Міністерство освіти і науки України

Запорізький національний університет
(повне найменування вищого навчального закладу)

Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні
(назва факультету)

Електронних інформаційних систем та програмного забезпечення
(повна назва кафедри)

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної магістерської роботи

рівень вищої освіти другий (магістерський) рівень

на тему Дослідження електромагнітних процесів у високо-частотному інверторі для живлення осциляторів

Виконав: студент 2 курсу, гр. ФІ-1714

Мовчан В. Л.
(ПІБ) (підпис)

спеціальності
171 - Електроніка
(шифр і назва)

спеціалізація

(шифр і назва)

освітньо-професійна програма
Електроніка
(шифр і назва)

Керівник Алексієвський Д. Т.
(прізвище та ініціали) (підпис)

Рецензент Шерцов С. А.
(прізвище та ініціали) (підпис)

Запоріжжя – 2026 року

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ім. Ю.М. ПОТЕБНІ

Кафедра Електроніки, інформаційних систем та програмного забезпечення

Рівень вищої освіти другий (магістерський) рівень

Спеціальність 141 - Електроніка
(шифр і назва)

Освітньо-професійна програма Електроніка
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ЕІСПЗ
Т.В. Журавська
"____" _____ 2025 року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Мочан Володимир Леонідович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Дослідження електромагнітних процесів у високочастотному інверторі для живлення вуглекислого
керівник роботи: Алексієвський Д.І., д.т.н., професор
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом вищого навчального закладу від 27 жовтня 2025р. №319с
2. Строк подання студентом роботи (проєкта) 09.12.2025р.
3. Вихідні дані до роботи (проєкта) Робоча частота інвертора: f=100 кГц; напруга пробою середньою стримеру - 600 В
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити: 1. Аналіз використання та будову ерозонатора; 1.2. Аналіз основних відомостей; 1.2. Аналіз використання озону; 1.3 Аналіз будови ерозонатора; 2. Аналіз видів інверторів для електросинтезу; 3. Синтез візуально-блочної математичної моделі; 3.1. Бібліотека елементів візуально-блочної моделі; 3.2. Аналіз результатів моделювання; 4. Охорона праці; 4.1. Аналіз основних положень з питань охорони праці; 4.2. Розрахунок пристрою заземлення; 5. Економічна модель процесу; 6. Висновки

5. Презентаційний матеріал презентація для захисту

6. Консультанти розділів роботи:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата
		завдання прийняв
1. Аналіз використання та будови однофазних.	Алексієвський Д.Р., н/конр	
2. Види інверторів для електротранспорту	Алексієвський Д.Р., н/конр	
3. Синтез будівельно-блочної імітаційної моделі	Алексієвський Д.Р., н/конр	

7. Дата видачі завдання: _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Аналіз використання та будови однофазного	7.03.2025	
2.	Аналіз видів інверторів для електротранспорту	21.03.2025	
3	Синтез будівельно-блочної імітаційної моделі	18.04.2025	
4.	Охорона праці	27.06.2025	
5	Економічна модель проекту	14.11.2025	

Студент _____ Лобчан В.І.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи) _____
(підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтролер Гуранов К.О.

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра містить 87 стор., 35 рис., 8 табл., 19 джерел літератури.

ОЗОНАТОР, БАР'ЄРНИЙ РОЗРЯД, ЖИВЛЕННЯ, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ, СТРУКТУРА ЕНЕРГЕТИЧНОГО ТРАКТУ, БІБЛІОТЕКА ЕЛЕМЕНТІВ, ІМПУЛЬСНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ ПОСТІЙНОЇ НАПРУГИ, ВІЗУАЛЬНО-БЛОЧНА МОДЕЛЬ, РЕЗОНАНС, ІНВЕРТОР НАПРУГИ, ТРАНСФОРМАТОР

Мета роботи: підтвердження працездатності алгоритму забезпечення резонансного режиму автономного інвертора для живлення високочастотного бар'єрного озонатора. Провести дослідження блоку живлення озонатора .

В ході роботи розглянуто питання специфіки використання озону. Проаналізовано проблематику створення системи живлення озонатора на базі інвертора напруги. Виконано постановку завдання для моделювання системи живлення.

Проведено дослідження відомих схем інверторів з метою вибору оптимального варіанту побудови системи живлення озонатора. Проаналізовано процеси, що протікають в інверторах різного схемотехнічного виконання.

Синтезовано візуально-блочну математичну модель на основі структури енергетичного тракту. Розглянуто бібліотеку елементів візуально-блочної моделі. Проаналізовано результати моделювання.

Розглянуто інструкції з охорони праці для офісних працівників, розраховано пристрій заземлення та зазначити рекомендації по монтажу заземлюючого пристрою.

Створено економічну модель проекту. Виконано вісім креслень для візуалізації виконаної роботи.

ЗМІСТ

ВСТУП 5
1 АНАЛІЗ ВИКОРИСТАННЯ ТА БУДОВИ ОЗОНАТОРА 6
1.1 Аналіз основних відомостей 6
1.2 Аналіз використання озону 9
1.3 Аналіз будови озонатора 15
Висновки до розділу 1 22
2 АНАЛІЗ ВИДІВ ІНВЕРТОРІВ ДЛЯ ЕЛЕКТРОСИНТЕЗУ 23
2.1 Дослідження інверторів ведених мережею 23
2.2 Дослідження коефіцієнт потужності та ККД інвертора 32
2.3 Дослідження автономних інверторів 34
Висновки до розділу 2 44
3 СИНТЕЗ ВІЗУАЛЬНО-БЛОЧНОЇ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ 46
3.1 Бібліотека елементів візуально-блочної моделі 49
3.2 Аналіз результатів моделювання 57
Висновки до розділу 3 60
4 ОХОРОНА ПРАЦІ 61
4.1 Розгляд основних положень з питань охорони праці 61
4.2 Розрахунок пристрою заземлення 68
Висновки до розділу 4 74
5 ЕКОНОМІЧНА МОДЕЛЬ ПРОЕКТУ 75
Висновки до розділу 5 84
ВИСНОВКИ 85
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 86

ВСТУП

Розроблення математичної моделі електротехнічного комплексу є одним із ключових етапів його проектування. Математичний синтез застосовується не лише для оцінювання ефективності та перевірки працездатності прийнятих технічних рішень щодо силового обладнання, а й слугує базою для подальшого синтезу системи керування, у якій силове електрообладнання розглядається як об’єкт керування. При цьому, за оцінками фахівців, процес створення математичних моделей становить приблизно 80–90 % загальної трудомісткості проектування систем керування [1].

Ефективним засобом скорочення часу, необхідного для синтезу та налагодження математичної моделі, а також зниження ймовірності виникнення помилок у процесі математичного моделювання, є застосування бібліотек компонентів системи. Структура та форма таких бібліотек значною мірою визначаються обраним принципом декомпозиції системи, математична модель якої підлягає синтезу [2].

Водночас не кожен спосіб декомпозиції забезпечує досягнення позитивного результату, оскільки лише раціональна декомпозиція дозволяє сформувати підсистеми, зручні для подальшого аналізу. Доцільність декомпозиції оцінюється з позицій збереження цілісності системи: у разі невдалого поділу втрачається логічний зв’язок між системними та підсистемними поняттями, що унеможливлює їх узгодження. Тому процес декомпозиції повинен забезпечувати чітке виокремлення підсистемних властивостей та відповідних їм понять [2].

Використання методу візуально-блочного моделювання для дослідження моделі озонатора повітря дозволяє отримати найбільш широке уявлення про електромагнітні процеси, що протікають в системі передачі та перетворення енергії від джерела до навантаження.

1 АНАЛІЗ ВИКОРИСТАННЯ ТА БУДОВИ ОЗОНАТОРА

Озонатор - це пристрій або установка, призначена для генерації озону (O_3) з молекулярного кисню (O_2) шляхом електричного розряду, ультрафіолетового опромінення або каталізаторного процесу, з метою дезінфекції, окислення або очищення.

1.1 Аналіз основних відомостей

Користь озону давно доведена вченими всього світу, які тривалий час вивчали цей унікальний елемент, створений природою. І незабаром ці розробки, а також стрімкий розвиток наукового прогресу, дозволили застосувати отримані знання на практиці та створити пристрій, який буде відтворювати природні процеси та створювати озон у штучних умовах. І сьогодні саме озонатори – це той пристрій, який з кожним днем стає все більш популярним на вітчизняному ринку. І це не дивно. Адже він має низку корисних функцій і, як наслідок, варіантів застосування. Озон – це молекула, що складається з трьох атомів кисню. Він утворюється природним шляхом в атмосфері під впливом ультрафіолетового випромінювання або електричних розрядів. У промислових умовах озон генерується за допомогою спеціальних озонаторів, які створюють електричний розряд, розкладаючи молекули кисню (O_2) та утворюючи O_3. Озонування – це технологічний процес, заснований на використанні озону (O_3), одного з найпотужніших окиснювачів, для очищення води, повітря та різних поверхонь. Цей метод зарекомендував себе як ефективний та екологічно чистий спосіб дезінфекції, який широко використовується в побуті, промисловості та медицині.

Технологія озонування імітує дії грози: кисень, що потрапляє в пристрій, піддається сильному електричному впливу, в результаті чого молекула перебудовується та створюється озон. Газ викидається в навколишнє середовище через трубку, де реагує із забруднювачами, окислює

їх, руйнуючи оболонку, та інактивує. Простий принцип роботи озонатора повітря визначає просту конструкцію, що включає генератор електричного розряду, джерело напруги, вентилятор та систему керування пристроєм.

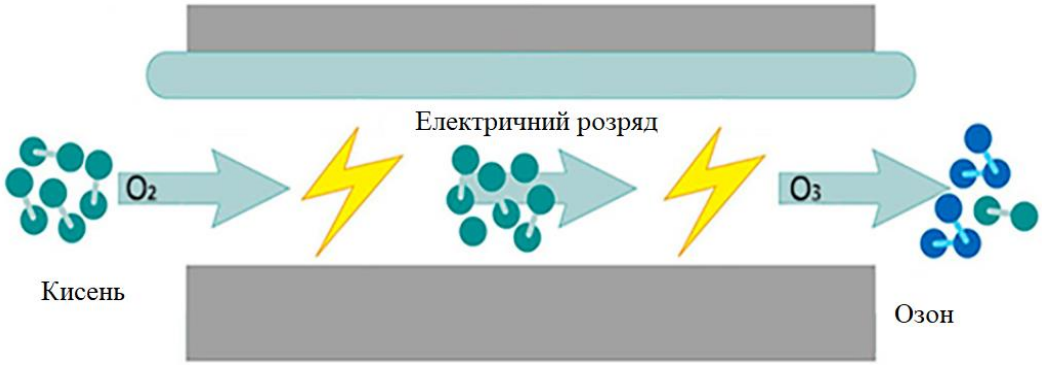


Рисунок 1.1 – Принцип роботи озонатора

Існують багатофункціональні пристрої, які поєднують кілька завдань. Озонатори поділяють на побутові, медичні та промислові, а також за типом оброблюваного середовища – для очищення повітря або води. Основна відмінність між ними полягає у способі генерації озону та його концентрації.

Способи утворення озону:

1. Електричний розряд: Найпоширеніший і найефективніший метод. Вимагає складного обладнання та має високу вартість, але забезпечує якісну дезінфекцію.
2. Ультрафіолетове випромінювання: Простий і економний спосіб, хоча й менш ефективний. Підходить для побутового використання, але не для промислових масштабів.
3. Хімічні реакції: За участю каталізаторів виробляється озон. Метод вимагає значних витрат і застосовується рідше через високу собівартість.
4. Електронне випромінювання: Складна технологія з утворенням значної кількості побічних продуктів. Використовується обмежено.

Складові частини озонатора: корпус, джерело живлення, блок генерації розрядів, вентилятор, система керування, а також (опційно) зволожувач.

Види озонаторів:

- Для житлових приміщень: очищають повітря в квартирах, приватних будинках, на дачах. Важливо суворо дотримуватись інструкцій, оскільки надлишок озону шкідливий.
- Для питної води: дозволяють знезаразити воду без кип’ятіння чи фільтрації. Озон у воді швидко розпадається, тому є безпечним.
- Для акваріумів і басейнів: не лише очищують воду, а й прибирають неприємний запах.
- Автомобільні: використовуються для очищення повітря в салоні або для озонування пального, що покращує його властивості.
- Для продуктів харчування: видаляють залишки пестицидів і шкідливих речовин шляхом замочування в озонованій воді.

Можливі побічні ефекти:

Надлишок озону в повітрі може негативно вплинути на здоров’я: подразнення слизових оболонок, проблеми з легенями, розвиток атеросклерозу через накопичення нерозчинного холестерину. Симптоми передозування: втома, сонливість, головний біль, алергії, депресивні стани. У таких випадках необхідно негайно знизити рівень озону в приміщенні.

Користь озону в невеликих дозах:

- Ефективно усуває неприємні запахи.
- Знищує комах, зокрема міль.
- Розкладає токсичні речовини.
- Вбиває патогенні мікроорганізми.
- Підвищує рівень кисню у воді та повітрі.
- Покращує кровообіг і роботу органів.
- Нормалізує артеріальний тиск.
- Знижує рівень стресу та дратівливості.
- Підтримує імунну систему.
- Сприяє зниженню болю, швидшому загоєнню ран та одужанню.

1.2 Аналіз використання озону

1.2.1 Аналіз озонування повітря та ґрунту в теплицях

У тепличному господарстві озонові технології набувають все більшого поширення завдяки своїй багатофункціональності та екологічності. Вони використовуються для [3]:

- Стимулювання росту рослин, зниження мікробного навантаження на повітря, ґрунт і самі рослини, покращення синтезу та накопичення поживних речовин.
- Передпосівної обробки насіння, що підвищує його схожість та стійкість до несприятливих умов.
- Боротьби з хворобами та шкідниками рослин.
- Знезараження поживних рідин при гідропонному вирощуванні.

Озонована вода як засіб аерації ґрунту

Озон у 15 разів краще розчиняється у воді, ніж кисень. Після потрапляння в ґрунт озон розкладається, виділяючи кисень, що покращує аерацію кореневої зони. Як відомо, доступ повітря до коренів є критично важливим: без нього розвиваються анаеробні мікроорганізми, які гальмують ріст рослин. Озоноване зрошення дозволяє:

- Покращити структуру ґрунту і підвищити його родючість.
- Підвищити врожайність на 13–35%.
- Значно збільшити рівень розчиненого кисню – на 30–45%, що позитивно впливає на ріст рослин.

Переваги озонованої води для поливу:

- Підвищення врожайності, маси кореня, вмісту цукрів, розміру та щільності плодів.
- Швидше дозрівання врожаю.
- Краще проникнення води та кисню в ґрунт, покращення дихання коренів.

- Зменшення потреби у добривах завдяки активнішому засвоєнню поживних речовин.
- Стимулювання корисної мікрофлори в ґрунті.
- Профілактика кореневих захворювань (Pythium, Phytophthora).
- Ефективніше використання води, зменшення її витрат.
- Підходить для всіх типів ґрунтів, зокрема солоних.
- Покращення стійкості до засолення.
- Зниження утворення вапняного нальоту в системах зрошення.

Боротьба з ґрунтовими патогенами: приклад галової нематоди

Галова нематода – небезпечний паразит закритого ґрунту, що уражає коріння та підземні частини рослин. Внаслідок її дії на коренях утворюються нарости (галли), які ускладнюють живлення рослини. Протягом одного сезону може з’явитися до 5 поколінь паразита, що може знизити врожай до 50%.

Застосування озонованої води для дезінфекції ґрунту:

- Ефективно знищує до 90–98% нематод.
- Сприяє росту кореневої системи та збільшенню біомаси на до 30%.
- Метод є екологічно чистим, не шкодить людям чи рослинам.
- Обробки можливі впродовж усього вегетаційного періоду.

1.2.2 Аналіз застосування озону в медицині

Озон активно використовується в медицині як потужний природний антисептик, що поєднує протизапальні, бактерицидні, противірусні та імуномодулюючі властивості [4]. Медичний озон – це суміш озону з киснем у певній концентрації, яка використовується для терапевтичних цілей у вигляді ін'єкцій, аплікацій, інгаляцій або озонованих рідин та олій. Завдяки здатності озону знищувати патогенні мікроорганізми і стимулювати обмінні процеси, він став ефективним засобом у лікуванні широкого спектра захворювань.

Зокрема, озонотерапія застосовується для лікування інфекцій шкіри, ран, виразок, гнійних процесів, а також у стоматології для обробки зубних

каналів, ясен та каріозних порожнин. У гінекології озон використовують для лікування запальних процесів, ерозії шийки матки, бактеріального вагінозу. У проктології – для обробки тріщин, геморою, парапроктитів. Також озон ефективно застосовується у фізіотерапії при артритах, остеохондрозі, болях у м’язах і суглобах.

Внутрішньовенне введення озонованого фізіологічного розчину або автогемотерапія (введення власної крові, обробленої озоном) допомагає покращити імунну відповідь, нормалізувати артеріальний тиск, зменшити прояви хронічної втоми, алергічних реакцій, покращити обмін речовин та мікроциркуляцію крові. Озон сприяє кращому насиченню тканин киснем, що особливо корисно в період реабілітації після операцій, інфарктів, інсультів та важких інфекцій [4].

У косметології озон використовується для омолодження шкіри, усунення запалень, акне, пігментації та стимуляції вироблення колагену. Його протизапальна та регенеративна дія допомагає вирівняти тон шкіри, покращити її еластичність і загальний вигляд.

Озонотерапія є безпечним методом, що рідко викликає побічні ефекти, однак, як і будь-який медичний засіб, вона має протипоказання. Її не застосовують при вагітності, гіпертиреозі, онкопатологіях, гострих порушеннях згортання крові. Тому лікування озоном повинно проводитися виключно під контролем кваліфікованого медичного фахівця.

У цілому озон – це унікальний засіб, який поєднує природну силу та сучасні технології, відкриваючи нові можливості для безпечного та ефективного лікування без антибіотиків і хімії.

1.2.3 Аналіз застосування озону для очищення води

Озон є одним із найпотужніших природних окисників і широко використовується для очищення та знезараження води [5]. Його застосування дозволяє ефективно знищувати бактерії, віруси, грибки, найпростіші організми, а також видаляти з води неприємні запахи, присмаки та органічні забруднення. Озон діє значно ефективніше за традиційні методи дезінфекції, такі як хлорування, при цьому не утворює шкідливих побічних продуктів і повністю розкладається до безпечного кисню.

У воді озон швидко розчиняється і вступає в реакцію з мікроорганізмами та забруднювачами, руйнуючи їхню клітинну оболонку шляхом окислення. Крім знезараження, озон також здатний окиснювати залізо, марганець і сірководень, перетворюючи їх у форми, які легко видаляються через фільтрацію. Після озонування вода стає прозорішою, приємнішою на смак і безпечною для вживання.

Застосування озону поширене як у централізованих системах водопостачання, так і в побутових установках [5]. У промисловості озон використовується для очищення води в харчовому виробництві, фармацевтичній та косметичній галузях. У басейнах він слугує безпечною альтернативою хлору, не викликаючи подразнення шкіри чи очей. У сільському господарстві озонована вода покращує стан ґрунту, сприяє росту рослин та використовується для напування тварин. Також озон застосовують у рибництві для підтримання чистоти та стабільного середовища в акваріумах і ставках.

Незважаючи на високу ефективність, використання озону потребує спеціального обладнання та дотримання безпечних концентрацій. У великих дозах озон може бути токсичним, тому його застосування має здійснюватися під контролем. Проте завдяки своїм унікальним властивостям озон залишається одним з найкращих екологічно чистих засобів для очищення води в сучасному світі.

Для очищення та знераження озон, що був отриманий в генераторі, необхідно розчинити в воді, що обробляється.

Всі відомі та поширені способи розчинення озону у воді базуються на подрібненні газового потоку, що містить озон (озоно-повітряна або озоно-киснева суміш), на дрібні бульбашки. Під час руху у водяному потоці ці бульбашки забезпечують перехід озону з газоподібного стану у розчин. Такий перехід озону через межу поділу газової та рідкої фаз називають масоперенесенням озону у воду.

Лише частина озону з газового потоку переходить у воду, де бере участь у окисно-відновних реакціях і знезаражує її. Інша частина озону не розчиняється і виходить у повітря як надлишковий газ.

Кількість озону, що розчинилася у воді, виражена у відсотках від загальної кількості озону, який подається у воду, називається ефективністю масоперенесення (ЕМП) і визначається за певною формулою.

1.2.4 Аналіз перспектив застосування озону

Перспективи застосування озону у різних сферах людської діяльності є надзвичайно широкими, і з розвитком технологій його роль лише зростає. Завдяки своїм унікальним фізико-хімічним властивостям – потужній окисній здатності, екологічній безпеці та високій ефективності – озон знаходить усе більше застосувань у медицині, сільському господарстві, харчовій промисловості, очищенні води та повітря, побуті, промисловості та навіть у сфері екології [5].

У медицині майбутнє озонотерапії пов’язане з її інтеграцією в стандарти лікування широкого спектру хвороб, особливо хронічних та інфекційних. Завдяки зростанню резистентності бактерій до антибіотиків, озон стає все більш привабливою альтернативою для антисептичної обробки ран, санації слизових оболонок, лікування шкірних, судинних та імунних захворювань. Також активно вивчається його потенціал у онкології, регенеративній медицині та реабілітації після COVID-19.

У сільському господарстві озоноване зрошення ґрунтів має великі перспективи як екологічно безпечна альтернатива хімічним пестицидам і добривам. Воно дозволяє підвищити врожайність, знизити захворюваність рослин, покращити якість плодів та зменшити навантаження на ґрунти. Озон також ефективно використовується для обробки насіння та знезараження тепличного повітря.

У харчовій промисловості озон поступово витісняє хлор та інші хімічні знезаражувачі, оскільки не залишає токсичних залишків. Його застосовують для обробки м'яса, овочів, фруктів, води, тари та обладнання [5]. Очікується, що в найближчі роки виробництва, орієнтовані на екологічність і безпечність продуктів, масово перейдуть на озонові технології.

У очищенні води та повітря озон уже демонструє високу ефективність, і його використання буде лише зростати. Він здатен знищувати віруси, бактерії, цвіль, токсичні органічні речовини та навіть мікропластик. У містах майбутнього, де питання якості довкілля стоятиме на першому місці, озонування стане важливим елементом екосистем.

Крім того, у побуті зростає популярність портативних озонаторів для води, повітря, обробки продуктів харчування та дезінфекції приміщень. Люди дедалі частіше шукають безпечні альтернативи побутовій хімії – і озон тут є надзвичайно перспективним рішенням.

