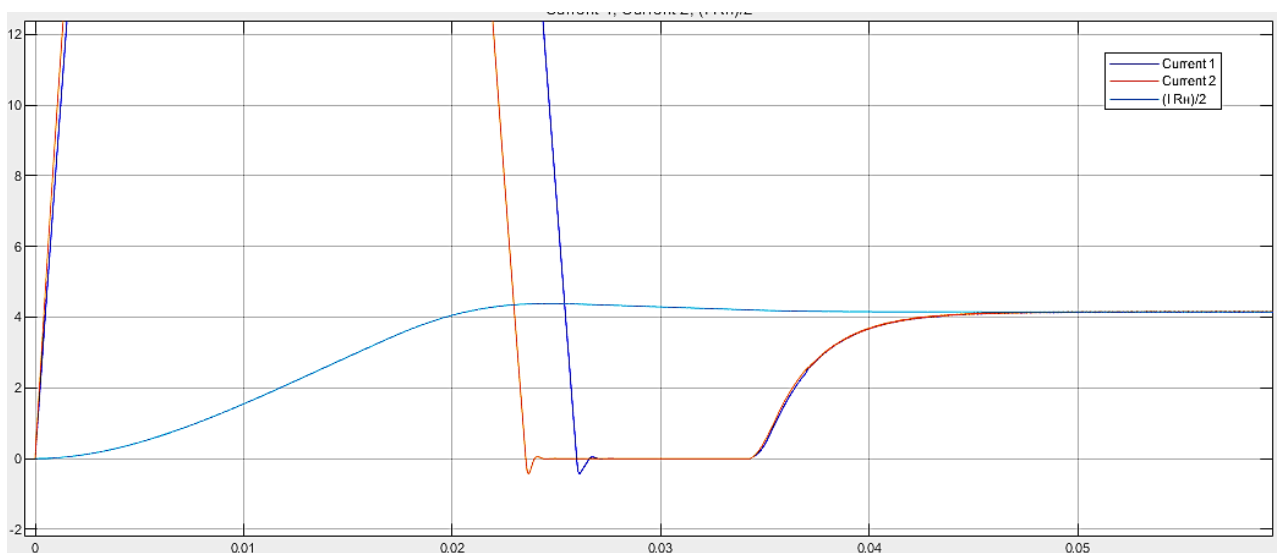


Рис. 3.11. Часові діаграми системи керування при  $E_1=420\text{В}$ ;  $E_2=500\text{В}$ ;  $R_{вн1}=R_L=1\ \text{Ом}$ ,  
 $R_{вн1}=R_L=3\ \text{Ом}$

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

На рис. 3.12 показано часову залежність струму в навантаженні, при  $E_1=420\text{В}$ ;  $E_2=500\text{В}$ ;  $R_{вн1}=R_L=1\ \text{Ом}$ ,  $R_{вн1}=R_L=3\ \text{Ом}$ . Діючі значення струму  $I_1=4.14\text{А}$ ;  $I_2=4.15\text{А}$ ;  $U_H=355.7\ \text{В}$ .

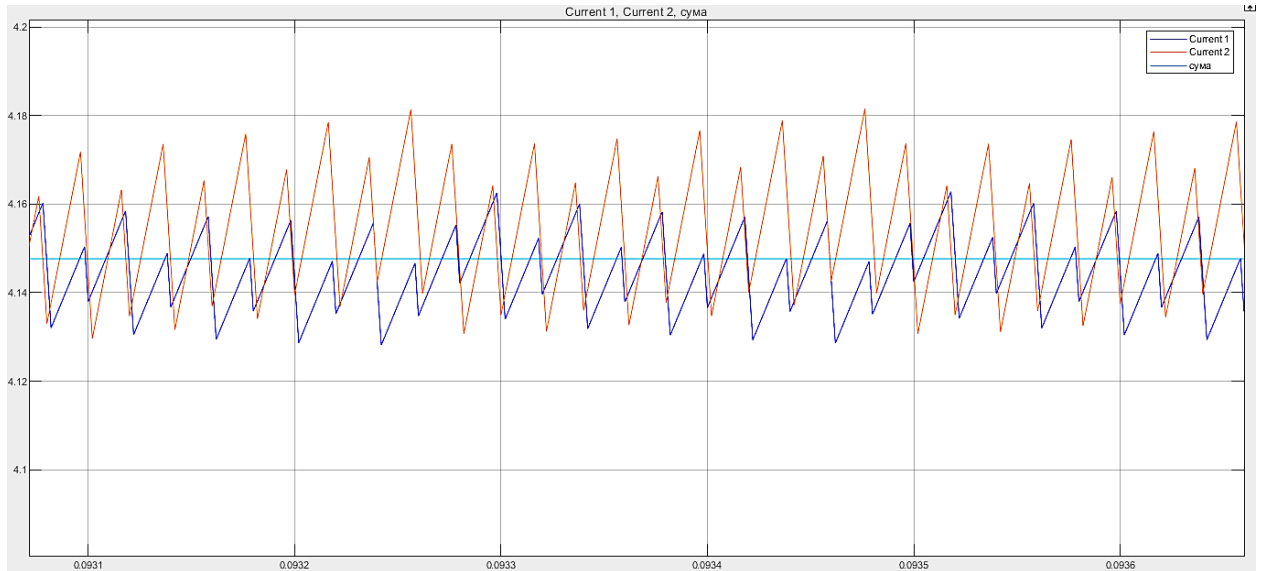


Рис. 3.12. Часові діаграми системи керування при  $E_1=420\text{В}$ ;  $E_2=500\text{В}$ ;  $R_{вн1}=R_L=1\ \text{Ом}$ ,  
 $R_{вн1}=R_L=3\ \text{Ом}$

На рис. 3.13 показано часову залежність струму в навантаженні, при  $E_1=E_2=500\text{В}$ ;  $R_{вн1}=R_L=1\ \text{Ом}$ ,  $R_{вн1}=R_L=3\ \text{Ом}$ . Діючі значення струму  $I_1=4.15\text{А}$ ;  $I_2=4.15\text{А}$ ;  $U_H=355.7\ \text{В}$ .

