

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Факультет інженерії та енергетики  
Кафедра електрифікації, автоматизації  
виробництва та інженерної екології  
Кваліфікаційна робота  
на правах рукопису

Ковальчук Віталій Володимирович

**УДК 620.93**

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

Параметри і режими роботи автономного інвертора сонячної  
фотоенергетичної установки  
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

---

(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи  
**Соколовський О.Ф.**  
к.т.н., доцент

**Житомир – 2022**

## АНОТАЦІЯ

**Ковальчук Віталій Володимирович. Параметри і режими роботи автономного інвертора сонячної фотоенергетичної установки.** – *Кваліфікаційна робота на правах рукопису.*

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 141 “Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка”. – Поліський національний університет, Житомир, 2022.

В магістерській роботі розроблено функціональну схему трифазних автономних інверторів виконаних на однофазній мостовій силовій електронній схемі та однофазно-трьохфазному трансформаторі з обертовим магнітним полем з покращеними експлуатаційно-технічними та енергетичними характеристиками. Розкрито особливості її роботи, переваги та недоліки.

Розроблено принципову електричну схему автономних інверторів на однофазно-трифазному трансформаторі з обертовим магнітним полем, виконану з використанням мікропроцесорної техніки, та алгоритм роботи системи управління з перетворення та стабілізації напруги для розробки програми. Розроблено електричну схему заміщення автономного інвертора на однофазно-трьохфазному трансформаторі з обертовим магнітним полем з підключеним джерелом та навантаженням. Для підтвердження результатів попередніх досліджень розроблено експериментальну установку з дослідження роботи однофазно-трифазного трансформатора з обертовим магнітним полем, виконаних на асинхронному двигуні з короткозамкненим та фазним ротором. Дослідження показали, що трансформатор з обертовим магнітним полем, виконаний на електричній машині з фазним ротором, має покращений спектральний склад вихідної напруги, ніж трансформатор з обертовим магнітним полем, виконаний на базі асинхронної машини з короткозамкненим ротором.

*Ключові слова: інвертор, магнітне поле, електрична схема, трансформатор, ротор.*

## ANNOTATION

**Vitaly Volodymyrovych Kovalchuk.** Parameters and Operating Modes of the Autonomous Inverter of Solar Photovoltaic Installation. – *Qualification work on the rights of the manuscript.*

Qualification work for a master's degree in the specialty 141 "Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics". – Polissya National University, Zhytomyr, 2022.

The master's thesis developed a functional scheme of three-phase autonomous inverters made on a single-phase bridge power electronic circuit and a single-phase-three-phase transformer with a rotating magnetic field with improved operational and technical and energy characteristics. Features of its work, advantages and disadvantages are disclosed.

The basic electric circuit of autonomous inverters on a single-phase-three-phase transformer with a rotating magnetic field, made using microprocessor technology, and the algorithm of the control system for voltage conversion and stabilization for the development of the program have been developed. An electric circuit for replacing an autonomous inverter on a single-phase-three-phase transformer with a rotating magnetic field with a connected source and load has been developed. To confirm the results of previous studies, an experimental setup was developed to study the operation of a single-phase-three-phase transformer with a rotating magnetic field, performed on an asynchronous motor with a short-circuited and phase rotor. Studies have shown that a transformer with a rotating magnetic field made on an electric machine with a phase rotor has an improved spectral composition of the output voltage than a transformer with a rotating magnetic field made on the basis of an asynchronous machine with a short-circuited rotor.

*Key words: inverter, magnetic field, electric circuit, transformer, rotor.*

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ДОСЛІДЖЕНЬ ЗА ТЕМОЮ РОБОТОЮ.....	9
РОЗДІЛ 2 ПРИНЦИПОВА ЕЛЕКТРИЧНА СХЕМА АВТОНОМНОГО ІНВЕРТОРА ТА АЛГОРИТМ РОБОТИ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ.....	20
РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКА ТА РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	27
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	35
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	36

## ВСТУП

**Актуальність дослідження.** В даний час для електропостачання автономних сільськогосподарських споживачів малих фермерських і особистих підсобних господарств, що займаються виробництвом меду, м'яса, вовни, риби, вирощуванням овочів і фруктів, а також для забезпечення побутових умов обслуговуючого персоналу застосовуються бензинові або дизельні станції, що мають низькі експлуатаційно-технічні характеристики, у тому числі невеликий ресурс роботи.