Постійне вдосконалення озоногенеруючого обладнання, зниження енергоспоживання, розвиток «розумних» систем контролю концентрацій і автоматизація процесів зроблять озон доступним і ефективним у багатьох сферах життя. Його універсальність, екологічність і висока ефективність роблять озон однією з ключових технологій майбутнього у боротьбі за чисте середовище, здоров’я людини та сталий розвиток.

1.3 Аналіз будови озонатора

Проаналізуємо вимоги до високочастотних озонаторів.

Реакція перетворення кисню O_2 в озон O_3 є ендотермічною [5]:

$$1{,}5O_2 + Q = O_3,$$

де Q=1,44 кВт - год/кг, оскільки 1 моль озону дорівнює 48 г = 0,048 кг.

Насправді цей процес складається з двох реакцій:

1) дисоціація молекули кисню на атомарний кисень, що є ендотермічною реакцією;

2) синтез молекули озону з атома О та молекули O_2, який є екзотермічним процесом, тобто супроводжується виділенням тепла.

У підсумку для утворення озону генератор, підключений до електричної мережі, споживає потужність приблизно 1,5 кВт/моль O_3. Частина цієї енергії витрачається на нагрівання газу, що містить кисень (повітря або чистого кисню), а інша – безпосередньо на синтез озону.

Отже, якщо пропускати через активну зону озонатора 5 м³/год осушеного повітря, щоб утворити 1 моль озону (48 г) і не охолоджувати його, температура цього повітря підвищиться на певну величину [5]:

$$\Delta T = \frac{2}{i}\frac{Q \cdot \mu}{R \cdot m}, \qquad (1.1)$$

де i – число ступенів свободи молекул повітря $i = 5$,

R – універсальна газова стала, що дорівнює 8,31·10³ Дж/К·моль,

Q – теплова енергія, яка виділяється електричним струмом під час створення тліючого розряду,

m – маса повітря, що проходить через озонатор, становить 1,3 кг×5 м³,

μ – молекулярна маса повітря, яка визначається за формулою 3.2.

$$\Delta T = \frac{2}{5}\frac{29\cdot(1540\cdot 3600 - 1440\cdot 10^3)}{8{,}31\cdot 10^3\cdot 13\cdot 5} = 880°K,$$

Молекулярна маса повітря:

$$\mu = 0{,}8 \cdot 28 + 0{,}2 \cdot 32 \cong 29, \qquad (1.2)$$

де 28 – молекулярна маса азоту,

32 – молекулярна маса кисню,

0,8 – доля вмісту азоту в повітрі,

0,2 - доля вмісту кисню в повітрі.

Отже, якщо на вході в озонатор температура повітря становить 20 °C, то без системи охолодження вона може підвищитися до 900 °C [5].

За таких температур озон, навіть утворившись, майже миттєво розпадається назад на кисень O_2.

Це зумовлює необхідність ефективного охолодження, яке відбувається через поверхню активної зони – області, де внаслідок бар'єрного розряду й відбувається утворення озону. Як зазначалося у вступі, загальний об’єм озонатора при зростанні частоти живильної напруги зменшується обернено пропорційно цій частоті (f^{α}, де α = 0,75–1). Якщо форма конструкції зберігається сталою, то зменшення об’єму також веде до зменшення площі поверхні активної зони, яка змінюється пропорційно $f^{2\alpha/3}$.

Таким чином, при збільшенні частоти з 50 Гц (стандартне значення) до 10 000 Гц теплове навантаження на поверхню активної зони зростає в $(10000/50)^{2/3}$ разів, тобто орієнтовно в 15–30 разів.

Отже, основною технічною проблемою при створенні високочастотних озонаторів є ефективне відведення тепла з активної зони – тобто зони, де утворюється озон за допомогою тліючого розряду [5].

У класичних (низькочастотних) озонаторах для охолодження використовують воду, яка відводить тепло від низьковольтних електродів.

Проте у високочастотних установках застосування води безпосередньо в зоні високої напруги часто призводило до аварійних ситуацій, оскільки вода є хорошим провідником електричного струму.

У деяких рішеннях для високочастотних озонаторів пропонувалося охолоджувати водою як низьковольтні, так і високовольтні електроди. Проте це створило нові інженерні труднощі. Звичайна вода, з огляду на домішки, дисоціює на іони і стає провідною. Тому виникла необхідність ізолювати водяну оболонку від електродів, особливо у випадку, коли високовольтна охолоджувальна вода контактує з низьковольтним електродом [7].

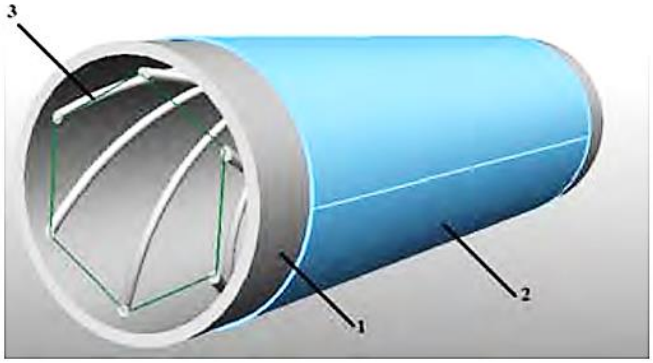
Ще одна важлива задача, пов’язана з необхідністю здешевлення виробництва озону, – це підвищення ефективності самого фізико-хімічного процесу перетворення молекулярного кисню на озон. Як зазначалося раніше, з теоретичної точки зору, тобто без врахування втрат, для отримання 1 кг озону необхідно приблизно 1,5 кВт·год електроенергії. Використання імпульсного живлення дозволяє на практиці довести споживання електроенергії до 2,5 кВт·год на 1 кг озону. Отже, виникає потреба у створенні таких озонаторів, де живлення активної зони забезпечує протікання бар’єрного розряду, за характером близького до імпульсного.

Ще однією проблемою, що постає при розробці сучасних озонаторів, є потреба в енергоощадних джерелах живлення. Сучасні напівпровідникові ключі серій IGBT і MOSFET дають можливість створити такі джерела [7].

Крім того, автори зіштовхнулися з ще однією суттєвою проблемою – підготовкою повітря. Йдеться про подачу на вхід озонатора повітря такої якості, яка унеможливлює передчасну дисоціацію озону безпосередньо в зоні його утворення (активній зоні).

Для моделювання необхідно проаналізувати характерні особливості навантаження для якого проектується інвертор, розглянемо конструкцію розрядної трубки озонатора в порівнянні [7].

Основним елементом озонатора є розрядна трубка, що зображена на рисунку 1.2.



1 – трубка з діелектричного матеріалу (діелектричний бар’єр),
2 – низьковольтний електрод, 3 – високовольтний електрод

Рисунок 1.2 – Зовнішній вигляд розрядної трубки озонатора

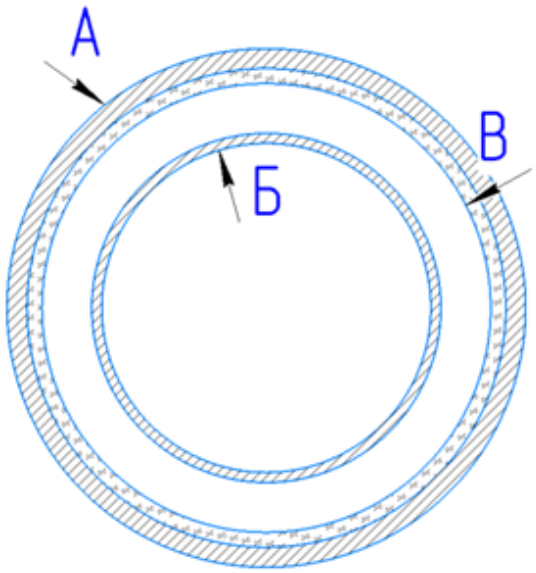
Як ми бачимо, конструкція складається з чотирьох основних елементів: низьковольтного електрода (2), високовольтного багатовиткового спірального електрода (3), діелектричного бар’єра (1), а також активної зони, розташованої всередині цього бар’єра [5].

Для підвищення ефективності вилучення озону з одиниці внутрішньої поверхні низьковольтного електрода, за рахунок використання всього об’єму всередині озонатора як активної зони, високовольтні електроди виконані у формі багатовиткових металевих спіралей.

В межах кожного напівперіоду зміни напруги живлення відбувається пробій газу поблизу високовольтного електроду. З часом зростання цієї напруги границя зони пробою віддаляється від цього електроду, а отже і площа іонізованої зони (в поперечному перерізі) зростає.

Обсяг іонізованого газу визначається як добуток площі на довжину електрода. Тому активна зона озонатора має більший обсяг порівняно з моделями, де використовуються прямі ниткоподібні високовольтні електроди. Це забезпечує підвищення ефективності роботи озонатора.

Розглянемо конструкцію розрядної трубки озонатора, що використовуємо.



А – анод; Б – катод; В – скляний корпус трубки

Рисунок 1.3 – Загальний вигляд трубки в розрізі

В більшості конструкцій трубок озонаторів анод з катодом розміщені поряд один з одним розділені тільки повітряним проміжком. Таким чином підчас пробою формується дуга напряму через повітряний проміжок, після відключення розрядного імпульсу (паузи) необхідно дочекатися гасіння дуги і тільки тоді подати наступний імпульс. При зворотній ситуації, коли наступний розрядний імпульс подається до остаточного гасіння дуги, зменшується область розбивання молекулярного кисню O_2 на атомарний О, а отже і кількість молекул озону O_3, що з'являється при паузі між імпульсами, значно зменшується. Таке виконання значно обмежує можливість збільшення ККД за допомогою збільшення частоти живлення озонатора тому розглянемо більш раціональну конструкцію, що зображена на рисунку 1.3.

При такому виконанні розрядної трубки ми можемо спостерігати пробігання бар'єрного розряду між корпусом розрядної трубки та електродами, загальний вигляд трубки, в якій відбувається бар'єрний розряд, зображено на рисунку 1.3. Відмінністю даної конструкції від всіх інших є те, що анод відокремлений від катоду корпусом трубки (див. рис. 1.3 В). Така будова озонатора дає можливість побудувати еквівалентну схему заміщення (рисунок 1.4). Отже, фактично ми маємо два конденсатори, які складаються з

аноду зі скляною колбою та з катоду зі скляною колбою, така конструкція дає можливість значно зменшити можливий час між імпульсами зі збереженням кількості генерованого атомарного кисню O, що пропорційно об'єднається з молекулярним киснем O_2. Відомо, що процес генерації озону O_3 відбувається саме під час пауз між розрядними імпульсами, коли атомарний кисень починає дифузійно змішуватись з молекулярним киснем O_2 утворюючи молекули озону O_3.

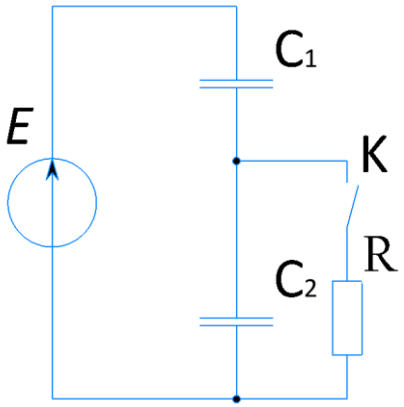


Рисунок 1.4 – Схема заміщення розрядної трубки озонатора

Таким чином, при використанні представленої конструкції в озонаторі ми забезпечуємо значне збільшення кількості озону на виході апарату при одній і тій самій споживаній потужності з мережі (мг/Вт), а отже покращуємо ККД та зменшуємо габарити при порівняній кількості озону на виході озонатора в порівнянні з іншими апаратами представленими на ринку.

До вхідного колектора надходить висушене та охолоджене повітря від компресора (або інший газ, що містить кисень). Усередині газорозрядних трубок, під дією високої напруги, біля струнних електродів формується тліючий розряд. У межах цієї області відбувається розщеплення молекул кисню O_2 на атомарний кисень, атоми якого взаємодіють із недисоційованими молекулами кисню, утворюючи озон (O_3).

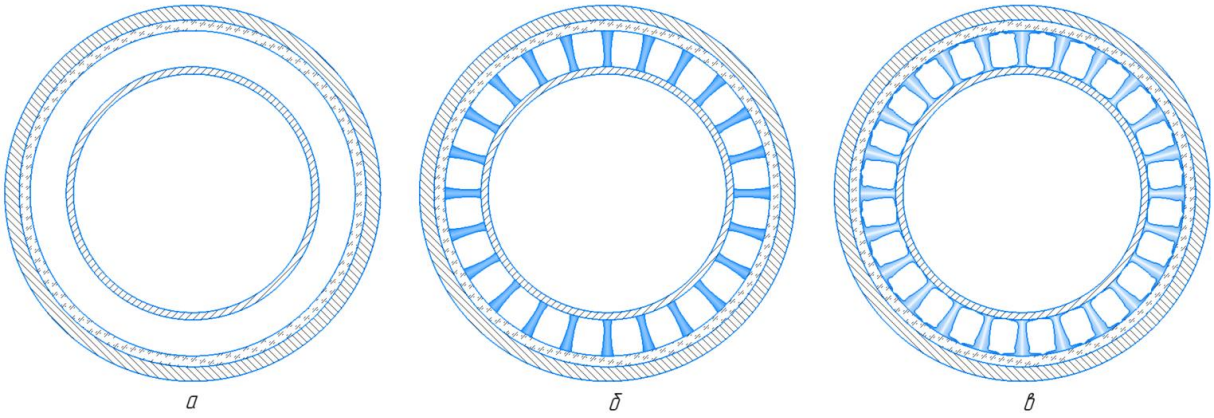
Оскільки напруга між електродами змінюється, процес іонізації триває лише під час періоду, коли електричне поле перевищує поріг. Коли напруга

падає до нуля, газ перестає іонізуватися, але при наступній півхвилі процес повторюється.

Тип реакцій, що протікають під час утворення озону, залежить від ступеня збудження атомарного кисню. Розрізняють пероксидну реакцію та реакцію Шумана-Рунге. Рівень збудження атомів кисню визначається енергією електричного поля у зоні бар'єрного розряду.

У процесі роботи озонатора під час кожного півперіоду зміни напруги розряд розвивається послідовно. Спочатку, зі зростанням напруги, іонізація повітря відбувається поблизу високовольтного електрода, після чого зона розряду поступово поширюється далі, утворюючи бігучий розряд.

Уже іонізований шар має значно менший електричний опір, тому різниця потенціалів між його межами стабілізується. У результаті збільшується кількість атомарного кисню, а енергетичні витрати на утворення озону зменшуються (див. рис. 1.5).



а, б, в – розвиток іонізуючого розряду, в результаті чого збільшується площа поперечного перерізу зони іонізації – відповідно збільшенню моментного значення напруги на електродах розрядної трубки

Рисунок 1.5 – Розвиток розряду в активній зоні трубки від високовольтного електроду до низьковольтного

Під час чергового півперіоду зміни напруги в газорозрядній трубці, коли високовольтний електрод має негативний потенціал, а низьковольтний -

позитивний, нитки високовольтного електрода випромінюють електрони в активну зону. Ці електрони забезпечують іонізацію повітря, після чого осідають на внутрішній поверхні діелектричної трубки.

У наступний півперіод накопичений заряд додається до негативного заряду низьковольтного електрода, що підвищує різницю потенціалів і сприяє ще інтенсивнішій іонізації. Вільні електрони прискорюються і досягають енергій, достатніх для розриву молекул кисню, головним чином поблизу високовольтних ниток. Таким чином, електрони, випромінені раніше, продовжують підтримувати процес іонізації, розширюючи активну область від високовольтних елементів.

Висновки до розділу 1

В розділі було розглянуто загальні відомості щодо озонатора. Розглянуто принцип роботи різних видів озонатора, корисний вплив озону.

Проаналізовано специфіку використання та вплив озону на грунт, повітря, воду, людей, бактерії та віруси. Зазначено ступінь можливого позитивного впливу озону на життя людини. Розглянуто питання перспектив використання озону, як перспективний варіант знезараження та очищення повітря та води, обґрунтовано конкурентні переваги в порівнянні з хлором.

Розглянуто будову озонатора, визначено конструктивні особливості складових елементів агрегату. Досліджено процес генерації озону в розрядній трубці та визначено проблематику живлення таких приборів, яка полягає у тому, що між різними розрядними трубками одного агрегату спостерігається значна розбіжність характеристик, що ускладнює проектування та налаштування системи живлення в таких агрегатах.

2 АНАЛІЗ ВИДІВ ІНВЕРТОРІВ ДЛЯ ЕЛЕКТРОСИНТЕЗУ

Інвертор – це пристрій, що перетворює постійний струм на змінний.

Якщо частота перемикання напівпровідникових елементів інвертора визначається частотою мережі змінного струму, такий інвертор називають веденими мережею.

Коли інвертор працює на автономне навантаження і частота перемикання встановлюється відповідно до умов роботи та за потреби може змінюватися, його називають автономним.

Обидва типи інверторів широко застосовуються в різних системах електроприводу.

У дипломному проекті досліджується інвертор, як складова частина системи живлення озонатора. До інвертора озонатора ставляться специфічні вимоги, такі як:

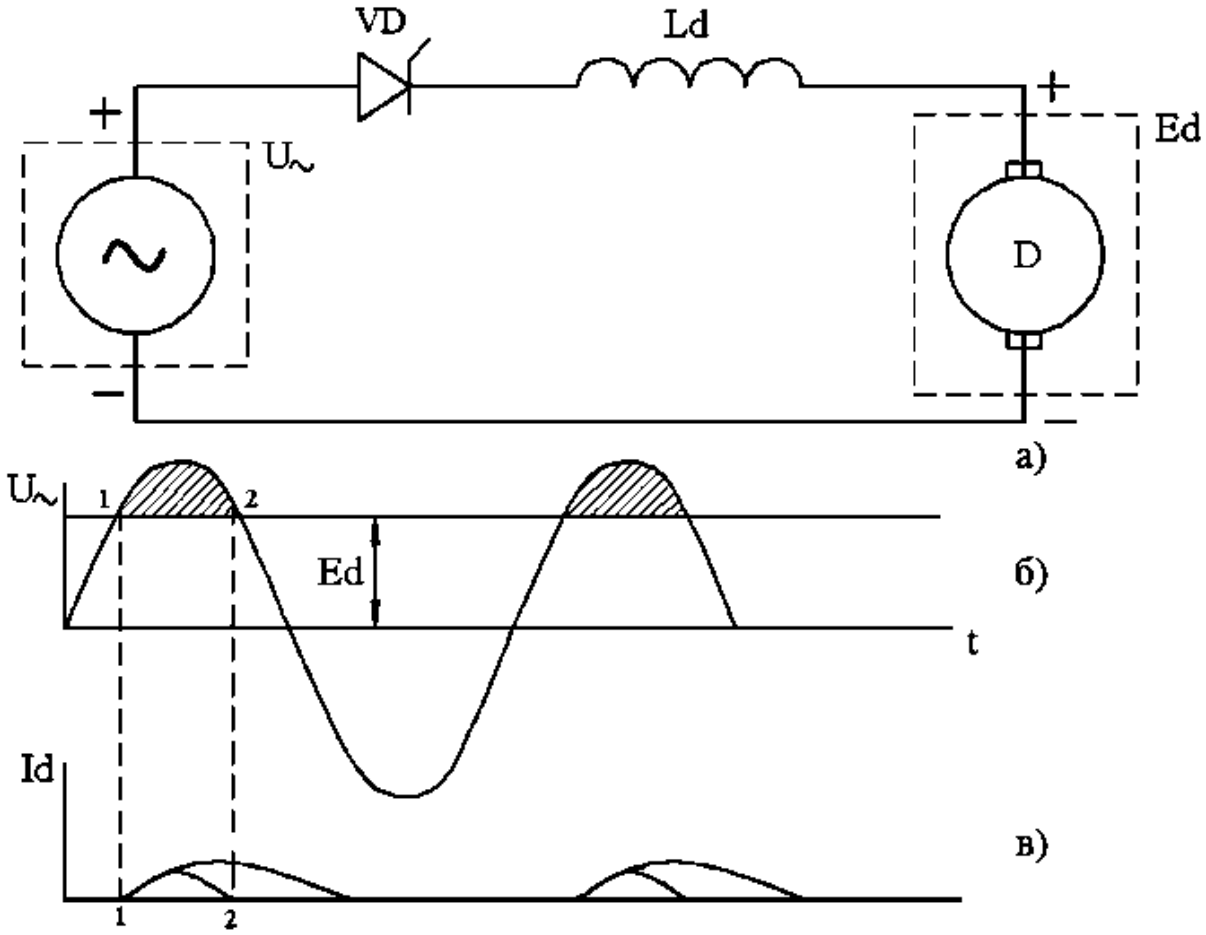
1. висока частота вихідної напруги (приблизно 100 кГц);
2. максимальна ефективність процесу перетворення;
3. значна зміна характеристик навантаження між виробами;
4. можливість регулювання вихідної частоти у широкому діапазоні.

Отже, необхідно дослідити можливі варіанти схемо-технічного виконання інверторів та обрати найбільш доцільніший.

2.1 Дослідження інверторів ведених мережею

Процес інвертування в системі «джерело постійного струму – мережу змінного струму» може бути здійснено на базі керованого випрямляча [8]. Для розуміння процесів, що відбуваються них спочатку розглянемо процес передачі потужності від джерела змінного струму до споживача, що живиться постійним струмом. На рис. 2.1(а) подано схему випрямляча з одним тиристором VD, що з’єднує джерело змінної напруги U~ з приймачем

постійної напруги Ed – у нашому випадку в якості прикладу [8] двигуном постійного струму D.



а – принципова схема випрямляча, б – U~(t) характеристика, в – Id(t) характеристика.

Рисунок 2.1 – Дослідження схеми елементарного випрямляча [8]

На затискачах двигуна, що обертається, виникає постійна протидіюча ЕРС (протиЕРС), напрямлена проти напруги живлення. Вона утворюється в провідниках обмотки ротора під час їх перетину ліній магнітного поля збудження [8].

Живлення забезпечується послідовністю позитивних півхвиль змінної напруги, отриманих на виході однопівперіодного випрямляча VD (рис. 2.1 б). Вважатимемо, що на тиристор VD подаються імпульси керування, щойно на його аноді з’являється плюсовий потенціал. Передача потужності від джерела U~ до споживача D можлива лише за умови зустрічного

підключення протиЕРС двигуна відносно мережі живлення. Це означає, що полярність напруги U відповідає режиму передачі корисної енергії в двигун [8].

Згідно з умовами переходу тиристора (або діода) у провідний стан, тиристор VD відкривається, коли виконується нерівність U − Ed > 0. На рис. 2.1 б ця умова зображена заштрихованою ділянкою півхвилі синусоїди.