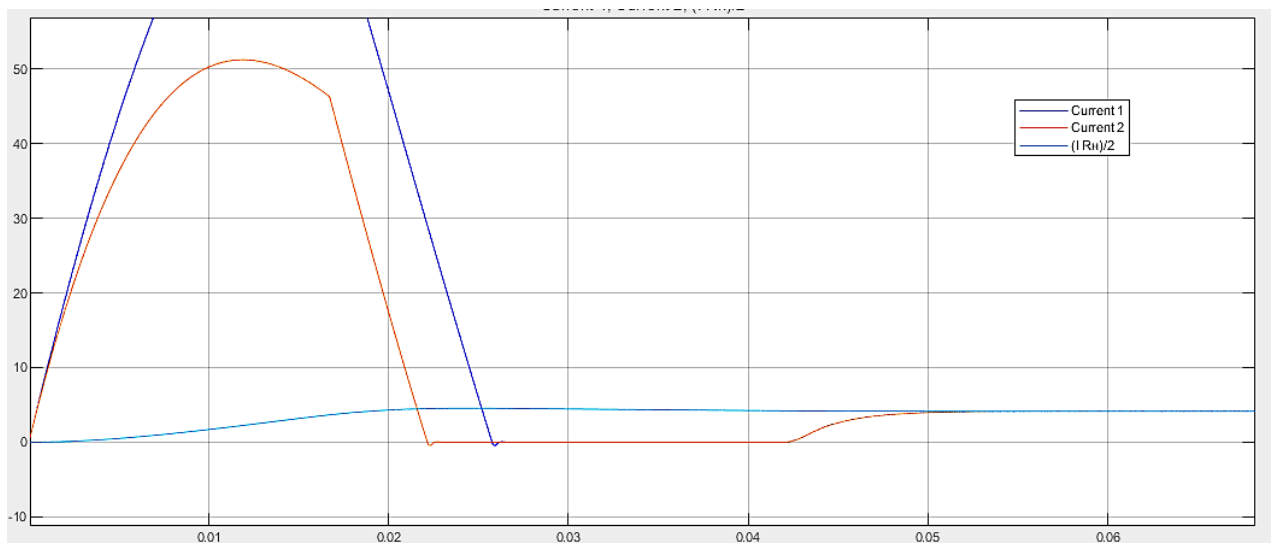


Рис. 3.13. Часові діаграми системи керування при  $E_1=500\text{В}$ ;  $E_2=500\text{В}$ ;  $R_{вн1}=R_L=1\ \text{Ом}$ ,  
 $R_{вн1}=R_L=3\ \text{Ом}$

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДС52.521.024.001 ПЗ

Арк.

41



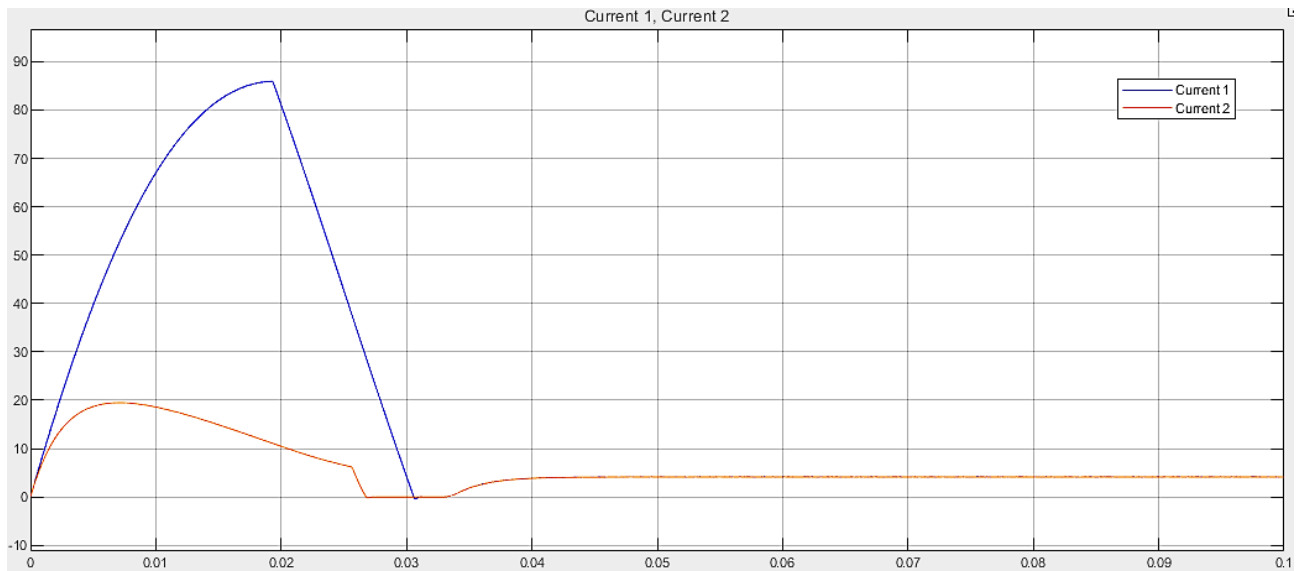


Рис. 3.15. Часові діаграми системи керування при  $E_1=450\text{ В}$ ;  $E_2=450\text{ В}$ ;  $R_{вн1}=R_L=1\text{ Ом}$ ,  
 $R_{вн1}=R_L=10\text{ Ом}$

На рис. 3.16 показано часову залежність струму в навантаженні, при  $E_1 = E_2 = 450\text{ В}$ ;  $R_{вн1} = R_L = 1\text{ Ом}$ ,  $R_{вн1} = R_L=10\text{ Ом}$ . Діючі значення струму  $I_1 = 4.14\text{ А}$ ;  $I_2 = 4.155\text{ А}$ ;  $U_H = 355.7\text{ В}$ .