Сьогодні актуальним напрямком є впровадження енергоефективних, зокрема енергозберігаючих технологій у сільськогосподарське виробництво за рахунок застосування відновлюваних джерел енергії.

Важливим функціональним елементом сонячних фотоенергетичних установок (СФЕУ) є сонячний автономний інвертор (АІ) напруги, який, крім функції перетворення електроенергії постійного струму в змінний, виконує функцію стабілізатора напруги. АІ істотно впливає на експлуатаційно-технічні характеристики СФЕУ в комплексі. Експлуатовані в даний час АІ СФЕУ, що застосовуються у сільськогосподарському виробництві, мають відносно низькі енергетичні та технічні характеристики, включаючи ККД та ресурс роботи. Крім того, вони переважно є джерелами однофазної напруги промислової частоти струму.

**Ступінь розробленості теми.** Наукові проблеми розробки енергоефективних сонячних енергосистем досліджували багато вчених: Амерханов Р.А., Безруких П.П., Борисов Р.І., Гайтов Б. Х., Даус Ю.В., Єлістратов В.В., Єрьомін Л.М. ., Кашин Я. М., Конопльов Є. В., Лукітін Б.В., Нікітенко Г.В., Саплін Л.А., Сибікін Ю.Д, Стребков Д.С., Четошнікова Л.М., Юдаєв І. В. та інші автори. Роботи вчених присвячені розробці математичного апарату, що дозволяє оцінити потенціал сонячної енергетики, енергоефективність обладнання, яке застосовується у складі сонячних

фотоенергетичних установок, а також велику увагу приділено особливостям проектування та експлуатації сонячних енергетичних систем. Проблематикою, що стала предметом дослідження, займалися відомі вчені Григораш О.В., Козюков Д.А., Нікітенко Г.В., П'ятикопов С.М., Охоткін Г.П., Стребков Д.С. та багато інших вчених. Їхні роботи були присвячені удосконаленню конструктивних рішень основних функціональних елементів цих систем. Однак питання електромагнітної сумісності АІ при використанні в їх конструкції однофазної силової електронної схеми перетворювача і однофазно-трьохфазного трансформатора з магнітним полем, що обертається, а також питання оцінки ефективності перетворювачів недостатньо досліджені.

Робоча гіпотеза полягає в тому, що застосування однофазно-трьохфазного трансформатора з магнітним полем, що обертається, і мікропроцесорною системою управління дозволить забезпечити необхідну якість електроенергії, розширити функціональні можливості автономного інвертора і поліпшити експлуатаційно-технічні характеристики сонячної фотоенергетичної установки в комплексі.

**Метою дослідження** є покращення експлуатаційно-технічних характеристик та функціональних можливостей автономного інвертора сонячної фотоенергетичної установки.

Для досягнення поставленої мети визначено **завдання досліджень**:

Розробити функціональну та принципову електричну схеми сонячного автономного інвертора з покращеними експлуатаційно-технічними характеристиками на трансформаторі з обертовим магнітним полем

Провести дослідження комп'ютерної моделі інвертора та експериментальні дослідження однофазно-трьохфазного трансформатора з магнітним полем, що обертається, і провести оцінку достовірності комп'ютерного моделювання.

**Об'єктом дослідження** є автономний інвертор напруги, виконаний на базі однофазно-трьохфазного трансформатора з обертовим магнітним полем

**Предмет дослідження** – показники оцінки ефективності автономного інвертора, результати комп'ютерного моделювання та експериментальних досліджень.

**Методи дослідження** базуються на використанні теорії електричних кіл, основ теорії електричних машин та силової перетворювальної техніки, методу статичної оцінки точності результатів теоретичних та експериментальних досліджень.

**Перелік публікацій за темою роботи:**

1. Соколовський О.Ф., Ковальчук В.В. Принципова електрична схема автономного інвертора. *Наукові читання–2022: матеріали науково-практичної конференції науково- педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених факультету інженерії та енергетики. 7 червня 2022 р. Житомир: Поліський національний університет, 2022. С. 16-18.*

2. Соколовський О. Ф., Ковальчук В. В. Автономні інвертори сонячних електростанцій. *Збірник тез доповідей XXIII Міжнародної наукової конференції "Сучасні проблеми землеробської механіки" (16–18 жовтня 2022 року).* МОН України, Національний університет біоресурсів і природокористування України, Житомирський агротехнічний фаховий коледж. Київ. Житомир. 2022.С. 350-355.