Якби в колі не було індуктивності Ld (дроселя), струм у двигуні мав би вигляд пунктирної кривої (рис. 2.1 в) на відрізку 1–2, повторюючи контур заштрихованої частини синусоїди. У точці 2, коли U − Ed = 0, тиристор VD переходить у непровідний стан.

Якщо ж у колі присутній дросель Ld, то ЕРС самоіндукції L dI/dt затримує вимикання тиристора навіть тоді, коли напруга на його аноді вже від'ємна (U − Ед < 0). Лише після того, як під дією цієї різниці напруг струм зменшиться до нуля, тиристор остаточно закривається [8].

Отже, для корисного перетворення енергії, тобто передачі потужності від джерела до споживача, мають виконуватися такі умови:

1. Напруга джерела та ЕРС споживача повинні бути спрямовані назустріч одна одній.

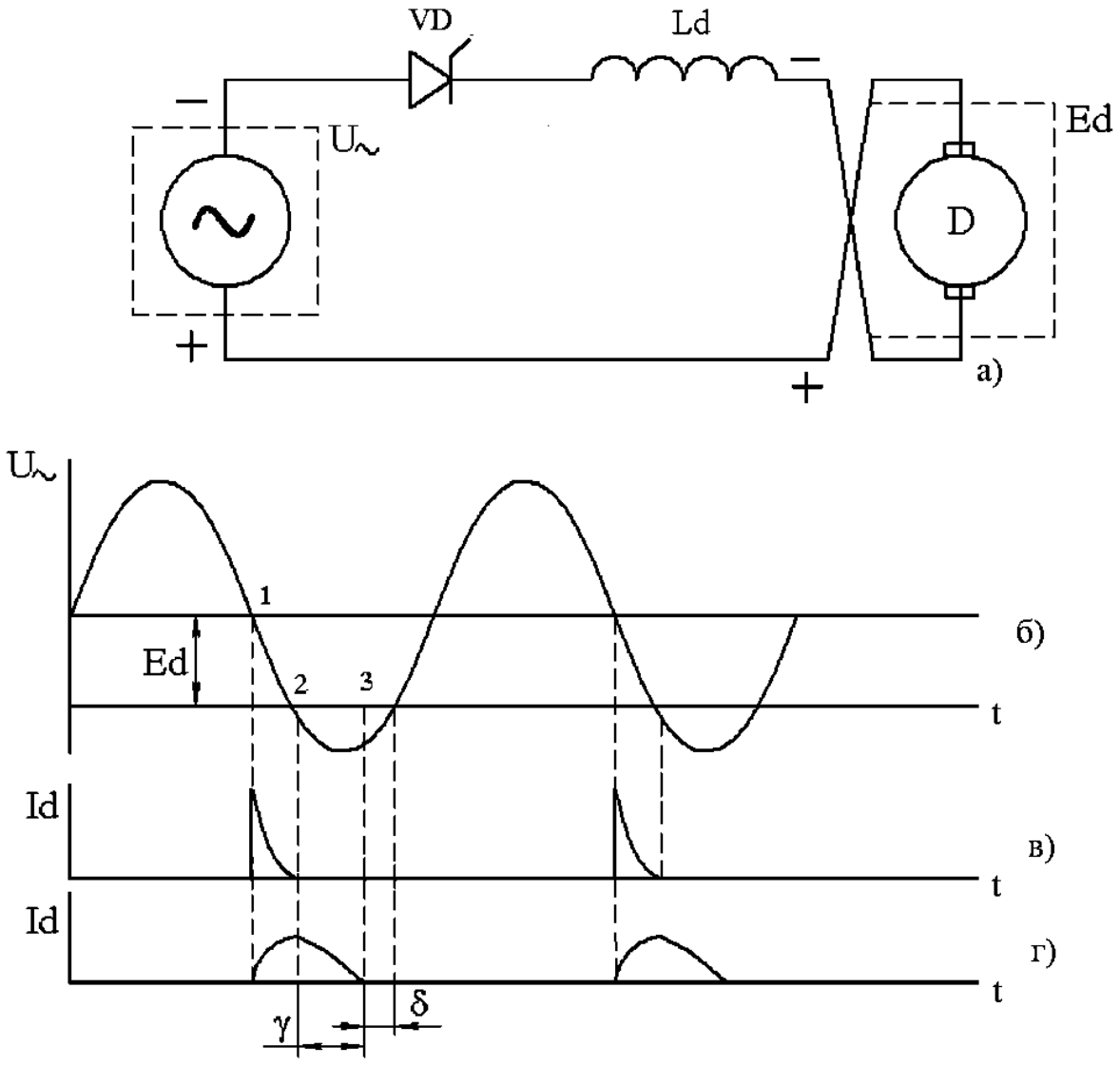
2. Напруга (ЕРС) джерела повинна хоча б у певні проміжки часу (або на визначених інтервалах кутів мережі протягом періоду 2π) перевищувати проти ЕРС споживача.

Інвертор ведений мережею передає енергію від джерела постійного струму в мережу змінного струму, що є процесом, оберненим до випрямлення. Розглянемо інвертування для тієї ж схеми однопівперіодного випрямляча (рис. 2.1 а), переведеної в режим інвертора.

Щоб забезпечити подачу потужності від двигуна постійного струму D, який працює в генераторному режимі, у мережу змінного струму, потрібно [8]:

- по-перше, перемкнути вихідні клеми двигуна так, як показано на рис. 2.2 а, щоб струм двигуна міг проходити через тиристор VD у дозволеному напрямку, коли він відкритий;

- по-друге, дотриматися умови зустрічного підключення полярності споживача відносно джерела, сформульованої раніше.



а – принципова схема інвертора, б – U~(t) характеристика, в – Id(t) характеристика без дроселя, г – Id(t) характеристика з дроселем

Рисунок 2.2 – Дослідження схеми елементарного інвертора [8]

Це означає, що тиристор VD має вмикатися на ділянках негативної півхвилі напруги U~. Але відкриття можливе лише тоді, коли під час подачі

імпульсу на аноді тиристора присутній додатний потенціал. Із рис. 2.2 а та б видно, що потенціал на аноді стає додатним (Ед + U~ > 0) від точки 1, де напруга U~ проходить через нуль, до точки 2, де синусоїда U~ перетинає постійну ЕРС двигуна.

Якщо імпульс відкривання подано в точці 1, то без дроселя струм двигуна, а значить і потужність, надходитиме в мережу на відрізку 1–2 мережевого кута. Форма цього струму повторює ділянку кривої, що відображає різницю напруг Ed + U~; ці імпульсні ділянки показані на рис. 2.2 в. Праворуч від точки 2 за відсутності індуктивності тиристор V теоретично миттєво закривається, оскільки напруга на його аноді стає від'ємною (Ед + U~ < 0).

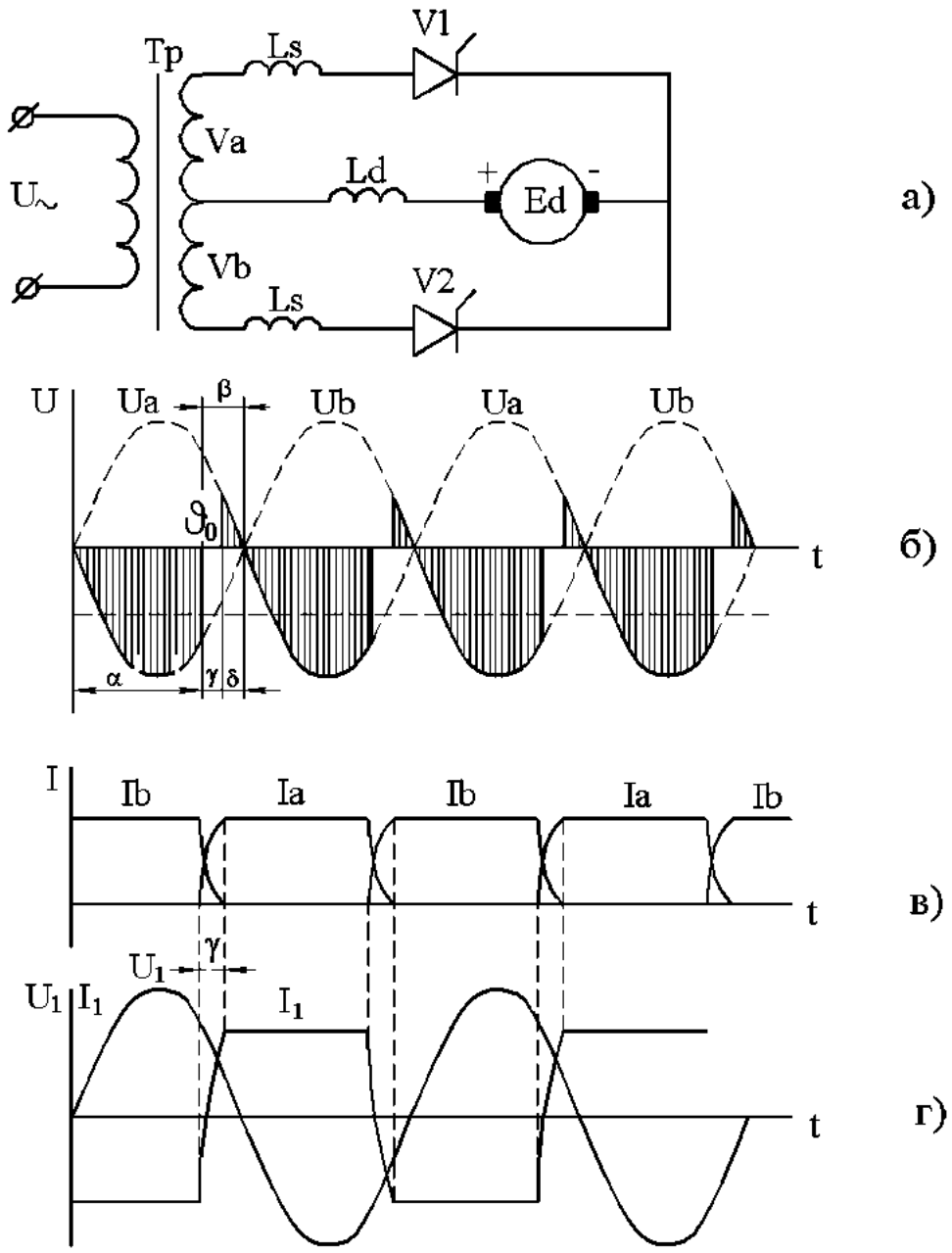
За наявності індуктивності Ld в колі інвертора робота тиристора VD та характер протікання струму змінюються.

Коли тиристор VD відкривається в точці 1, струм поступово зростає й досягає максимального значення в точці 2. Далі, праворуч від точки 2, напруга на аноді тиристора (Ed + U~) стає від'ємною, але тиристор залишається у відкритому стані, оскільки струм підтримується ЕРС дроселя. Лише після того, як струм спадає до нуля, тиристор вимикається, бо виконуються дві необхідні умови: відсутність струму (I = 0) та від'ємна напруга на аноді (Ед + U~ < 0) [8].

Для надійного запирання тиристора зазвичай потрібна ще третя умова — збереження від'ємного потенціалу на аноді після зникнення струму протягом певного часу, достатнього для відновлення його блокувальних властивостей. Цей інтервал відповідає мережевому куту, що називається кутом запасу δ.

Отже, для впевненого відновлення запиральних властивостей необхідно, щоб Ed + U~ < 0 при δ ≥ ωt. На рис. 2.2 г показано кут комутації γ, протягом якого струм Id спадає до нуля, та кут запасу δ, коли струм через тиристор відсутній, а на його аноді зберігається від'ємний потенціал (Ed + U~ < 0).

Розглянемо роботу однофазного інвертора зі середньою точкою, зображеного на рис. 2.3 а.



а – принципова схема однофазного інвертора із середньою точкою, б – U(t) характеристика, в – I(t) характеристика, г – U1(t) характеристика

Рисунок 2.3 – Дослідження однофазного інвертора із середньою точкою [8]

Припустімо, що у провідному стані перебуває тиристор V2, і під спільною дією ЕРС двигуна (генератора) Ud та фазної напруги половини обмотки в колі протікає ідеально згладжений струм [8].

У певний момент часу, що відповідає куту ϑ₀, віддаленому від точки перетину фазних напруг на кут α > 0, на керуючий електрод V1 подається імпульс відкривання. Тиристор V1 вмикається, і в короткозамкненому контурі «V1 – V2 – обмотка U_a – обмотка U_b» починається процес комутації. Під дією різниці напруг $U_a – U_b = -2U_a$ на аноді тиристора V2, струм через V2 (I_b) зменшується, а струм через V1 (I_a) зростає, причому завдяки великій індуктивності кола (теоретично $L \to \infty$) зміна відбувається плавно $I_a + I_b = I_d$ – const.

Комутація завершується на ділянці кута γ, коли сумарний струм I_d. Струм врешті «перехоплюється» тиристором V1. Після закриття V2 на його аноді протягом кута запасу δ зберігається від'ємний потенціал, необхідний для відновлення блокувальних властивостей тиристора.

Далі, через π радіан мережевого кута, з тим самим кутом керування, відмикаючий імпульс подається на тиристор V2, і весь процес повторюється. Таким чином, потужність від джерела постійного струму через перетворювач, що працює в режимі інвертора, надходить у мережу змінного струму [8].

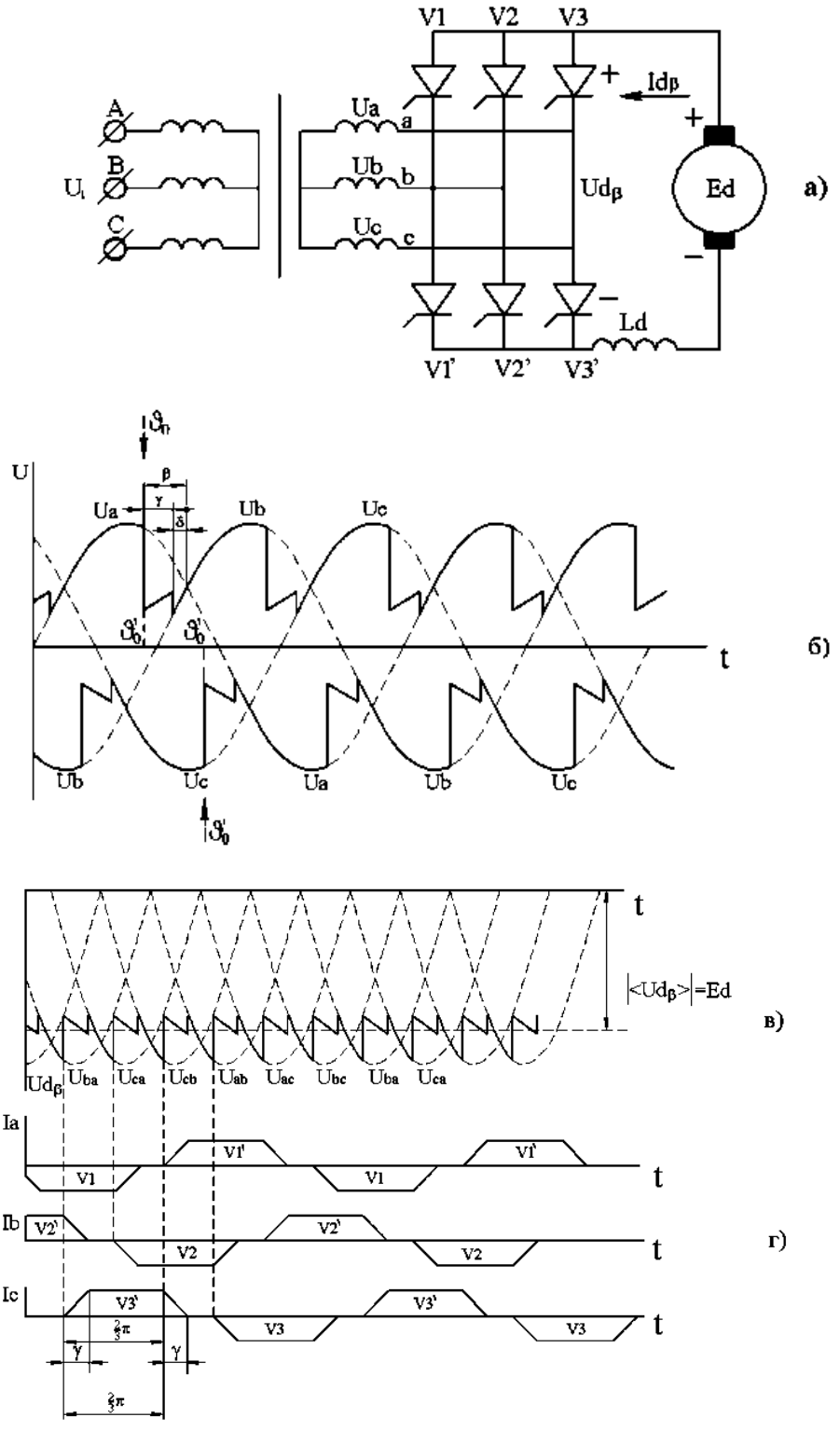
Під час аналізу роботи інвертора зручно використовувати, як регулювальний не сам кут α, а доповнення до π, тобто кут $\beta = \pi - \alpha$, який називають кутом випередження. Цей кут відлічується від моменту подачі імпульсу відкривання до точки перетину фазних напруг комутованих фаз.

Для схеми на рис. 2.3 а кут β відповідає відрізку мережевого кута від моменту подачі імпульсу ϑ₀ до точки перетину напруг U_a та $U_в$. Варто зауважити, що кут комутації γ та кут запасу δ пов'язані між собою певним співвідношенням.

$$\beta = \gamma + \delta. \tag{2.1}$$

На рис. 2.4 в показано струми, що проходять відповідно через тиристори V1 та V2, а на рис. 2.4 г подано напругу й струм первинної

обмотки трансформатора, форма півхвиль яких повторює форму зазначених струмів $I_а$ та $I_в$.



а – принципова схема трифазного мостового інвертора, б – $U_n(t)$ характеристика, в – $U_{db}(t)$ характеристик, г – $I_n(t)$ характеристика

Рисунок 2.4 – Дослідження трифазного мостового інвертора [8]

Розглянемо роботу трифазного мостового інвертора, зображеного на рис. 2.4 а.

Інверторний режим реалізується на основі трифазного керованого мостового випрямляча. Для інвертора, як зазначалося раніше, замість кута керування α застосовують кут випередження $\beta = \pi - \alpha$.

Схему трифазного інвертора разом із двигуном постійного струму, на затискачах якого створюється ЕРС E_d, подано на рис. 2.4 а. На лінійній діаграмі фазних напруг вторинних обмоток трансформатора (рис. 2.4 б) показані ділянки комутації між фазами, що виконуються відповідними тиристорами [8].

Верхні (позитивні) півхвилі напруг U_a, U_b, U_c комутуються верхньою (анодною) групою тиристорів V1, V2, V3 (рис. 2.4 а), а нижні півхвилі — відповідно нижньою (катодною) групою тиристорів V1’, V2’, V3’.

Використовуючи раніше сформульоване правило комутації діодів і тиристорів, у нашому випадку слід врахувати, що під час подачі імпульсу відкривання на тиристор анодної групи ввімкнеться той елемент, потенціал катода якого нижчий за потенціал вимикаємого тиристора тієї ж групи [8].

Наприклад, у точці ϑ_0 керуючий імпульс подається на тиристор V2 анодної групи інвертора. Катод V2 має потенціал $Ub(\vartheta_0)$. Завдяки різниці напруг $Ua - Ub$ на інтервалі кута γ відбудеться вимикання тиристора V1 фази а та «перехоплення» струму тиристором V2 фази b.

Аналогічно для нижньої (катодної) групи тиристорів V1′, V2′, V3′: під час подачі імпульсу відкривання ввімкнеться той, чий анод має вищий потенціал, ніж у тиристора, який відключається. Наприклад, у точці ϑ_0' імпульс подають на тиристор V1′, анод якого має потенціал $Ua(\vartheta_0')$, що перевищує потенціал анода вимикаємого V3′, рівний $Uc(\vartheta_0')$. У цьому разі на ділянці кута комутації γ відбувається відключення V3′, і струм, що надходить від двигуна (генератора) постійного струму, переходить з фази с на фазу а.

Виходячи з цього правила, на діаграмі рис. 2.3 б показана послідовність комутації струму з фази на фазу, яку здійснюють тиристори інвертора під

дією керувальних імпульсів (самі імпульси на схемі не наведені), зсунених відносно точок перетину фазних напруг на кут випередження β.

Вхідна напруга інвертора визначається сумою абсолютних значень миттєвих фазних огинаючих, позначених на рис. 2.3 б жирною лінією. Результат цього додавання у вигляді миттєвого значення вхідної напруги показаний на рис. 2.3 в. Фазні струми Ia, Ib, Ic, зсунуті по фазі на 2π/3 радіан, зображені на рис. 2.3 г.

Позитивні півхвилі струмів відповідають провідному стану тиристорів катодної групи V1′, V2′, V3′, а негативні — провідному стану тиристорів анодної групи V1, V2, V3. Тривалість проходження півхвилі струму через кожну фазу дорівнює мережевому куту (π/3 + γ).

Щоб отримати вираз для вхідної характеристики інвертора, можна скористатися відомою характеристикою аналогічного випрямляча, підставивши в неї кут α = π − β.

2.2 Дослідження коефіцієнт потужності та ККД інвертора

Розглянемо питання визначення коефіцієнт потужності χ та ККД η для інверторів. Зазвичай співвідношення для інверторів розглядаються відповідно, як для керованих випрямлячів з урахуванням деяких нюансів по фазному куту φ_1 та по напрузі обмотки трансформатора [8].

