

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерії та енергетики

Кафедра електрифікації, автоматизації виробництва та інженерної екології

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

Шуляк Ольга Василівна

УДК 621.359.4

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Обґрунтування розробки структури однопровідної лінії та пристроїв
перетворення напруги для електропостачання віддалених
сільськогосподарських споживачів
(тема роботи)

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва спеціальності)

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Шуляк О. В.

(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи

Палійчук Володимир Константинович

(прізвище, ім'я, по батькові)

к.т.н., доцент кафедри електрифікації,
автоматизації виробництва та інженерної екології

(науковий ступінь, вчене звання)

Житомир – 2022

АНОТАЦІЯ

Шуляк О. В. Обґрунтування розробки структури однопровідної лінії та пристроїв перетворення напруги для електропостачання віддалених сільськогосподарських споживачів. Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка – Поліський національний університет, Житомир, 2022.

Основною метою кваліфікаційної роботи є обґрунтування розробки однопровідної системи передачі електроенергії призначеної для електропостачання віддалених сільськогосподарських споживачів, яка характеризується більш високою експлуатаційною надійністю по відношенню до трифазних систем.

Ключові слова: передача електроенергії, однопровідна система передачі електроенергії, надійність електропостачання.

ABSTRACT

Shulyak O. V. Rationale for the development of a single-wire line structure and voltage conversion devices for power supply to remote agricultural consumers. Qualification work for obtaining a master's degree in specialty 141 - Electric power, electrical engineering and electromechanics - Polish National University, Zhytomyr, 2022.

The main goal of the qualification work is to substantiate the development of a single-wire power transmission system intended for the supply of electricity to remote agricultural consumers, which is characterized by higher operational reliability in relation to three-phase systems.

Key words: power transmission, single-wire power transmission system, power supply reliability.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. РАЗРАБКА СТРУКТУРИ ОДНОПРОВІДНОЇ МЕРЕЖІ ПЕРЕДАЧІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ТА ПРИСТРОЇВ ПЕРЕТВОРЕННЯ НАПРУГИ	6
1.1. Структура і принцип роботи однопровідної мережі, що розробляється, на 10 кВ для віддалених сільськогосподарських споживачів	6
1.2. Обґрунтування методики розрахунку параметрів та математичної моделі однопровідної лінії на 10 кВ	7
Висновки по розділу 1	16
РОЗДІЛ 2. ОБГРУНТУВАННЯ СХЕМИ ПЕРЕТВОРЕННЯ НАПРУГИ ДЛЯ ОДНОПРОВІДНОЇ ЛІНІЇ 10 кВ ТА РОЗРАХУНКИ ОСНОВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ	17
2.1. Вибір багаторівневого інвертора з фіксацією нейтралі як перетворювача напруги в однопровідній мережі, що розробляється	17
2.2. Математичний опис формування синусоїдальної напруги в багаторівневих інверторах з фіксацією нульової точки	21
Висновки по розділу 2	30
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА СХЕМИ ПРИНЦИПОВОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ДЛЯ ПЕРЕТВОРЕННЯ ТРИФАЗНОЇ НАПРУГИ В ОДНОФАЗНУ І НАВПАКИ	31
3.1. Розробка схеми перетворювачів напруги для однопровідної лінії на 10 кВ та розрахунок основних елементів	31
3.2. Конструкція заземлювального пристрою для пропонованої однопровідної лінії електропередачі	42
3.3. Застосування перетворювача числа фаз як пристрій симетрування неповнофазних режимів на лінії 10 кВ для віддалених сільськогосподарських споживачів	46
Висновки по розділу 3	48
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	49
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	50
ДОДАТКИ	53

ВСТУП

Чільне місце забезпечення електроенергією агропромислового комплексу безперечно належить системам центрального енергопостачання, які у більшості випадків, для сільськогосподарського сектора є трифазними.

Розвиток тваринництва, птахівництва, рослинництва, переробної промисловості, веде до зростання споживаної потужності об'єктами АПК, а також до посилення вимог, що висуваються до якості електроенергії [1, 2, 3]. На сьогоднішній день знос трифазних систем становить більше 70%, що негативно впливає як на безперебійність електропостачання, так і на якість електроенергії [4]. Тому для задоволення вимог до роботи енергопостачальних систем, при виході на заплановані потужності, необхідно проводити повну реконструкцію існуючих систем, що спричиняє великі фінансові витрати, або знаходити шляхи здешевлення способів передачі електроенергії, при дотриманні всіх вимог до її якості.

Актуальність теми обумовлена недостатньою надійністю існуючих систем енергопостачання підприємств агропромислового комплексу та високою вартістю будівництва ліній електропередач. Удосконалення систем передачі електроенергії, спрямоване на зниження втрат при транспортуванні, зменшення вартості, збільшення надійності та покращення експлуатаційних характеристик, є актуальним завданням.

Метою кваліфікаційної роботи є обґрунтування розробки однопровідної системи передачі електроенергії призначеної для електропостачання віддалених сільськогосподарських споживачів, яка характеризується більш високою експлуатаційною надійністю по відношенню до трифазних систем.

Об'єктом дослідження є однопровідна система передачі електроенергії для електропостачання віддалених сільськогосподарських споживачів.

Практична значемість результатів роботи заключається:

- у підвищенні якості електропостачання за рахунок застосування однопровідної системи;

- у розробці принципової електричної схеми для перетворювачів трифазної напруги в однофазну та однофазну в трифазну на базі семирівневого інвертора напруги.

Методи дослідження включали фізичні засади електроніки, елементи теорії надійності, методи математичного та комп'ютерного моделювання, елементи математичної статистики. Для обробки результатів досліджень використовувався табличний редактор Excel Microsoft Office.

Перелік публікацій автора за темою дослідження :

Шуляк О. В. СТРУКТУРА І ПРИНЦИП РОБОТИ ОДНОПРОВІДНОЇ МЕРЕЖІ, НА 10 кВ ДЛЯ ВІДДАЛЕНИХ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ СПОЖИВАЧІВ.

Матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених факультету інженерії та енергетики «СТУДЕНТСЬКІ ЧИТАННЯ – 2022» 30 листопада 2022 року. Житомир: Поліський національний університет, 2022.- С 58-62.

Гончаренко Ю. П., Шуляк О. В. ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ ТА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ОДНОПРОВІДНОЇ ЛІНІЇ НА 10 кВ

Матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених факультету інженерії та енергетики «СТУДЕНТСЬКІ ЧИТАННЯ – 2022» 30 листопада 2022 року. Житомир: Поліський національний університет, 2022.- С 58-62.

Соколовський О. Ф., Шуляк О. В. КОНСТРУКЦІЯ ЗАЗЕМЛЮЮЧОГО ПРИБОРУ ДЛЯ ПРОПОНОВАНОЇ ОДНОПРОВІДНОЇ ЛІНІЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ

Матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених факультету інженерії та енергетики «СТУДЕНТСЬКІ ЧИТАННЯ – 2022» 30 листопада 2022 року. Житомир: Поліський національний університет, 2022.- С 58-62.

РОЗДІЛ 1

РАЗРАБКА СТРУКТУРИ ОДНОПРОВІДНОЇ МЕРЕЖІ ПЕРЕДАЧІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ТА ПРИСТРОЇВ ПЕРЕТВОРЕННЯ НАПРУГИ

Найбільш уразливим місцем у схемі передачі електроенергії с/г споживачам є лінії 10 кВ, оскільки у структурі протяжності ліній займають близько 40% та його знос становить понад 80%. У свою чергу, значна частина відмов (більше 30%) припадає на втрати фаз через обриви дротів, незадоволення контактів масляного вимикача або роз'єднувача, руйнування ізоляторів з наступним замиканням на землю дроту повітряної лінії та ін.

На підставі зроблених висновків актуальним є завдання розробки та впровадження однопровідної лінії електропередачі напругою 10 кВ для віддалених сільгоспспоживачів з метою забезпечення безперебійної та якісної електроенергії споживачів АПК.

1.1 Структура і принцип роботи однопровідної мережі, що розробляється, на 10 кВ для віддалених сільськогосподарських споживачів

Для створення надійних систем електропостачання споживачів електроенергії, що знаходяться на значній відстані від вузлів живлення, було запропоновано систему однопровідної мережі на напругу 10 кВ. Структурна схема такої однопровідної лінії представлена на рисунку 1.1. Дана система дозволить уникнути безліч факторів, що впливають на безперебійне електропостачання споживачів, які докладно описані у першому розділі. Принцип роботи однопровідної лінії: трифазна напруга з джерела живлення ТП1 і трипровідної мережі (в даному випадку магістральна лінія) подається на блок 1 - струмообмежуючий реактор і блок 2 - розрядники, що служать для захисту блоку 3 - перетворювач трифазної напруги в однофазну від кидків струмів і напруги. Блок 3 включає в себе: блок 4 - силовий трифазний випрямляч, блок 5 - ємнісний дільник напруги, блок 6 -

семирівневий інвертор напруги та блок управління 7 ключами інвертора. Отримане на вході трифазного випрямляча 4 напруга випрямляється, згладжується, ділиться ємнісними дільниками 5 і надходить у блок інвертора 6, де формується двофазна напруга 10 кВ, промислової частоти 50 Гц, яке далі, через заземлювачі 9 і 9' і одне 10 і 11 струмообмежувальні реактори і розрядники, надходить на вхід блоку 12 - перетворювач однофазної напруги трифазне, що включає в себе аналогічні блоки, як і перетворювач 3. Напруга яка надійшла на семирівневий інвертор 15, формується вже в трифазну, лінійне значення якої 10 кВ [2], промислової частоти 50 Гц, через блок фільтра 17 надходить на понижувальний трансформатор ТП2 споживача 18.

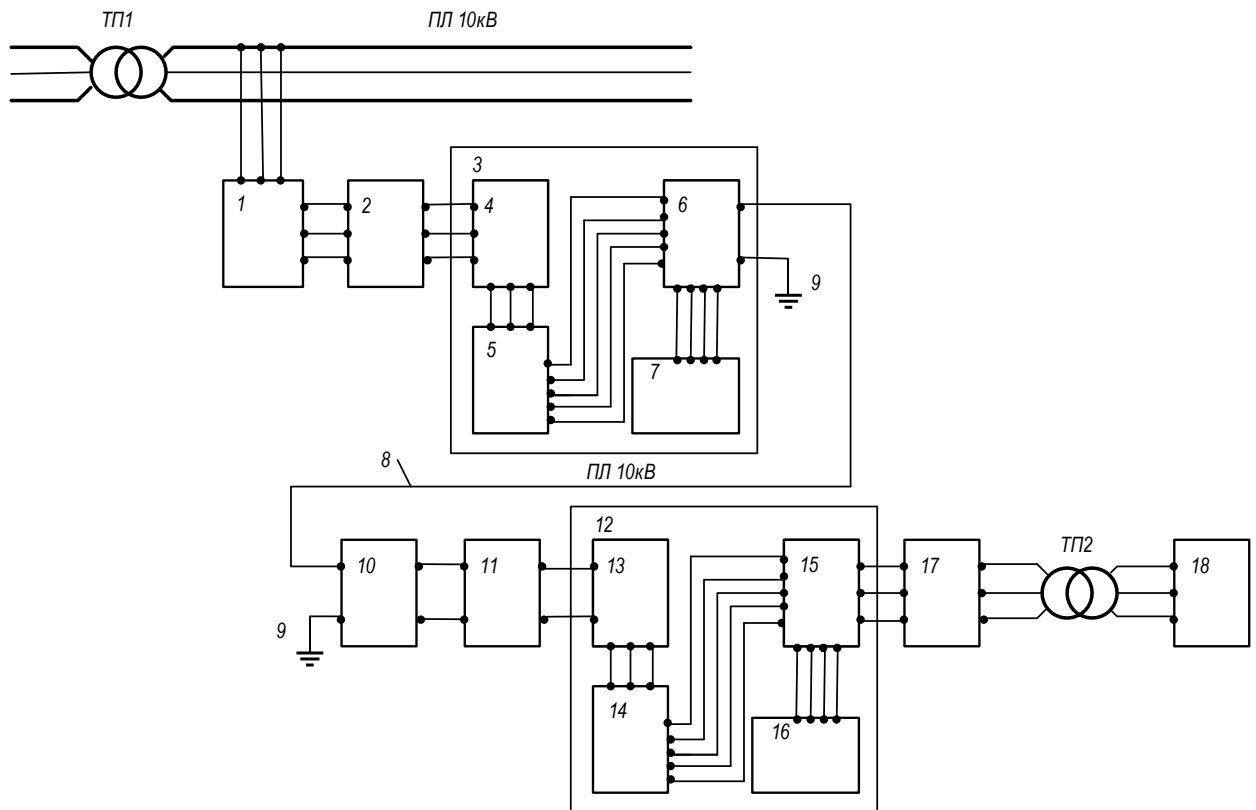


Рисунок 1.1 – Структурна схема однопровідної лінії напругою 10 кВ для віддалених сільськогосподарських споживачів

1.2 Обґрунтування методики розрахунку параметрів та математичної моделі однопровідної лінії на 10 кВ

Зробимо розрахунок втрат для перетворювачів трифазної напруги в однофазну та однофазного в трифазну, а також втрати в однопровідній лінії з урахуванням її протяжності.

Втрати у напівпровідникових приладах поділяються на два види: статичні та динамічні. Статичні втрати виникають у час, коли напівпровідниковий прилад перебуває у відкритому стані. Динамічні втрати з'являються при перемиканні транзистора та при вимиканні зворотного діода [3].

Розрахунок втрат повинен проводитися для найбільш важкого режиму роботи, тобто коли через напівпровідниковий прилад протікає граничний струм навантаження [4]. В інверторах з синусоїдальною формою вихідного сигналу обчислення втрат виявляється найбільш складним. Зробимо розрахунок, згідно з рекомендаціями [3, 4]:

Статичні втрати на транзисторі:

$$P_{st} = \frac{1}{2} \cdot U_{sat} \cdot I_{SW}, \text{ Вт}, \quad (1.1)$$

де I_{SW} - значення струму, що протікає через транзистор, А;

U_{sat} – пряме падіння напруги на транзисторі, В;

Потужність динамічних втрат складається з трьох складових: жорстке перемикання, розряд вихідної ємності транзистора, зворотне відновлення антипаралельного діода із зарядом Q_{rr} :

$$P_{SW} = \frac{1}{2} \cdot f_s \cdot E_{tot} + \frac{1}{2} \cdot C_{22} \cdot V_0^2 \cdot f_s + Q_{rr} \cdot V_0 \cdot f_s, \text{ Вт}, \quad (1.2)$$

де E_{tot} – сумарна енергія перемикання транзистора, мДж; визначається за технічними характеристиками транзистора;

f_s – частота перемикання, Гц.

V_0 - напруга живлення;

C_{22} – розряд вихідної ємності транзистора, Ф;

Q_{rr} – заряд зворотного відновлення антипаралельного діода, нКл.

Сумарні втрати на транзисторі будуть визначатися:

$$P_{DM} = P_{st} + P_{SW}, \text{ Вт}. \quad (1.3)$$

Вираз для розрахунку статистичних втрат на вбудованому діоді транзистора [5] має вигляд:

$$P_{DF} = I_{FM} \cdot U_{FM}(I_{FM}) \cdot (1/8 - D \cdot \cos\theta/3\pi), \text{ Вт}, \quad (1.4)$$

де I_{FM} - пікове значення струму, А;

$U_{FM}(I_{FM})$ - пікове значення напруги на діоді при відновленні, В;

Вираз для розрахунку втрат при відновленні:

$$P_{rr} = 0,125 \cdot I_{rr} \cdot t_{rr} \cdot U_s \cdot F, \text{ Вт}, \quad (1.5)$$

де I_{rr} – піковий струм зворотного відновлення, А;

t_{rr} – час зворотного відновлення діода, с.