3. Ковальчук В. В. Особливості конструкції та роботи автономних сонячних фотоенергетичних установок. *Збірник тез VII Всеукраїнської науково-практичної конференції «Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь» 31 березня 2021 року, м. Житомир. С. 275-276.*

**Практичне значення одержаних результатів.** Практична цінність полягає в розробці функціональної та принципової електричної схеми сонячного автономного інвертора з покращеними експлуатаційно-технічними характеристиками на трансформаторі з обертовим магнітним полем.

**Структура та обсяг роботи.** Кваліфікаційна робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 18 найменувань. Загальний обсяг роботи становить 38 сторінок комп'ютерного тексту, містить 14 рисунків і 1 таблиця.



## РОЗДІЛ 1

### ОГЛЯД ДОСЛІДЖЕНЬ ЗА ТЕМОЮ РОБОТОЮ

#### 1.1 Особливості конструкції та роботи автономних сонячних фотоенергетичних установок

На рис. 1.1 наведено типову структурну схему автономних сонячних фотоенергетичних установок (СФЕУ). Принцип роботи її заснований на фізичному ефекті прямого перетворення сонячної радіації (випромінювання) на електричну енергію, використовуючи фотоелементи. До складу СФЕУ, крім фотоперетворювачів – сонячних батарей (СБ), як правило, входять такі основні функціональні елементи: автономний інвертор (АІ), що здійснює перетворення напруги постійного струму, що виробляється СБ, в напругу змінного струму, акумуляторні батареї (АБ) – накопичувачі електроенергії, зарядний пристрій (ЗП), контролер (К), що виконує функцію системи управління та захисту, в тому числі контроль параметрів електроенергії та перекомутацію електричних кіл. На рис. 1.1 показано також навантаження (Н).

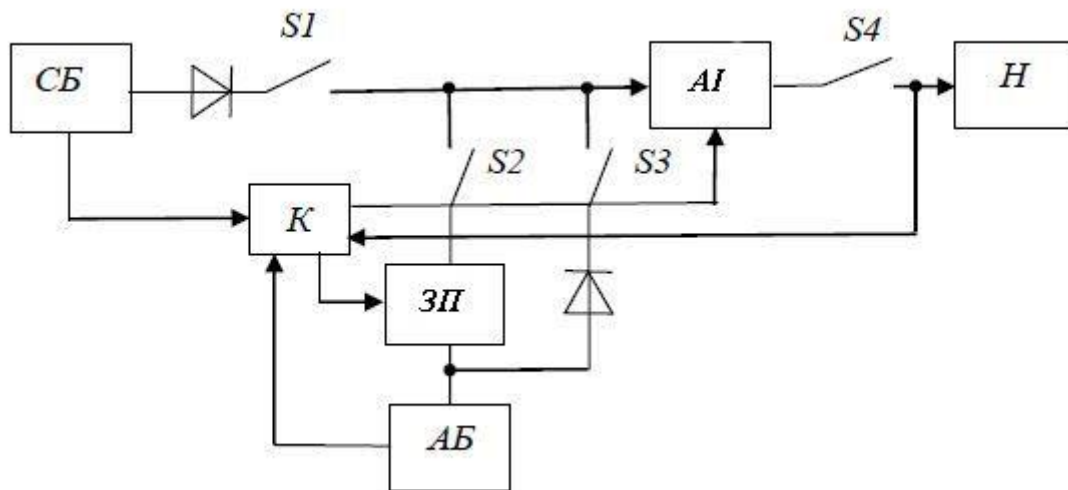


Рис. 1.1. Структурна схема сонячної фотоенергетичної установки

Вхідна напруга постійного струму АІ становить 12, 24 або 48, крім перетворення напруги інвертор здійснює функцію стабілізації вихідної напруги. СБ є групи послідовно-паралельних включених фотоелементів, як правило,

загальною площею  $1,5 \text{ м}^2$ . Потужність СБ такої площі становить 400-500 Вт. Для збільшення встановленої потужності СФЕУ сонячні батареї підключаються між собою паралельно.

Сьогодні в Україні розроблено та впроваджено технічні рішення автономних стаціонарних (портативних) та мобільних сонячних електростанцій (рис. 1.2) потужністю від 200 Вт до 5 кВт.