Виміряні діючі значення струму ( $I_1 = 4.155\text{ А}$ ,  $I_2 = 4.14\text{ А}$ ) відрізняються на 0.24% при відмінності внутрішніх опорів джерела та перетворювача ( $R_{вн} R$ ) на 1000%.

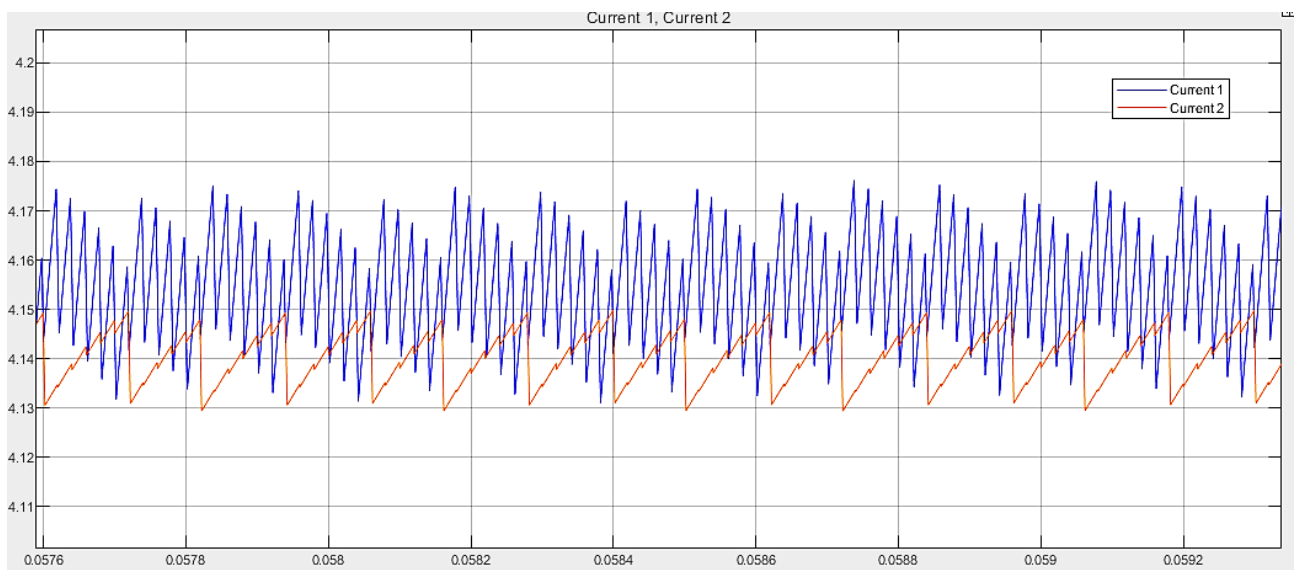


Рис. 3.16. Часові діаграми системи керування при  $E_1=450\text{ В}$ ;  $E_2=450\text{ В}$ ;  $R_{вн1}=R_L=1\text{ Ом}$ ,  
 $R_{вн1}=R_L=10\text{ Ом}$

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДС52.521.024.001 ПЗ

Арк.

43

На рис. 3.17 показано часову залежність напруги в навантаженні, при  $E_1 = E_2 = 450\text{В}$ ;  $R_{вн1} = R_L = 1\ \text{Ом}$ ,  $R_{вн1} = R_L = 10\ \text{Ом}$   $U_H = 355.7\ \text{В}$ .

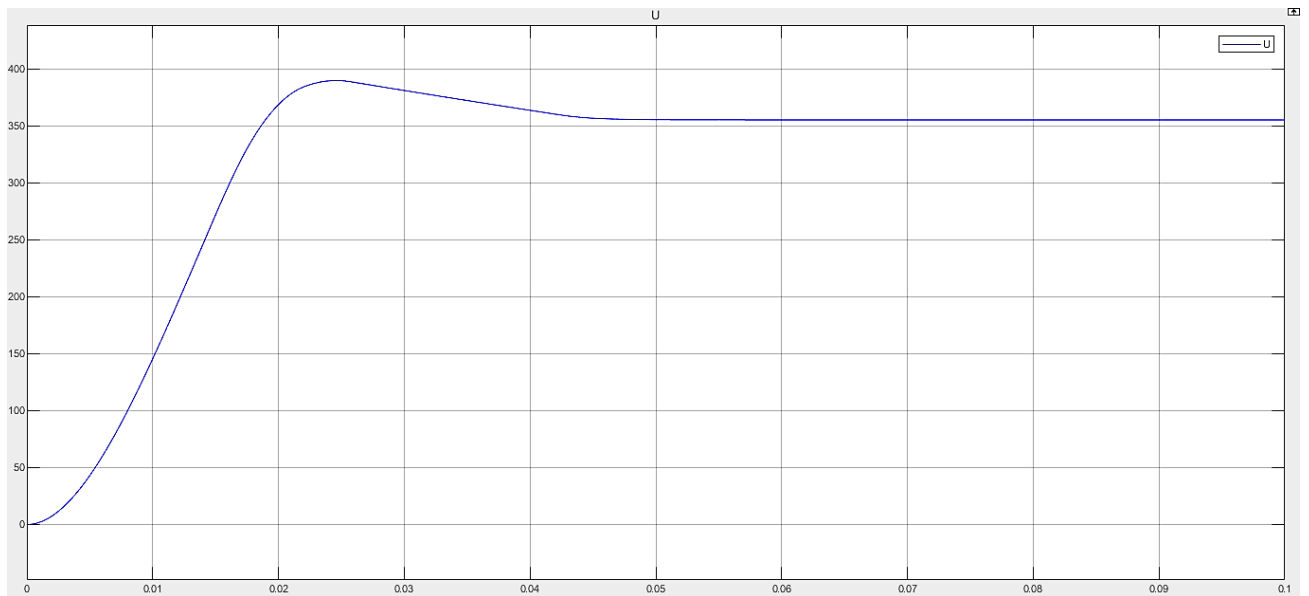


Рис. 3.17. Часова залежність напруги на навантаженні

На рис 3.18 зображено сигнали системи керування після завершення перехідного процесу. З результатів моделювання видно, що система знаходиться в стійкому режимі.