Коефіцієнт потужності визначається, як:

$$\chi = \nu \cdot \cos \varphi_1, \tag{2.2}$$

де ν – коефіцієнт спотворення;

φ_1 – кут зсуву першої гармоніки струму $I_{(1)}$ відносно діючого значення напруги мережі;

Коефіцієнт спотворення:

$$v = \frac{I_{(1)}}{\sqrt{I_{(1)}^2 + \sum I_{(n)}^2}}, \quad (2.3)$$

де $I_{(1)}$ – діюче значення першої гармоніки мережі;

$I_{(n)}$ - діюче значення n-ї гармоніки мережі;

$$\cos\varphi_1 \approx \cos\left(\alpha + \frac{\gamma}{2}\right),$$

Враховуючи $\alpha = \pi - \beta$ тоді ми отримуємо остаточний вигляд співвідношення коефіцієнта потужності:

$$\chi = v \cdot \cos\left(\beta - \frac{\gamma}{2}\right), \quad (2.4)$$

ККД інвертора визначається співвідношенням:

$$\eta = \frac{U_{d\beta} \cdot I_{d\beta}}{U_{d\beta} \cdot I_{d\beta} + \sum P_n}, \quad (2.5)$$

де, U_d, I_d – корисна потужність на стороні інвертора;

$\sum P_n$ – сума втрат у інверторі,

Сума втрат у інверторі визначається, як:

$$\sum P_n = P_{\text{Т}} + P_{\text{ДР}} + P_{\text{вс}} + P_{\text{в}}, \quad (2.6)$$

де $P_{\text{Т}}$ – втрати у мережевому трансформаторі;

$P_{\text{ДР}}$ – втрати у дроселі;

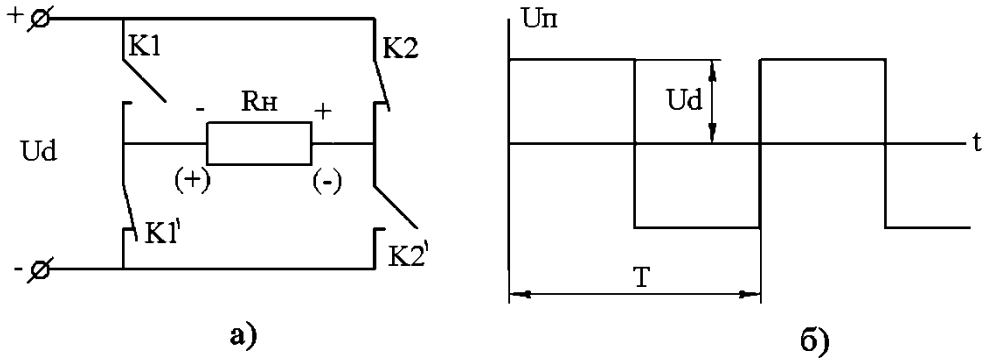
$P_{вс}$ – втрати у допоміжних приладах (системі керування, системи контролю, системи охолодження та інше);

$P_{в}$ – втрати у ключах (тиристорах),

У сучасних інверторів ККД наближається до 98-99%. Слід зазначити, що інвертори керовані мережею, широко застосовуються в системах електропривода постійного струму, які живляться від мережі змінного струму через випрямляч у режимах гальмування з рекуперацією енергії в мережу. Такий режим реалізується або переведенням керованого випрямляча в режим інвертора ($\alpha > \pi/2$), або шляхом використання здвоєної групи перетворювачів (випрямляч–інвертор).

2.3 Дослідження автономних інверторів

На рис. 2.5 а показано найпростішу модель однофазного інвертора на чотирьох механічних ключах K_1–K_{21}'. Попарне вмикання та вимикання ключів K_1–K_2' і K_2–K_1' з періодичністю T призводить до появи на навантаженні змінної прямокутної напруги, амплітуда якої (умовний рівень прямокутника) дорівнює напрузі джерела постійного струму U_d.



а – принципова схема елементарного однофазного інвертора, б – $U_П(t)$ характеристика

Рисунок 2.5 – Дослідження моделі елементарного однофазного інвертора [8]

У сучасній техніці механічні ключі К–К21′ замінюються напівпровідниковими, які в автономних інверторах виконуються переважно на повністю керованих комутаційних елементах — транзисторах і повністю керованих тиристорах (типу GTO) [8].

Використання звичайних тиристорів з штучною (ємнісною) комутацією нині майже повністю витіснене завдяки появі потужних транзисторів і GTO-тиристорів.

Повністю керованим напівпровідниковим елементом називають прилад, який можна відкрити подачею на керуючий електрод сигналу потрібного рівня та полярності, а закрити — зняттям цього сигналу або подачею сигналу протилежної полярності.

Звичайний тиристор не має можливості закриватися через керуючий електрод, тому він називається неповністю керованим комутаційним елементом.

На рисунку 2.6 а подано однофазний інвертор, у якому, на відміну від механічної моделі (рис. 2.5 а), як ключові елементи використовуються транзистори (V1, V2, V1′, V2′), шунтовані зворотними діодами (VD1, VD2, VD1′, VD2′). Ці діоди потрібні для запобігання перенапругам на транзисторах у момент їх вимикання.

Навантаження (Z) містить як активний опір (R), так і індуктивність (L). Припустімо, що в усталеному режимі, показаному на рисунку 2.5 б, у початковий момент часу (t = 0) відкриті транзистори (V2, V1′), а транзистори (V1, V2′) закриті. Початкове значення струму навантаження дорівнює $I_{(0)}$. Цей струм, зображений на рисунку 2.5 б, спрямований проти напруги (U_d), прикладеної до навантаження (Z), що зумовлено роботою відкритих транзисторів (V2, V1′). Приймемо цей напрям струму за негативний.

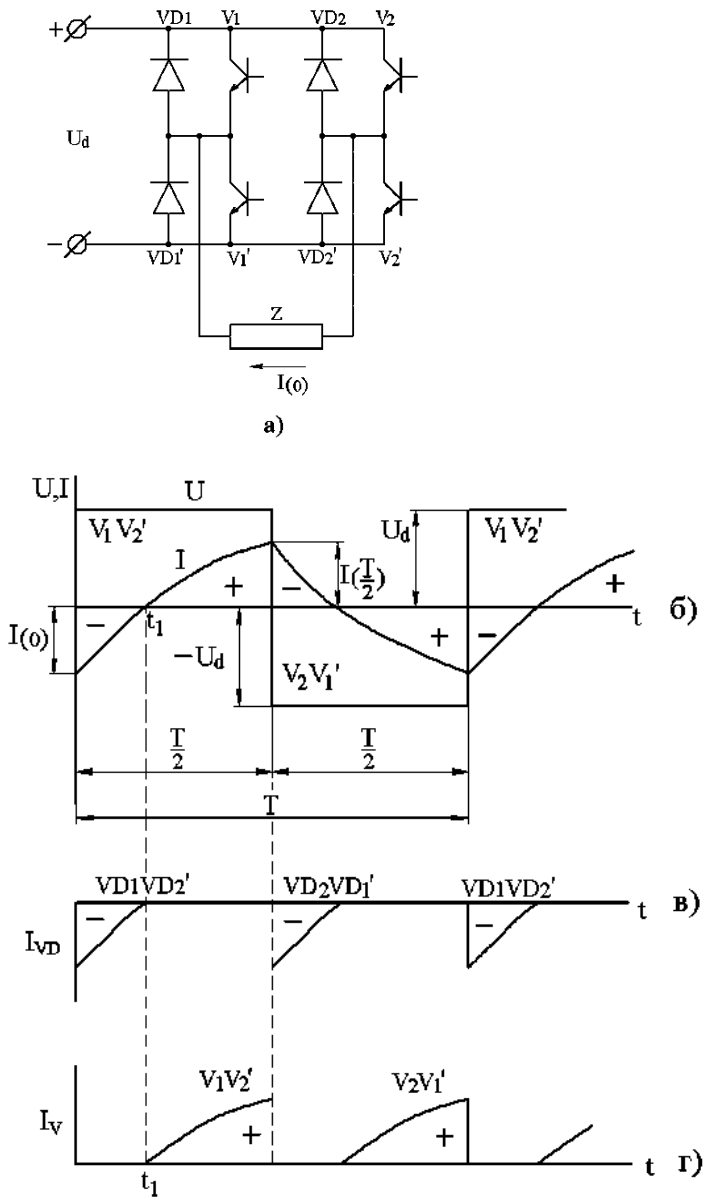
Завдяки ЕРС самоіндукції (L(dI/dt)), що виникає в навантаженні під час вимкнення пари транзисторів (V2, V1′), відкриваються зворотні діоди (VD1′) та (VD2). У цей момент для струму навантаження утворюється замкнене коло [8]: «навантаження Z – діод VD1 – джерело живлення U_d– діод VD2′ –

навантаження Z». Струм (I) починає надходити назад у джерело живлення, а електромагнітна енергія, накопичена в індуктивності навантаження ($\frac{1}{2}LI^2(0)$), частково повертається до джерела. Абсолютне значення струму поступово зменшується до нуля. На часовій діаграмі (рис. 2.6 б) цей інтервал позначено знаком (–).

Після того як струм (I) зменшується до нуля, його напрям змінюється на протилежний, і через відкриті транзистори V1, V2′ струм починає текти від джерела живлення до навантаження Z. Ці інтервали на діаграмі позначені знаком (+).

Через півперіоду ($\frac{T}{2}$) відбувається вимкнення транзисторів (V1, V2′) та вмикання транзисторів (V2, V1′). Процес повторюється циклічно: спочатку відкривається інша пара зворотних діодів, і струм (I) починає надходити назад у джерело живлення, поступово зменшуючись до нуля. Після зміни напрямку струму на протилежний він проходить через відкриті транзистори (V2, V1′), надходячи від джерела напруги (U_d) до навантаження (Z). Далі процес повторюється знову, утворюючи безперервний цикл.

Як видно з лінійних діаграм струмів діодів (рис. 2.6 в) та транзисторів (рис. г), в однофазному інверторі з активно-індуктивним навантаженням (Z) відбувається періодичний обмін енергією між джерелом живлення та навантаженням. Ділянки, позначені знаком (–), відповідають проходженню струму через діоди, коли енергія повертається від навантаження до джерела. Ділянки зі знаком (+) відповідають проходженню струму через транзистори, коли енергія надходить від джерела до навантаження.



а – принципова схема однофазного інвертора, б – U,I(t) характеристика, в – $I_{VD}(t)$ характеристика, г – $I_V(t)$ характеристика

Рисунок 2.6 – Дослідження однофазного інвертора на базі транзисторів [8]

У цьому розділі розглядається найпростіший випадок, коли навантаження не містить проти-ЕРС, створюваної електричною машиною, і вся енергія, що надходить від джерела, виділяється у вигляді тепла на опорі (R).

Розглянутий інвертор належить до класу інверторів напруги, які створюють на навантаженні певну напругу (у цьому випадку — прямокутну

форму), а струм є реакцією навантаження на прикладену напругу та визначається її складом — опором, індуктивністю, ємністю або наявністю проти-ЕРС [8].

Існує також інший тип — інвертори струму, у яких формується безпосередньо струм у навантаженні, тоді як напруга є наслідком реакції навантаження на цей струм.

Нині в силових перетворювачах середньої та високої потужності найбільш поширеним типом ключових елементів є MOSFET- та IGBT-транзистори — напівпровідникові прилади з керуванням за напругою. Для систем керування потужного класу ці транзистори характеризуються значною вхідною ємністю, яка за своїми властивостями еквівалентна ємності конденсаторів на рівні 10^3–10^4 пФ [8].

Під час відкривання транзистора його вхідна ємність заряджається, а під час закривання — розряджається. Відкриття транзистора починається тоді, коли напруга на затворі відносно витоку перевищує порогове значення. Для MOSFET- та IGBT-транзисторів, що застосовуються в силових схемах, типове порогове значення напруги затвор-витік становить 2…4 В. Проте, щоб зменшити опір відкритого каналу MOSFET-транзистора або забезпечити режим насичення IGBT-структури, на затвор необхідно подавати вищу напругу — зазвичай 10…15 В. В той же час, для надійного закривання транзистора потрібно забезпечити $U_{затв} \geq 0$ В, однак, щоб прискорити вимикання та запобігти хибному відкриванню при великих значеннях du/dt, часто використовують від’ємну напругу у діапазоні −3…−15 В.

Після подачі з виходу драйвера позитивного керуючого сигналу починається заряджання вхідної ємності транзистора. Якщо стік MOSFET-транзистора або колектор IGBT тимчасово не під’єднані до кола, заряд цієї ємності відбувається за експоненційним законом до рівня вихідної напруги драйвера.

У випадку, коли на стоку закритого транзистора присутня висока напруга, при досягненні напругою на затворі порогового рівня

розпочинається розряд перехідної ємності. Це зумовлює зниження напруги на стоку [8]. Розряд цієї ємності спричиняє збільшення струму стоку та падіння напруги на виході драйвера через його вихідний опір. Унаслідок цього час відкривання транзистора збільшується, що є характерним проявом ефекту Міллера.

Під час закривання ключа напруга на затворі зменшується за експоненціальним законом доти, поки в момент часу t_1 не почне зростати напруга стік–витік. Напруга на затворі встановлюється на такому рівні, за якого струм стоку залишається майже незмінним (якщо навантаження в колі стоку має індуктивний характер).

Через ефект Міллера швидкість підйому напруги на стоку залишається сталою і залежить від струму стоку. У момент t_2 зростання напруги стоку припиняється, а напруга Uзи продовжує зменшуватись за експоненціальним законом до значення ЕРС драйвера Едр. При цьому струм стоку знижується до нуля [9].

Характерною особливістю MOSFET- і IGBT-транзисторів є дуже мала потужність керування, необхідна для комутації значних струмів силових ланцюгів. Це забезпечує зменшення статичних і динамічних втрат енергії.

Відсутність потреби у великій керуючій потужності дозволяє не застосовувати складні гальванічно розв’язані схеми, що значно спрощує роботу і налаштування пристроїв, а також дає можливість використовувати інтегральні драйверні схеми для керування такими елементами.

Розглянемо будову та принцип роботи резонансного інвертора. В загалі резонансний інвертор має низку переваг, таких як:

1. високий ККД,
2. низький рівень електромагнітних втрат,
3. м’який режим роботи силових ключів,
4. висока щільність потужності.

Але проектування резонансного перетворювача являє собою складне завдання і потребує великих зусиль по підбору та оптимізації для інженерного відділу підприємства.

Розрізняють резонанс струмів, який виникає при паралельному з'єднанні котушки та конденсатора, і резонанс напруг, що спостерігається при послідовному з'єднанні цих елементів. Резонанс напруг застосовується у техніці для підсилення коливань напруги певної частоти [10].

Резонанс струмів використовують у резонансних підсилювачах, які дають змогу виокремити коливання заданої частоти із сигналу складної форми.

Напруги на індуктивності та ємності можуть значно перевищувати напруги на вході ланцюга. Їхнє відношення, зване добротністю контуру Q, визначається величинами індуктивного (або ємнісного) та активного опорів:

$$Q = \frac{U_L}{U} = \frac{U_C}{U} = \frac{X_{L\,\text{рез}}}{R} = \frac{X_{C\,\text{рез}}}{R}, \tag{2.7}$$

Добротність характеризує, у скільки разів напруга на котушці індуктивності та конденсаторі під час резонансу перевищує напругу, прикладену до кола. У радіотехнічних колах її значення може досягати кількох сотень умовних одиниць [9].

Для розуміння процесів, що відбуваються в резонансному інверторі розглянемо типову схему напівмостового послідовного LC резонансного перетворювача, що зображено рисунок 2.6.

Спроби підвищити щільність потужності імпульсних джерел живлення обмежуються розмірами пасивних компонентів. Підвищення частоти роботи дозволяє істотно зменшити габарити таких елементів, як трансформатори та фільтри, проте втрати на перемикання ставали головною перешкодою для роботи на високих частотах [11].

Щоб знизити ці втрати та забезпечити ефективну роботу на високих частотах, були розроблені методи резонансного перемикання. У таких схемах

потужність обробляється синусоїдально, а перемикаючі пристрої здійснюють "м’яке" комутацію, що дає змогу значно зменшити втрати на перемикання та рівень шуму. М’якою комутацією ми називаємо такий процес перемикання стану силових ключів схеми при якому під час перехідного процесу через елемент не протікають хоч скільки б значущі струми [12].

Серед різних типів резонансних перетворювачів найпростішим і найпоширенішим є послідовний резонансний перетворювач LC, у якому ланцюг навантаження з’єднаний послідовно з резонансним контуром LC, як показано на рисунку 2.7.

У такій схемі резонансна мережа разом із навантаженням утворюють дільник напруги. При зміні частоти збуджувальної напруги V_d змінюється опір резонансного контуру, тому вхідна напруга розподіляється між цим опором і еквівалентним опором навантаження [9].

Оскільки схема працює як дільник напруги, коефіцієнт підсилення постійного струму у послідовному LC-перетворювачі завжди менший за 1.

У режимі малого навантаження імпеданс навантаження стає значно більшим за імпеданс резонансного контуру, тому майже вся вхідна напруга припадає на навантаження, що ускладнює регулювання потужності при низькому рівні споживання [13].

Теоретично, щоб підтримувати регулювання вихідної потужності без навантаження, частота повинна бути нескінченно великою.

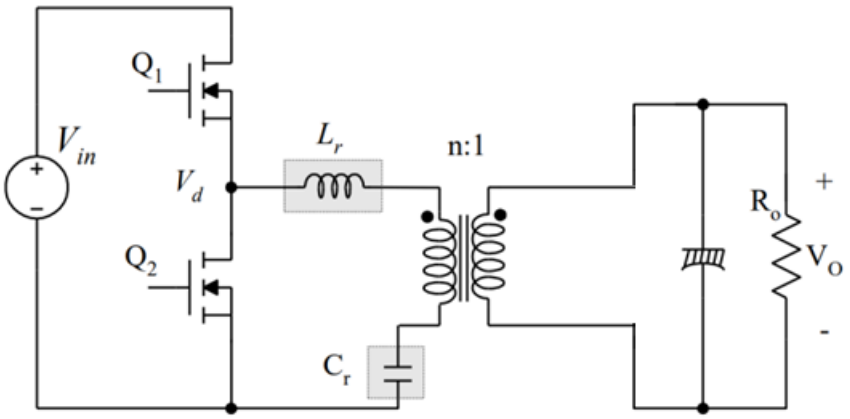


Рисунок 2.7 – Принципова схема напівмостового послідовного LC резонансного перетворювача [9]

Щоб усунути недоліки послідовних резонансних перетворювачів, було запропоновано резонансний перетворювач типу LLC.

Цей перетворювач є модифікованою версією послідовного LC-резонансного перетворювача, у якій на первинній обмотці трансформатора додано шунтувальний індуктор, як показано на рисунку 2.8.

Під час першого представлення ця топологія не отримала широкого визнання, оскільки її принцип роботи здавався суперечливим — підвищення циркуляційного струму в первинній обмотці за рахунок шунтуючого індуктора здавалося неефективним [9].

Однак згодом було доведено, що LLC-перетворювач може забезпечувати високу ефективність, особливо в системах із великою вхідною напругою, де втрати на перемикання значно переважають над втратами на провідність.

У більшості практичних конструкцій шунтувальний індуктор реалізують, використовуючи індуктивність намагнічування самого трансформатора.

Принципова схема резонансного перетворювача LLC майже не відрізняється від послідовного LC-перетворювача — основна різниця полягає лише у величині індуктивності намагнічування [14].

У послідовному резонансному перетворювачі індуктивність намагнічування є значно більшою, ніж резонансний індуктор L_r, тоді як у LLC-перетворювачі вона зазвичай становить лише у 3–8 разів більше за L_r [9].

Такий показник досягається за рахунок створення повітряного зазору в магнітопроводі трансформатора.

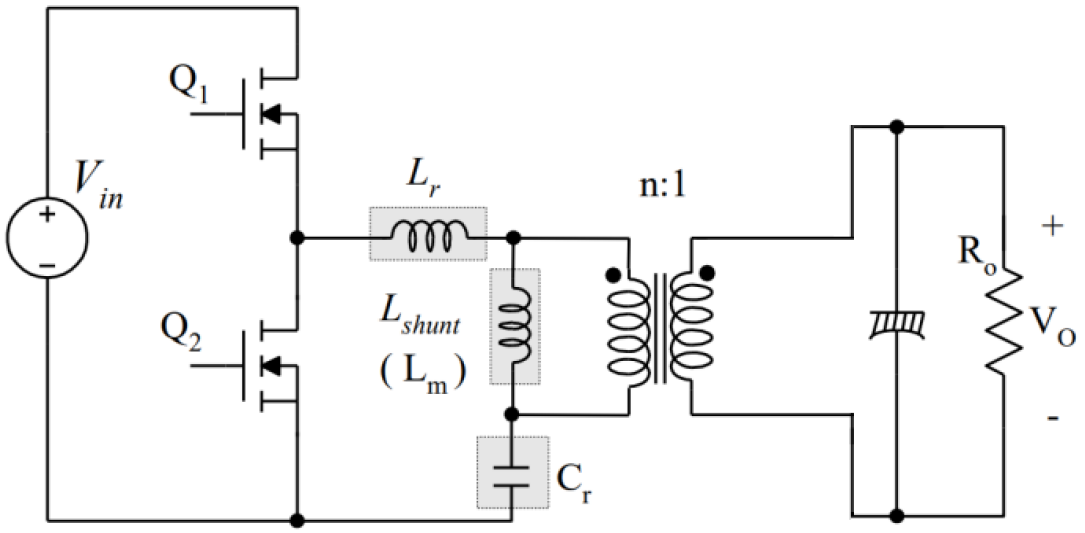


Рисунок 2.8 – Принципова схема напівмостового LLC резонансного перетворювача [9]

Резонансний перетворювач LLC має низку переваг порівняно з послідовним резонансним перетворювачем. Він здатний забезпечувати стабільне регулювання вихідної напруги у широкому діапазоні змін навантаження та вхідної напруги, при цьому частота перемикання змінюється незначно [15].

Крім того, такий перетворювач може здійснювати перемикання при нульовій (м’яке перемикання) напрузі у всьому робочому діапазоні.

Для досягнення м’якого перемикання ефективно використовуються усі паразитні елементи схеми — зокрема, ємності переходів напівпровідникових приладів, а також індуктивність розсіювання і індуктивність намагнічування трансформатора.

На рисунку 2.9 зображено принципову схему підключення та керування силових ключів інвертора. В даному випадку зображені біполярні транзистори, але в загальному випадку на їх місці можливе використання біполярних транзисторів типу MOSFET або IGBT.