Відповідно, літературним джерелам [6], розрахунок втрат на діодах визначається за таким виразом:

$$P = U_{(TO)} \cdot I_{FAV} + k_{\phi}^2 \cdot r_T \cdot I_{FAV}^2, \text{ Вт}, \quad (1.6)$$

де $U_{(TO)}$ - гранична напруга, В;

I_{FAV} – середній прямий струм, А;

r_T - диференціальна пряма напруга (динамічний опір), Ом;

k_{ϕ} - коефіцієнт форми струму, що дорівнює відношенню діючого значення струму до середнього.

Розрахунок потужності втрат на шунтуючих резисторах визначається за формулою [6]:

$$P_m = \frac{U_{d0}^2}{R_m}, \text{ Вт}, \quad (1.7)$$

де U_{d0} - напруга прикладається до шунтуючого резистори, В;

R_m - опір резистора, Ом.

Відповідно до рекомендацій, наведених у методичних вказівках виробника [6,7], розрахунок втрат на конденсаторах розраховується за виразом:

$$P_B = P_{B0} + P_{BR} = U^2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot C \cdot \tan \delta_0 + I_{eff}^2 \cdot R_s, \text{ Вт}, \quad (1.8)$$

де I_{eff} – середньоквадратичний струм, А;

f_0 – частота, Гц;

R_S - еквівалентний послідовний опір, Ом;

$\tan\delta_0$ – тангенс кута втрат;

U - значення напруги пульсації на конденсаторі, В.

Для наочності розрахунки втрат у перетворювачах трифазної напруги в однофазну та однофазну в трифазну зведемо до таблиці .1.

Таблиця 1.1 - Розрахункові значення втрат у перетворювачах напруги

Вид перетворювача	Втрати на елементах перетворювача, Вт					
	На діодах випрямляча	Ємнісний подільник	Силові транзистори	Обернені діоди транзисторів	Блокувальні діоди	Демпферні кола
Із 3 фаз в 1	130,3	20,4	1799,7	1042,3	398,4	103,3
Із 1 фази в 3	86,8	140	2699,6	1563,4	597,6	118,1

Сума значень розрахункових втрат силової частини, кожного з перетворювачів, дозволяє визначити розрахункове значення К.П.Д. Сумарні втрати для перетворювача трифазної напруги двофазне (однофазне) становить: 3495 Вт; а для перетворювача двофазного (однофазного) трифазна напруга: 5206 Вт. З урахуванням розрахункової потужності кожного з перетворювачів рівної 100 кВт, К.П.Д. для кожного складе:

$$\eta = 1 - \frac{\Sigma P_{\pi}}{P_{\text{пр}}}, \quad (1.9)$$

де ΣP_{π} - розрахункова сума втрат, кВт;

$P_{\text{пр}}$ – потужність перетворювача, кВт.

Для перетворювача із трьох фаз в одну:

$$\eta = 1 - \frac{3,495}{100} = 0,965.$$

Для перетворення із однієї фази в три:

$$\eta = 1 - \frac{5,206}{100} = 0,948.$$

Порівняємо роботу «класичної» трипровідної лінії та запропонованої однопровідної, отримані значення струмів та напруги для обраної потужності 100 кВА дозволять вибрати параметри однопровідної мережі.

Розрахунок потужності трипровідної системи, що передається,

представленої на рисунку 1.2, має вигляд:

$$P_3 = 3 \cdot U_\phi \cdot I_{\phi 3} \cdot \cos \varphi_3, \text{ кВт}, \quad (1.10)$$

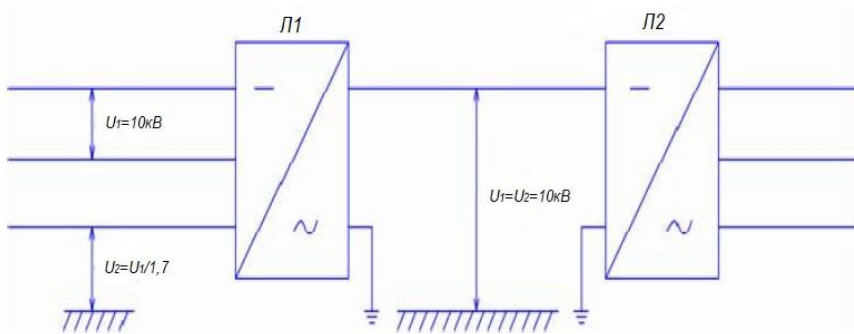


Рисунок 2.2 – Схема системи з ділянкою пропонуваної однопровідної лінії

Для ділянки однопровідної мережі представленої рисунку 2.2 відповідно:

$$P_1 = \sqrt{3} \cdot U_\phi \cdot I_{\phi 1} \cdot \cos \varphi_1, \text{ кВт}, \quad (1.11)$$

Зробимо припущення і значеннями $\cos \varphi_3$, $\cos \varphi_1$ нехтуємо, тоді:

$$S_3 = 3 \cdot U_\phi \cdot I_{\phi 3}, \text{ кВА}, \quad (1.12)$$

$$S_1 = \sqrt{3} \cdot U_\phi \cdot I_{\phi 1}, \text{ кВА}. \quad (1.13)$$

Звідси, при однаковій потужності, що передається:

$$I_{\phi 1} = \frac{3}{\sqrt{3}} \cdot I_{\phi 3} = \sqrt{3} \cdot I_{\phi 3}, \text{ А}. \quad (1.14)$$

Оскільки, розрахунок ведеться за умови однакової протяжності лінії та однакового перетину проводів, зробимо припущення та індуктивну складову опору з метою спрощення розрахунків враховувати не будемо, тоді:

- для трипровідної лінії:

$$\Delta P = 3 \cdot I_{\phi 3}^2 \cdot R_\pi, \text{ Вт}, \quad (1.15)$$

$$\Delta U = I_{\phi 3} \cdot R_\pi, \text{ В}, \quad (1.16)$$

$$\frac{\Delta U}{U_\phi} = \frac{I_{\phi 3} \cdot R_\pi}{U_\phi}, \quad (1.17)$$

$$j_3 = \frac{I_{\phi 3}}{S_{\phi 3}}, \text{ А/мм}^2. \quad (1.18)$$

- для однопровідної лінії:

$$\Delta P' = I_{\phi 1}^2 \cdot R_{\pi} = 3 \cdot I_{\phi 3}^2 \cdot R_{\pi}, \text{ Вт}, \quad (1.19)$$

$$\Delta U = I_{\phi 1} \cdot R_{\pi} = \sqrt{3} \cdot I_{\phi 3} \cdot R_{\pi}, \text{ В}, \quad (1.20)$$

$$\frac{\Delta U}{U_{\phi 1}} = \frac{I_{\phi 1} \cdot R_{\pi}}{U_{\phi 1}} = \frac{\sqrt{3} \cdot I_{\phi 3} \cdot R_{\pi}}{\sqrt{3} \cdot U_{\phi}}, \quad (1.21)$$

$$j_1 = \frac{I_{\phi 1}}{S_{\phi 1}} = \frac{\sqrt{3} \cdot I_{\phi 3}}{S_{\phi 1}}, \text{ А/мм}^2. \quad (1.22)$$

І так, аналізуючи вище отримані залежності, можна виділити наступне: щоб забезпечити рівність у значеннях щільності струму трипровідної та однопровідної ліній, які відрізняються на відповідно виразів (2.18), (2.22), необхідно збільшити переріз однопровідної лінії по відношенню до одного дроту трипровідної мережі; однак, враховуючи ту обставину, що втрати потужності у двох лініях відрізняються в $\sqrt{3}$ рази і що б зрівняти ці умови, необхідно збільшити перетин дроту в однопровідній лінії у $\sqrt{3}$ рази по відношенню до одного дроту трипровідної мережі.

Таким чином, характеристики двох ліній (втрати потужності, загальний переріз проводів, потужності, що передаються, і т.д.) залишаються однаковими і основні вимоги згідно з ПУЕ, не порушуються.

Однак, слід врахувати, що ПУЕ пред'являє вимоги до мінімально допустимих перерізів проводів за умовами механічної міцності, згідно з чим, при відносно невеликій потужності, що передається, потрібне застосування марок проводів із завищеним перетином. Тому відбувається наступне, в трипровідній лінії для кліматичних зон з великими ожеледицями (20, 25, 30 мм і більше) доводиться застосовувати 3 проводу такої марки, для якої достатньо одного дроту, щоб передати цю ж потужність. Дана обставина дозволяє стверджувати про доцільність застосування однопровідної лінії, яка дозволить знизити загальну вартість будівництва, за рахунок зменшення кількості проводів (у 3 рази) та спрощення несучої конструкції. Що підтверджується розрахунками, проведеними нижче.

Для того, щоб мати повне уявлення про втрату напруги в однопровідній лінії, необхідно враховувати опір землі при протіканні через неї зворотного струму мережі. Однак, розрахунок даного параметра носить абстрактний характер, оскільки поведінка струму, що протікає через землю (особливо при використанні її в якості зворотного проводу) до кінця не вивчено, тому необхідно приймати деякі припущення. Так у роботі [8] у системі «провід-земля» описаний приблизний принцип проходження струму землі. Відомо, що лінії змінного струму мають активний та індуктивний опір, останнє у свою чергу залежить від величини потоку, що пронизує товщу дроту (внутрішній індуктивний опір) і потік, що пронизує контур лінії (зовнішнє індуктивне опір). Зовнішнє ж індуктивне опір залежить від розмірів контуру, тобто, чим більше відстань між протікаючим прямим і зворотним струмом, тим більша індуктивність [8]. На рисунку 1.3 представлено схему протікання струмів через землю.

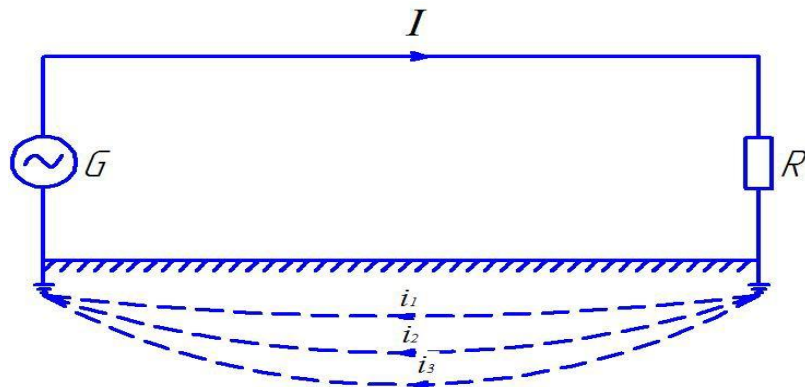


Рисунок 1.3 – Схема однопровідної мережі з урахуванням протікання струму через землю

Враховуючи сказане вище, виходить, що струм i_1 визначає меншу індуктивність, ніж i_2 , i_3 та ін. Оскільки струми мають різну індуктивність, вони будуть зрушені по фазі відносно один одного. Звідси, щільність струму землі буде знижуватися з віддаленням від землі і тим швидше, що вища частота струму [8].

Таким чином, при збільшенні частоти глибина протікання струму зменшується, зростає опір землі. Наприклад, струм лінії при частоті 50 Гц,

поширюється землі убік і в глибину кілька кілометрів. При постійному струмі опір землі в розрахунках взагалі не враховується. Що ж стосується випадків, при збільшенні питомого опору землі, то, зростає падіння напруги в ній, знижується щільність струму і одночасно збільшується глибина і ширина протікання струмів. При зниженні питомого опору відбувається протилежне явище [8].

На підставу вищевикладеного матеріалу, авторами [8, 9], були виведені висловлювання для розрахунку повного опору контуру «провод-земля»:

$$Z = r_a + jx' + jx'', \text{ Ом/км}, \quad (1.23)$$

де r_a – активний опір, Ом/км;

x' – зовнішній індуктивний опір, Ом/км;

x'' – внутрішній індуктивний опір, Ом/км.

Розмір зовнішнього індуктивного опору:

$$x' = \omega \cdot L, \text{ Ом/км}, \quad (1.24)$$

де L - коефіцієнт самоіндукції в Гн / км;

Розмір внутрішнього індуктивного опору:

$$x'' = \omega \cdot \frac{\mu}{2} \cdot 10^{-4}, \text{ Ом/км}, \quad (1.25)$$

де μ - магнітна проникність дротів, для алюмінію $\mu = 1$ [8].

Коефіцієнт самоіндукції згідно з [8, 9] розраховується так:

$$L = \left(1 + 2 \ln \frac{10^4}{1,78 \cdot R \cdot \sqrt{10 \cdot \pi \cdot \omega \cdot \gamma_3}} - j \frac{\pi}{2} \right) \cdot 10^{-4}, \text{ Гн/км}, \quad (1.26)$$

де R – радіус проводу, м;

γ_3 - провідність землі, сім/м; середнє значення якого $\gamma_3 = 10^{-3}$ сім/м.

Оскільки в даній формулі індуктивний опір є комплексною величиною, то при множенні виразу на $j\omega$ дозволить отримати дійсну частину $\frac{\pi\omega}{2} \cdot 10^{-4}$ (звідси, при частоті мережі 50 Гц, отримуємо 0,05 Ом/км), що є активний опір землі як зворотного провідника струму [8].

Підставивши отримані вирази у формулу (1.23) отримаємо повний опір для контуру «провід-земля»:

$$Z = r_a + j \cdot \frac{\omega}{2} \cdot 10^{-4} + j \cdot \omega \cdot \left(1 + 2 \ln \frac{10^4}{1,78 \cdot R \cdot \sqrt{10 \cdot \pi \cdot \omega \cdot \gamma_3}} - j \frac{\pi}{2} \right) \cdot 10^{-4}, \text{ Ом/км.} \quad (1.27)$$

Враховуючи, що частота напруги не змінюється і становить 50 Гц, вираз (1.27) можна спростити:

$$Z = r_a + 0,05 + j \cdot 0,144 \cdot (2,08 - \lg R \cdot \sqrt{\gamma_3}), \text{ Ом/км.} \quad (1.28)$$

Приймаємо згідно з вимогами ПУЕ [8], за мінімально допустимим перерізом проводів з умов механічної міцності, для території України, що знаходиться в II та III районах по ожеледиці, марку дроту АС-50, діаметр якого $d_n = 9,6$ мм, $r_0 = 0,595$ мм² [10].

Підставляючи вираз (1.28), значення для прийнятої марки проводу, отримуємо значення повного опору контуру «провід-земля» в комплексній формі:

$$Z = 0,645 + j \cdot 0,849 \text{ Ом/км.}$$

Визначимо втрати напруги в однопровідній лінії, відповідно до отриманих питомих значень активного та індуктивного опорів, виразу [11]:

$$\Delta U = \frac{S_p \cdot \ell \cdot (r_0 \cos \varphi + x_0 \sin \varphi)}{10 \cdot U_n^2}, \%, \quad (1.29)$$

де S_p - потужність, що передається, $S_p = 100$ кВА;

ℓ - довжина лінії, км;

U_n - номінальна напруга мережі, $U_n = 10$ кВ;

r_0 - питомий активний опір лінії, Ом/км;

x_0 - питомий індуктивний опір лінії, Ом/км.

Результати розрахунків втрати напруги наочності зведемо в таблицю 1.2.

Таблиця 1.2 – Результати розрахунку втрати напруги у однопровідній лінії електропередачі

ℓ , км	5	10	15	20	25	30	35	40
ΔU	0,62	1,23	1,85	2,46	3,08	3,69	4,31	4,92

Дані результати втрати напруги наведені з урахуванням опорів обраної марки проводу та зворотного контуру через землю, без урахування втрати напруги на заземлювачах пропонованої лінії. Тому, зробимо розрахунок опорів заземлювачів на початку і в кінці мережі, які дозволять уточнити втрати напруги, а отже і довжину лінії.