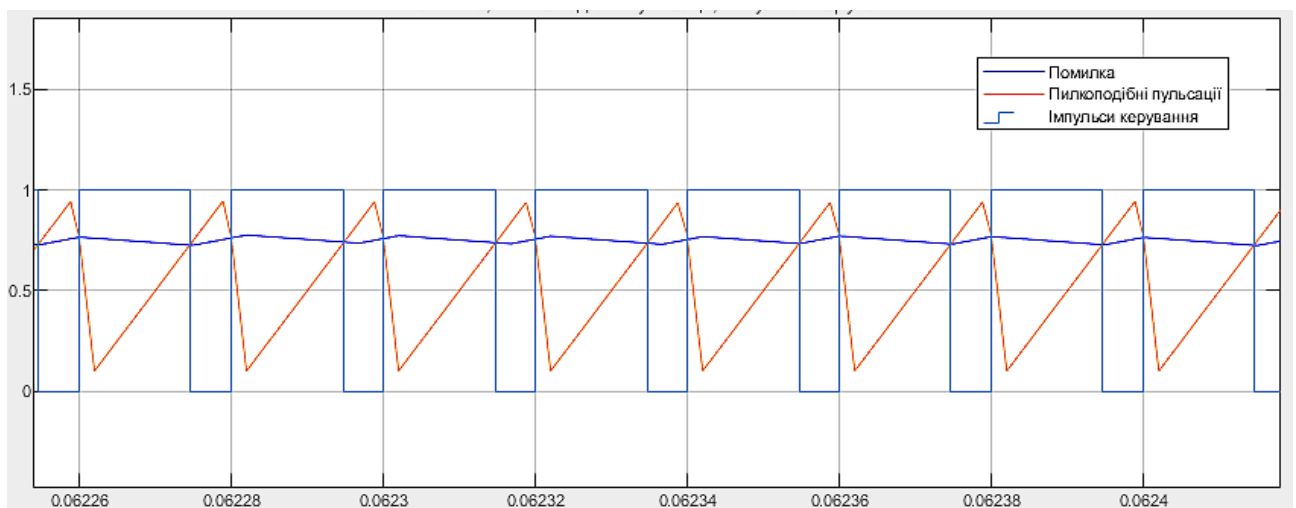


Рис. 3.18 Часові діаграми системи керування при  $E_1 = E_2 = 450\text{В}$ ;  $R_{вн1} = R_L = 1\ \text{Ом}$ ,  $R_{вн2} = R_L = 10\ \text{Ом}$

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

### 3.3. Моделювання трьох перетворювачів

Досліджено роботу трьох перетворювачів підключених до спільного навантаження. Схема з'єднання показана на рис. 3.19. Було досліджено роботу системи при різних значення вхідної напруги  $E$ , та при різних значеннях опорів  $R_{вн}$  та  $R_L$ .