а)



б)

Рис. 1.2. Стаціонарні портативні (а) та мобільні (б) СФЕУ серії МФС12, МФС24 та МФС48

Портативні сонячні електростанції (Рис. 1.2, а) зазвичай мають невелику потужність - кілька сотень ват. Є джерелами напруги постійного струму. Для

резервного електропостачання застосовується заряджена акумуляторна батарея ємністю від 50 до 75 А/год.

Мобільні сонячні електростанції (Рис. 1.2 б), як правило, у своєму складі мають:

- багатокристалічні сонячні батареї Yingli по 275 Вт (для забезпечення споживачів електроенергією із сумарною потужністю 5 кВт необхідно близько 20 таких батарей);

- гелеві GST Volta 200 А/год або літій-іонні акумуляторні батареї 100 А/год (від 2 до 4 шт);

- однофазний інвертор потужністю до 5 кВт чи трифазний інвертор потужністю від 5 до 9 кВт;

- контролер заряду акумуляторних батарей МРРТ;

- комплект похилого кріплення сонячних батарей, кабелі та інші монтажні пристрої;

- двоколісний причіп вантажопідйомністю до 500 кг.

Вартість мобільних СФЕУ залежить від потужності станції, а також комплектуючих функціональних елементів (сонячних батарей, інвертора, контролера, акумуляторних батарей, причепа, монтажного обладнання).

Основними перевагами розглянутих технічних рішень СФЕУ є:

- автономність та незалежність від зовнішньої енергосистеми;

- відсутність потреби у спеціальних приміщеннях;

- зручність при транспортуванні та обслуговуванні;

- тривалий термін служби основного функціонального елемента - сонячних батарей (від 25 років).

Основні недоліки розглянутих СФЕУ:

- портативні стаціонарні системи (Рис. 1.2, а) в основному є джерелами напруги постійного струму і застосовуються для забезпечення електроенергією активного навантаження;

– електроенергією змінного струму забезпечуються лише однофазні споживачі промислової частоти, з цією метою у складі станції застосовуються однофазні автономні інвертори в основному з квазісинусоїдальною вихідною напругою;

– для електропостачання споживачів електроенергією з підвищеною або зниженою частотою струму додатково застосовуються перетворювачі частоти, які також генерують напругу квазісинусоїдальної форми, що значно погіршує експлуатаційні та техніко-економічні показники автономного джерела електроенергії.

Таким чином, джерелом основних недоліків СФЕУ є автономний інвертор, тому для покращення експлуатаційно-технічних характеристик СФЕУ необхідно покращити ЕТХ та підвищити функціональні можливості АІ.

## **1.2 Автономні інвертори сонячних електростанцій**

Основним функціональним елементом сонячної фотоелектричної установки (СФЕУ) є сонячний автономний інвертор (АІ), основна функція якого – здійснювати перетворення напруги постійного струму на підвищену напругу змінного струму, необхідного для споживачів електроенергії. Величина напруги постійного струму це, як правило, 12, 24 або 48, а змінного струму 220 В - в однофазному і 380 В - в трифазному виконанні.

АІ істотно впливають на експлуатаційно-технічні характеристики (ЕТХ) та енергетичні характеристики сонячної фотоенергетичної установки. В даний час вони не відповідають сучасним вимогам, що пред'являються споживачами електроенергії малих фермерських господарств (МФГ) і особисті підсобні господарства (ОПГ), оскільки в основному генерують напругу постійного струму або однофазну напругу, у більшості випадках квазісинусоїдальної форми.

Сьогодні відомі багато технічних рішень силових схем АІ, у тому числі для здійснення стабілізацію напруги, що генерують однофазну та трифазну систему напруг, а також струм підвищеної частоти.

Для того, щоб розробити енергоефективний АІ для мобільної сонячної фотоенергетичної установки, необхідно провести аналіз особливостей конструкції, роботи та недоліків відомих технічних рішень автономних інверторів, а також розглянути перспективну елементну базу і на основі цього аналізу розробити нове технічне рішення енергоефективного перетворювача напруги постійного струму в змінний.

Важливим функціональним елементом силової електронної схеми АІ є напівпровідниковий пристрій. Особливістю роботи цих приладів є ключовим режимом роботи. Все ширше у складі силових електронних схем АІ застосовуються замість біполярних транзисторів польові транзистори, що мають такі основні переваги: підвищена швидкодія; малі втрати енергії у відкритому стані; стійкість роботи при зміні температури; простота виготовлення; покращені масогабаритні показники. Всі ці переваги в комплексі покращують загалом експлуатаційно-технічні та енергетичні показники АІ.