Висновки по першому розділу

В даному розділі представлений варіант та структура і принцип роботи однопровідної мережі, що розробляється, на 10 кВ для віддалених сільськогосподарських споживачів та обґрунтована методика розрахунку параметрів та математичної моделі однопровідної лінії на 10 кВ .

РОЗДІЛ 2

ОБГРУНТУВАННЯ СХЕМИ ПЕРЕТВОРЕННЯ НАПРУГИ ДЛЯ ОДНОПРОВІДНОЇ ЛІНІЇ 10 кВ ТА РОЗРАХУНКИ ОСНОВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

2.1 Вибір багаторівневого інвертора з фіксацією нейтралі як перетворювача напруги в однопровідній мережі, що розробляється

Пристрій, що застосовується як перетворювач напруги з однієї фази в три і з трьох в одну фазу повинен задовольняти наступним вимогам: високий К.П.Д., надійність, можливість перетворення великої потужності, якість вихідної напруги тощо. На сьогоднішній день, внаслідок революційних змін, спрямованих на вдосконалення передачі та споживання електроенергії, створених силовою електронікою, усім цим вимогам можуть задовольняти схемотехнічні рішення побудови багаторівневих автономних інверторів напруги (МАІН).

Існує кілька підходів побудови багаторівневих інверторів, поширені з них: каскадні інвертори, інвертори з «плаваючими» конденсаторами, з фіксацією нейтралі.

Схема Н-мостового осередку каскадного інвертора напруги представлена рисунку 2.1.

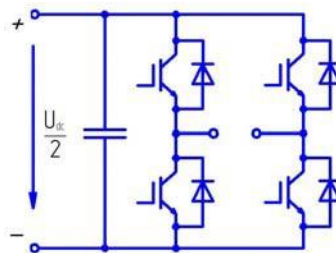


Рисунок 2.1 – Схема Н – мостового каскадного інвертора

Каскадні перетворювачі будуються на базі Н-мостових осередків, завдяки чому на виході формується ступінчаста крива вихідної напруги. У таких типів перетворювачів кожен осередок повинен живитися від ізольованого джерела постійної напруги. Тому для каскадних перетворювачів необхідне виготовлення спеціальних трансформаторів, кожен з яких включає кілька

вторинних обмоток, що мають трифазні мостові випрямлячі. Одна з основних переваг багаторівневого перетворювача такого виконання полягає у можливості масштабування робочої напруги і потужності за допомогою з'єднання певної кількості осередків. Наприклад, при трьох осередках у фазі можливе отримання 7 рівнів фазної напруги, а при п'яти осередках – 11. З іншого боку, це тягне за собою і зростання кількості вторинних обмоток трансформатора, виготовлення якого є складним і дорогим, а також зростає кількість силових ключів у порівнянні з іншими схемами, що, безумовно, є недоліком даної типології [12, 13]. Тому від такої схеми для реалізації перетворювача було вирішено відмовитися.

На рисунку 2.2 представлена схема інвертора з «плаваючими» конденсаторами

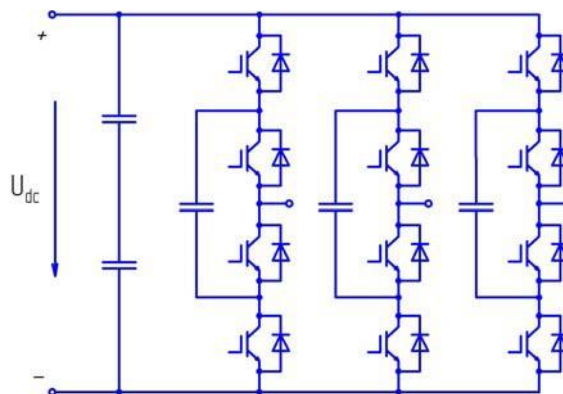


Рисунок 2.2 – Схема багаторівневого інвертора з «плаваючими» конденсаторами

В основних станах, коли включений зовнішній транзистор, з'єднаний з негативним або позитивним полюсом джерела живлення, конденсатор заряджається до напруги $U_d/2$, де U_d - напруга джерела живлення (напруга на вході інвертора), тобто напруга джерела живлення, ділиться навпіл між конденсатором і закритим транзистором, з'єднаним із протилежним полюсом джерела живлення). У додаткових станах напруга конденсатора або подається безпосередньо на вихід фази, або віднімається з напруги джерела живлення. В обох випадках на вихід фази подається напруга, що дорівнює $U_d/2$. При

збільшенні кількості рівнів (під кількістю рівнів слід розуміти, суму ділильних елементів або силових ключів, плюс один стан, а напруга одного рівня – це напруга на ділильному елементі або силовому ключі), з'являються додаткові щаблі у кривій вихідної напруги, що позитивно впливає на коефіцієнт вихідної напруги (що представляє собою відношення вихідної напруги першої гармоніки до вихідної напруги). Однак, порівняно з інвертором з фіксацією нейтралі, що розглядається, при одній кількості рівнів і несучій частоті ШІМ має вдвічі більше втрат при перемиканні, а також вимагає застосування більшої кількості конденсаторів [13]. Тому ця схема далі так само не розглядалася.

Таким чином, за основу перетворювачів напруги з однієї фази три і з трьох в одну фазу була застосована схема інвертора з фіксацією нейтралі, рисунок 2.3..

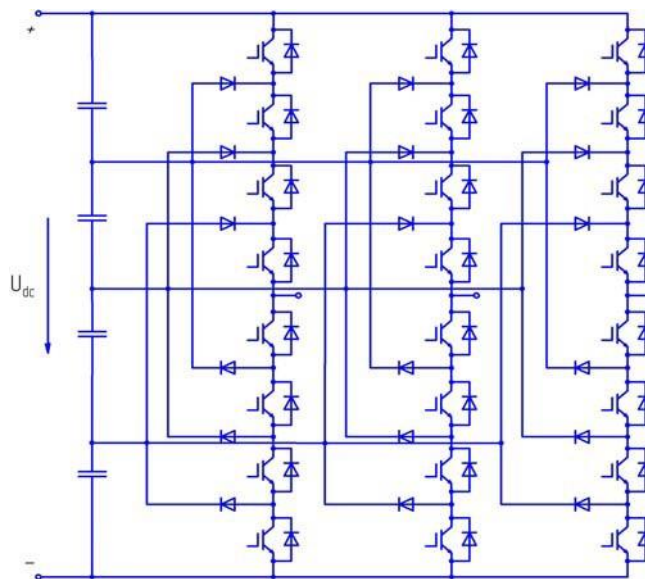


Рисунок 2.3 – Схема п'ятирівневого інвертора напруги із фіксацією нейтралі

За рахунок послідовно з'єднаних конденсаторів на вході інверторного моста на середній точці цих конденсаторів формується постійна напруга, що дорівнює $U_d/4$ [12]. Ця напруга через розділові діоди подається на середні точки плечей інвертора, утворена послідовно включеними транзисторами. За рахунок відповідного управління транзисторами інвертора на його виході формується напруга п'яти рівнів, U_d , $3/4U_d$, $1/2U_d$, $U_d/4$, 0. Поява додаткових

щаблів у кривій вихідної напруги $3/4U_d$, $1/2U_d$, $U_d/4$, підвищуються коефіцієнт синусоїдальності вихідної напруги.

Вибір кількості рівнів інвертора залежатиме від значення напруги, що комутується, і від якості вихідної напруги. Грунтуючись на викладеному вище матеріалі та попередньому комп'ютерному моделюванні, було отримано вираз, що описує значення сумарних коефіцієнтів гармонійних складових залежно від числа рівнів інвертора:

$$y = 63,6e^{-0,44x}, \quad (2.1)$$

де x - число рівнів інвертора, шт.

Значення сумарних коефіцієнтів гармонійних складових залежно кількості рівнів інвертора представлено рисунку 2.4.

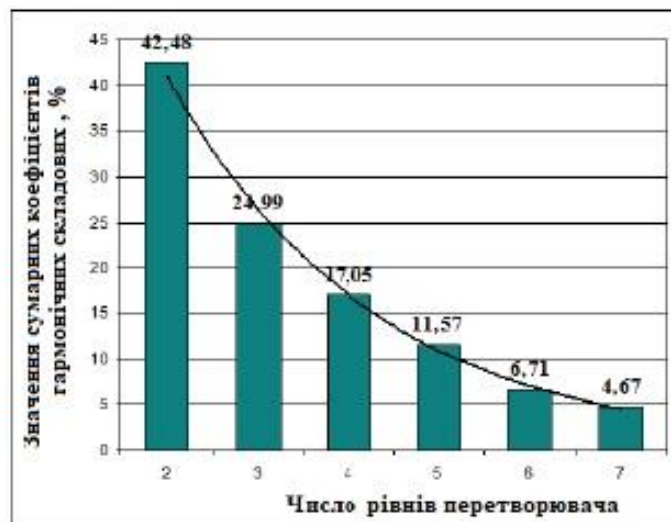


Рисунок 2.4 – Значення сумарних коефіцієнтів гармонійних складових залежно від рівня інвертора

Згідно з вимогами ПУЕ, значення повних коефіцієнтів гармонік напруги для електричних мереж 6-10 кВ усереднених в інтервалі часу 10 хв, не повинні перевищувати 5%, протягом 95% часу інтервалу в один тиждень [14]. Спираючись на результати досліджень описаних вище та на вимоги ДСТУ для електричних мереж 6- 10 кВ, як перетворювач напруги з однієї фази в три і з трьох в одну фазу, слід застосовувати інвертор з числом рівнів не менше семи.

2.2 Математичний опис формування синусоїдальної напруги в багаторівневих інверторах з фіксацією нульової точки

У порівнянні з іншими інверторами багаторівневі, мають ряд переваг: форма кривої вихідної напруги наближена до синусоїди, знижений рівень перешкод, що випромінюється перетворювачем, покращений режим роботи в навантаженні, знижені кидки струмів.

На рисунку 2.5 представлено принципову схему силової частини семирівневого інвертора з фіксацією нульової точки.

За рахунок послідовно з'єднаних конденсаторів на вході інверторного моста на середній точці цих конденсаторів формується постійна напруга, що дорівнює $U_d/6$ [12]. Ця напруга через розділові діоди подається на середні точки плечей інвертора, утворена послідовно включеними транзисторами. За рахунок відповідного управління транзисторами інвертора з його виході формується напруга семи рівнів, U_d , $5/6U_d$, $2/3U_d$, $U_d/2$, $U_d/3$, $U_d/6$, 0.

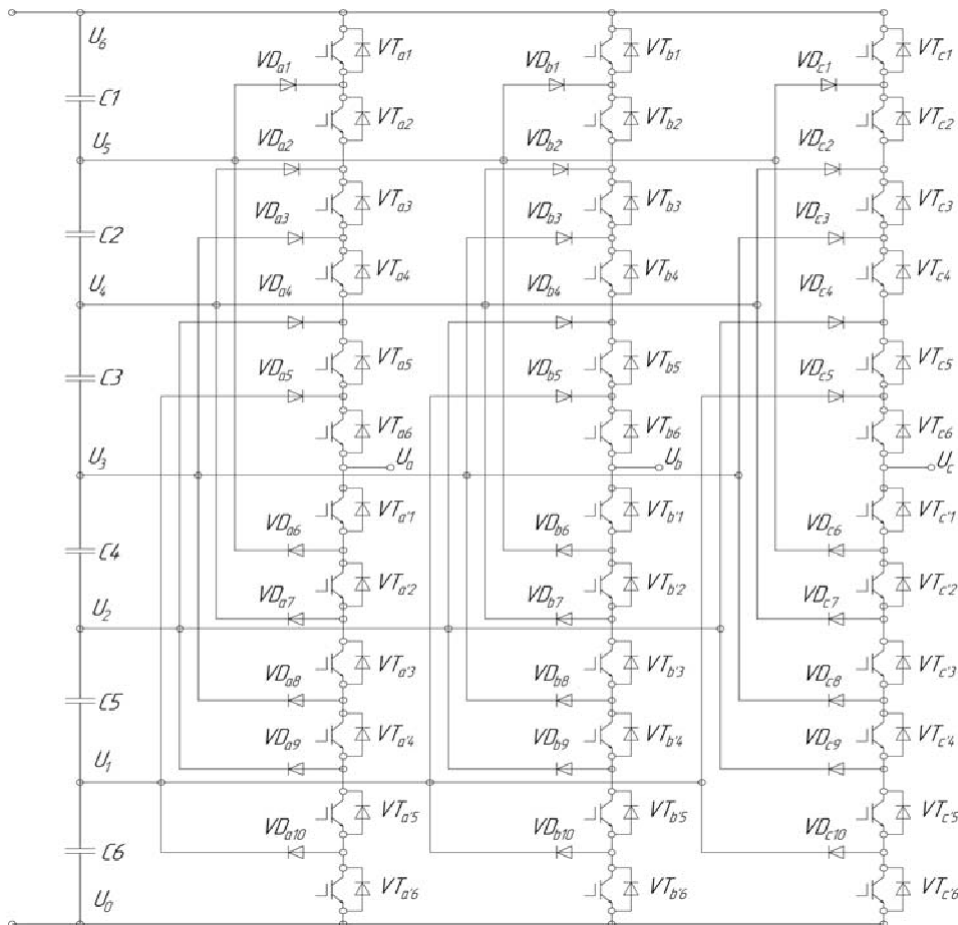


Рисунок 2.5 – Принципова схема силової частини семирівневого інвертора з фіксацією нульової точки

Діаграма стану ключів семирівневого інвертора з фіксацією нульової точки представлена на рисунку 2.6 і 2.7.

На рисунку 2.6 а) представлена схема однієї фази інвертора, що розглядається, б) і в) основні стани, при яких на виході перетворювача формується відповідно 0 і повна прикладена вхідна напруга.

Додаткові стани, при яких формується напруга $U_d/6$, $U_d/3$, $U_d/2$, $2/3U_d$, $5/6U_d$, представлені відповідно на рисунку 2.7 а), б), в), г) та д). У таблиці 2.1 наведені можливі рівні вихідної напруги однієї фази семирівневого перетворювача.