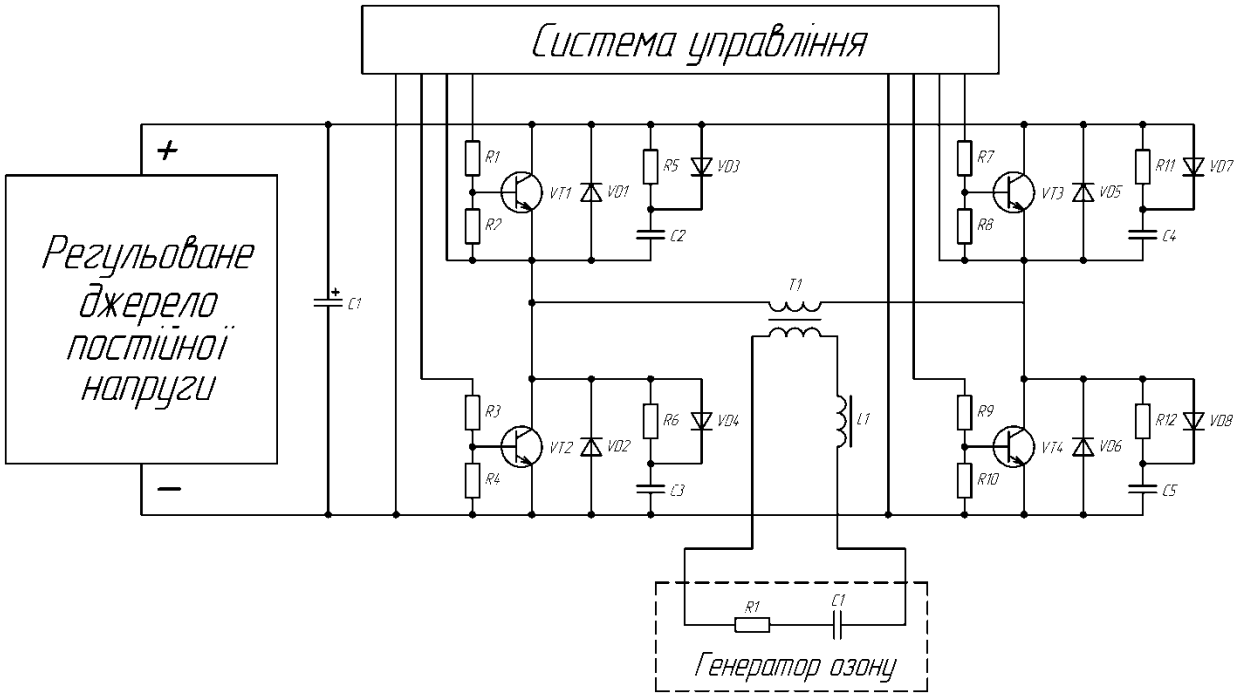


Рисунок 2.9 – Принципова схема інвертора

Висновки до розділу 2

В розділі були досліджені електромагнітні процеси у інверторах ведених мережею, з дослідження стало зрозуміло, що інвертори ведені мережею не відповідають вимогам до живлення запропонованого озонатора.

Було досліджено автономні інвертори, в тому числі і резонансні, з дослідження стало зрозуміло, що найбільш ефективним варіантом буде використання резонансного інвертора, як найбільш ефективним варіантом виконання системи живлення та наведено принципову схему типового інвертора.

В нашому випадку, при використанні резонансного інвертора для живлення озонатора, виникає складність роботи перетворювача пов’язана з типом навантаження – активно-ємнісним та дуже неоднорідним від одного озонатора до іншого. Відмінність характеристик електричного навантаження розрядної трубки сильно впливають на резонансний контур інвертора, що призводить до необхідності додаткового налаштування кожного резонансного інвертора індивідуально до кожного нового озонатора.

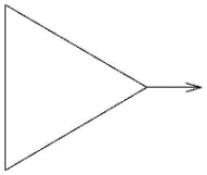
3 СИНТЕЗ ВІЗУАЛЬНО-БЛОЧНОЇ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ

Створення будь-якої візуально-блочної моделі починається з побудови структури енергетичного тракту (СЕТ).

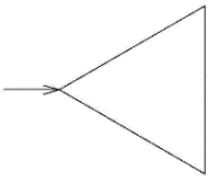
Структура енергетичного тракту - це підхід до декомпозиції системи, в якому електротехнічний комплекс представляється не як взаємопов'язана сукупність агрегатів (пристроїв), а як енергетичний тракт.

Елементами даної структури виступають функціональні вузли що до енергії, що передається через комплекс.

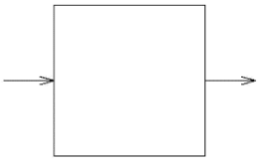
Бібліотека СЕТ складається з шести стандартних елементів [16]:



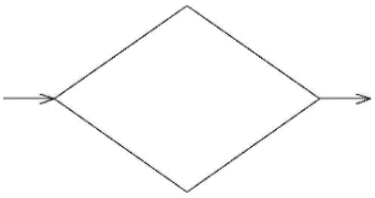
- джерело енергії;



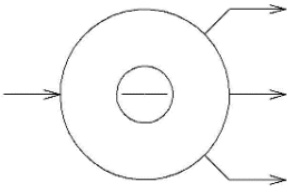
- приймач енергії;



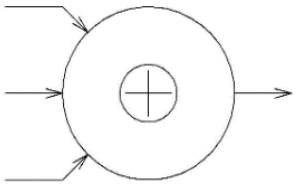
- перетворювач енергії;



- накопичувач енергії;



- розподільник енергії;



- консолідатор енергії.

Електротехнічний комплекс представляється як енергетичний об'єкт, через який проходить потік енергії. Тому обов'язковими елементами цієї структури завжди є джерело та приймач енергії. Джерело енергії – це елемент енергетичного тракту, який перетворює потік енергії, що надходить із зовнішнього середовища, на потік енергії всередині системи. Аналогічно, приймач енергії перетворює потоки енергії всередині електротехнічного комплексу у потоки енергії, що виходять із системи в зовнішнє середовище. Обидва ці елементи виступають у ролі посередника між електротехнічним комплексом та зовнішнім середовищем. Інші елементи можуть входити в систему, так і відсутні [2]. СЕТ озонатора наведено на рис 3.1.

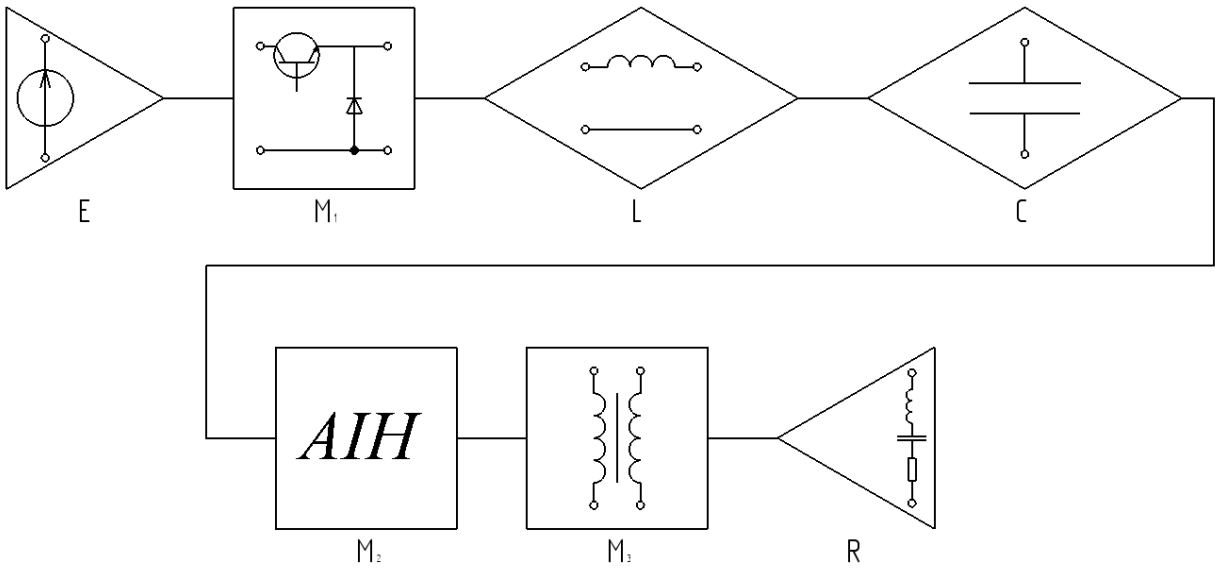


Рисунок 3.1 – СЕТ озонатора

Структура енергетичного тракту озонатора складається з п’яти вузлів: E, M_1, C, M_2, R.

Вузол E – це джерело постійної напруги.

Вузол M_1 – імпульсний перетворювач постійної напруги першого роду.

Вузол L – це накопичувач енергії у вигляді індуктивності.

Вузол C – це накопичувач енергії у вигляді ємності.

Вузол M_2 – це автономний інвертор напруги.

Вузол M_3 – це трансформатор.

Вузол R – це індуктивне, ємкісне та активне навантаження у ролі приймача енергії.

На наступному етапі елементи схеми енергетичного тракту замінюються відповідними елементами з бібліотеки елементів візуально-блокової моделі (ВБМ) (рис. 3.2). Елементи ВБМ розміщуються у тих самих позиціях, як і елементи СЕТ. Після розміщення елементів ВБМ проводиться їхнє з'єднання, показане на рис. 3.2 у вигляді спрямованих відрізків. Спочатку вводяться прямі причинно-наслідкові зв'язки, а потім замикаються зворотні зв'язки.

Візуально-блочна математична модель озонатора представлено на рисунку 3.2.

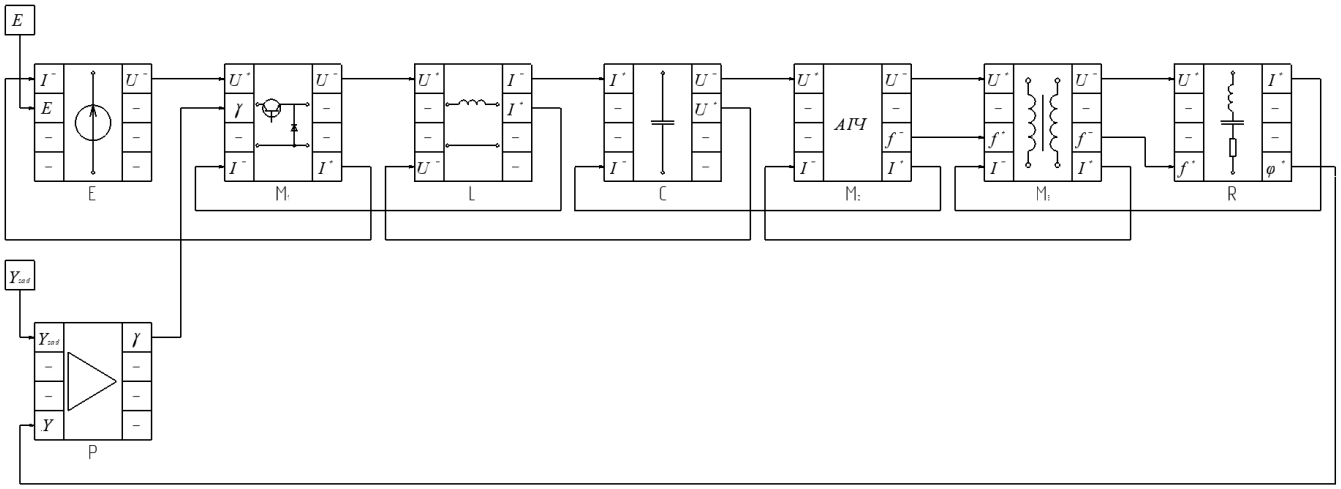


Рисунок 3.2 – Візуально-блочна математична модель озонатора

У нашому випадку модель залежить від двох вхідних параметрів:

- вхідної напруги E;
- заданого значення пропорційного регулятора Y_{zad}.

На відміну від СЕТ на візуально-блочній математичній моделі озонатора присутній ще один компонент P. Це пропорційний регулятор, що формує сигнал керування для компонента M_1.

3.1 Бібліотека елементів візуально-блочної моделі

Модель кожної підсистеми (вузла) будується у вигляді блок-схеми, шляхом стикування відповідних входів та виходів ескізів. Ескізи відображають локальні причино-наслідкові зв'язки всередині системи.

Для моделювання використовується не диференціальна, а інтегральна форма диференціального рівняння.

Математична модель джерела постійної напруги приведено на рис. 3.3.

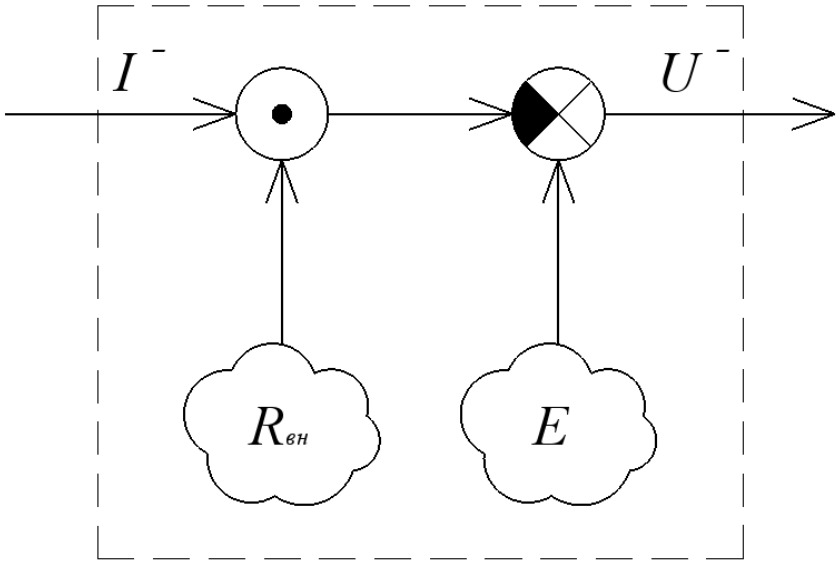


Рисунок 3.3 – Математична модель джерела постійної напруги

Параметр E визначає величину вихідної напруги джерела живлення, а параметр $R_{вн}$ – внутрішній опір, який визначає нахил вольт амперної характеристики джерела постійної напруги. Вхідною величиною є струм на виході I^-. Вихідною величиною є напруга на виході U^-.

Для побудови математичної моделі джерела постійної напруги використовується наступне рівняння:

$$U^- = E - I^- \cdot R_{\text{вн}}, \tag{3.1}$$

Математична модель імпульсного перетворювача постійної напруги першого роду приведено на рисунку 3.4.

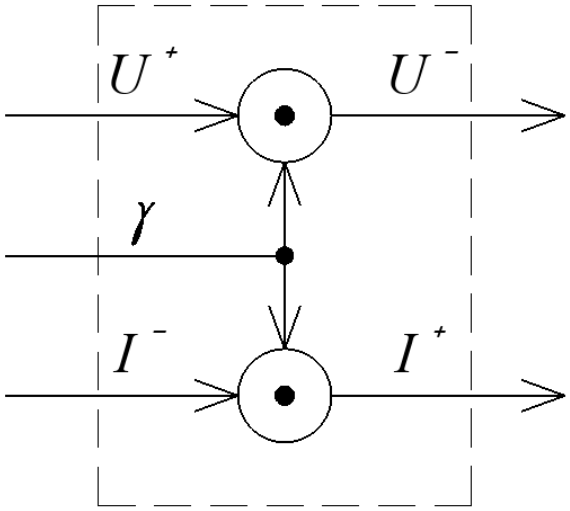


Рисунок 3.4 – Математична модель імпульсного перетворювача постійної напруги першого роду

Вхідними величинами є напруга U^+, струм I^- та ступінь заповнення імпульсного перетворювача γ. Вихідними величинами є напруга U^- та струм I^+.

Для побудови моделі імпульсного перетворювача напруги першого роду використовується наступні рівняння:

$$U^- = U^+ \cdot \gamma, \tag{3.2}$$

$$I^+ = I^- \cdot \gamma, \tag{3.3}$$

Математична модель умовного індуктивного накопичувача приведено на рисунку 3.5.

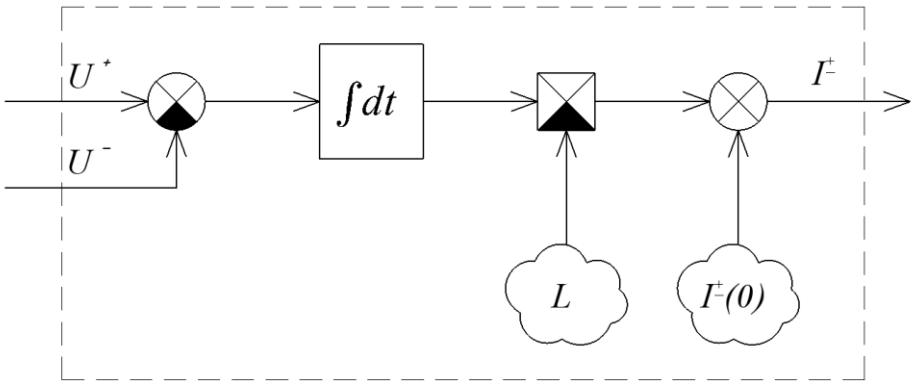


Рисунок 3.5 – Математична модель умовної індуктивного накопичувача

Вхідними величинами є напруга U^+ та напруга U^-. Вихідними величинами є струм $I^{\pm}$. Модель представлена в інтегральній формі з урахуванням початкового струму $I^{\pm}(0)$ на індуктивності L.

Для побудови математичної моделі індуктивного накопичувача використовуємо наступні рівняння, які перетворене з диференційної в інтегральну форму:

$$L\frac{dI}{dt} = U^+ - U^-, \tag{3.4}$$

$$\frac{dI}{dt} = \frac{1}{L}(U^+ - U^-),$$

$$dI = \frac{1}{L}(U^+ - U^-)dt,$$

$$\int dI = \int \frac{1}{L}(U^+ - U^-)dt,$$

$$I = \frac{1}{L}\int_0^T (U^+ - U^-)\,dt + I^{\pm}_{(0)}, \tag{3.5}$$

Математична модель умовного ємнісного накопичувача приведено на рисунку 3.6.

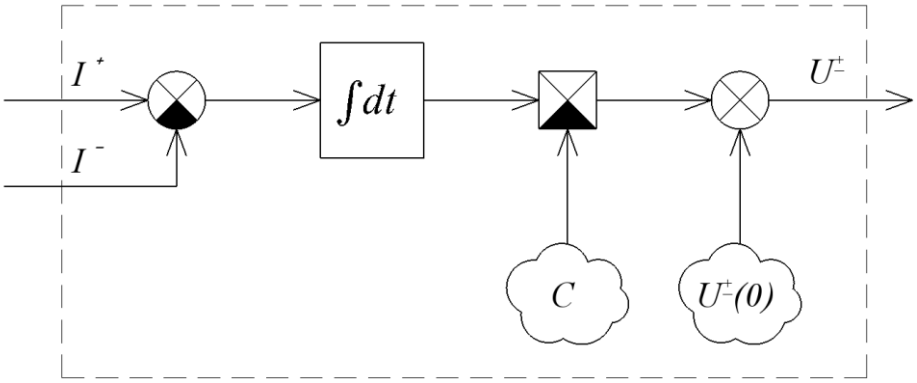


Рисунок 3.6 – Математична модель умовного ємнісного накопичувача

Вхідними величинами є струм I^+ та струм I^-. Вихідними величинами є напруга $U^{\pm}$. Модель представлена в інтегральній формі з урахуванням початкової напруги $U^{\pm}(0)$ на ємності С.

Для побудови математичної моделі ємнісного накопичувача використовуємо наступні рівняння, які перетворені з диференційної в інтегральну форму:

$$C\frac{dI}{dt} = I^+ - I^-, \tag{3.6}$$

$$\frac{dU}{dt} = \frac{1}{C}(I^+ - I^-),$$

$$dU = \frac{1}{C}(I^+ - I^-)dt,$$

$$\int dU = \int \frac{1}{C}(I^+ - I^-)dt,$$

$$I = \frac{1}{C}\int_0^T (I^+ - I^-)\,dt + U^{\pm}_{(0)}, \tag{3.7}$$

Математична модель автономного інвертора напруги приведено на рисунку 3.7.

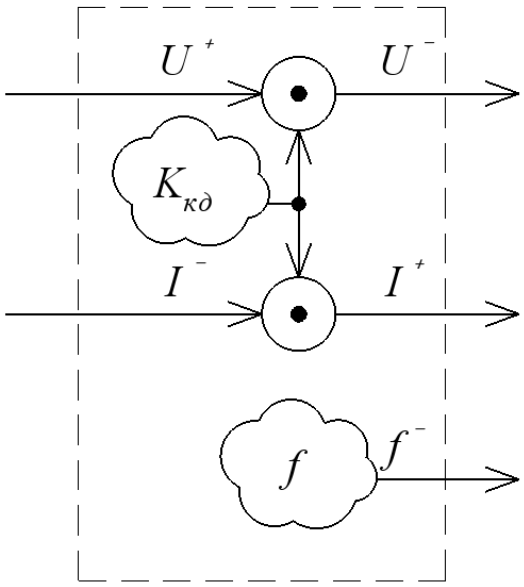


Рисунок 3.7 – Математична модель умовного автономного інвертора напруги.

Вхідними величинами є напруга U^+ та струм I^-. Вихідними величинами є напруга U^-, струм I^+ та частота f^-. Модель представлена в інтегральній формі з урахуванням ККД інвертора $K_{кд}$.

Для побудови математичної моделі автономного інвертора напруги використовуємо наступні рівняння:

$$U^- = U^+ \cdot K_{кд}, \tag{3.8}$$

$$I^+ = I^- \cdot K_{кд}, \tag{3.9}$$

Математична модель трансформатора приведено на рисунку 3.8.

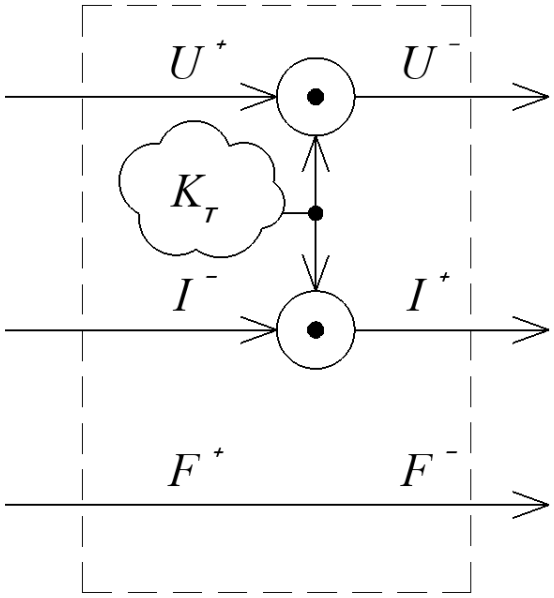


Рисунок 3.8 – Математична модель умовного трансформатора

Вхідними величинами є напруга U^+, струм I^- та частота F^+. Вихідними величинами є напруга U^-, струм I^+ та частота F^-. Модель представлена в інтегральній формі з урахуванням коефіцієнта трансформації $K_т$.

Для побудови математичної моделі ємнісного накопичувача використовуємо наступні рівняння:

$$U^- = U^+ \cdot K_т, \tag{3.10}$$

$$I^+ = I^- \cdot K_т, \tag{3.11}$$

$$F^+ = F^-, \tag{3.12}$$

Математична модель індуктивного, ємнісного та активного навантаження у ролі приймача енергії приведено на рисунку 3.9.