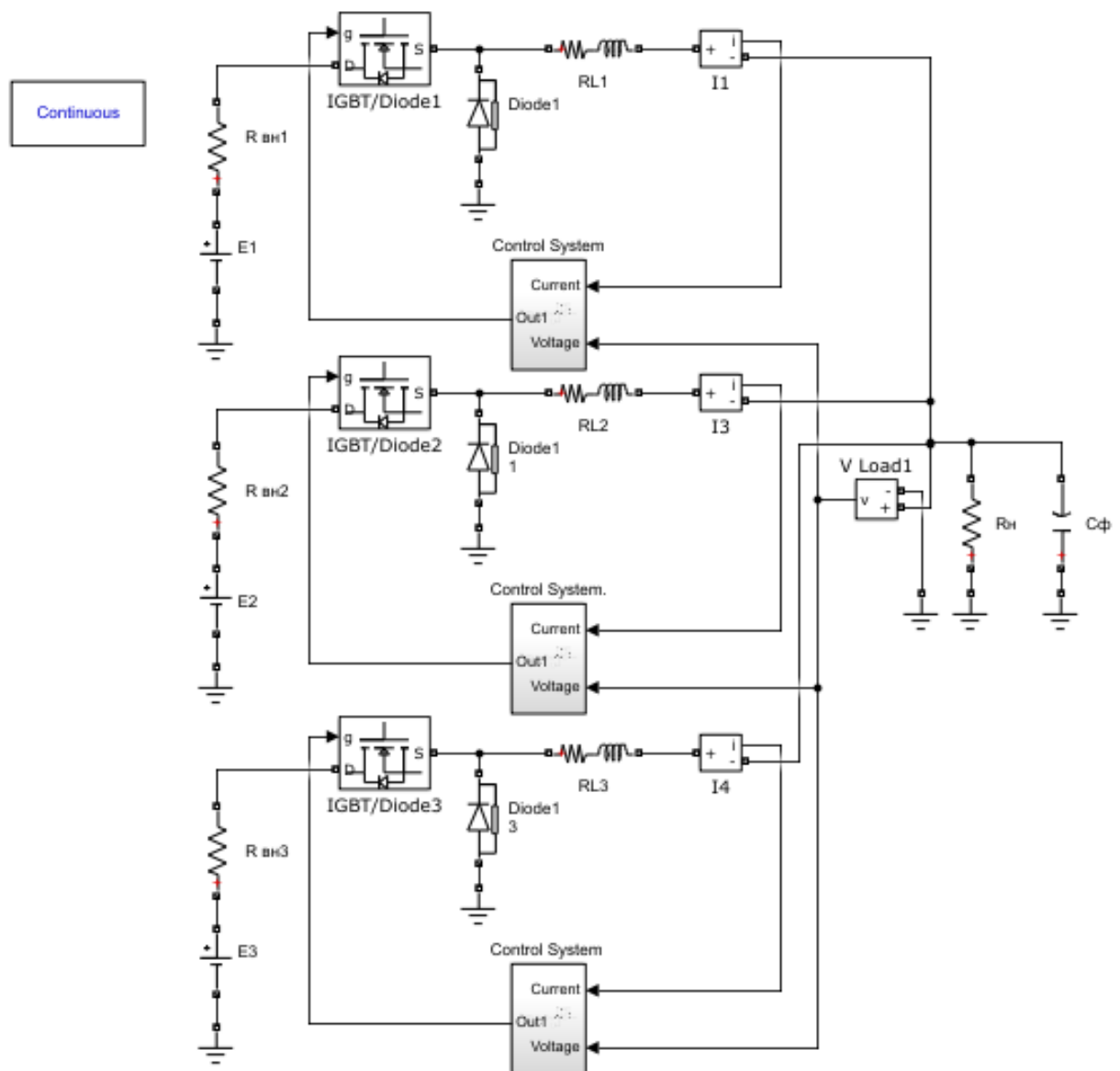


Рис.3.19. Модель роботи трьох перетворювачів на спільне навантаження

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДС52.521.024.001 ПЗ

Арк.

45



На рис 3.20 зображено часові залежності струму при  $E_1=405\text{В}$ ;  $E_2=450\text{В}$ ;  $E_3=495\text{В}$ ;  $R_{вн1}=R_{Л1}=1\ \text{Ом}$ ;  $R_{вн2}=R_{Л2}=1$ ;  $\text{Ом}$   $R_{вн3}=R_{Л3}=1\ \text{Ом}$ . Вимірні діючі значення струму:  $I_1=2.758\text{А}$ ;  $I_2=2.773\text{А}$ ;  $I_3=2.785\text{А}$ ;  $U_H=357.2\ \text{В}$ .

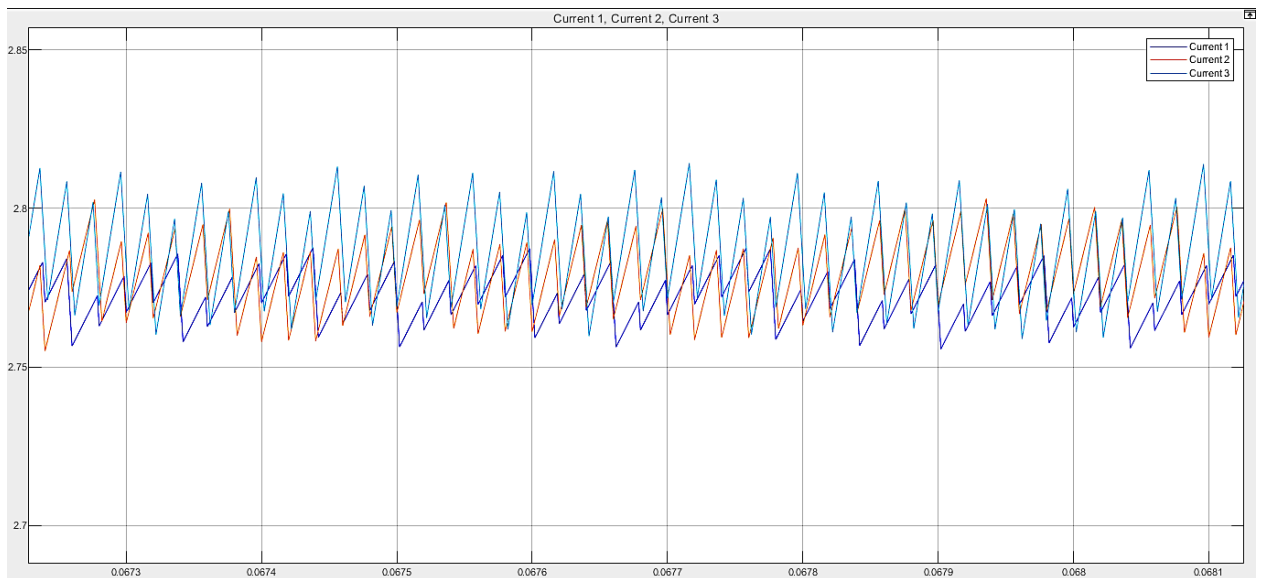


Рис. 3.20 Часові діаграми системи керування при  $E_1=405\text{В}$ ;  $E_2=450\text{В}$ ;  $E_3=495\text{В}$ ;  $R_{вн1}=R_{Л1}=1\ \text{Ом}$ ;  $R_{вн2}=R_{Л2}=1$ ;  $\text{Ом}$   $R_{вн3}=R_{Л3}=1\ \text{Ом}$

На рис 3.21 зображено часові залежності струму при  $E_1=450\text{В}$ ;  $E_2=450\text{В}$ ;  $E_3=450\text{В}$ ;  $R_{вн1}=R_{Л1}=1\ \text{Ом}$ ;  $R_{вн2}=R_{Л2}=3$ ;  $\text{Ом}$   $R_{вн3}=R_{Л3}=3\ \text{Ом}$ . Вимірні діючі значення струму:  $I_1=2.776\text{А}$ ;  $I_2=2.779\text{А}$ ;  $I_3=2.764\text{А}$ ;  $U_H=357.2\ \text{В}$