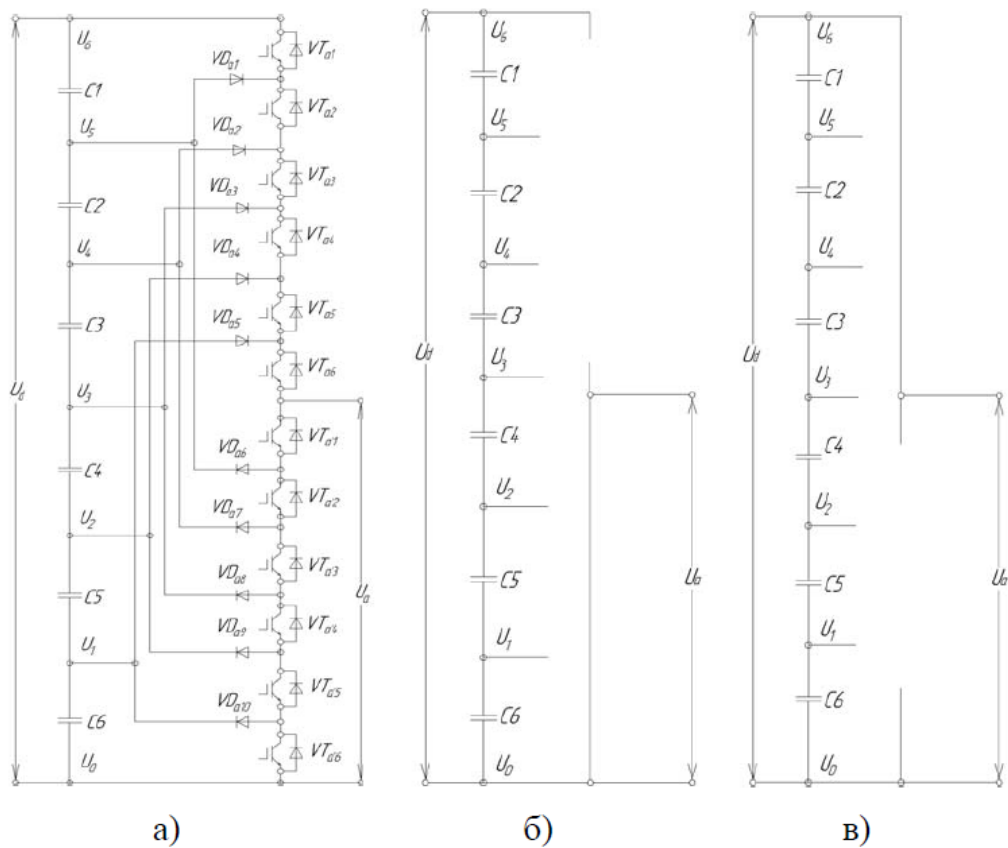


Рисунок 2.6 – Діаграма основних станів ключів багаторівневого інвертора

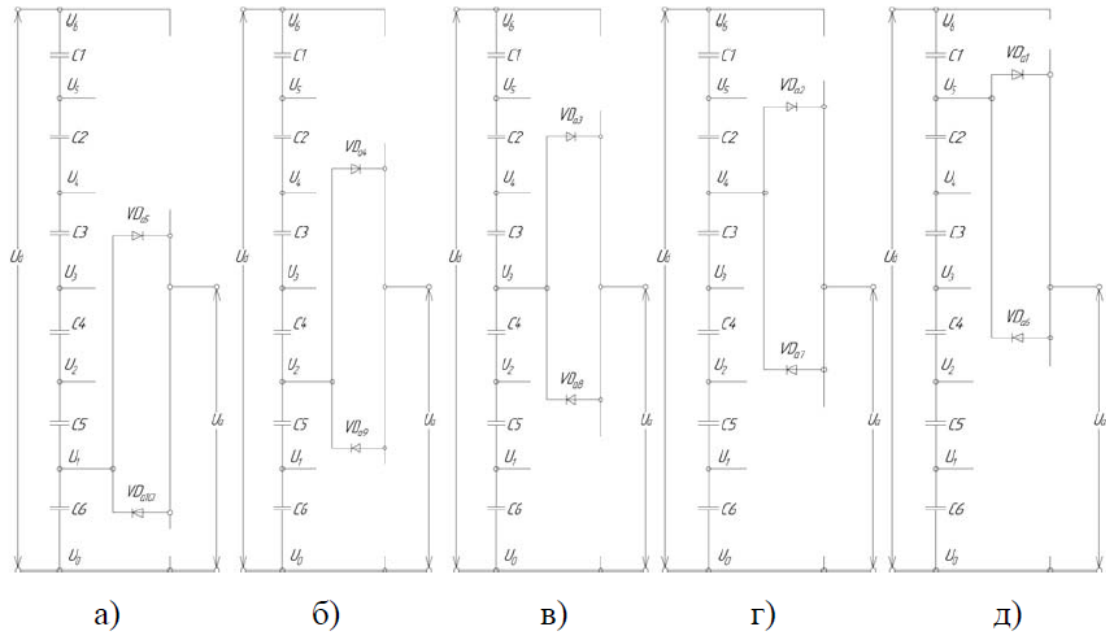


Рисунок 2.7 – Діаграма додаткових станів ключів семирівневого інвертора

Таблиця 2.3 – Алгоритм роботи ключів для однієї із фаз семирівневого інвертора

Вихідна напруга	Стан ключів											
	VT_{a1}	VT_{a2}	VT_{a3}	VT_{a4}	VT_{a5}	VT_{a6}	$VT_{a'1}$	$VT_{a'2}$	$VT_{a'3}$	$VT_{a'4}$	$VT_{a'5}$	$VT_{a'6}$
U_d	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
$5/6 U_d$	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
$2/3 U_d$	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
$U_d/2$	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0
$U_d/3$	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0
$U_d/6$	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0
0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1

У таблиці 2.3.1, 1 – така умова, за якої ключ перебуває у включеному стані, а 0 – у вимкненому. Кожна фаза перетворювача має шість додаткових ключів, що працюють у такому режимі, що включення одного з ключів можливе лише при відключеному іншому додатковому ключі. Додатковими ключами для фази А є: $VT_{a'1}$, $VT_{a'2}$, $VT_{a'3}$, $VT_{a'4}$, $VT_{a'5}$, $VT_{a'6}$. [15].

Математичну модель двофазного інвертора опишемо за аналогією з працями представленими в [16]. Повна довжина вектора напруги відповідатиме максимальній величині першої гармоніки, використання таких векторів веде до погіршення гармонійного складу при формуванні вихідного сигналу. Тому, в даному випадку раціональніше застосовувати вектори напруги, що описують при обертанні коло, вписане в чотирикутну фігуру.

В інверторах з двофазним вихідним сигналом напруги визначають чотири вектори, які розташовані один до одного під кутом 90^0 . Просторове розподілення векторів такого інвертора представлено на рисунку 2.8.

Результуючий вектор буде визначатися як геометрична сума векторів, що обмежує сектор, в якому він знаходиться, рисунок 2.12:

$$\bar{U}_p = \sqrt{U_\alpha^2 + U_\beta^2}. \quad (2.2)$$

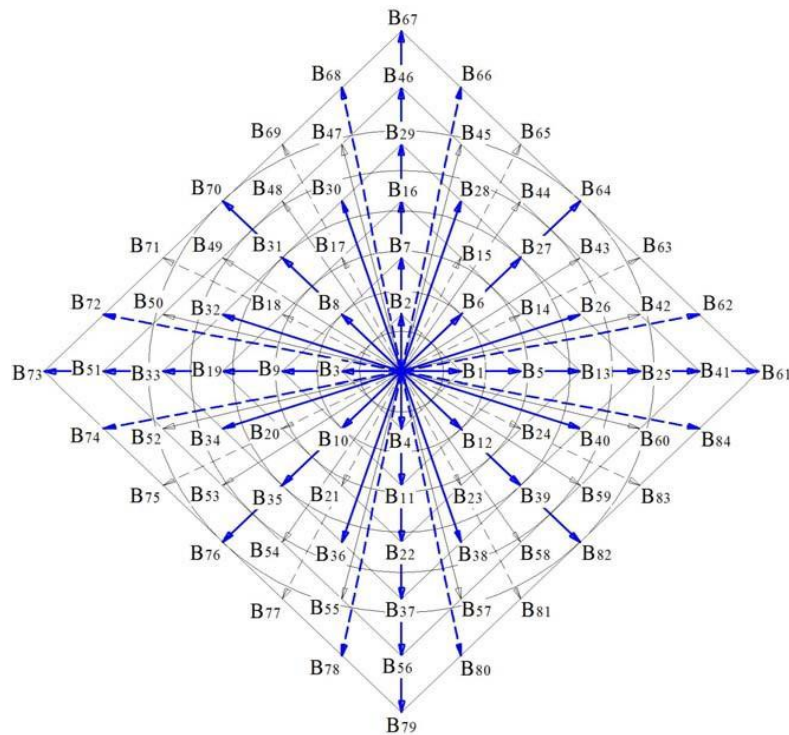


Рисунок 2.8 – Просторовий розподіл векторів напруги семирівневого інвертора за двофазної схеми

Кут просторового положення результуючого вектора визначається як:

$$\alpha = \arctg \frac{U_\beta}{U_\alpha}. \quad (2.3)$$

Для формування результуючого вектора, як показано на рисунку 2.9, необхідно:

$$T_{\pi} \cdot \bar{U}_p = \bar{B}_{13} \cdot T_1 + \bar{B}_7 \cdot T_2 . \quad (2.4)$$

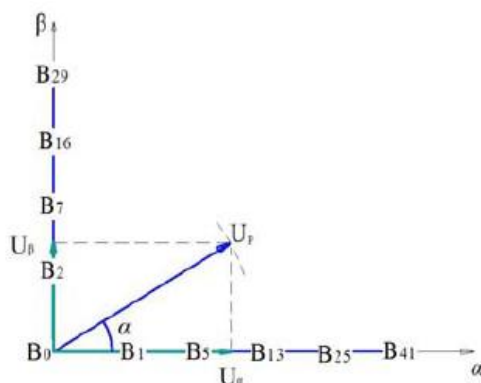


Рисунок 2.9 – Результуючий вектор напруги двофазного інвертора

Положення векторів можна визначити як:

$$\bar{B}_{13} = U_1 \cdot e^{j\alpha_1} ; \quad (2.5)$$

$$\bar{B}_7 = U_2 \cdot e^{j\alpha_2} ; \quad (2.6)$$

$$\bar{U}_p = U_p \cdot e^{j\alpha_p} . \quad (2.7)$$

Підставимо отримані вирази (2.4):

$$T_{\pi}(U_p \cdot \cos\alpha_p + jU_p \sin\alpha_p) = T_1 U_1 \cos\alpha_1 + jT_1 U_1 \sin\alpha_1 + T_2 U_2 \cos\alpha_2 + jT_2 U_2 \sin\alpha_2$$

Вирішуючи цей вираз через матрицю і перетворивши його отримуємо:

$$T_1 \cdot U_{cn} \cdot n \cdot \sin(\alpha_2 - \alpha_1) = T_{\pi} \cdot U_p \cdot \sin(\alpha_2 - \alpha_p) ; \quad (2.8)$$

$$T_2 \cdot U_{cn} \cdot n \cdot \sin(\alpha_2 - \alpha_1) = T_{\pi} \cdot U_p \cdot \sin(\alpha_p - \alpha_2) . \quad (2.9)$$

З отриманих виразів визначаємо час включення T1 та T2:

$$T_1 = \frac{T_{\pi} \cdot U_p \cdot \sin(\alpha_2 - \alpha_p)}{U_{cn} \cdot n \cdot \sin(\alpha_2 - \alpha_1)} , \quad (2.10)$$

де n – кількість конденсаторів;

U_{cn} – напруга на конденсаторі, В.

$$T_2 = \frac{T_{\pi} \cdot U_p \cdot \sin(\alpha_p - \alpha_2)}{U_{cn} \cdot n \cdot \sin(\alpha_2 - \alpha_1)} . \quad (2.11)$$

Тепер розглянемо формування трифазного сигналу вихідного інвертора.

Рівняння балансу для трифазної системи визначається за таким виразом:

$$U_a + U_b + U_c = 0. \quad (2.12)$$

У свою чергу миттєві значення напруги рівні:

$$u_a = U \cdot \cos \omega t, \quad (2.13)$$

$$u_b = U \cdot \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}), \quad (2.14)$$

$$u_c = U \cdot \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}). \quad (2.15)$$

Результуючий вектор напруги через оператор повороту визначається за таким виразом:

$$U_p = \frac{2}{3} \cdot (u_a + u_b \cdot a + u_c \cdot a^2), \quad (2.16)$$

де a – оператор поворота, $a = e^{j\frac{2\pi}{3}}$.

Результуючий вектор може бути представлений в декартових системах координат наступних видів: в нерухомих координатах і обертаються з синхронною швидкістю. У подальшому описі дотримуватимемося нерухомих координат, для яких вісь α – дійсна, β – уявна. Тоді результуючий вектор буде визначено:

$$U_p = U_\alpha + jU_\beta. \quad (2.17)$$

Прирівнявши, ліві частини виразів отримуємо:

$$U_\alpha + jU_\beta = \frac{2}{3} \cdot (U_a + U_b \cdot e^{-j\frac{2\pi}{3}} + U_c \cdot e^{j\frac{2\pi}{3}}) \quad (2.18)$$

або

$$U_\alpha + jU_\beta = \frac{2}{3} \cdot (U_a + U_b \cos(\frac{2\pi}{3}) + U_c \cos(\frac{2\pi}{3})) + j\frac{2}{3} \cdot (U_c \sin(\frac{2\pi}{3}) - U_b \sin(\frac{2\pi}{3})). \quad (2.19)$$

Тоді

$$U_\alpha + jU_\beta = \frac{2}{3} \cdot (U_a + U_b \cdot (-\frac{1}{2}) + U_c \cos(-\frac{1}{2})) + j\frac{2}{3} \cdot (U_c \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} - U_b \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}), \quad (2.20)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{\alpha} = \frac{2}{3} \cdot (U_a - 0,5 \cdot U_b - 0,5 \cdot U_c) \\ U_{\beta} = \frac{2}{3} \cdot (0,866 \cdot U_c - 0,866 \cdot U_b) \end{array} \right\}. \quad (2.21)$$

Просторові вектори напруги семирівневого інвертора наведено малюнку 2.10.

Трифазна система визначає 6 просторових векторів напруги, кінець яких описує траєкторію правильної шестикутної фігури. Повна довжина вектора напруги відповідно дорівнює максимальній величині

перша гармоніка, досягнення цієї величини, призводить до погіршення гармонійного складу сигналу на виході інвертора. Тому раціональніше застосовувати обертовий вектор напруги, що описує кінцем коло, вписане в цю шестикутну фігуру. Наприклад, при використанні одного рівня напруги, характерного для традиційного мостового інвертора, визначається 6 ненульових та 2 нульові стани. Визначити кількість станів в залежності від рівнів інвертора можна за такими виразами (для одного рівня не використовується):

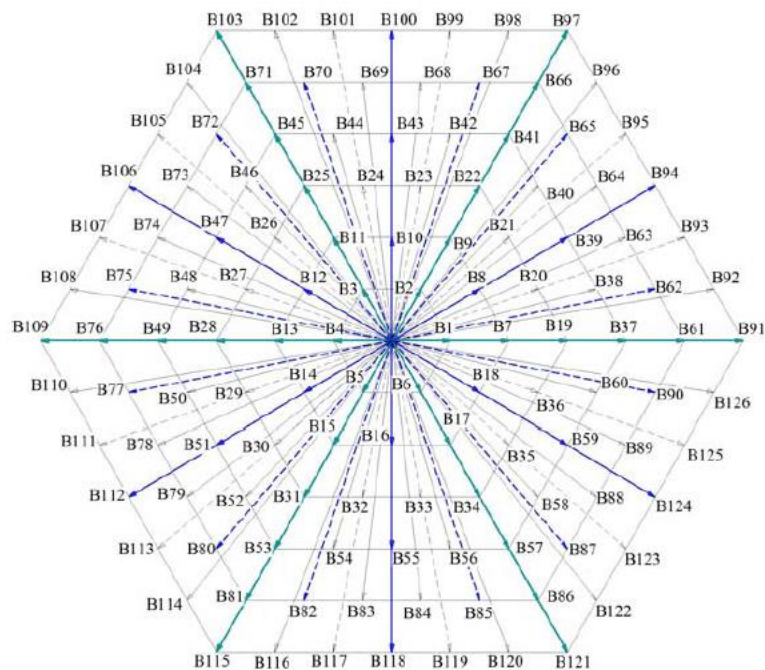


Рисунок 2.10 – Просторовий розподіл векторів напруги семирівневого інвертора

- ненульові стани:

$$n_{i \neq 0} = 6 \cdot \frac{n \cdot (n - 1)}{2}, \quad (2.22)$$

де n – число рівній інвертора.

- нульовий стан:

$$n_{i=0} = n + 1. \quad (2.23)$$

Для семирівневого інвертора кількість ненульових станів становить 127, нульових 8.

Векторна діаграма представлена на рисунку 2.10 складається з 6 секторів. Перший сектор представлений на рисунку 2.11.

Результуючий обертовий вектор напруги формується, як сума векторів, що обмежують сектор, в якому він знаходиться.