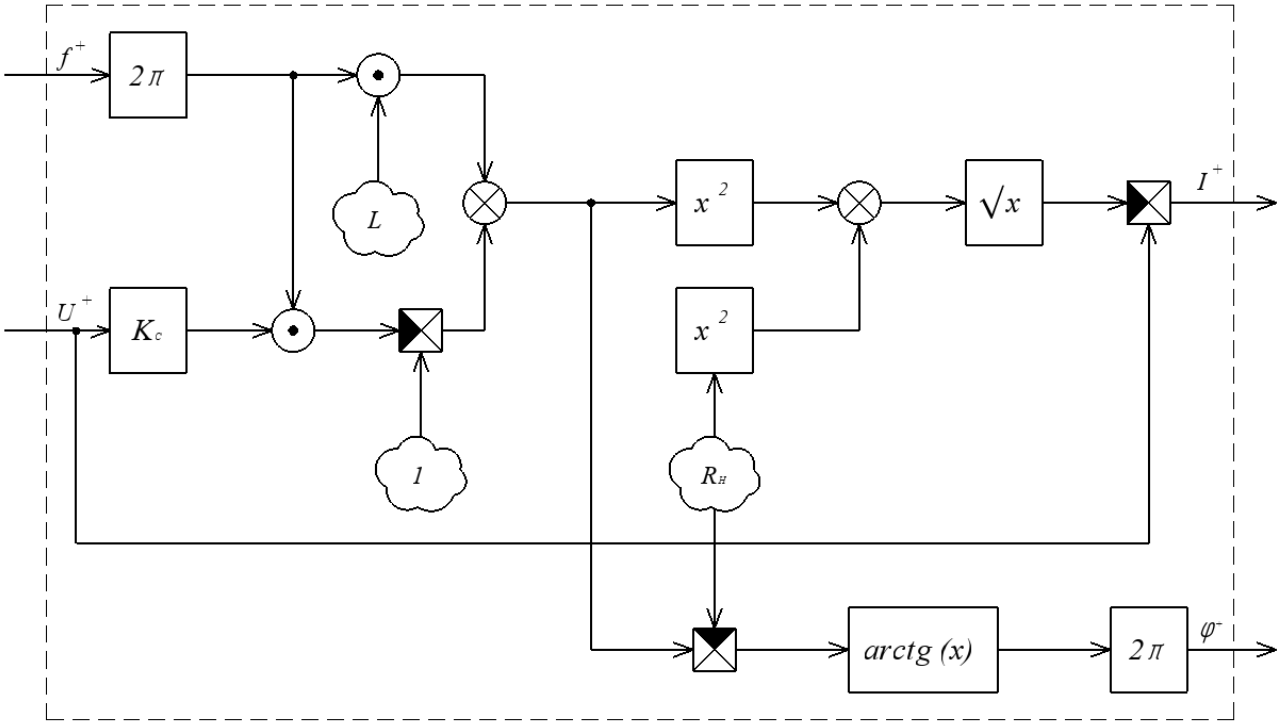


Рисунок 3.9 – Математична модель індуктивного, ємнісного та активного навантаження у ролі приймача енергії

Вхідними величинами є напруга U^+ та частота f^+. Вихідними величинами є струм I^+ та кут φ^-.

Для побудови математичної моделі ємнісного накопичувача використовуємо наступні рівняння:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f, \tag{3.13}$$

$$X_L = \omega \cdot L, \tag{3.14}$$

Де L – індуктивність навантаження.

$$\mathrm{C} = U^+ \cdot K_C, \tag{3.15}$$

де K_C – коефіцієнт нелінійності ємності навантаження.

$$X_C = \frac{1}{C \cdot \omega}, \tag{3.16}$$

$$Z = \sqrt{R^2{}_н + X_L - X_C}, \tag{3.17}$$

де $R_н$ – активний опір навантаження.

$$I^- = \frac{U^+}{Z}, \tag{3.18}$$

$$\varphi = arctg \frac{(X_L - X_C)}{R_н}, \tag{3.19}$$

$$\varphi^+ = \varphi \frac{360}{2 \cdot \pi}, \tag{3.20}$$

Математична модель пропорційного регулятора представлена на рисунку 3.10.

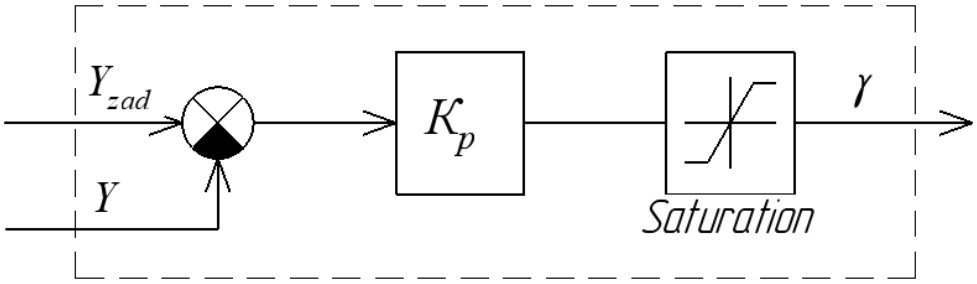


Рисунок 3.10 – Математична модель пропорційного регулятора

Вхідними величинами є Y (кут φ у градусах) та задана величина Y_{zad}. Вихідною величиною є значення γ.

Для побудови математичної моделі пропорційного регулятора використовуємо наступні рівняння:

$$\gamma = K_р(Y_{zad} - Y), \tag{3.21}$$

де $K_р$ – регулювальний коефіцієнт; з умовою, що $\gamma \in [0;1]$.

3.2 Аналіз результатів моделювання

Перевірка адекватності математичної моделі системи живлення озонатора було проведено в програмі Matlab Simulink. Реалізація математичної моделі приведена у кресленні ЕІСПЗ МР.202501.00.00.00.00.Д2.

Перевірка адекватності моделі проводилась з наступними початковими параметрами системи живлення:

1. Внутрішній опір джерела живлення $R_{вн}$ = 1 Ом;
2. Діюче значення напруги живлення E = 220 В;
3. Індуктивність резонансного контуру L = 1 Гн;
4. Ємність резонансного контуру C = 1 Ф;
5. Коефіцієнт корисної дії автономного інвертора напруги $К_{кд}$ = 0,9;
6. Коефіцієнт трансформації $К_т$ = 100;
7. Частота на виході інвертора f = 100 кГц;
8. Регулювальний коефіцієнт $К_р$ = 10000.

Значення індуктивності та ємності резонансного контуру під час перевірки були навмисно встановлені значно більшими за реальні з метою отримання вихідну характеристику затягнуту у часі, щоб більш наочно побачити процес стабілізації. Збільшення часу видно з рівняння:

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}, \quad (3.22)$$

Перевірка адекватності моделі проводилась з наступними параметрами навантаження:

1. Індуктивність навантаження $L_н$ = 550 нГн;
2. Коефіцієнт нелінійності ємності навантаження $К_с$ = 0,00001;
3. Активна складова навантаження $R_н$ = 100 Ом.

На рисунку 3.11 приведено графік відношення кута φ(t) під час процесу стабілізації системи на резонансній частоті.

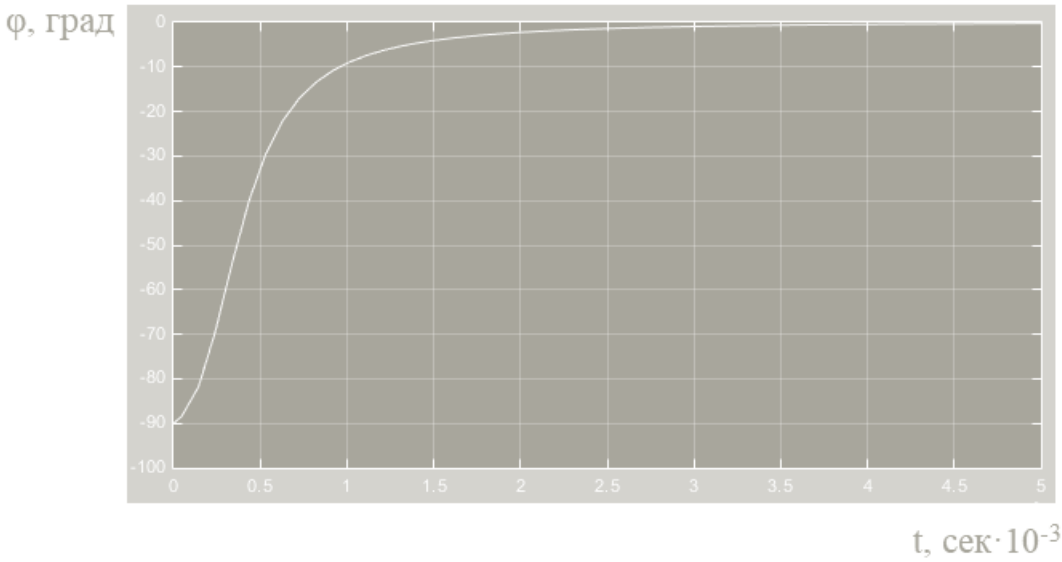


Рисунок 3.11 – Графік відношення φ(t) №1

Як ми бачимо на рисунку 3.11 кут φ на початку має значення -90^0, що відповідає чисто ємнісній реактивній складовій системи, але за $5 \cdot 10^{-3}$ секунди досліджувана система змогла за допомогою кута γ, з блоку Р (див. рис. 3.2), виправити значення кута φ до 0^0. Це каже нам про те, що система зворотного зв'язку працює коректно.

Проведемо перевірку з іншими параметрами навантаження, щоб підтвердити стабільність системи.

Перевірка адекватності моделі проводилась з наступними параметрами навантаження:

1. Індуктивність навантаження $L_н$ = 1 мкГн;
2. Коефіцієнт нелінійності ємності навантаження $K_с$ = 0,00005;
3. Активна складова навантаження $R_н$ = 100 Ом.

Результати зображені на рисунку 3.12.

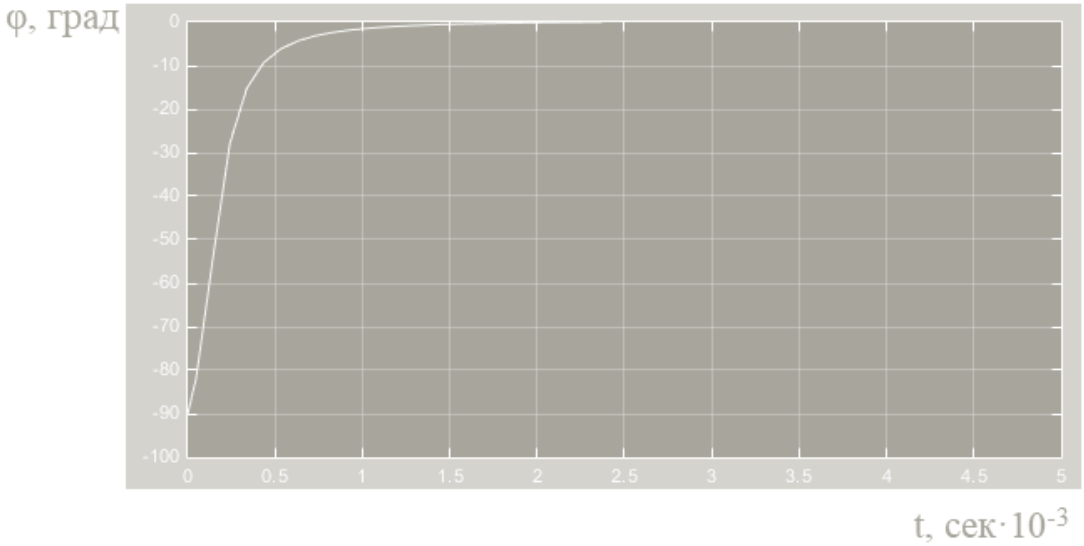


Рисунок 3.12 – Графік відношення φ(t) №2

Проведемо перевірку з іншими параметрами навантаження, щоб підтвердити стабільність системи.

Перевірка адекватності моделі проводилась з наступними параметрами навантаження:

1. Індуктивність навантаження $L_н$ = 100 нГн;
2. Коефіцієнт нелінійності ємності навантаження K_c = 0,0000005;
3. Активна складова навантаження $R_н$ = 100 Ом.

Результати зображені на рисунку 3.13.

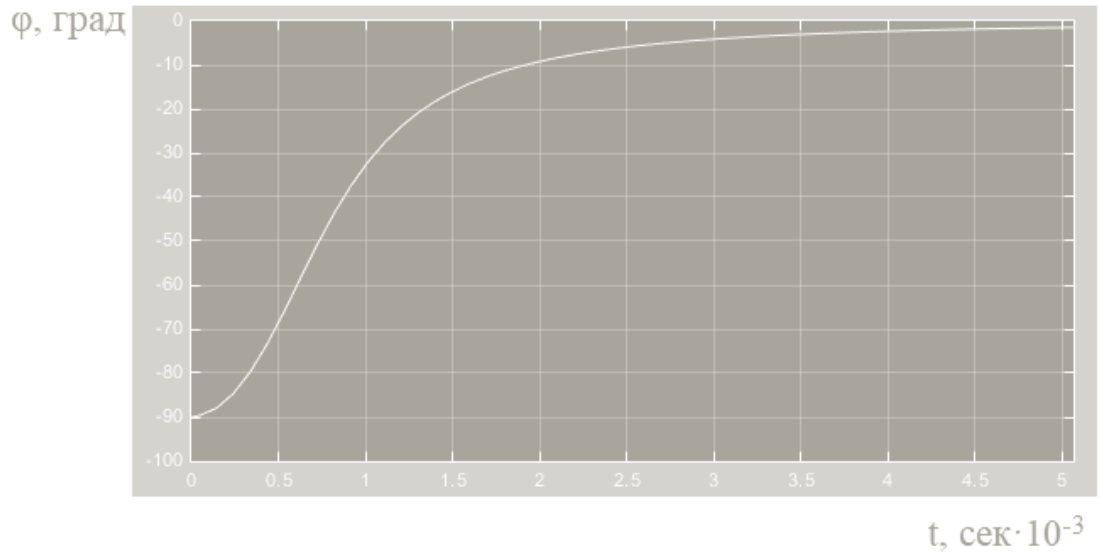


Рисунок 3.13 – Графік відношення φ(t) №3

Висновки до розділу 3

В розділі було запропоновано принципово новий спосіб регулювання резонансного контуру. В класичному варіанті розраховується та виконується підбір індуктивності та ємності резонансного контуру. Була запропоновано використати змінну та нелінійну властивість конденсатора, ця властивість зумовлена зміною ємності конденсатора в залежності від прикладеного до нього напруги, як результат отримуємо змінення параметрів резонансного контуру. На основі запропонованої схеми виконання системи живлення було створено СЕТ, візуально-блочну модель та бібліотеку елементів озонатора.

Дослідження працездатності системи було проведено в програмі Matlab Simulink. Можна констатувати, що створена модель стабільно компенсує зміни у навантаженні в широкому діапазоні значень реактивної та активної складової. Виконує свою функцію підстроювання резонансного контуру задля забезпечення оптимального режиму роботи системи живлення озонатора. Математична модель має високий рівень достовірності.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

В Україні охорона праці і техніка безпеки забезпечуються прийнятими основними нормативними документами такими, як ПУЕ-2017 – Правила улаштування електроустановок, НПАОП 40.1-1.01-97 - Правила безпечної експлуатації електроустановок, Закон України "Про охорону праці" від 01.01.2004р. №229-1У і так далі.

4.1 Розгляд основних положень з питань охорони праці

4.1.1. Загальні положення [17]

Інструкція з охорони праці (далі – інструкція) розроблена згідно з вимогами законодавства України і встановлює правила виконання робіт і поведінки працівника на території підприємства, у виробничих та службових приміщеннях, та на робочому місці відповідно до державних, міжгалузевих і галузевих нормативних актів про охорону праці.

Дія інструкції поширюється на працівників, які працюють в офісі (далі – працівник):

Працівник зобов’язаний знати і виконувати вимоги нормативних актів про охорону праці, правила поводження з машинами, механізмами, устаткуваннями та іншими засобами виробництва, користуватися засобами колективного та індивідуального захисту.

Залежно від конкретних умов організації виробничого процесу, а також у зв’язку з допущеними аваріями і нещасними випадками, до інструкції можуть вноситися зміни і доповнення, які викладаються на окремому аркуші за затвердженням директора.

До виконання робіт, які проводяться, допускаються особи, які:

- пройшли навчання інструктаж з питань охорони праці, надання першої допомоги потерпілим від нещасних випадків, про правила поведінки при виникненні аварій.

Працівник зобов’язаний:

1) вміти користуватися засобами колективного та індивідуального захисту;

2) дотримуватися зобов’язань з охорони праці, передбачених колективним договором (угодою, трудовим договором) та правилами внутрішнього трудового розпорядку підприємства;

3) своєчасно починати та закінчувати роботу, дотримуватися часу обідньої перерви;

4) не виконувати роботи, які не передбачені посадовою інструкцією;

5) зобов’язаний дбати про особисту безпеку і здоров’я, а також про безпеку і здоров’я оточуючих людей в процесі виконання будь – яких робіт чи під час перебування на території підприємства.

В процесі роботи на працівника можливий вплив небезпечних і шкідливих виробничих чинників:

1) рухомих автомобілів на території підприємства;

2) рухомих частин технологічного обладнання, виробів, заготівель, матеріалів, що пересуваються, рухаються;

3) підвищеної або зниженої температура повітря робочої зони;

4) підвищеної або зниженої температури поверхні обладнання, матеріалів;

5) підвищеного рівня шуму, вібрації на робочому місці;

6) підвищеної або заниженої вологості повітря;

7) підвищеної або заниженої рухомості повітря;

8) недостатнього освітлення робочої зони;

9) напруження зору;

10) підвищений рівень статичної електрики;

11) емоційні перевантаження;

12) можливість поразки електричним струмом;

13) підвищений рівень електромагнітних випромінювань;

14) підвищений рівень іонізуючих випромінювань;

15) підвищена напруженість електростатичного поля;

16) підвищена чи понижена іонізація повітря;

17) підвищена яскравість світла;

18) пряма і відбита блискітливість;

19) статичні перевантаження кістково-м’язового апарату та динамічні локальні перевантаження м’язів кистей рук;

20) розумове перенапруження;

21) монотонність праці.

Для працівників офісу не передбачено видачі та застосування спеціального одягу.

Під час виконання своїх обов’язків працівник повинен дотримуватися вимог санітарних норм та особистої гігієни:

1) під час роботи використовувати засоби індивідуального захисту (за потребою);

2) зберігати і приймати їжу тільки у відведених місцях;

3) після роботи вимити забруднені частини тіла.

4.1.2 Вимоги безпеки перед початком роботи

Ознайомитися з умовами, характером та обсягом робіт, що будуть виконуватися. Залишити в гардеробі вуличний одяг, особисті речі.

Підготовити робоче місце до роботи. Забрати з робочого місця предмети, що не будуть використовуватися у роботі. Не класти на комп’ютери та оргтехніку папір, книги, документи й інші предмети.

За для уникнення перевантаження мережі, не підключати комп’ютери та оргтехніку через трійники разом з іншими електроприладами.

Включити, при необхідності, штучне освітлення, настільний світильник.

Зовнішнім оглядом переконатися в справності сполучних проводів, штепсельних рознімань, шин заземлення й вимикачів, у надійності кріплення захисних кожухів і кришок блоків комп’ютерів та оргтехніки.

Перевірити відсутність пилу на екрані монітора й правильність установки паперу в прийомний лоток принтера. Не допускати забивання пилом і сторонніми предметами вентиляційних отворів для відводу тепла з блоків.

Відрегулювати висоту сидіння стільця. Відрегулювати положення екрана монітора щодо свого поля зору.

При виявленні несправностей обладнання та пристосувань, засобів колективного захисту, не приступайте до роботи з несправним обладнанням, повідомте свого безпосереднього керівника або іншу посадову особу. Не виконуйте самостійний ремонт.

4.1.3 Вимоги безпеки під час роботи

При включенні/відключенні комп’ютерів, оргтехніки та освітлення в електромережу, братися тільки за ізольовані частини штепселів та штепсельних колодок.

Дотримувати зазначену в інструкції з експлуатації послідовність включення блоків.

Щоб уникнути розрядів статичної електрики, не допускається доторкання до екрана монітора.

При введенні даних, редагуванні програм, читанні інформації з екрана, безперервна тривалість роботи перед екраном не повинна перевищувати 1 годину з наступними регламентованими перервами по 10 хвилин для відпочинку зору та виконуванню комплексу фізичних вправ, релаксаційної гімнастики й аутогенного тренування.

При включеному електроживленні комп’ютерів та оргтехніки:

1) не розкривати захисні кожухи й кришки блоків ПК, не робити регулювання й чищення внутрішніх деталей, не змінювати запобіжники;

2) не переключати сполучні шнури блоків;

3) не змінювати встановлену конфігурацію робочого місця, не переставляти комп’ютери та оргтехніку;

4) не робити вологе прибирання поверхонь комп’ютерів, моніторів та оргтехніки (прибирання робити спеціальними серветками).

На робочому місці:

1) не палити, не користуватися відкритим вогнем;

2) не зберігати легкозаймисті, вибухонебезпечні і хімічно-активні, що руйнують ізоляцію, речовини.

Дотримуватися:

1) чистоти і порядку на місці проведення робіт;

2) обережності при роботі, при пересуванні по приміщенню;

3) обережності та правил дорожнього руху на проїзних шляхах та території.

Паління дозволяється тільки у спеціально відведених для цього місцях.

При пересуванні по приміщенню, території та по сходах бути уважним і обережним. Особливо обережним бути під час дощу та після вологого прибирання.

Порядок повідомлення адміністрації про нещасний випадок:

1) про кожний нещасний випадок свідок, працівник, який його виявив або сам потерпілий повинні терміново повідомити безпосереднього керівника робіт, інженера з охорони праці чи іншу посадову особу і вжити заходів до подання необхідної допомоги;

2) зберегти до прибуття комісії з розслідування обставин на робочому місці та устаткування у такому стані, в якому вони були на момент події (якщо це не загрожує життю та здоров’ю інших працівників і не призведе до більш тяжких наслідків), а також вжити заходів до недопущення подібних випадків у ситуації, що склалася.

4.1.4 Вимоги безпеки після закінчення роботи

Закінчити працюючі програми, закрити всі каталоги, підготувати комп’ютер до вимикання.

Відключити ПК і місцеве електроосвітлення від мережі.

Упорядкувати робоче місце, забрати документи, що використовувалися.

Переконатися у відсутності пожежної небезпеки.