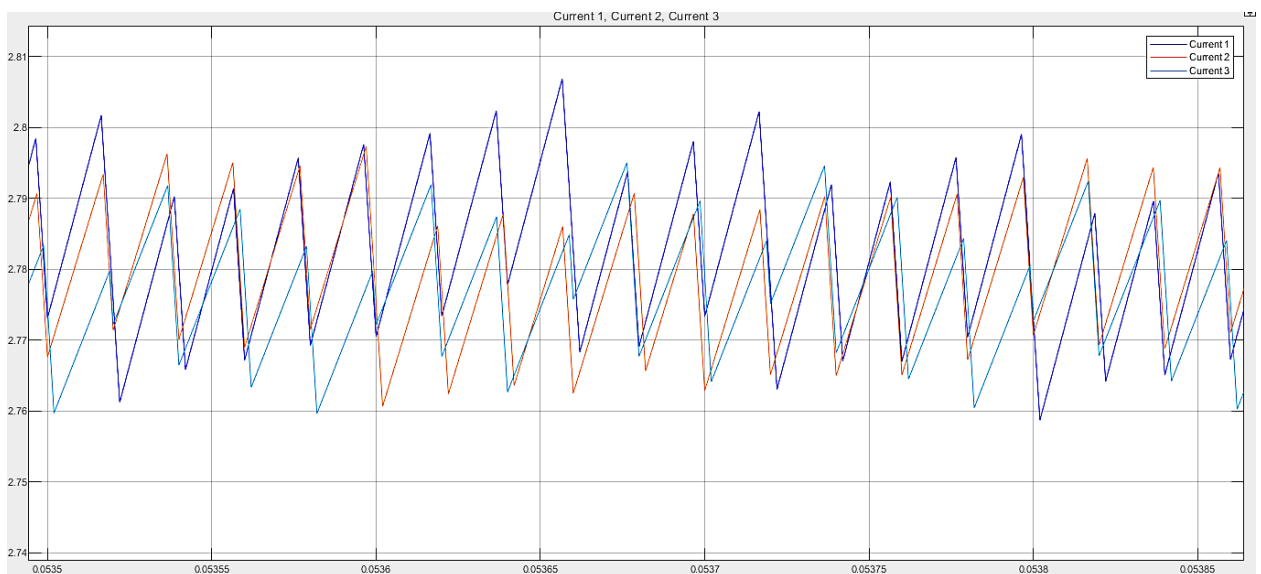


Рис. 3.21 Часові діаграми системи керування при  $E_1=450\text{В}$ ;  $E_2=450\text{В}$ ;  $E_3=450\text{В}$ ;  $R_{вн1}=R_{Л1}=1\ \text{Ом}$ ;  $R_{вн2}=R_{Л2}=3$ ;  $\text{Ом}$   $R_{вн3}=R_{Л3}=3\ \text{Ом}$

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДС52.521.024.001 ПЗ

Арк.

46

На основі проведених досліджень було побудовано графіки залежності струмів на виході перетворювача в залежності від різних факторів, а саме: різних значеннях напруги на вході перетворювача та різних значеннях опору джерела та еквівалентного опору перетворювача.

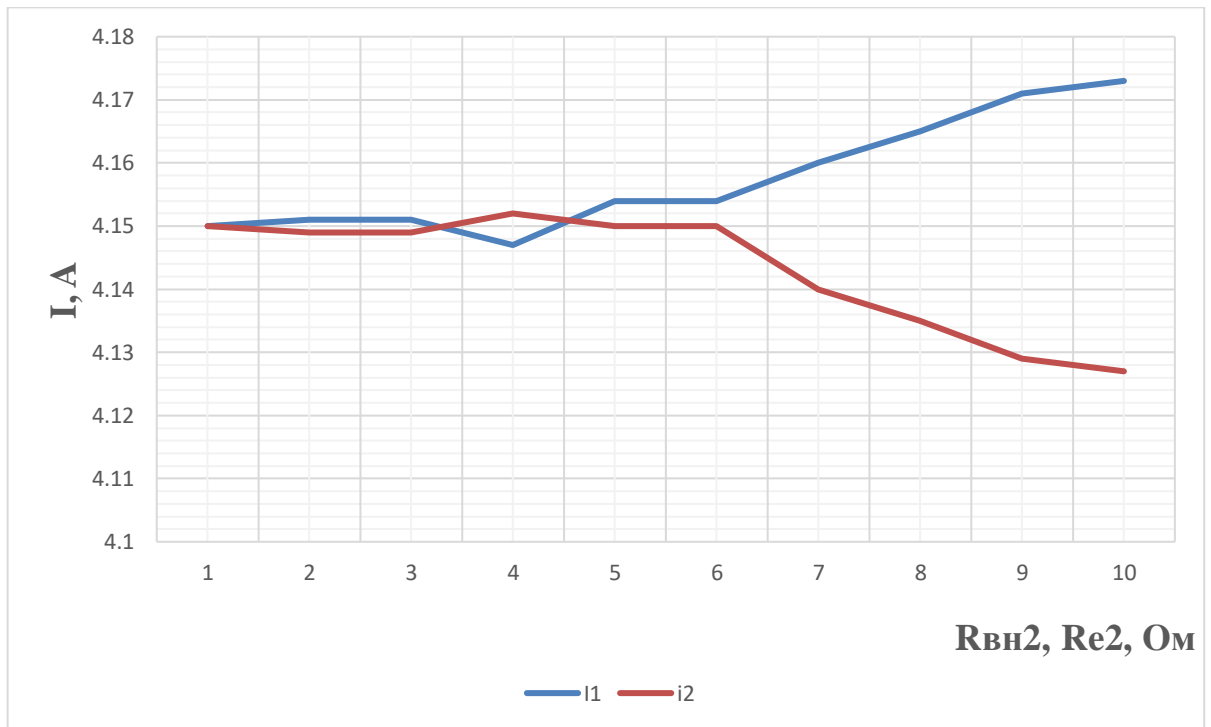


Рис 3.22 Графік залежності струмів перетворювачів від опорів  $R_{вн2}, R_{e2}, \text{ Ом}$

З графіка на рис. 3.22 видно, що при суттєвій різниці опорів ( $R_2=10R_1$ ) діючі значення струмів відрізняються не суттєво. Можна зробити висновок, що система керування перетворювачем може забезпечити стабільну роботу в цьому діапазоні зміни опорів.