Розрахуємо вирази для кожного стану векторів напруги першого сектора:

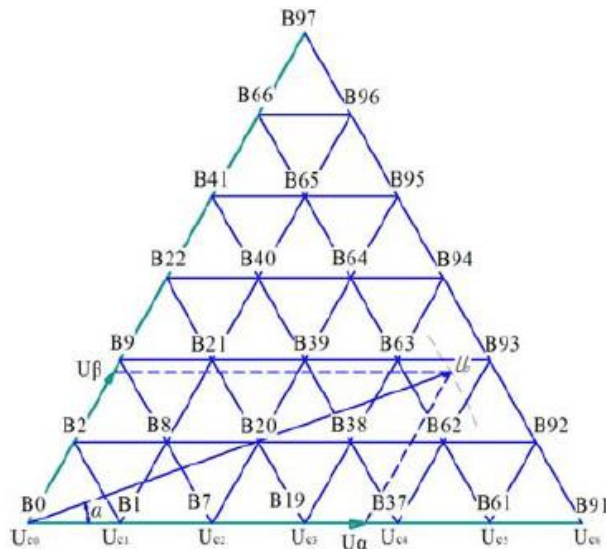


Рисунок 2.11 – Перший сектор векторної діаграми

$$- B_1 = U_{c1}; B_2 = U_{c2} \cdot e^{j60^\circ};$$

$$- B_7 = U_{c2}; B_8 = 0,866 \cdot U_{c2} \cdot e^{j30^\circ}; B_9 = U_{c2} \cdot e^{j60^\circ};$$

$$- B_{19} = U_{c3}; B_{20} = 0,882 \cdot U_{c3} \cdot e^{j19,4^\circ}; B_{21} = 0,882 \cdot U_{c3} \cdot e^{j40,8^\circ}; B_{22} = U_{c3} \cdot e^{j60^\circ};$$

$$- B_{37} = U_{c4}; B_{38} = 0,901 \cdot U_{c4} \cdot e^{j13,9^\circ}; B_{39} = 0,866 \cdot U_{c4} \cdot e^{j30^\circ}; B_{40} = 0,901 \cdot U_{c4} \cdot e^{j46,1^\circ};$$

$$B_{41} = U_{c4} \cdot e^{j60^\circ};$$

$$- B_{61} = U_{c5}; B_{62} = 0,917 \cdot U_{c5} \cdot e^{j11^\circ}; B_{63} = 0,872 \cdot U_{c5} \cdot e^{j23,4^\circ};$$

$$B_{64} = 0,872 \cdot U_{c5} \cdot e^{j36,6^\circ}; B_{65} = 0,917 \cdot U_{c5} \cdot e^{j49,1^\circ}; B_{66} = U_{c5} \cdot e^{j60^\circ};$$

$$- B_{91} = U_{c6}; B_{92} = 0,928 \cdot U_{c6} \cdot e^{j8,9^\circ}; B_{93} = 0,882 \cdot U_{c6} \cdot e^{j19,4^\circ};$$

$$B_{94} = 0,866 \cdot U_{c6} \cdot e^{j30^\circ}; B_{95} = 0,882 \cdot U_{c6} \cdot e^{j40,8^\circ}; B_{96} = 0,928 \cdot U_{c6} \cdot e^{j51,1^\circ};$$

$$B_{97} = U_{c6} \cdot e^{j60^\circ}.$$

Зміна значень векторів B_i залежить від тривалості включення (t_i) транзисторів відповідних рівнів напруги на повному періоді T_n . Розрахунок результуючого вектора напруги, наведеного до осі α здійснюється за таким виразом:

$$U_p \cdot \cos \alpha \cdot T_n = n \cdot U_{cn} \cdot T_1 + (n \cdot U_{cn} \cdot \cos 60^\circ) \cdot T_2, \quad (2.24)$$

де n – кількість конденсаторів;

U_{cn} - напруга на конденсаторі, В.

Привівши до осі β :

$$U_p \cdot \sin \alpha \cdot T_n = (n \cdot U_{cn} \cdot \sin 60^\circ) \cdot T_2. \quad (2.25)$$

З отриманих виразів (2.24) та (2.25) виведемо значення часу T_1 та T_2 :

$$T_1 = \frac{U_p \cdot T_n - (n \cdot U_{cn} \cdot \cos 60^\circ) \cdot T_2}{n \cdot U_{cn}}, \quad (2.26)$$

$$T_2 = \frac{U_p \cdot T_n \cdot \sin \alpha}{n \cdot U_{cn} \cdot \sin 60^\circ}. \quad (2.27)$$

Тоді час нульового стану:

$$T_0 = T_n - T_1 - T_2. \quad (2.28)$$

Звідси результуючий вектор напруги, рисунок 2.11 визначається як:

$$\bar{V}_{62} \cdot T_0 + \bar{V}_{93} \cdot T_1 + \bar{V}_{63} \cdot T_2 = U_{\text{рез}} \cdot T_{\text{II}}. \quad (2.29)$$

Крива вихідної напруги семирівневого інвертора показана малюнку 2.12.

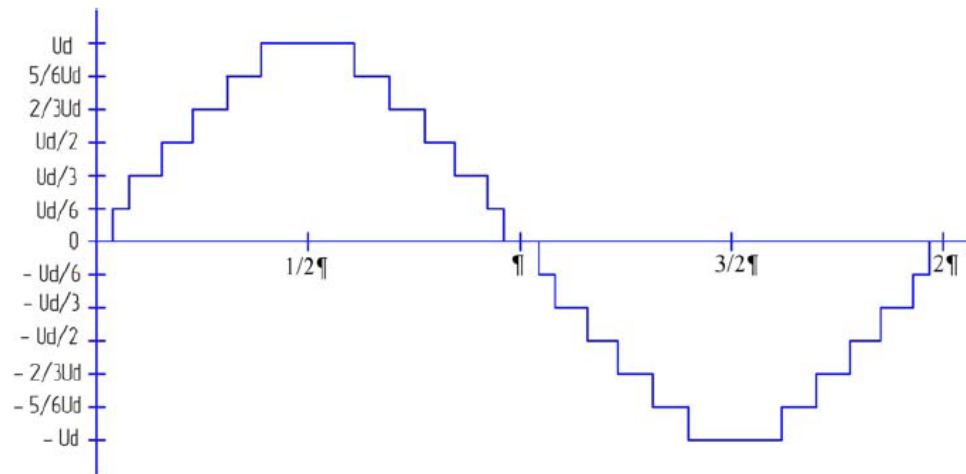


Рисунок 2.12 – Крива вихідної напруги семирівневого інвертора

За рахунок появи додаткових щаблів у кривій вихідного напруги $5/6U_d$, $2/3U_d$, $U_d/2$, $U_d/3$, $U_d/6$, суттєво покращує якість вихідної напруги (значення сумарного коефіцієнта гармонійних складових напруги) [12, 13].

Висновки по другому розділу

1. На базі семирівневого інвертора напруги розроблено пристрій, що перетворює трифазну напругу на однофазну і однофазну на трифазну. Теоретичні дослідження, роботи запропонованого для однопровідної системи перетворювача, дозволяють стверджувати, що пристрій здатний вирішити задачу перетворення електроенергії для передачі по однопровідних мережах.

2. Здійснено розрахунок запропонованого семирівневого інвертора напруги на 10 кВ.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА СХЕМИ ПРИНЦИПОВОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ДЛЯ ПЕРЕТВОРЕННЯ ТРИФАЗНОЇ НАПРУГИ В ОДНОФАЗНУ І НАВПАКИ

3.1 Розробка схеми перетворювачів напруги для однопровідної лінії на 10 кВ та розрахунок основних елементів

Перед безпосереднім розрахунком перетворювачів проаналізуємо можливі режими роботи мережі із ізольованою нейтраллю, щоб зробити поправку для значень струмів і напруг.

Відповідно до літературних джерел [17, 18, 19] у мережах напругою 6, 10, 20 і 35 кВ нейтраль ізольована від землі, лінії мають лише три фазні проводи. Отже, для цих напруг споруджують мережі із ізольованою нейтраллю. У таких системах замикання на землю однієї із фаз не є коротким замиканням.

Зробимо розрахунок перетворювача трифазної напруги в однофазне. Даний пристрій включає такі основні блоки: трифазний випрямляч, ємнісний дільник напруги поєднаний з семирівневим інвертором, схему управління. Результати розрахунків для різних класів потужності зведено до таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Результати розрахунків перетворювача трифазної напруги на однофазну залежно від потужності

S, кВА	40	63	100	160	250	400	630
U _л , В	10	10	10	10	10	10	10
I _л , А	2,31	3,64	5,77	9,24	14,43	23,1	36,36
ланцюг випрямляча							
U _ф , В	5,77	5,77	5,77	5,77	5,77	5,77	5,77
U _{d0} , В	13,6	13,6	13,6	13,6	13,6	13,6	13,6
U _{Amax} , В	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3
U _{max} , В	17,2	17,2	17,2	17,2	17,2	17,2	17,2
I _a , А	0,77	1,21	1,92	3,08	4,81	7,7	12,12
m, шт	3	3	3	3	3	3	3
ланцюг ємнісного подільника							
N _с , шт	6	6	6	6	6	6	6
U _{с max} , кВ	2,87	2,87	2,87	2,87	2,87	2,87	2,87
ланцюг інвертора							

m, шт	6	6	6	6	6	6	6
m ₀ , шт	36	36	36	36	36	36	36
n, шт	7	7	7	7	7	7	7
O _i	5	5	5	5	5	5	5
Д	10	10	10	10	10	10	10
Д ₀	30	30	30	30	30	30	30

У сільській місцевості переважають споживачі малої та середньої потужності, а з урахуванням впливу комунально-побутового навантаження, споживання продовжує зростати, як приклад зробимо розрахунок для потужності 100 кВА.

Розрахунок випрямляча. Зробимо розрахунок при схемі з'єднання зірка живильного трансформатора, тоді з формули [17]:

$$\begin{aligned}
 S &= \sqrt{3} \cdot U_{\pi} \cdot I_{\pi}, \text{ ВА}, \\
 I_{\pi} &= \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_{\pi}}, \text{ А.} \\
 I_{\pi} &= \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_{\pi}} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 10} = 5,77, \text{ А.}
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

Тоді $I_{\text{л}} = I_{\text{ф}} = 5,77 \text{ А}$.

Середнє значення струму, який протікає через вентиль [20,21]: $I_{\text{а}}=4.8 \text{ А}$.

$$\begin{aligned}
 I_{\text{а}} &= \frac{I_{\text{д}}}{3}, \text{ А}, \\
 I_{\text{а}} &= \frac{I_{\text{д}}}{3} = \frac{5,77}{3} = 1,92, \text{ А.}
 \end{aligned}
 \tag{3.2}$$

Приймаємо струм діода із запасом не менше, ніж у 2,5 рази [21]:

Аналогічно зробимо розрахунок для схеми з'єднання трикутник, за найбільшим значенням струму, що вийшло, виберемо діоди для випрямляча.

$$I_{\pi} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 10} = 5,77, \text{ А}$$

Тоді $I_{\text{л}} = \sqrt{3} \cdot I_{\text{ф}}$ звідси:

$$I_{\text{ф}} = \frac{5,77}{\sqrt{3}} = 3,33, \text{ А}$$

Середнє значення струму, що протікає через вентиль [20]:

$$I_{\text{а}} = \frac{3,33}{3} = 1,11, \text{ А}$$

Приймаємо струм діода із запасом у 2,5 рази: $I_a = 2,8$ А [21].

Вибір діодів моста зробимо за струмом $I_a = 4,8$ А.

Відповідно до [22], середнє значення випрямленої напруги для випрямляча, з'єднаного за схемою Ларіонова, має вигляд:

$$U_{d0} = 2,34 \cdot U_{2\phi}, \text{ В}, \quad (3.3)$$

де $U_{2\phi}$ - діюче значення фазної напруги вторинної обмотки трансформатора на початку лінії.

$$U_{2\phi} = \frac{U_{\pi}}{\sqrt{3}} = \frac{10}{\sqrt{3}} = 5,77 \text{ кВ}$$

$$U_{d0} = 2,34 \cdot 5,77 = 13,6 \text{ кВ}.$$

Амплітуда зворотної напруги, що прикладається до вентиля, знаходимо за виразом:

$$U_{A\max} = \sqrt{6} \cdot U_{2\phi} = 1,045 \cdot U_{d0}, \text{ кВ}$$

$$U_{A\max} = \sqrt{6} \cdot U_{2\phi} = 1,045 \cdot U_{d0} = 1,045 \cdot 13,6 = 14,3 \text{ кВ}. \quad (3.4)$$

Враховуючи перенапруги, приймаємо 20% запас по напрузі для вентилів випрямляча:

$$U_{\max} = U_{A\max} \cdot 1,20, \text{ кВ},$$

$$U_{\max} = U_{A\max} \cdot 1,20 = 14,3 \cdot 1,20 = 17,16 \text{ кВ}.$$

Кількість діодів у плечі випрямляча розраховується за такою формулою:

$$m = \frac{U_{d0}}{U_d}, \text{ шт},$$

$$m = \frac{U_{d0}}{U_d} = \frac{17,16}{6,0} = 2,86 \approx 3 \text{ шт}.$$

де U_d – зворотна напруга діода, В; вибираємо діод марки Д123-200-60, у якого зворотна напруга, $U_d = 6,0$ кВ.

Приймаємо 4 діоди в плечі на випадок, аварійної ситуації та виходу одного з ладу.

Загальна кількість діодів випрямляча:

$$m_{\text{общ}} = 6 \cdot m, \text{ шт},$$

$$m_{\text{общ}} = 6 \cdot 4 = 24 \text{ шт}.$$

Перевіряємо умови для трифазного випрямляча [59, 60]:

$$U_{\text{обр}} > U_{\text{max}}$$

$$U_{\text{обр}} = 4 \cdot 6 = 24 \text{ кВ.}$$

При послідовному з'єднанні на приладах з меншим зворотним струмом або струмом у закритому стані падає більша частина напруги. При цьому найбільший розбаланс напруг виходить у тому випадку, якщо один прилад має найменший зворотний струм, а решта – найбільший. З метою вирівнювання напруги на окремих приладах паралельно кожному з них включається шунтуючий резистор $R_{\text{ш}}$. Резистори, включені паралельно кожному діоду, виявляються з'єднаними послідовно і утворюють дільник напруги і навіть у разі пробою одного з діодів через виробничі дефекти не дозволяють вирости напрузі на інших елементах ланцюга.

Шунтуючі конденсатори необхідні, для запобігання виникненню імпульсних короткочасних перенапруг, а також для усунення так званого "білого" шуму генерованого діодами. Якщо джерелом живлення є мережа змінного струму на 50 Гц – такі конденсатори не встановлюються [20].

Розрахунок опорів шунтуючих резисторів $R_{\text{ш}}$ у потужних перетворювальних установках принципово не відрізняється від розрахунку в малопотужних пристроях, але проводиться з урахуванням загального опору плеча та потужності розсіювання резистора [20,21]:

$$R_{\text{ш}} = \frac{U_{\text{повт}} \cdot n - U_{\text{Вmax}}}{(n - 1) \cdot I_{\text{Omax}}}, \quad (3.5)$$

де $U_{\text{Вmax}}$ - амплітудне значення зворотної напруги вентилів перетворювальної установки, визначається схемою випрямлення та розраховується з урахуванням коливання напруги мережі, В;

$U_{\text{повт}}$ - напруга одного діода, що повторюється, В;

n – кількість послідовно з'єднаних вентилів, прим;

I_{Omax} -максимальний зворотний струм, А.

Зворотне напруження на діоді:

$$U_{\text{обVD}} = \frac{U_{\text{d0}}}{m} = \frac{17,16}{4} = 4290 \text{ В,}$$

$$R_{ш} = \frac{6000 \cdot 4 - 17160}{(4-1) \cdot 0,035} = 65142 \text{ Ом.}$$

Приймаємо резистори марки SGT 52 с підвищеним опором 10 МОм $\pm 1\%$, щоб знизити потужність розсіювання на резистори.

Зробимо розрахунок випрямляча, що складається з двох вентилів для перетворювача однофазної напруги трифазне проводиться аналогічно. Відповідно до того, що на виході перетворювача з трьох в одну фазу формується рівну напругу:

$$U_{л} = U_{ф} = 10 \text{ кВ.}$$

Тоді значення лінійного струму зменшиться у $\sqrt{3}$.