У разі виявлення пошкоджень та несправностей екранних пристроїв, периферійних пристроїв, засобів оргтехніки, меблів, приладів, електропроводки і інших кабелів, електророзеток, електровимикачів, світильників, кондиціонерів та іншого обладнання не включати устаткування, не приступати до роботи, повідомити про це керівництво.

4.1.5 Дії персоналу в аварійних ситуаціях

Ознаками аварійної ситуації на робочому місці є:

1) поява збоїв у роботі ПК, заїдання паперу в принтері, зникнення зображення на екрані монітора;

2) коротке замикання, іскріння, появи запаху горіння, підвищене нагрівання корпусу, штепсельних рознімань, сполучних проводів, зниження або зникнення напруги в мережі і т.п.

В аварійній ситуації необхідно:

1) роботу припинити, відключити від мережі комп’ютери та оргтехніку;

2) при загорянні використовувати вуглекислотний або порошковий вогнегасники;

3) ужити заходів по евакуації людей і наданню першої медичної допомоги постраждалим;

4) доповісти про те, що трапилося, керівникові;

5) при необхідності викликати швидку допомогу, пожежну команду.

Якщо виникла ситуація, що може призвести до аварії або нещасного випадку необхідно огородити небезпечну зону і не запускати в неї сторонніх осіб. Якщо є потерпілі надавати їм першу домедичну допомогу, при необхідності викликати швидку допомогу.

4.1.6 Надання першої домедичної допомоги

Надання першої домедичної допомоги при ураженні електричним струмом [17]

При ураженні електричним струмом необхідно негайно звільнити потерпілого від дії електричного струму, відключивши електроустановку від джерела живлення. При відсутності у потерпілого дихання і пульсу необхідно робити йому штучне дихання і непрямий масаж серця .

Перша домедична допомога при пораненні [17]

Для надання першої домедичної допомоги при пораненні необхідно розкрити індивідуальний пакет, накласти стерильний перев'язочний матеріал, що міститься у ньому на рану і зав'язати її бинтом. Особливо важливо застосовувати настойку йоду при забруднених ранах.

Перша допомога при переломах, вивихах, ударах [17]

При переломах і вивихах кінцівок необхідно пошкоджену кінцівку укріпити шиною, палицею, картоном.

При передбаченому переломі черепа необхідно прикласти до голови холодний предмет або зробити холодну примочку.

При переломі ребер, ознакою якого є біль при диханні, кашлю, чиханні, рухах, необхідно туго забинтувати груди чи стягнути їх рушником під час видиху.

Надання першої допомоги при опіках кислотами [17]

При попаданні кислоти на шкіру, ушкоджені ділянки необхідно ретельно промити водою на протязі 15-20 хв. після цього пошкоджену кислотою поверхню обмити 5%-ним розчино питної соди. При попаданні на слизову оболонку очей кислоти необхідно очі ретельно промити водою протягом 15-20 хв. Після цього промити 2%-ним розчином питної соди.

Надання першої допомоги при теплових опіках [17]

При опіках вогнем, парою, гарячими предметами ні в якому разі не можна відривати пузирі. При I ст. обпечене місце обробити ватою, змоченою етиловим спиртом. При опіках II ст. обпечене місце обробляють спиртовим,

3%-ним марганцевим розчином. При опіках III ст. накривають рану стерильною пов’язкою та викликають лікаря.

Перша допомога при кровотечі [17]

Для того щоб зупинити кровотечу, необхідно підняти поранену кінцівку вверх.

Кровоточиву рану закрити перев’язочним матеріалом, якщо кровотеча зупинилася, то не змінюючи накладеного матеріалу, поверх нього покласти ще одну подушечку з іншого пакета чи кусок вати і забинтувати поранене місце.

При сильній кровотечі, яку не можна зупинити пов’язкою, застосовується здавлювання кровоносних судин, які живлять поранену область, при допомозі згинання кінцівок в суглобах, а також пальцями, джгутом або закруткою; при великій кровотечі необхідно терміново викликати лікаря.

Дії під час пожежі.

У разі виникнення пожежі, негайно приступити до її гасіння. Вимкнути електроенергію. Пам’ятати, що палаючу електромережу, електроприлади слід гасити тільки вуглекислотними, порошковими вогнегасниками, піском. Організувати евакуацію людей та матеріальних цінностей з небезпечної зони. При необхідності викликати пожежну допомогу за тел. 101, організувати зустріч прибуваючих пожежних підрозділів.

4.2 Розрахунок пристрою заземлення

Розрахунок пристрою заземлення фактично зводиться до визначення параметрів самого заземлювача, оскільки вибір заземлювальних провідників у більшості випадків визначають вимоги до їхньої механічної міцності та стійкості проти корозії.

Згідно з ПУЕ, нормативний опір заземлення має становити 4 Ом. Планується облаштувати контур заземлення зовні будівлі, розмістивши

вертикальні електроди уздовж усього периметра. Як вертикальні заземлювачі застосовуються сталеві електроди діаметром 22 мм і довжиною 2,5 м, які заглиблюються у ґрунт так, щоб їх верхні кінці знаходилися на глибині 0,5 м від поверхні землі. До цих електродів приварюються горизонтальні провідники, виготовлені з тієї ж сталі.

Попередньо, враховуючи площу об’єкта 30×30 м, визначається схема розміщення електродів уздовж периметра протяжністю 120 м. Верхній шар ґрунту представлений кам’янистою глиною, а нижній — гравієм.

Параметри двошарового ґрунту, кліматичні коефіцієнти та інші вихідні дані, необхідні для проведення розрахунку, наведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1- Вихідні дані

Позначення	Найменування	Одиниці виміру	Зна-чення
R_i	Нормований опір розтікання струму в землю	Ом	4
ρ_1	Питомий опір верхнього слою ґрунту	Ом·м	120
ρ_2	Питомий опір нижнього слою ґрунту	Ом·м	700
d	Діаметр стержня	мм	22
L	Довжина вертикального заземлювача	м	2,6
H	Товщина верхнього слою ґрунту	м	1,8
$t_{\text{полоси}}$	Глибина закладення горизонтального заземлювача	м	0,5
t	Відстань від поверхні землі до середини заземлювача	м	1,75
k_1	Кліматичний коефіцієнт для вертикальних електродів	-	1,5
k_2	Кліматичний коефіцієнт для горизонтальних електродів	-	2,25
b	Ширина сталевої полоси	мм	60
$l_{\text{г}}$	Довжина горизонтального заземлювача	м	100

Питома розрахунковий коефіцієнт опору двошарового ґрунту визначаємо за формулою:

$$\rho = \frac{(\rho_1 \cdot \rho_2 \cdot L)}{(\rho_1(L - H + t_{\text{полоси}}) + \rho_2 \cdot (H - t_{\text{полоси}}))}, \quad (4.1)$$

$$\rho = \frac{(120 \cdot 700 \cdot 2{,}6)}{(120(2{,}6 - 1{,}8 + 0{,}5) + 700 \cdot (1{,}8 - 0{,}5))} = 204{,}9 \text{ Ом} \cdot \text{м},$$

Опір розтіканню одного вертикального електрода визначаємо за формулою:

$$r_B = \frac{0{,}366 \cdot k_1 \cdot \rho}{L} \cdot \left(\lg\left(\frac{2 \cdot L}{0{,}95 \cdot d}\right) + \frac{1}{2} \cdot \lg\left(\frac{4 \cdot t + L}{4 \cdot t - L}\right)\right), \quad (4.2)$$

$$r_B = \frac{0{,}366 \cdot 1{,}5 \cdot 204{,}9}{2{,}6} \cdot \left(\lg\left(\frac{2 \cdot 2{,}6 \cdot 1000}{0{,}95 \cdot 22}\right) + \frac{1}{2} \cdot \lg\left(\frac{4 \cdot 1{,}75 + 2{,}6}{4 \cdot 1{,}75 - 2{,}6}\right)\right) = 111 \text{ Ом},$$

Передбачувана кількість вертикальних заземлювачів визначаємо за формулою:

$$\eta_{\text{вик}} = \frac{r_B}{R_i \cdot \eta_B}, \quad (4.3)$$

де $\eta_B \approx 0{,}7$, - коефіцієнт використання вертикальних заземлювачів;

$$\eta_{\text{вик}} = \frac{111}{4 \cdot 0{,}7} = 40 \text{ шт.}$$

Таблиця 4.2 – Параметри вертикальних і горизонтальних заземлювачів

Позначення	Найменування	Одиниці виміру	Значення
η_B	Коефіцієнт використання вертикальних заземлювачів	-	0,7
$\eta_г$	Коефіцієнт використання горизонтальних заземлювачів	-	0,34
h	Відстань між заземлювачами	м	3

Опір горизонтального заземлювача визначимо за формулою:

$$r_г = \frac{0{,}366 \cdot k_2 \cdot \rho}{l_г \cdot \eta_г} \cdot \lg\left(\frac{2 \cdot l_г^2}{b \cdot t_{полоси}}\right), \quad (4.4)$$

$$r_г = \frac{0{,}366 \cdot 2{,}25 \cdot 204{,}9}{100 \cdot 0{,}34} \cdot \lg\left(\frac{2 \cdot (1000 \cdot 100^2)}{60 \cdot 0{,}5 \cdot 1000}\right) = 28{,}9 \text{ Ом},$$

Опір вертикальних заземлювачів R не повинно перевищувати значення визначається за формулою:

$$R = \frac{R_i \cdot r_г}{r_г - R_i}, \quad (4.5)$$

$$R = \frac{4 \cdot 28{,}9}{28{,}9 - 4} = 4{,}64 \text{ Ом},$$

З урахуванням повного опору вертикальних заземлювачів уточнене кількість вертикальних заземлювачів з урахуванням сполучної смуги визначається за формулою:

$$n = \frac{r_B}{R \cdot \eta_B}, \quad (4.6)$$

$$n = \frac{111}{4{,}64 \cdot 0{,}7} = 35 \text{ шт.}$$

Приймаються до установки 35 вертикальних заземлювачів, загальна довжина горизонтального заземлювача 100 м при середній відстані між вертикальними заземлювачами 2,9 м. Остаточне відстань між вертикальними заземлювачами уздовж сполучної смуги вказується на плані заземлювального пристрою.

Конструкція заземлюючого пристрою вказано на рисунку 4.1, а монтажні параметри одиночного заземлювача в двошаровому ґрунті на рисунку 4.2.

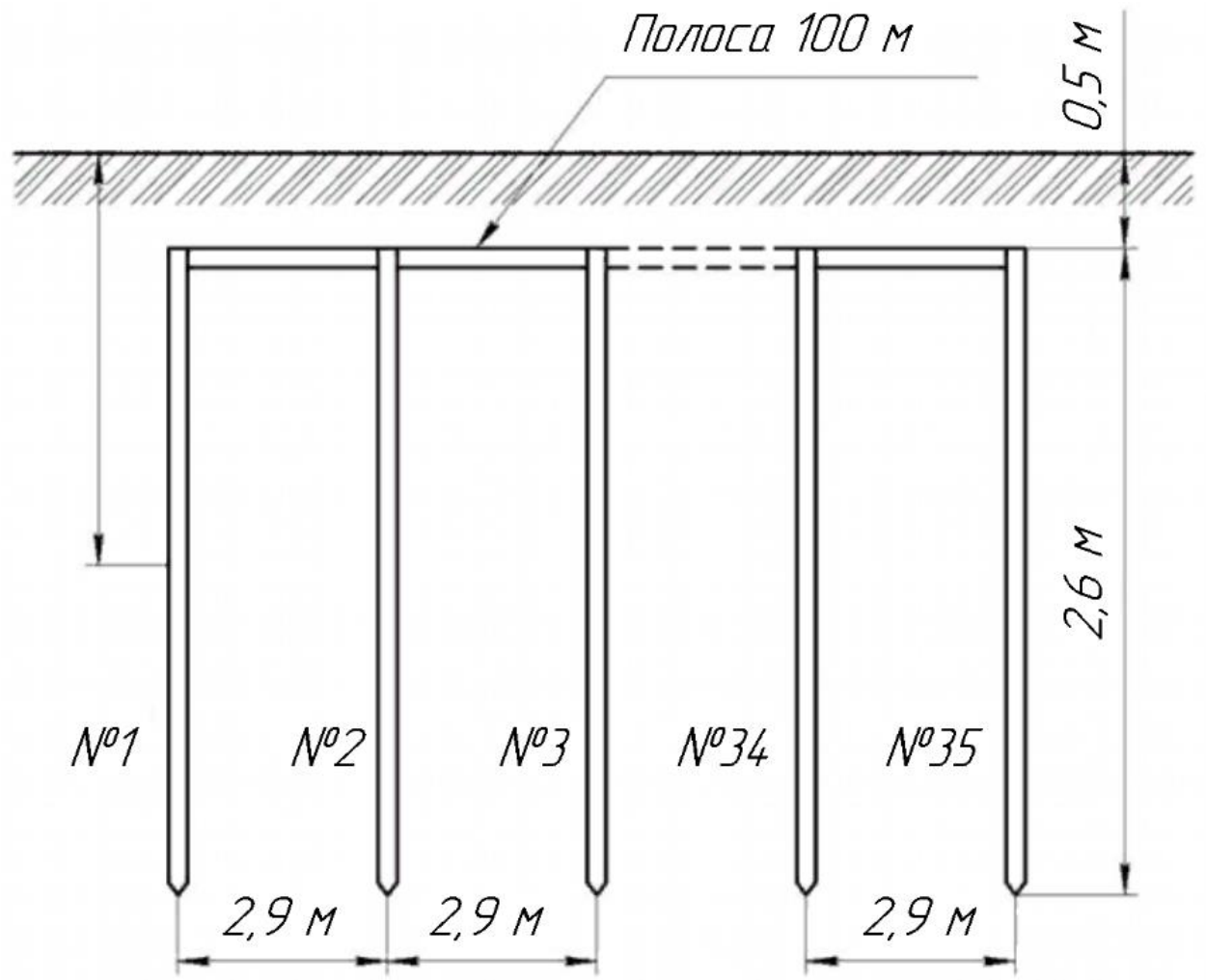


Рисунок 4.1 – Конструкція заземлювального пристрою

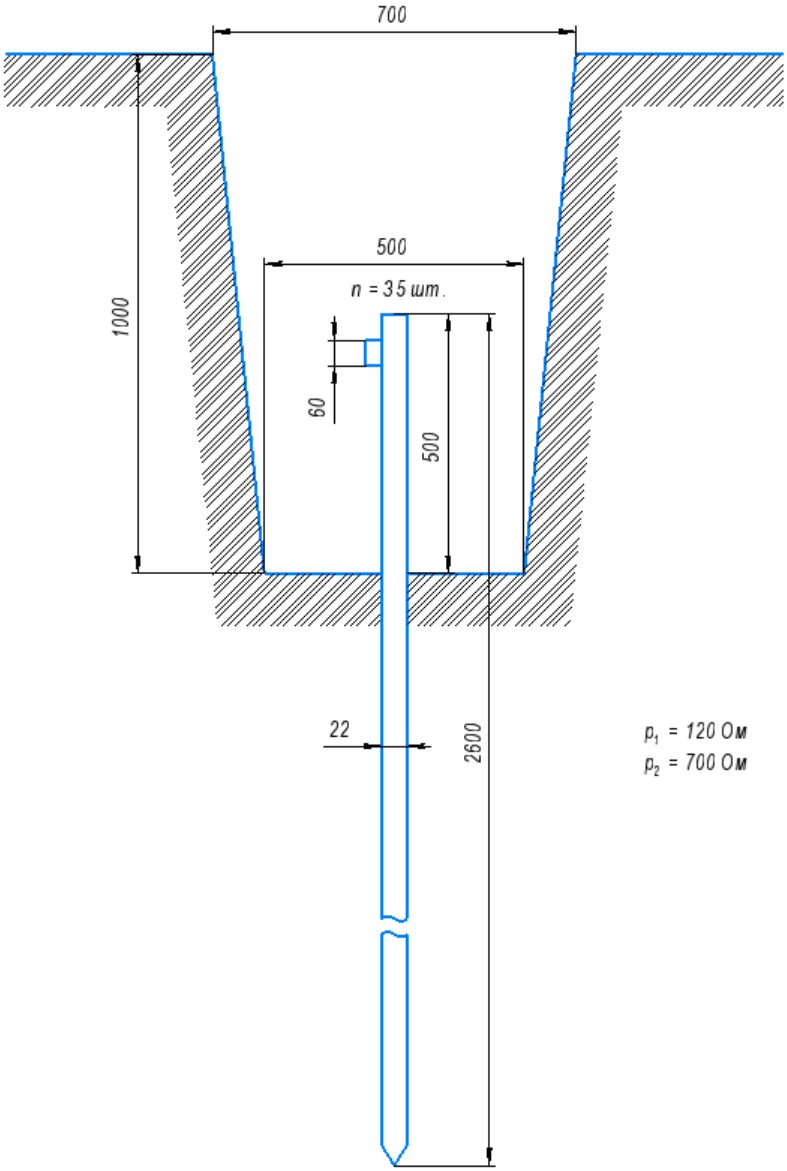


Рисунок 4.2 – Установка одиночного заземлювача в двошаровому гранті

Рекомендації по монтажу заземлюючого пристрою

Основні рекомендації по монтажу заземлюючого пристрою:

1. Опір заземлюючого пристрою, згідно з вимогами ПУЕ-2017, у будьякий час року має бути не більше 4 Ом.

2. По закінченню монтажу зробити вимір дійсного опору розтіканню струму заземлюючого пристрою. При необхідності збільшити кількість вертикальних і довжину горизонтального електродів. 76

3. Роботи по установці елементів заземлюючого пристрою виконати у відповідності з рисунком 4.14.

4. Вертикальний електрод - сталевий прут l = 2,5 м, d = 20 мм, кількість - 26 шт.

5. Горизонтальний електрод – сталева полоса l = 100 м, шириною = 50 мм, кількість - 1 шт..

6. Перед забиванням в землю один кінець вертикального електрода зрізати під клин (кут 60 градусів).

7. Відстань між вертикальними електродами - 4 м.

8. Глибина залягання горизонтального заземлювача - 0,5 м нижче рівня землі.

9. Всі з'єднання елементів заземлюючого пристрою виконати зварюванням внахлест.

10. Всі місця зварювальних з'єднань покрити бітумною мастикою в два шари.

Висновки до розділу 4

В розділі було розглянуто основні положення з питань охорони праці для офісних працівників, зазначено вимоги безпеки при виконанні робіт та в небезпечних умовах.

Було розраховано пристрій заземлення для зазначених умов та визначено конструкцію та кількість заземлювачів у кількості 35 штук. Зазначені рекомендації по монтажу заземлюючого пристрою.

5 ЕКОНОМІЧНА МОДЕЛЬ ПРОЕКТУ

Модель проекту будується на основі проекту «Дослідження електромагнітних процесів у високочастотному інверторі для живлення озонатору» [18].

Таблиця 5.1 – Формуляр проекту

Формуляр проекту	
Завдання	№ проекту_____*1*_____ Дата замовлення_*06.07.2025*_____ Назва проекту_ Дослідження електромагнітних процесів у високочастотному інверторі для живлення озонатору_____ Замовник ПІП___*Мовчан Володимир Леонідович*_____ Адреса____*м. Запоріжжя, вул. Тополина 33*_____ Контактна особа ПІП _____*Мовчан Володимир Леонідович*_____ Тел. і факс_____*0684482965*_____
Договірна ціна	Усього _____*50000*_____ грн. План оплати ___*попередня оплата - 50%*_____ Додаткові умови_____-_____
Строки	Початок _____*10.07.2025*_____кінець___0*5.12.2025*___ Проміжні строки_____-_____
Партнери	Кооперація_____-_____ Субпідрядники ___*фірма "Проміння"*_____ Завдання _____Розробка фізичної реалізації інвертора_____
Персонал	Керівник ___*Пацюк Л.В.*_____ Заступник_____*Куліков А.Н.*____ Співробітники_*Якіменко В.О., Козак М.С.*_____
Проект	Скорочена назва ____*"Інвертор"*_____ Цілі _____*Дослідження інвертора живлення озонатора*_____ Критичні строки 1. _____*05.12.2024*_____ 2. _____ 3. _____ Особливості та проблеми__*Проблема відсутності математичної моделі трансформатора інвертора живлення озонатора*_____

Таблиця 5.2 – Характеристика робіт за проектом

Характеристика робіт за проектом			
Код роботи	Назва чи зміст роботи	Безпосередньо попередня робота	Тривалість, діб
1.1.1	Аналіз використання та будови озонатора	-	3
1.1.2	Аналіз основних відомостей	-	10
1.1.3	Аналіз використання озону	-	5
1.1.4	Аналіз будови озонатора	-	4
1.2.1	Дослідження інверторів ведених мережею	1.1.4	5
1.2.2	Дослідження коефіцієнт потужності та ККД інвертора	1.1.4, 1.2.1	6
1.2.3	Дослідження автономних інверторів	1.1.4, 1.2.1, 1.2.2	5
1.2.4	Дослідження резонансного інвертора	1.1.4, 1.2.1, 1.2.2, 1.2.3	8
1.3.1	Синтез візуально-блочної математичної моделі	1.2.4	8
1.3.2	Бібліотека елементів візуально-блочної моделі	1.3.1	10
1.3.3	Аналіз результатів моделювання	1.3.1, 1.3.2	4
1.4.1	Охорона праці	1.3.3	4
1.4.2	Розгляд основних положень з питань охорони праці	1.3.3, 1.4.1	5
1.4.3	Розрахунок пристрою заземлення	1.3.3, 1.4.1, 1.4.2	3