На рис. 3.23 зображено графік залежності струмів на виході перетворювачів від зміни напруги джерела  $E_2$ . З результатів видно, що система керування гарно підлаштовує струми на виході при  $\pm 10\%$  від вхідное.

Цього коливання повністю достатньо, аби забезпечити ефективну роботу сонячної системи.

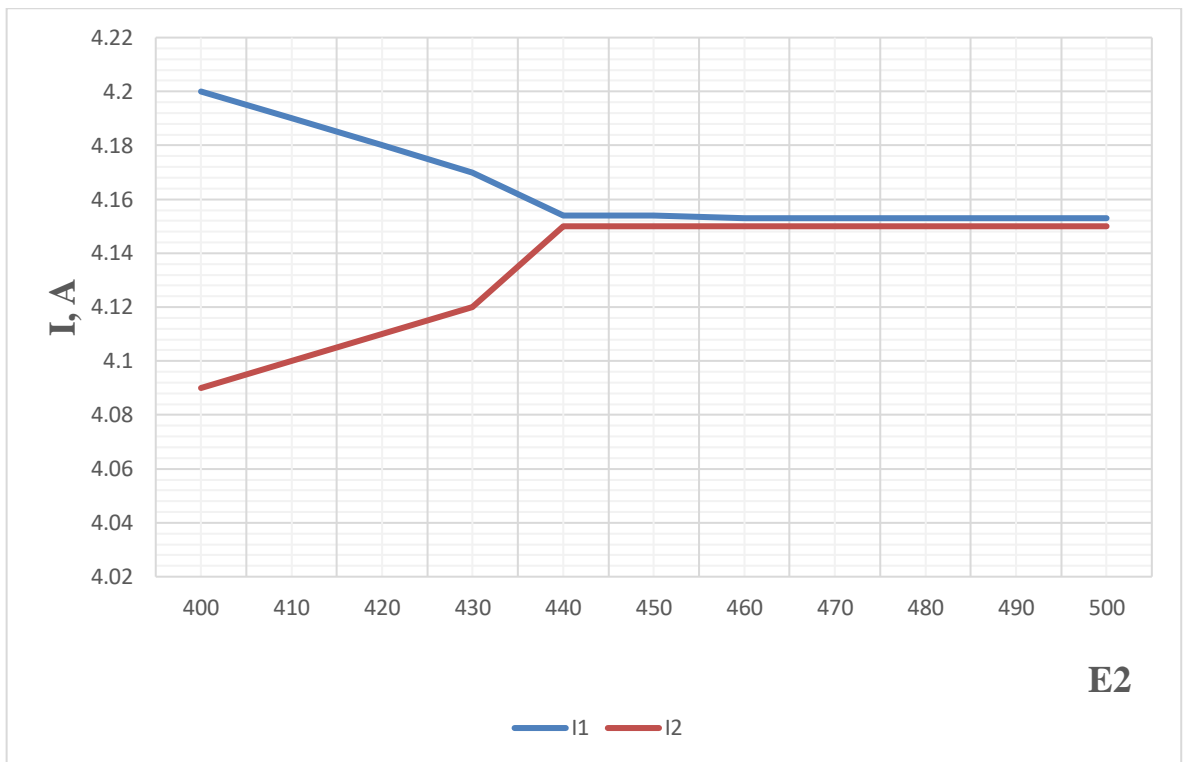


Рис. 3.23 Графік залежності струмів перетворювачів від джерела  $E2$

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДС52.521.024.001 ПЗ

Арк.

48

## ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

В результаті виконання даного проекту досліджено роботу систему Smart Grid. Було обрано та розв'язано проблему паралельного з'єднання джерел відновлювальної енергії.

Для вирішення проблеми розроблено нову систему керування перетворювачем напруги понижуючого типу. Досліджено роботу схеми при різних значеннях вхідної напруги та різних значеннях внутрішнього опору джерела та еквівалентного опору перетворювача. Система керування в результаті моделювання показала здатність забезпечувати роботу двох і більше перетворювачів на одне навантаження. Різниця струмів на виході перетворювачів не перевищувала 1%.

Система має надзвичайно великий потенціал для розробників. Головною перевагою даного винаходу є відсутність будь-яких шин між перетворювачами, що значно спрощує використання та експлуатацію, як сонячних станцій, так і систему Smart Grid в цілому.

					ДС52.521.024.001 ПЗ	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Базюк Т.М., Блінов І.В., Буткевич О.Ф., Гончаренко І.С., Денисюк С.П., Жуйков В.Я., Кириленко О.В., Лук'яненко Л.М., Миколаєць Д.А., Осипенко К.С., Павловський В.В., Рибіна О.Б., Стелюк А.О., Танкевич С.Є., Трач І.В. Інтелектуальні електричні мережі: елементи та режими: За заг. ред. акад. НАН України О.В. Кириленка / Інститут електродинаміки НАН України. – К.: Ін-т електродинаміки НАН України, 2016. – 400 с.
2. О.В. Кириленко, В.В. Павловський, О.Я. Яндульський, А.О. Стелюк Керування режимом роботи електростанції з відновлювальними джерелами енергії в умовах зміни частоти в енергосистемі // Технічна електродинаміка. – 2012. – №4. – С. 52-57.
3. Енергетична стратегія України на період до 2030 року. Прогнозування балансів паливно-енергетичних ресурсів. – 2006. – 129 с.
4. Дикий М. О., Поновлювані джерела енергії, К., Вища школа, 1993, 351 с.
5. Сокол Е.И. Принципы построения микропроцессорных систем управления полупроводниковыми преобразователями / Сокол Е.И., Якименко Ю.И., Жуйков В.Я., Вержановская М.Р. // Технічна електродинаміка, 2001. - Тем. вип., Ч.3. –С. 43 -45.
6. Відновлювальні джерела енергії у локальних об'єктах / Ю.І. Якименко, Є.І. Сокол, В.Я. Жуйков, Ю.С. Петергеря, О.Л. Іванін. – К.: ІВЦ «Політехніка», 2001. – 114 с.
7. Шакарян Ю. Г. Технологическая платформа micro Grid (основные средства) / Шакарян Ю. Г., Новиков Н. Л. // Энергоэксперт. — 2009. — № 4. — с. 7-12.
8. Zang H. Development of Static Switchgear for Utility Interconnection in a Microgrid. / Zang H., M. Chandorkar, G. Venkataramanan, // Power and Energy Systems PES, Palm Springs, CA. – 2003. – p.25-26.