Значення випрямленого струму у випрямлячі, зібраному за бруківкою, визначається з виразу [20]:

$$I_0 = \frac{2 \cdot I_m}{\pi}, \text{ А,} \quad (3.6)$$

де I_m – амплітудне значення струму, А.

$$I_m = I_{л} \cdot \sqrt{2} = 3,33 \cdot \sqrt{2} = 4,71 \text{ А,}$$

$$I_0 = \frac{2 \cdot 4,71}{3,14} = 3 \text{ А.}$$

Значення струму, що протікає через вентиль, дорівнює [20]:

$$I = \frac{\pi \cdot I_0}{4} = 0,785 \cdot I_0, \text{ А,}$$

$$I = 0,785 \cdot 3 = 2,355 \text{ А.} \quad (3.7)$$

Випрямлена напруга на виході випрямляча визначається [20]:

$$U_0 = \frac{2 \cdot U_m}{\pi}, \text{ В,} \quad (3.8)$$

де U_m – амплітудне значення напруги, В.

$$U_m = U_{л} \cdot \sqrt{2} = 10 \cdot \sqrt{2} = 14,142 \text{ кВ,}$$

$$U_0 = \frac{2 \cdot 14,142}{3,14} = 9,008 \text{ кВ.}$$

Зворотна напруга, що діє на кожен вентиль, визначається з виразу [20]:

$$U_{обр} = U_m = 1,57 \cdot U_0, \text{ кВ,}$$

$$U_{обр} = 1,57 \cdot 9,008 = 14,143 \text{ кВ.}$$

Враховуючи перенапруги, приймаємо 20% запас по напрузі для вентилів випрямляча:

$$U_{\max} = U_{A\max} \cdot 1,20 = 14,143 \cdot 1,20 = 16,97 \text{ кВ.}$$

Кількість діодів у плечі випрямляча:

$$m = \frac{U_{d0}}{U_d} = \frac{16,97}{6,0} = 2,83 \approx 3 \text{ шт.}$$

Приймаємо 4 діоди в плечі на випадок аварійної ситуації та виходу одного з ладу.

$$m_{\text{общ}} = 4 \cdot 4 = 16 \text{ шт.}$$

Вибрано аналогічні марки діодів та шунтуючих опорів.

Зробимо розрахунок семирівневого інвертора напруги для перетворювача трифазної напруги в однофазне.

З урахуванням схеми з'єднання зірка згідно з формулою (2.60) $I_L \cdot I_\phi = 5,77$ А.

Приймаємо струм із запасом у 2,5 рази [22]: $I_a = 14,5$ А.

Відповідно до виразів (2.62):

$$U_{d0} = 2,34 \cdot 5,77 = 13,6 \text{ кВ.}$$

Тоді амплітудне значення зворотної напруги, що прикладається:

$$U_{A\max} = \sqrt{6} \cdot U_{2\phi} = 1,045 \cdot U_{d0} = 1,045 \cdot 13,6 = 14,3 \text{ кВ.}$$

Враховуючи перенапруги, приймаємо 20% запас по напрузі:

$$U_{\max} = U_{A\max} \cdot 1,20 = 14,3 \cdot 1,20 = 17,16 \text{ кВ.}$$

Розрахунок для схеми з'єднання трикутник робити не будемо з урахуванням того, що $I_L = \sqrt{3} I_\phi$, отже, струм, що протікає через ключі інвертора, буде в раз менше струму при схемі з'єднання зірка.

Кількість силових ключів у плечі визначаємо, згідно з рекомендаціями [64, 65], вибрано марку транзистора: IGBT IXBF32N300, 3000 В.

Кількість ключів в одному плечі:

$$m = \frac{U_{\max}}{U_d}, \text{ шт.},$$

$$m = \frac{U_{\max}}{U_d} = \frac{17160}{3000} = 5,72 \approx 6 \text{ шт.}$$

Згідно зі статтями [23, 24], визначаємо кількість рівнів для інвертора:

$$n = m + 1,$$

де m - число ключів у плечі інвертора, шт,

$$n = m + 1 = 6 + 1 = 7 \text{ рівнів.}$$

Згідно з аналізом, проведеним у п. 2.1 та 2.2 глави 2, приймаємо число рівнів 7.

Кількість загальних точок відповідно дорівнює:

$$O_i = m - 1,$$

$$O_i = m - 1 = 6 - 1 = 5. \quad (3.9)$$

Кількість блокуючих діодів у секції [67, 68]:

$$D = 2 \cdot n - 4,$$

де n – число рівнів інвертора, шт.

$$D = 2 \cdot n - 4 = 2 \cdot 7 - 4 = 10 \text{ шт.}$$

Загальна кількість блокувальних діодів з урахуванням двофазного інвертора:

$$D_o = 4 \cdot (n - 2),$$

$$D_o = 4 \cdot (n - 2) = 4 \cdot (7 - 2) = 20 \text{ шт.}$$

Напруга на блокуючих діодах буде формуватися залежно від їх розташування:

$$U_{\text{дн}} = \frac{U_d}{n-1} \cdot N = U_o \cdot N, \quad (3.10)$$

де N – номер блокуючого діода. ($N = 1$ – для верхнього та нижніх відсікаючих діодів)

Для верхнього першого блокуючого діода першої секції:

$$U_{\text{Vd1}} = \frac{17160}{(7-1)} = 2860 \text{ В.}$$

Для верхнього другого блокуючого діода першої секції:

$$U_{VDa2} = \frac{17160}{(7-1)} \cdot 2 = 5720 \text{ В.}$$

Для верхнього третього блокуючого діода першої секції:

$$U_{VDa3} = \frac{17160}{(7-1)} \cdot 3 = 8580 \text{ В.}$$

Для верхнього четвертого блокуючого діода першої секції:

$$U_{VDa4} = \frac{17160}{(7-1)} \cdot 4 = 11440 \text{ В.}$$

Для діода з найбільшим номером складає: $N = m - 1$ максимальна напруга

$$U_{VDm-1} = U_{\max} = \frac{U_d \cdot (n-2)}{n-1} = U_o \cdot (n-2) = \frac{U_d \cdot (m-1)}{m}, \quad (3.11)$$

Для верхнього (п'ятого) блокуючого діода першої секції:

$$U_{VDm-1} = U_{\max} = \frac{17160 \cdot (7-2)}{7-1} = 14300 \text{ В.}$$

Інші напруги на діодах, визначаються відповідно до того, що підключені до кожної точки O1, O2, O3, O4 мають однакову сумарну напругу:

$$U_{VD1} + U_{VD(m-1)} = U_{VD2} + U_{VD(m-2)} = U_{VD(m-1)} + U_{VD1} = U_d, \quad (3.12)$$

Для нижнього першого блокуючого діода першої секції:

$$U_{VDa6} = U_d - U_{VDa1} = 17160 - 2860 = 14300 \text{ В.}$$

Для нижнього другого блокуючого діода першої секції:

$$U_{VDa7} = U_d - U_{VDa2} = 17160 - 5720 = 11440 \text{ В.}$$

Для нижнього третього блокуючого діода першої секції:

$$U_{VDa8} = U_d - U_{VDa3} = 17160 - 8580 = 8580 \text{ В.}$$

Для нижнього четвертого блокуючого діода першої секції:

$$U_{VDa9} = U_d - U_{VDa4} = 17160 - 11440 = 5720 \text{ В.}$$

Для нижнього п'ятого блокуючого діода першої секції:

$$U_{VDa10} = U_d - U_{VDa5} = 17160 - 14300 = 2860 \text{ В}$$

Приймаємо діоди марки ДЧ323-200-46, 4600 В. Для обраної марки визначаємо кількість блокувальних діодів:

$$m = \frac{U_{VDi}}{U_d}, \text{ шт.}, \quad (3.13)$$

Для верхнього першого блокуючого діода першої секції:

$$m = \frac{U_{VDa1}}{U_d} = \frac{2860}{4600} = 0,62 \approx 1 \text{ шт.}$$

Для верхнього другого блокуючого діода першої секції:

$$m = \frac{U_{VDa2}}{U_d} = \frac{5720}{4600} = 1,24 \approx 2 \text{ шт.}$$

Для верхнього третього блокуючого діода першої секції:

$$m = \frac{U_{VDa3}}{U_d} = \frac{8580}{4600} = 1,87 \approx 2 \text{ шт.}$$

Для верхнього четвертого блокуючого діода першої секції:

$$m = \frac{U_{VDa4}}{U_d} = \frac{11440}{4600} = 2,49 \approx 3 \text{ шт.}$$

Для верхнього п'ятого блокуючого діода першої секції:

$$m = \frac{U_{VDa5}}{U_d} = \frac{14300}{4600} = 3,11 \approx 4 \text{ шт.}$$

Для нижніх блокуючих діодів 6, 7, 8, 9, 10 відповідно кількість одно: 4, 3, 2, 2, 1 шт.

Визначаємо значення шунтуючих опорів для блокуючих діодів, згідно з формулою (3.5) [20, 24]:

Для верхнього другого блокуючого діода першої секції:

$$R_{ш2} = \frac{4600 \cdot 2 - 5720}{(2 - 1) \cdot 0,05} = 70 \text{ кОм.}$$

Для верхнього третього блокуючого діода першої секції:

$$R_{ш3} = \frac{4600 \cdot 2 - 8580}{(2 - 1) \cdot 0,05} = 13 \text{ кОм.}$$

Для верхнього четвертого блокуючого діода першої секції:

$$R_{ш4} = \frac{4600 \cdot 3 - 11440}{(3 - 1) \cdot 0,05} = 24 \text{ кОм.}$$

Для верхнього п'ятого блокуючого діода першої секції:

$$R_{ш5} = \frac{4600 \cdot 4 - 14300}{(4 - 1) \cdot 0,05} = 28 \text{ кОм.}$$

Для нижнього другого, третього, четвертого і п'ятого блокуючого діода опору резисторів відповідно дорівнюють: 28 кОм, 24 кОм, 13 кОм, 70 кОм.

Приймаємо резистори марки SGP 52, 10 Мом $\pm 1\%$, з підвищеним опором, щоб знизити теплові втрати на опорі.

Для перетворювача з однофазної напруги трифазний розрахунок проводиться аналогічно з урахуванням того, що в інверторі не 4 плеча, а 6. Тобто згідно формули (3.13), загальна кількість блокувальних діодів:

$$D_o = 6 \cdot (n - 2) = 6 \cdot (7 - 2) = 30 \text{ шт.}$$

Марки всіх компонентів аналогічні, як і для перетворювача трифазної напруги однофазне.

З урахуванням вироблених вище розрахунків та підбору необхідних елементів були розроблені перетворювачі напруги з трифазної в однофазну напругу та з однофазної в трифазну, схеми яких представлені в додатку 1. Схема управління виконана з використанням мікроконтролера PIC16F628A та силових двоканальних драйверів серії. Ці драйвери призначені для керування високовольтними транзисторами MOSFET або IGBT. Драйвер є підсилювачем – формувачем сигналів керування затворами з частотою до 100 кГц, містить гальванічну розв'язку по двох каналах керування, вбудований гальванічно розв'язаний DC-DC перетворювач для забезпечення необхідного рівня відмикаючих і замикаючих напруг, а також захист транзисторів від перевантаження струмом.

Блок стабілізації напруги, схема якого представлена на малюнку 2.16, працює наступним чином: через клеми X1 напруга (10 кВ), з силових шин живлення подається на трифазний понижувальний трансформатор TV1 (марки НТМІ-10), з виходу трансформатора напруга подається на випрямляч DA1. Випрямлена напруга надходить на вхід стабілізатора D2, а з його виходу на стабілізатор D3 та клему X3 живлення драйверів. Ємності C7 та C8 згладжують пульсації напруг. З виходу фільтра напруга C7 подається на шини живлення блоку управління.

Блок управління складається з мікроконтролерів DD1 і DD8, високовольтних драйверів DD2-DD7, DD9-DD14, резистивних дільників напруги R13, R14 в ланцюгах управління мікроконтролером DD1, роз'єм X4

забезпечує синхронність сигналів для мікроконтролерів DD1, DD8 від перемикача XZ2 та ємностей C12, C13, C20 та C21, клеми X3 для живлення драйверів, діоди VD27-VD38 необхідні для подачі позитивного потенціалу на висновки драйверів, ємності C9-C16, C17-C24 фільтруючі конденсатори, всі резистори резистори, необхідні зменшення максимального імпульсного струму.

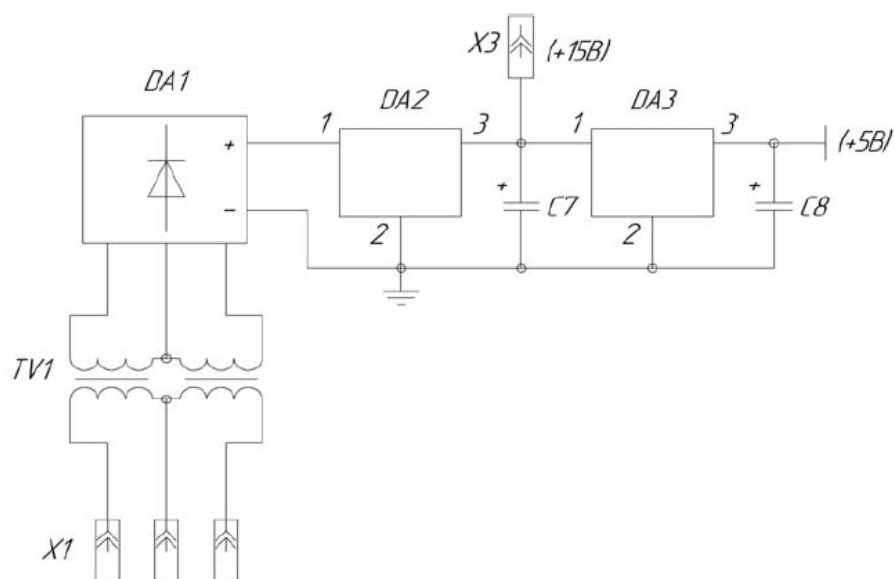


Рисунок 2.16 – Блок стабілізації живлення системи керування

Принцип роботи блоку управління наступний: мікроконтролер фази А та В при включенні знаходиться в режимі очікування сигналу з перемикача S1. При перемиканні S1 в положення включено, на входи мікроконтролерів надходить сигнал, починає формування керуючих сигналів для блоків ключів вихідних напруг фази А і В, з виходів мікроконтролерів надходять сигнали на драйвера і через їх опори токообмежуючі подаються на затвори транзисторів інвертора. У драйверах передбачено захист насичення (падіння напруги) на транзисторі.

Силовий інверторний блок працює в такий спосіб. Напруга подана через клему X2 випрямляється трифазним високовольтним випрямлячем VD1-VD6, надходить на ємнісний дільник C1-C6 і потім шини семирівневого інвертора VT1-VT6', VT7-VT12'. У схемі VD1-VD26 - діоди, що блокують. Через клеми

X5-X16 високовольтні ключі надходять управляючі сигнали драйверів. На виході інвертора формується двофазна напруга.

Робота блоків перетворювача однофазного напруги трифазне, заснована на такому ж принципі, як і у описаного вище перетворювача, елементна база аналогічна, відрізняється тільки кількістю фаз у випрямлячі і в інверторі силового блоку.

3.2 Конструкція заземлювального пристрою для пропонованої однопровідної лінії електропередачі

До основних вимог, які пред'являються заземлюючим пристроям, можна віднести наступне: безпека для обслуговуючого персоналу та великий термін служби.

Всім цим вимогам відповідають робочі пристрої для заземлення [69, 70]. Для того, щоб мінімізувати падіння напруги на робочому заземлювачі, необхідно виконати умову, за якої опір переходу заземлювач-земля буде меншим за активний опір контуру

"Провід-земля". Прийmemo згідно з ПУЕ [14] для електроустановок понад 1000 В, опір заземлювача менше 0,5 Ом.