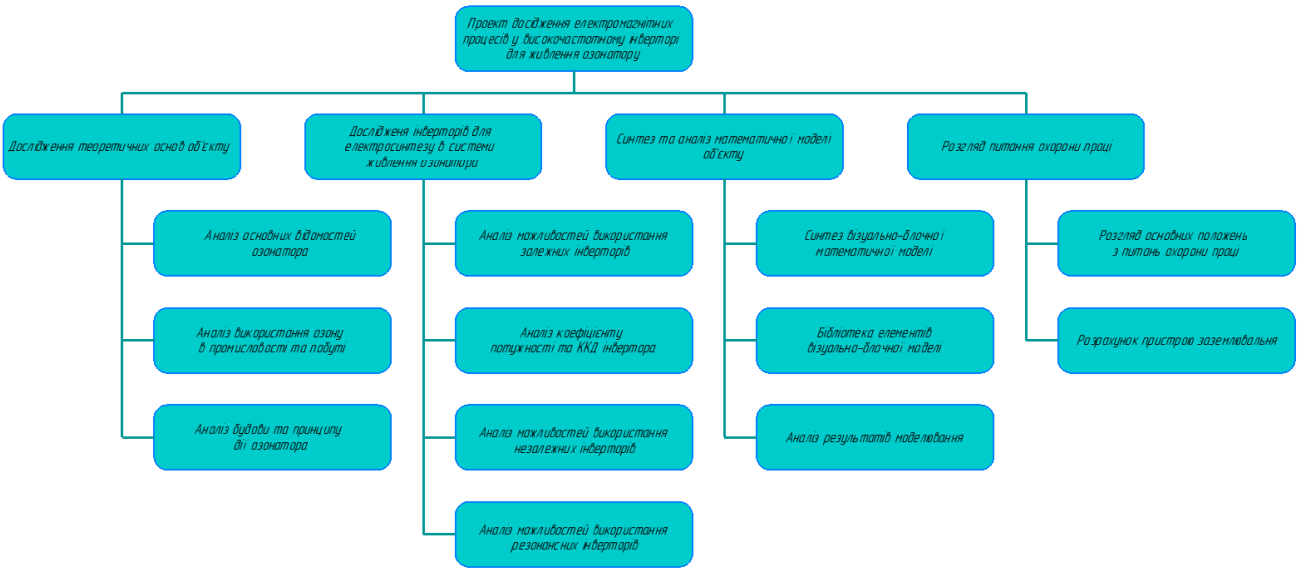


Рисунок 5.1 – Робоча структура проекту WBS

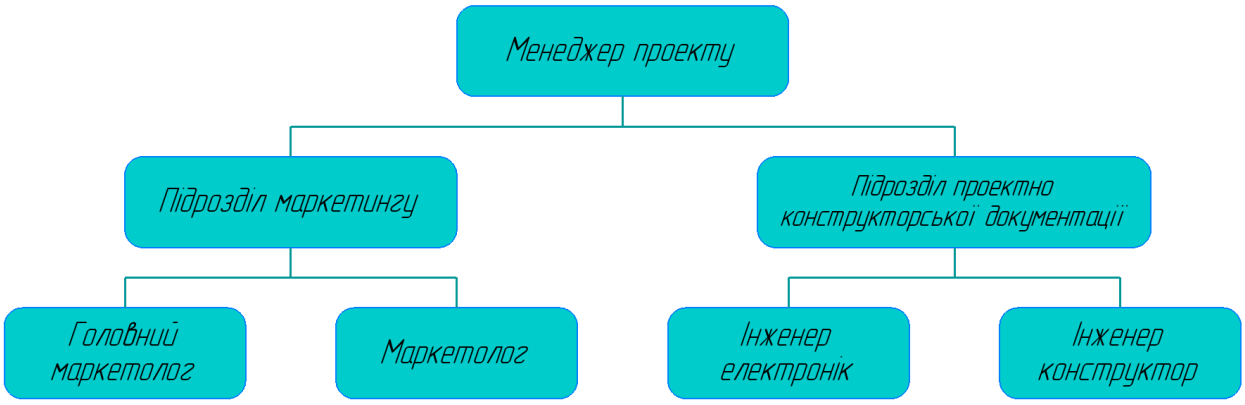


Рисунок 5.2 – Організаційна структура проекту OBS

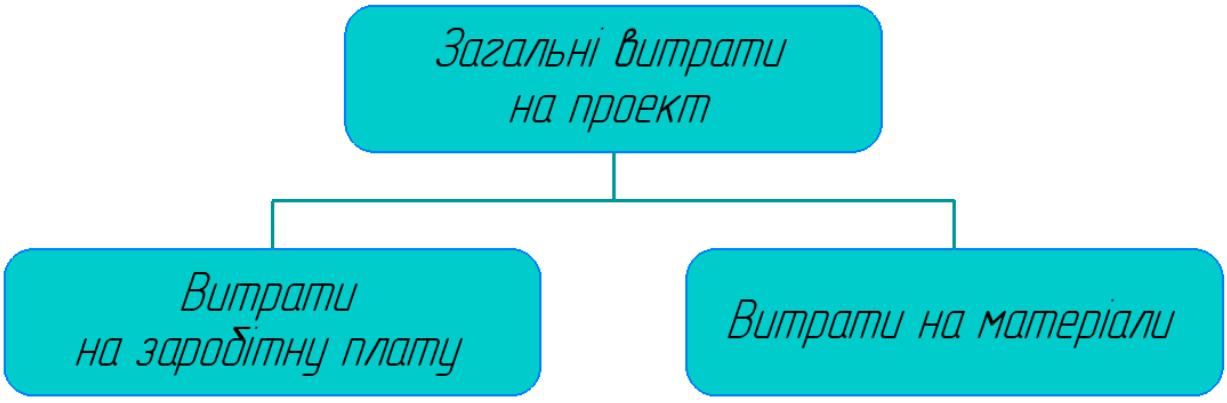


Рисунок 5.3 – Структура затрат проекту CBS

Таблиця 5.3 – Матриця відповідальності

Матриця відповідальності													
Виконавці	Роботи												
	Аналіз використання та будови озонатора	Аналіз основних відомостей	Аналіз використання озону	Аналіз будови озонатора	Дослідження інверторів ведених мережею	Дослідження коефіцієнт потужності та ККД інвертора	Дослідження автономних інверторів	Дослідження резонансного інвертора	Синтез візуально-блочної математичної моделі	Бібліотека елементів візуально-блочної моделі	Аналіз результатів моделювання	Розгляд основних положень з питань охорони праці	Розрахунок пристрою заземлення
Менеджер проекту		p	p	p	p	p	p	p	p	p	s	s	s
Головний маркетолог	p	s	s	s									
Маркетолог	+	+	+	+									
Інженер електронік	s				+	+	+	+	+	s	p	p	p
Інженер конструктор					s	s	s	s	s	+	+	+	+
p – первинна відповідальність s – вторинна відповідальність + – виконавець													

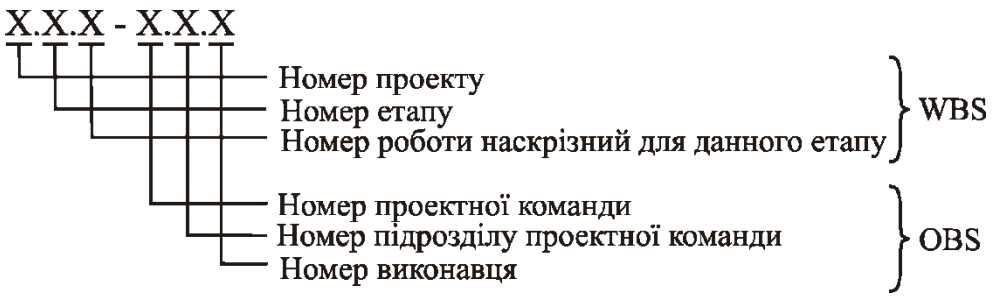


Рисунок 5.4 – Система кодування проекту.

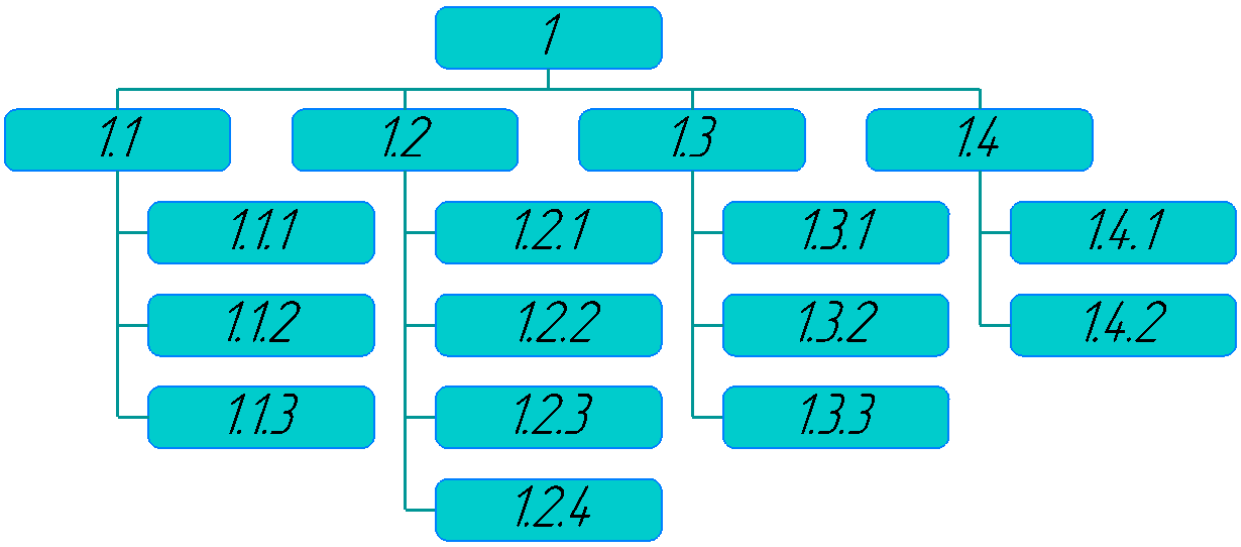


Рисунок 5.5 – Робоча кодова структура проекту WBS.

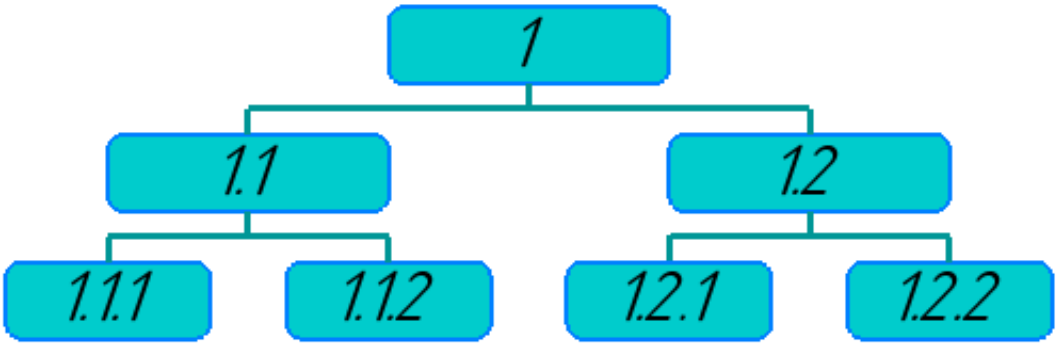


Рисунок 5.6 – Організаційна кодова структура проекту OBS.

Таблиця 5.4 – каталог CTR

Номер	Код роботи	Зміст роботи	Затрати, грн	Тривалість, діб	Необхідні ресурси
1	1.1.1 – 1.1.2	Аналіз використання та будови озонатора	1500	3	Головний маркетолог, маркетолог
2	1.1.2 – 1.1.2	Аналіз основних відомостей	3500	10	Менеджер проекту, маркетолог
3	1.1.2 – 1.1.2	Аналіз використання озону	3500	5	Менеджер проекту, маркетолог
4	1.1.3 – 1.1.2	Аналіз будови озонатора	2500	4	Менеджер проекту, маркетолог
5	1.2.1 – 1.1.2	Дослідження інверторів ведених мережею	3000	5	Менеджер проекту, інженер електронік
6	1.2.2 – 1.1.2	Дослідження коефіцієнт потужності та ККД інвертора	4000	6	Менеджер проекту, інженер електронік
7	1.2.3 – 1.1.2	Дослідження автономних інверторів	4000	5	Менеджер проекту, інженер електронік
8	1.2.4 – 1.1.2	Дослідження резонансного інвертора	6500	8	Менеджер проекту, інженер електронік

продовження таблиці 5.4

9	1.3.1 – 1.2.1	Синтез візуально-блочної математичної моделі перетворювача	4500	8	Менеджер проекту, інженер електронік
10	1.3.2 – 1.2.2	Бібліотека елементів візуально-блочної моделі	9000	10	Менеджер проекту, інженер конструктор
11	1.3.3 – 1.2.2	Аналіз результатів моделювання	2000	4	Менеджер проекту, інженер конструктор
12	1.4.1 – 1.2.2	Охорона праці	3000	4	Менеджер проекту, інженер конструктор
13	1.4.2 – 1.2.2	Розгляд основних положень з питань охорони праці	2000	5	Менеджер проекту, інженер конструктор
14	1.4.3 – 1.2.2	Розрахунок пристрою заземлення	2000	3	Менеджер проекту, інженер конструктор

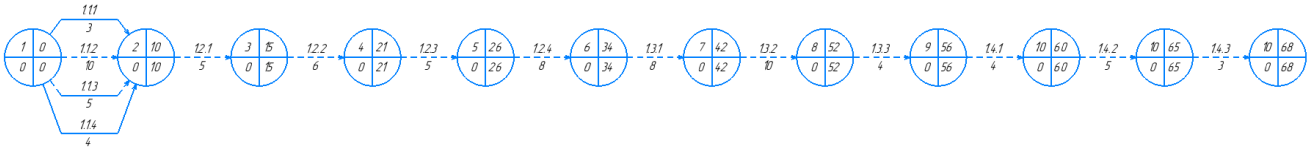


Рисунок 5.7 – Стрілчастий графік.

Більшість реальних проектів виконуються в умовах невизначеності строків виконання робіт з моделювання та розробки проектів. Тому при визначенні загального терміну виконання проекту потрібно враховувати імовірнісний характер визначення термінів виконання робіт.

5.1 Визначаємо три оцінки для кожної i-ї роботи, що входять до критичного шляху, за допомогою експертної оцінки, такі як:

a_i – оптимістичний прогноз тривалості i-ї роботи;

b_i – песимістичний прогноз тривалості i-ї роботи ;

m_i – найбільш ймовірний прогноз тривалості i-ї роботи.

5.2 Розраховуємо математичне очікування тривалості i-ї роботи за допомогою формули:

$$t_i = \frac{a_i+4\cdot m_i+b_i}{6}, \quad (5.1)$$

5.3 Розраховуємо дисперсію тривалості i-ї роботи за допомогою формули:

$$\sigma_i^2 = \left(\frac{b_i-a_i}{6}\right)^2), \quad (5.2)$$

Результати попередніх обчислень заносимо у табл. 4.7.

Таблиця 5.5 – Розрахунок тривалості проекту з урахуванням запасів часу

Код роботи	a_i	m_i	b_i	σ_i^2	t_i
1.1.1	2	3	4	0,11	3
1.1.2	8	10	12	0,44	10
1.1.3	4	5	6	0,11	5
1.1.4	3	4	5	0,11	4
1.2.1	4	5	5	0,03	4,8
1.2.2	5	6	7	0,11	6
1.2.3	4	5	6	0,11	5
1.2.4	6	8	10	0,44	8
1.3.1	6	8	10	0,44	8
1.3.2	8	10	12	0,44	10
1.3.3	3	4	5	0,11	4
1.4.1	3	4	5	0,11	4
1.4.2	4	5	5	0,03	4,8
1.4.3	2	3	4	0,11	3

5.4 Математичне очікування проекту визначаємо за допомогою формули:

$$t = \sum_{i=1}^{n} t_i = 79{,}7, \tag{5.3}$$

де n – кількість робіт, що належать до критичного шляху.

5.5 Стандартне відхилення терміну виконання проекту визначаємо за допомогою формули:

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \sigma_i^2} = 1{,}65, \tag{5.4}$$

5.6 Розраховуємо величину φ:

$$\varphi = F - 0{,}5 = 0{,}9 - 0{,}5 = 0{,}4, \quad (5.5)$$

де F – ймовірність виконання проекту, ($F = 0{,}9$).

5.7 Отже, визначаємо $z = 1{,}29$.

5.8 Розраховуємо необхідний термін виконання проекту, який необхідно прийняти для того, щоб не зірвати строки виконання з ймовірністю 90% за допомогою формули:

$$\text{Ò} = z \cdot \sigma + t = 1{,}3 \cdot 1{,}65 + 79{,}7 = 81{,}8 \text{ діб}, \quad (5.6)$$

де: z = 1,3 – значення нормального розподілу.

Висновки до розділу 5

На основі виконаного проекту було створену економічну модель, за результатами якої термін виконання проекту складає 82 доби.

ВИСНОВКИ

В результаті виконання роботи, було досліджено електромагнітні процеси у високочастотному інверторі для живлення озонатору та представлено його як елемент бібліотеки візуально-блочного моделювання.

У першому розділі виконано аналіз використання та будови озонатора, проведено аналіз основних відомостей. Було проаналізовано використання озону та будова озонатора, визначена проблема побудування системи живлення озонатора.

У другому розділі проведений аналіз електромагнітних процесі у інверторах ведених мережею, автономних інверторів та досліджено питання визначення коефіцієнта потужності та ККД інверторів. Обрано найбільш раціональний варіант.

У третьому розділі було запропоновано новий метод регулювання параметрів резонансного контуру за допомогою зміни вхідної напруги та використання не лінійності ємності конденсатора в залежності від прикладеної до нього напруги. Синтезовано СЕТ, візуально-блочну модель та проведено аналіз результатів моделювання, які підтвердили працездатність моделі.

У четвертому розділі було розглянуто питання охорони праці та розраховано пристрій заземлення.

У п’ятому розділі було створено економічну модель проекту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Phillips C. L., Harbor R. D. Feedback Control Systems. N.J.: Prentice Hall, Upper Saddle River, 1996. 658 p.

2. Alekseevskiy D., Pankova O., Khrestin R . Procedure for the synthesis of models of electro-technical complexes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. № 6/9(96). С. 48-54.

3. Озон для вирощування огірків в теплиці. *База знань.* 2022. URL: https://ozonbox.pro/tpost/23ads5rrt1-ozon-dlya-viraschivaniya-ogurtsa-v-tepli (дата звернення: 20.08.2025)

4. Вплив озонотерапії на організм: все, що треба знати про озон. *Авіцена*. URL: https://avicena.ck.ua/vplyv-ozonoterapii-na-orhanizm-vse-shcho-treba-znaty-pro-ozon/ (дата звернення: 20.08.2025)

5. Талат К.О. Еколого-технологічне обгрунтування озонування води р. Сіверський Донець для питних цілей. Харків: НУЦЗУ, 2021.

6. Ворох Д.А., Махов А.І. Резонансний перетворювач із широтноімпульсним регулюванням вихідної напруги. Аерокосмічна техніка, технології та машинобудування. 2016. Т. 15, №3. С. 143-152.

7. Kogelschatz U., Eliasson B., Hirth M. Ozone Generation From Oxygen and Air: Discharge Physics and Reaction Mechanisms. *Ozone: Science & Engineering*. 1988. № 10. P. 367-377.

8. Казачковський М.М.Автономні перетворювачі та перетворювачі частоти: навч.пос. Дніпро: НГА України, 2000. 197 с.

9. AN-4151. Half-Bridge LLC Resonant Converter Design Using FSFRSeries Fairchild Power Switch (FPS™). Onsemi. 2014. URL: https://www.onsemi.com/ pub/Collateral/AN-4151.pdf (дата звернення: 20.08.2025)

10. Павлов Г.В., Обрубов А.В. Розрахунок характеристик послідовнорезонансного перетворювача з релейним регулюванням: докт. дисерт. Миколаїв: Національний університет кораблебудування, 2012.

11. Довідник з електропостачання та електрообладнання. А. А. Федорова. Том 1 Електропостачання. М.: Энергоатомиздат,1986 – 568 с.

12. Резонанс – друг і ворог: веб-сайт. URL: https://kpi.ua/resonance (дата звернення: 18.11.2025).

13. Явище резонансу: веб-сайт. URL: https://skysmart.com/articles/physics/ yavlenie-rezonansa (дата звернення: 18.11.2025).

14. Застосування резонансу напруги та резонансу струмів: веб-сайт. URL: https://electricalschool.info/spravochnik/electroteh/1860-primenenie-rezonansanaprjazhenijj-i.html (дата звернення: 16.09.2024).

15. Н.М. Чернишов, Н.І. Сліпченко, В.М. Писаренко та інші. Розрахунок втрат у резонансних перетворювачах при режимах непреривних і розрівних струмів. Радіотехніка. 2015. Вип. 183, С. 147-154.

16. Алексієвський Д. Г. Візуальне моделювання багатоканальних вітроелектрогенеруючих систем. *Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія та практика. Силова електроніка та енергоефективність.* 2017. № 27 (1249). С. 332-336.

17. Інструкція з охорони праці для офісних працівників. *Safety. Безпека та охорона праці.* URL: https://safety.org.ua/instruktsiya-z-ohorony-pratsi-dlya-ofisnyh-pratsivnykiv/ (дата звернення: 18.11.2025).

18. Методичні вказівки до проведення практичних занять та самостійної роботи з дисципліни «Моделі та методи управління проектами» для студентів спеціальності: 8.090803 - «Електронні системи» / упоряд.: Д.Г. Алексієвський. Запоріжжя: ЗДІА, 2010р.

Формат	Зона	Поз.	Позначення	Найменування	Кіл	Примітка
				Документація		
A1			ЕІСПЗ МР.202501.00.00.00.00.Д1	Дослідження електромагнітних процесів у високочастотному інверторі для живлення озонатору		
				Структура енергетичного тракту		
A1			ЕІСПЗ МР.202501.00.00.00.00.Д2	Дослідження електромагнітних процесів у високочастотному інверторі для живлення озонатору		
				Реалізація математичної моделі 1		
A1			ЕІСПЗ МР.202501.00.00.00.00.Д3	Дослідження електромагнітних процесів у високочастотному інверторі для живлення озонатору		
				Візуально-блочна математична модель		
A1			ЕІСПЗ МР.202501.00.00.00.00.Д4	Дослідження електромагнітних процесів у високочастотному інверторі для живлення озонатору		
				Компоненти математичної моделі		
A1			ЕІСПЗ МР.202501.00.00.00.00.Д5	Дослідження електромагнітних процесів у високочастотному інверторі для живлення озонатору		
				Заземлювальний пристрій		
A1			ЕІСПЗ МР.202501.00.00.00.00.Д6	Дослідження електромагнітних процесів у високочастотному інверторі для живлення озонатору		
				Економічна модель проекту		
1			ЕІСПЗ МР.202501.00.00.00.00.Д7	Дослідження електромагнітних процесів у високочастотному інверторі для живлення озонатору		
				Реалізація математичної моделі 2		
1			ЕІСПЗ МР.202501.00.00.00.00.Д8	Дослідження електромагнітних процесів у високочастотному інверторі для живлення озонатору		
				Автономний інвертор напруги		

Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата	ЕІСПЗ МР.202501.00.00.00.00		
Розроб.		Мовчан			Дослідження електромагнітних процесів у високочастотному інверторі для живлення озонатору	Літ.	Аркуш 1 / Аркушів 1
Перевір.		Алексієвський					
Н.контр.		Туришев		10.12.25		ІННІ ім Ю.М. Потебні ЗНУ 8.1714	