						ДС52.521.024.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			50

9. Nacer K. M'Sirdi, Bechara Nehme, Mouna Abarkan, Abdelhamid Rabbi, "The best MPPT algorithms by VSAS approach for Renewable Energy Sources (RES)", Environmental Friendly Energies and Applications (EFEA), 2014 3rd International Symposium on, 19-21 Nov. 2014, pp. 1 – 7.

10. Ксенович И.А., Ипатов А.А., Изосимов Д.Б. Состояние и перспективы развития отечественной автомобильной техники с комбинированными энергоустановками // Мобильная техника. – 2003. – № 2/3. – С. 15-18.

11. A.Bonhomme. A New Voltage Control System to Facilitate the Connection of Dispersed Generation to Distribution Networks / A.Bonhomme, D. Cortinas, L. Fraisse. // Integration of Green and Renewable Energy in Electric Power Systems. – 2001. – №482. – С. С. 4–8.

12. B. Maurhoff. Dispersed Generation to Reduce Power Costs and Improve Service Reliability / B. Maurhoff, G. Wood. // Rural Electric Power Conference. – 2000. – С. C5/1–C5/7.

13. Панфилов А.И., Энговатов В.И. Настольная книга энергетика. – М.: Энергосервис, 2006. – 332 с.

14. Jakub Dawidziuk Место и роль силовой электроники в сбережении электроэнергии в Польше // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск Силова електроніка та енергоефективність. – 2007. – №2. – С. 9-14.

15. J. Gutierrez-Vera. Use of Renewable Sources of Energy in Mexico / J. Gutierrez-Vera. // IEEE Trans. Energy Conversion. – 1994. – №9. – С. 442 –450.

16. J. L. Del Monaco. The Role of Distributed Generation in the Critical Electric Power Infrastructure / J. L. Del Monaco. // IEEE-Power Engineering Society Winter Meeting. – 2001. – С. 144 –145.

17. Волківський В.Б. Адаптивний метод заряду акумуляторних батарей // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск "Силова електроніка та енергоефективність". – 2005. – Ч. 2.– С. 40-43.

					ДС52.521.024.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

18. L. Philipson. Distributed and Dispersed Generation: Addressing the Spectrum of Consumer Needs / L. Philipson. // IEEE-Power Engineering Society Summer Meeting. – 2000. – С. 1663–1665.

19. B. Lasseter. Microgrids / B. Lasseter. // IEEE-Power Engineering Society Winter Meeting. – 2001. – С. 146–149.

20. М.В. Гельман. Преобразовательная техника / М.В. Гельман, М.М. Дудкин, К.А. Преображенский., 2009. – 425 с.

21. K. Tomsovic. Intelligent Control Method for System with Dispersed Generation / K. Tomsovic, T. Hiyama. // IEEE-Power Engineering Society Winter Meeting., – 2001. – С. 913–917.

22. M. C. Chandorkar. Control of Parallel Connected Inverters in Standalone ac Supply Systems / M. C. Chandorkar, D. M. Divan, R. Adapa. // IEEE Trans. Ind. Applicat.. – 1993. – С. 136–143.

23. S. J. Chiang and J. M. Chang. A Robust Load-Sharing Control Scheme for Parallel-Connected Multisystems / S. J. Chiang and J. M. Chang. // IEEE Trans. on Ind. Electron. – 2000. – С. 871–879.

24. Цыпкин Я.З. Теория линейных импульсных систем. – М.: Гос. изд. физ-мат литературы, 1963. – 968 с.

25. Дьяконов В.П. MATLAB 6/6.1/6.5 + Simulink 4/5. Основы применения. Полное руководство пользователя – М.: СОЛОН-Пресс, 2002. – 768 с.

26. Ромашко В.Я. До питання про відбір максимальної потужності від джерел електричної енергії // Електроніка и связь. – 2013. – № 4. – С. 28-34.

27. S. J. Chiang, C. Y. Yen, and K. T. Chang. Multimodule parallelable Series-Connected PWM Voltage Regulator / S. J. Chiang, C. Y. Yen, and K. T. Chang. // IEEE Trans. on Ind. Electron. – 2001. – С. 506–516.

					ДС52.521.024.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

28. A. Tuladhar, H. Jin, T. Unger, and K Mauch. Parallel Operation of Single Phase Inverters with No Control Interconnections / A. Tuladhar, H. Jin, T. Unger, and K Mauch. // IEEE Trans. Ind. Appl. – 1997. – С. 94–100.

29. D. Casadei, G. Grandi, R. K. Jordan, and F. Profumo. Control Strategy of a Power Line Conditioner for Cogeneration Plants / D. Casadei, G. Grandi, R. K. Jordan, and F. Profumo. // IEEE-PESC'99. – 1999. – С. 607–612.

					<i>ДС52.521.024.001 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		53