У реальних умовах земля має багат шарову будову з різним опором для кожного з них, що значно ускладнює розрахунок заземлювачів. Тому для практичних розрахунків землю представляють у вигляді двошарової структури, в якій питомий опір верхнього шару значно вищий, ніж нижній. З огляду на ці обставини доцільно використовувати глибинні заземлювачі, які дозволять забезпечити необхідне значення перехідного опору [25].

Розрахунок опорів глибинного заземлювача визначається за такою формулою [25]:

$$R_B = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{h}{\rho_1} + (\ell - h) \right) \cdot \frac{1}{\rho_2}} \ln \frac{4 \cdot \ell}{d}, \text{ Ом}, \quad (3.14)$$

де ρ_1 – питомий опір верхнього шару ґрунту, Ом·м;

ρ_2 – питомий опір нижнього шару ґрунту, Ом·м;

l – довжина електрода, м;

d – зовнішній діаметр труби чи стрижня, м;

h – глибина верхнього шару, м. Визначається з урахуванням довжини прохідного ізолятора у верхній частині заземлювача та відповідно [25] становить не більше 20 м.

Питомі опори верхніх і нижніх шарів приймаємо в діапазоні від 50 до 500 Ом·м для нижнього та верхніх відповідно, виходячи з умов, що нижні шари мають більшу вологість і мають менший питомий опір [25].

Як аналог електрода робочого заземлення приймемо пристрій, розроблений М.А. Тарановим [26], електрод у вигляді труби та одягненого на верхню частину її прохідного керамічного ізолятора, з метою підвищення безпеки для обслуговуючого персоналу. Результати розрахунків опорів одиночних електродів для двошарового ґрунту зведемо до таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 - Опір одиночного електрода при різних діаметрах і довжинах для двошарового ґрунту, Ом.

Довжина електрода, м	Діаметр електрода, мм					
	57	73	95	114	127	140
50	1,855	1,799	1,739	1,698	1,673	1,651
100	0,829	0,806	0,781	0,764	0,754	0,745
150	0,546	0,532	0,516	0,505	0,498	0,493
200	0,411	0,400	0,389	0,381	0,376	0,372

Металеві заземлювачі, перебуваючи у землі, піддаються корозії, причому у особливо несприятливих умовах перебувають заземлювачі робочого заземлення, якими проходять робочі струми, тому дуже важливим параметром цих пристроїв є термін служби. За граничний термін експлуатації заземлювачів можна прийняти такий термін, після якого вага кожного заземлювача знизиться до 0,25 початкової ваги.

Звідси термін служби для вертикальних сталевих електродів визначається за формулою [25]:

$$T=0,47 \cdot 10^2 \frac{l}{I} n (d_1^2 - d_2^2), \text{ років}, \quad (3.15)$$

де n – кількість окремих вертикальних заземлювачів; $n = 1$;

I - величина робочого струму, що стікає в землю через заземлення, А; $I = 10$ А;

l - Довжина трубчастого заземлювача, м;

d_1 - Зовнішній діаметр трубчастого заземлювача, м; $d_1 = 0,057$ м;

d_2 – внутрішній діаметр трубчастого заземлювача, м. $d_2 = 0,046$ м;

Результати розрахунку терміну служби електродів зведемо до таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 - Строк служби заземлення, років.

Довжина електрода, м	Діаметр електрода, мм					
	57	73	95	114	127	140
20	1,07	1,40	2,16	2,63	2,95	3,26
40	2,13	2,79	4,33	5,25	5,89	6,53
60	3,19	4,19	6,49	7,88	8,84	9,79
80	4,26	5,58	8,65	10,51	11,78	13,05
100	5,33	6,98	10,81	13,14	14,73	16,31
120	6,39	8,38	12,98	15,76	17,67	19,58
140	7,46	9,77	15,14	18,39	20,62	22,84
160	8,52	11,17	17,30	21,01	23,56	26,10

Досвід показує, що доцільно будувати заземлюючий пристрій те щоб заземлення працювало без заміни електродів щонайменше 15 років, тобто. термін служби повинен бути таким самим, як і в лінії електропередачі [26]. Тому враховуючи результати представлені в таблицях 2.5 і 2.6, для запропонованої системи можна рекомендувати електрод у вигляді труби перерізом не менше ніж 127 мм і довжиною не менше ніж 150 м.

Зробимо розрахунок втрати напруги для однопровідної лінії з урахуванням опорів заземлювачів. Для розрахунку, приймемо згідно з ПУЕ [14] опір одного заземлювача $r_{\text{заземлювача}} = 0,5$ Ом, тоді для двох заземлювачів опір складе $r_{\text{об.заземлювача}} = 1$ Ом. Підставляючи отримане значення опору формулу (3.14) отримаємо:

$$\Delta U = \frac{S_p \cdot ((\ell \cdot r_0 + r_{\text{об.заземлювача}}) \cdot \cos \varphi + \ell \cdot x_0 \sin \varphi)}{10 \cdot U_H^2}, \% \quad (3.16)$$

Результати розрахунків втрати напруги в однопровідній лінії з урахуванням заземлювачів для наочності зведемо таблицю 2.7.

Таблиця 3.3 - Результати розрахунку втрати напруги в однопровідній лінії електропередачі з урахуванням заземлювачів

ℓ , км	5	10	15	20	25	30	35	40
ΔU	0,69	1,31	1,92	2,54	3,15	3,77	4,38	5

Визначимо розподіл відносного потенціалу поверхні землі навколо вертикального електрода [50]:

$$\frac{U_x}{U_0} = \frac{\lg \sqrt{\left(\frac{\ell}{x}\right)^2 + 1} + \frac{\ell}{x}}{\lg \frac{4 \cdot \ell}{d}}, \quad (3.17)$$

де l - Довжина електрода, м;

d – діаметр вертикального електрода, м; U_0 напруга на електроді, В;

U_x – напруга лежить на поверхні землі з відривом x від заземленого електрода, В.

Результати розрахунків представимо у вигляді графіків, представлених на малюнку 3.1.

Аналіз графіків показує, що крокова напруга на відстані 1 метра від заглибленого електрода на глибину 50 м становить 16,2 В, при зануренні електрода на 100 м - 29,2 В, а при зануренні на 150 м - 41,4 В. Враховуючи то, що для обраного типу заземлювача передбачається

застосування прохідного ізолятора у верхній частині електрода, то різниця потенціалів між ним і землею буде значним, тому для безпеки слід передбачити огорожувальні конструкції.

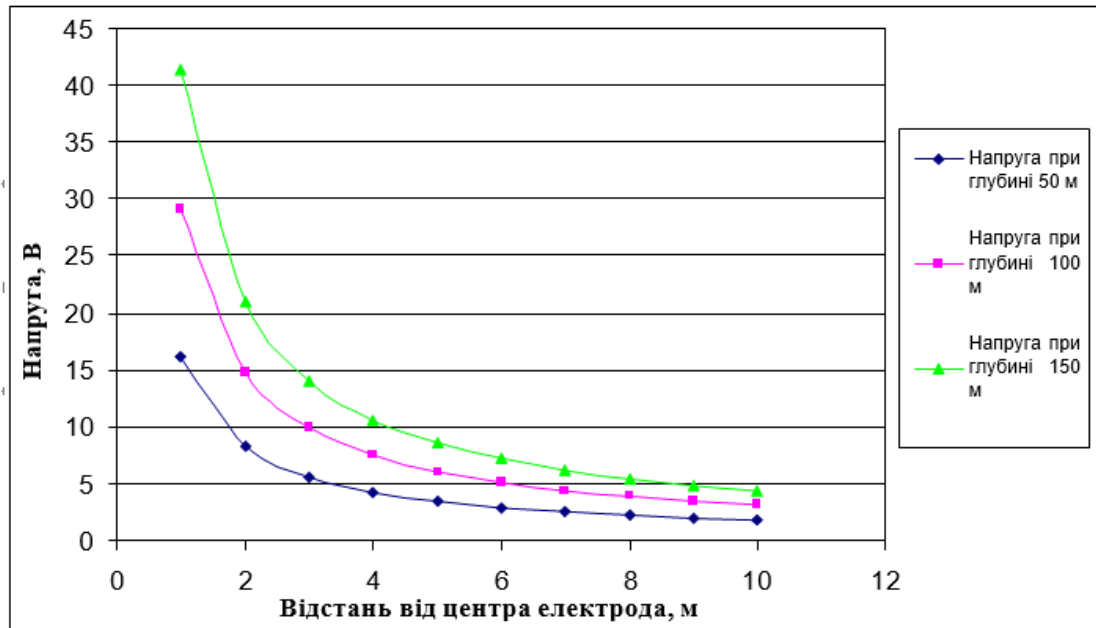


Рисунок 3.1 – Значення напруги лежить на поверхні землі

3.3 Застосування перетворювача числа фаз як пристрій симетрування неповнофазних режимів на лінії 10 кВ для віддалених сільськогосподарських споживачів

Розглянемо пристрій на базі багаторівневого автономного інвертора, який дозволить забезпечити споживача електроенергією у разі неповнофазного режиму роботи ПЛ електропередачі. Слід зазначити, що неповнофазний режим може виникати з низки причин: згоряння запобіжника, обрив проводів під впливом природних явищ (вітер, ожеледиця і т.д.), недолучення одного з ножів роз'єднувачів, відгорання шлейфів і т.д.

На рисунку 3.2 представлена структурна схема пропонованого пристрою симетрування неповнофазних режимів роботи ПЛ.

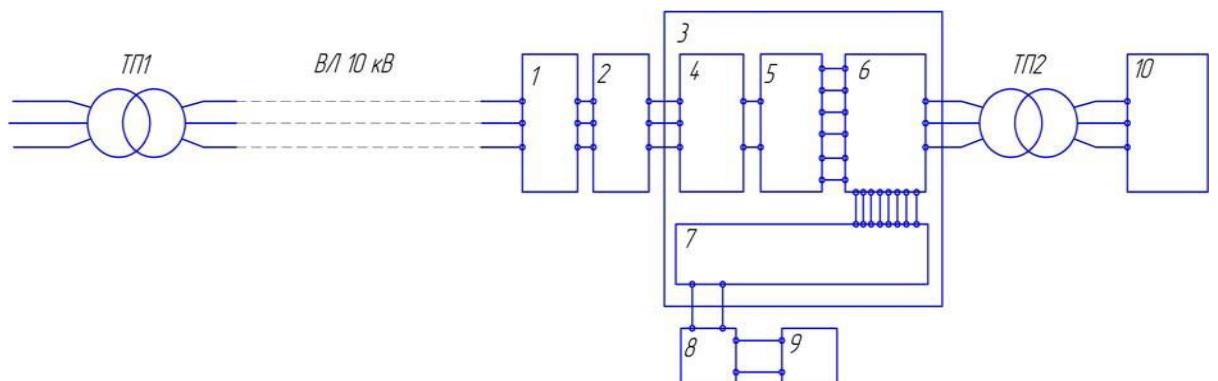


Рисунок 3.2 – Структурна схема пристрою симетрування неповнофазних режимів встановленого на ПЛ 10 кВ у трансформаторної підстанції споживача

Захист перетворювача блоку - 3 забезпечується блоками 1 - струмообмежуючий реактор і 2 - розрядники. Перетворювач складається з наступних блоків: 4 – трифазний випрямляч, 5 – ємнісний дільник, 6 – багаторівневий інвертор, 7 – схема керування. Для забезпечення незалежного живлення блоку 7 від мережі, передбачено наявність блоку 8 - батарея і блоку 9 - фотоелектричний перетворювач, що гарантує роботу пристрою, незалежно від того, яка фаза в даний момент відключена. Блок 10 – сільськогосподарський споживач.

При аварійному режимі лінії (обриві однієї з фаз), у перший час, сплески струмів компенсуються струмообмежуючим реактором, що забезпечує захист перетворювального блоку. У режимі, що встановився, неповнофазна змінна напруга надходить на трифазний випрямляч, випрямляється, а потім прикладається на трифазний багаторівневий інвертор, на виході якого формується симетрична трифазна напруга, яка через трансформаторну підстанцію запитує споживача.

Установка цього пристрою саме у споживача, як представлено на малюнку 2.20, є найбільш раціональною, оскільки забезпечується найменша довжина лінії від перетворювача до трансформаторної підстанції споживача (ТП-2), що знижує ймовірність виникнення аварійного режиму, іменного на цьому проміжку мережі. Однак, при необхідності можливе встановлення пристрою на будь-якій ділянці мережі.

Тривалість усунення відключення складається з двох основних тимчасових проміжків: перший час на пошук місця аварії і другий час на безпосереднє усунення. Застосування перетворювача як пристрій симетрування неповнофазних режимів, дозволить забезпечити сільськогосподарського споживача належним рівнем якості електроенергії та скоротити час відновлення одного відключення, за рахунок того, що в період

часу, який необхідний для пошуку місця аварії, споживач забезпечуватиметься електроенергією та відключатиметься безпосередньо на той проміжок, який знадобиться усунення несправності.

Висновки по третьому розділу

1. Досліджено пристрій, здатний виконати функцію робочого заземлювача пропонованої однопровідної лінії електропередачі на 10 кВ.
2. Необхідно провести експерименти, що підтверджують працездатність пристрою на базі семирівневого інвертора, що перетворює трифазну напругу на однофазну.
3. Необхідно виконати експерименти, що підтверджують працездатність пристрою на базі семирівневого інвертора, що перетворює однофазну напругу на трифазну.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

При виконанні кваліфікаційної роботи на базі семирівневого інвертора напруги розроблено пристрій, що перетворює трифазну напругу на однофазну і однофазну на трифазну. Теоретичні дослідження, роботи запропонованого для однопровідної системи перетворювача, дозволяють стверджувати, що пристрій здатний вирішити задачу перетворення електроенергії для передачі по однопровідних мережах.

Здійснено розрахунок запропонованого семирівневого інвертора напруги на 10 кВ. Розроблено схему принципову електричну для перетворювачів трифазної напруги в однофазну і однофазну в трифазну на базі семирівневого інвертора напруги.

Досліджено пристрій, здатний виконати функцію робочого заземлювача запропонованої однопровідної лінії електропередачі на 10 кВ.

Розроблена однопровідна система передачі електроенергії в порівнянні з трипровідною системою дозволяє підвищити надійність електропостачання віддалених сільськогосподарських споживачів на 31,3 % за рахунок виключення можливих аварійних режимів, таких як: схлест проводів, обрив проводів, міжфазні короткі замикання на лінії, начерк на проводи, перекриття птахів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Таранов М.А. Возобновляемые энергоносители для автономного энергообеспечения. / М.А. Таранов, А.Ю. Медведько // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2008. - №8. – С.2.-3.
2. Хорольський В.Я. Аналіз та синтез автономного електропостачання сільськогосподарських об'єктів. /В.Я. Хорольський, М.А. Таранів. - Ростов - на - Дону: Терра, 2001. - 222 с.
3. Пронін, М.В. Силові повністю керовані перетворювачі (моделювання та розрахунок) / М.В. Пронін, А.Г. Воронцов - За ред. Крутякова О.О. СПб: «Електросила», 2003. - 172 с.: Іл.
4. Поліщук, А. Проблеми вибору ключових транзисторів для перетворювачів із жорстким перемиканням / А. Поліщук // Силова електроніка. - 2004. - №2.
5. Ковпаков, А. Особливості теплового розрахунку імпульсних силових каскадів / А. Ковпаков // Компоненти та технології. - 2002. - №1.
6. Чебовский, О.Г. Силовые полупроводниковые приборы: Справочник / О.Г. Чебовский, Л.Г. Моисеев, Р.П. Недошивин. – 2-е изд., перераб и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 400 с.: ил.
7. Capacitors for power electronics. [Электронный ресурс]. – Режим доступа:http://www.gvleistungselektronik.de/_gva/gva_downloads/Electronicon.pdf
8. Марквардт, К.Г. Электроснабжение электрических железных дорог/К.Г. Марквардт. – Москва: Изд-во «Транспорт», 1965. – 457 с.: ил.
9. Косарев, Б.И. Электробезопасность в тяговых сетях переменного тока/Б.И. Косарев. - Москва: Транспорт, 1989. - 216 с.: Ил.
10. Розроблення регіональних карт кліматичного районування з використанням ГІС-технологій. Квицинській А.О., Кудачький Л.Н., Лях В.В., Молчанов В.М. та інші. Новини енергетики. № 2, 2013.
11. Справочник по проектированию электрических сетей/ Под ред. Д.Л.

Файбисовича. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2006. – 352 с.:ил.

12. Таранов, М.А. Многоуровневые и каскадные инверторы / М.А. Таранов, П.Т. Корчагин // Вестник аграрной науки донна. – 2013 – №1. – С.63-66.

13 . Бурдасов, Б.К. Многоуровневые и каскадные преобразователи частоты для высоковольтных электроприводов переменного тока / Б.К. Бурдасов, С.А. Нестеров // [Электронный ресурс]. – Режим доступа: terman.msu.ru/2011-1/Frequency_Converters.pdf

14. Правила улаштування електроустановок/МІНІСТЕРСТВО ЕНЕРГЕТИКИ ТА ВУГШЬНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ УКРАЇНИ/ Наказ №476 від 21.07.2017р.- Київ, 2017.

15. Таранов, М.А. Алгоритм роботи силових ключів для формування синусоїдальної вихідної напруги в інверторах з фіксацією нейтралі / М.А. Таранов, П.Т. Корчагин // Вісник аграрної науки дону. -2013 -№4. - С. 31- 34.

16. Laskody T. Space vector PWM for two-phase inverter in matlab-simulink /T. Laskody, S. Kascak, M. Prazenica, V. Dobrucky // [Электронный ресурс]. – Режимдоступа:http://dsp.vscht.cz/konference_matlab/MATLAB13/prispevky/038_laskody.

17. Будзко, И.А. Электроснабжение сельского хозяйства / И.А. Будзко, Т.Б.Лещинская – Москва: Колос , 2000. – 536 с.: ил.

18. Хорольський, В.Я. Електроенергетика: навчальний посібник/В.Я. Хорольський, М.А. Таранов, В.М. Шем'якін - зерноград: ФГОУ ВПО ФЧГАА, 2010. - 600 с.

19. Герасимов, А.А. Передача та розподіл електричної енергії: навчальний посібник для вузів / О.О. Герасимов, В.Т. Федін - Ростов-на-Дону: Фенікс, 2008.

20. Каганов И.Л. Промышленная электроника / И.Л. Каганов – М.: Высшаяшкола, 1968. – 357 с.

21. Шавёлкин, А.А. Несимметричный гибридный многоуровневый преобразователь частоты для электропривода среднего напряжения / А.А. Шавелкин, Р.В. Уланов // Вісник КДПУ імені Михайла Остроградського. – 2008 - №4.
22. Преображенский, В.И. Полупроводниковые выпрямители / В.И. Преображенский – 2-е изд., перераб. и доп. Москва: Энергоатомиздат, 1986. – 136 с.: ил.
23. Сітніков, В.Ф. Вибір силових електронних ключів для перетворювачів в електроенергетиці/В.Ф. Сітніков, М.В. Рябчицький, М.І. Смирнов// Електротехніка. - 2007 - №4.
24. Diego, S. A comparison of high-power converter topologies for the implementation of FACTS controllers // IEEE transactions on power electronics. – 2002. -№5.- Vol.49.
25. Бургсдорф В.В. Расчет сложных заземлителей в неоднородных грунтах/ В.В. Бургсдорф, О.В. Волкова// Электричество -1964.- №9
26. Пат. 2262785, МНК7 Н 01 R 4/66. Электрод рабочего заземления / Таранов М.А., Чугунов А.В., Гуляев П.В., Гуляева Т.В.; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО АЧГАА. – 2003127658/09; заявлен 11.09.2003; опубликован 27.03.2005.

ДОДАТКИ

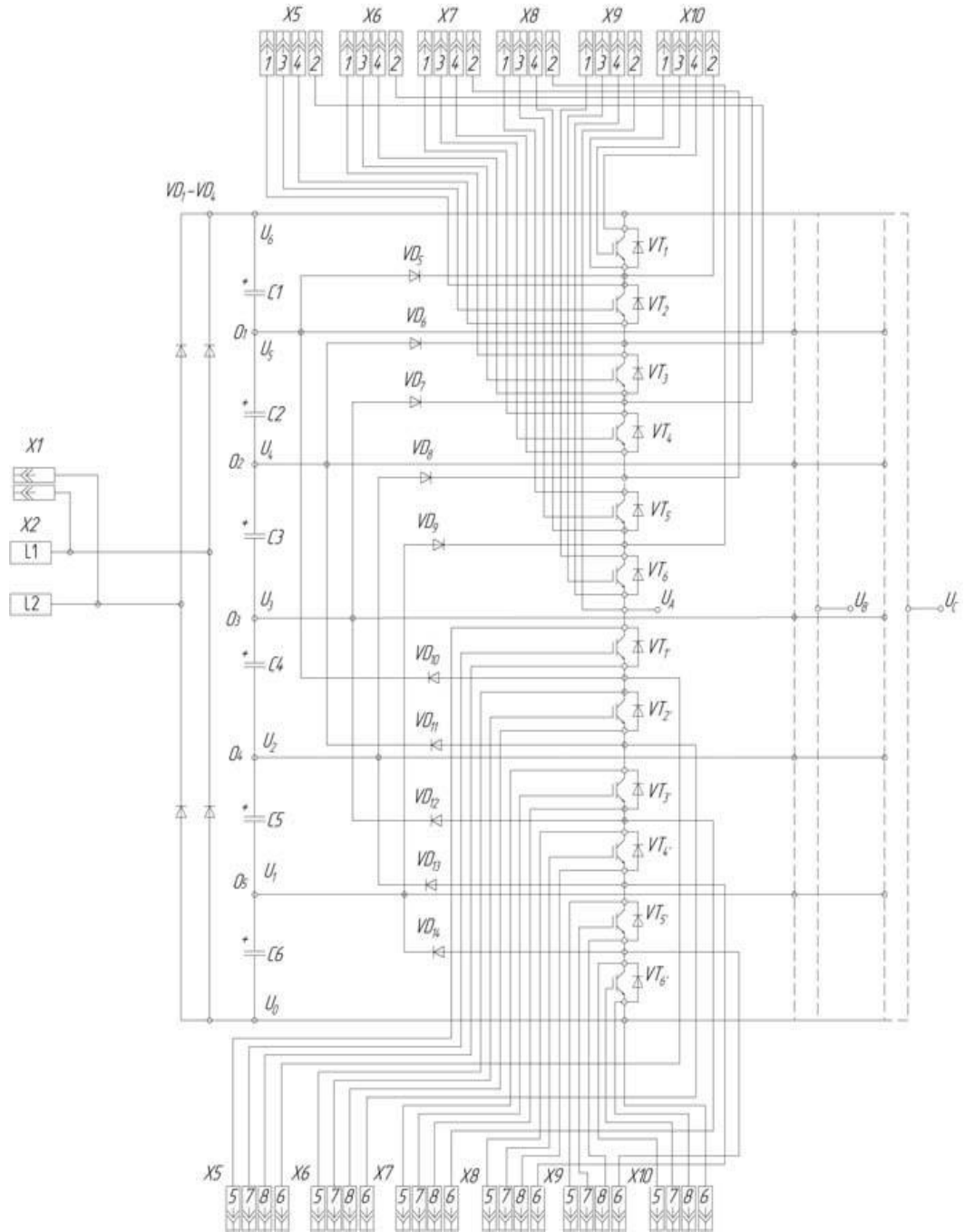


Рисунок Д.1 – Принципова схема силового блоку інвертора фази А перетворювача однофазної напруги трифазне

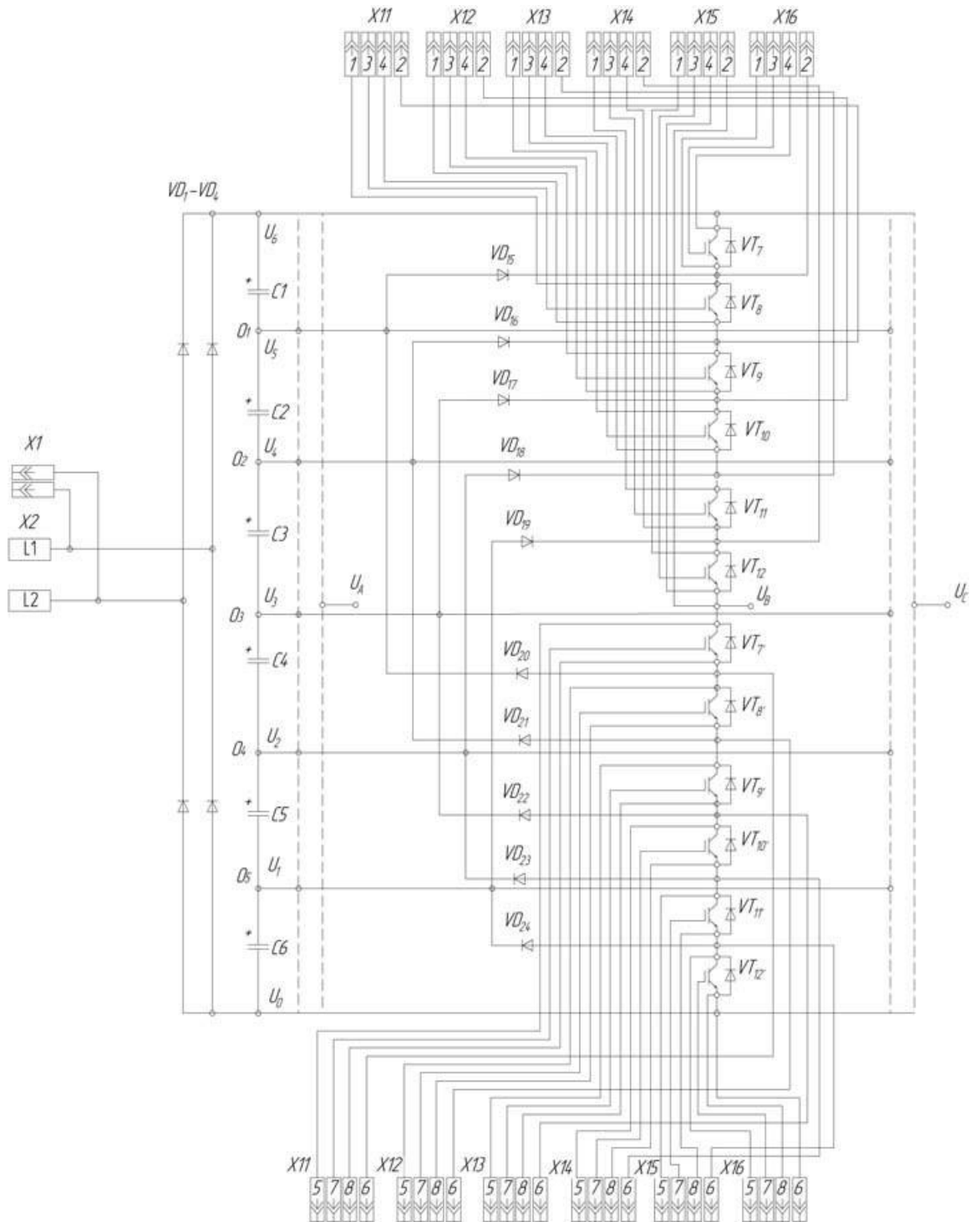


Рисунок Д.2 – Принципова схема силового блоку інвертора фази В перетворювача однофазної напруги трифазне

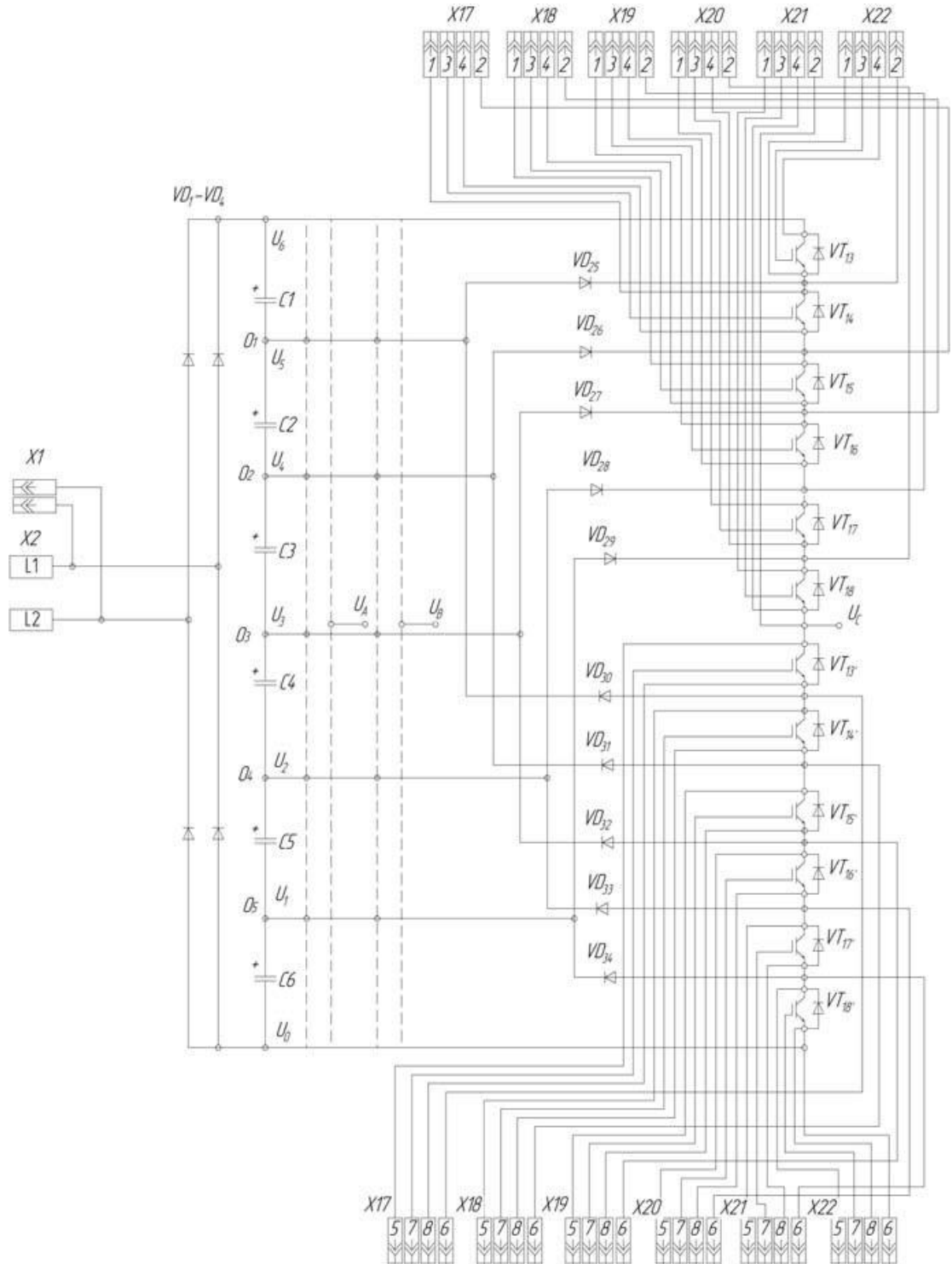


Рисунок Д.3 – Принципова схема силового блоку інвертора фази С перетворювача однофазної напруги трифазне