Структурно-схемні рішення силових електронних схем із застосуванням польових транзисторів практично не змінилися. Тому в даний час використовуються однофазні мостові схема АІ напруги. Один із варіантів такої схеми наведено на рис. 1.3 а. Однофазна схема інвертора, виконана на двох польових транзисторах наведено на рис. 1.3 б. На рис. 1.3 а і 1.3 б показано тільки первинну обмотку трансформатора.

Основними елементами силової схеми АІ є польові транзистори  $V_T$ , зворотні діоди, включені зустрічно-паралельно транзистори, захищають транзистори від перенапруг, трансформатор  $T$ , призначений для підвищення напруги і вхідний конденсатор  $C$ , виконує функцію вхідного фільтра та здійснює захист джерела електроенергії від стрибків напруги, що виникають під час комутації силових електронних приладів. Почергова робота польових

транзисторів  $VT1$ ,  $VT4$  і  $VT2$ ,  $VT3$  (рис. 1а),  $VT1$  і  $VT2$  (рис. 1.3 б) призводить до зміни напрямку струму по первинній обмотці трансформатора  $T$ . В результаті постійний струм джерела напруги, перетворюється на змінний струм.

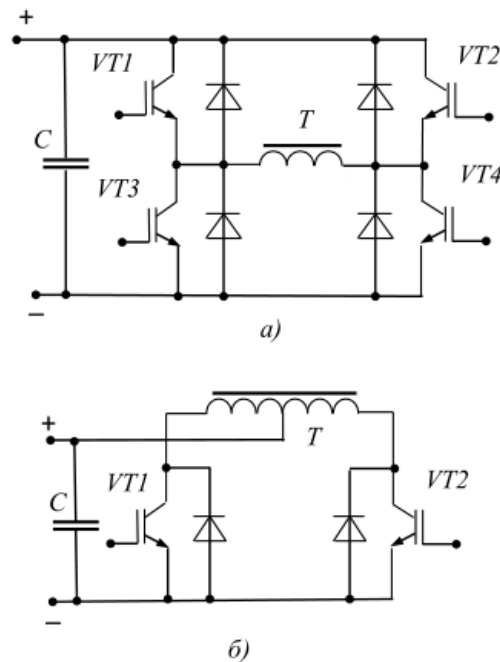


Рис. 1.3. Принципові силові електричні схеми однофазних автономних інверторів

Величина вхідної напруги постійного струму може дорівнювати 12, 24 або 48 В, вихідна напруга змінного струму дорівнює 220 В, якщо АІ однофазний та 220/380, якщо АІ трифазний.

Широтно-імпульсна модуляція (ШІМ) вихідної напруги забезпечує відносно високу його якість. Схеми мають просте технічне рішення системи управління, яка стабілізацію напруги здійснює за рахунок зміни тривалості паузи між позитивною та негативною напівхвилею вихідної напруги. Основними недоліками мостової схеми АІ (рис. 1.3 а) є відносно низький ККД і показники надійності, за рахунок застосування 4-х транзисторів, а при необхідності збільшення встановленої потужності АІ, транзистори силової схеми включаються на паралельну роботу, що призводить до зниження ККД та надійності роботи перетворювача.

Підвищені показники надійності та ККД має схема АІ, показана на рис. 1б, проте основним її недоліком є підвищена маса узгоджуючого трансформатора, що має практично дві первинні обмотки.

Загальним недоліком розглянутих однофазних схем АІ є те, що для отримання трифазної симетричної системи напруг, необхідно застосовувати три схеми однофазних інверторів і складну систему управління, що забезпечує синхронізацію їх роботи, як по зрушенню напруг один щодо одного на кут  $120^\circ$  про так і по пофазній їх стабілізації.

На рис. 1.4 наведено схему трифазної мостової схеми АІ. На схемі не показаний трифазний трансформатор, первинні обмотки якого, в тому числі навантаження  $Z$  можуть бути включені за схемою «зірка» або «трикутник».

Перевагою трифазної схеми АІ є її простота, у тому числі високі показники надійності та ККД, а основним недоліком – низький діапазон стабілізації напруги, що не дозволяє працювати схемі навіть за незначної несиметрії навантаження.

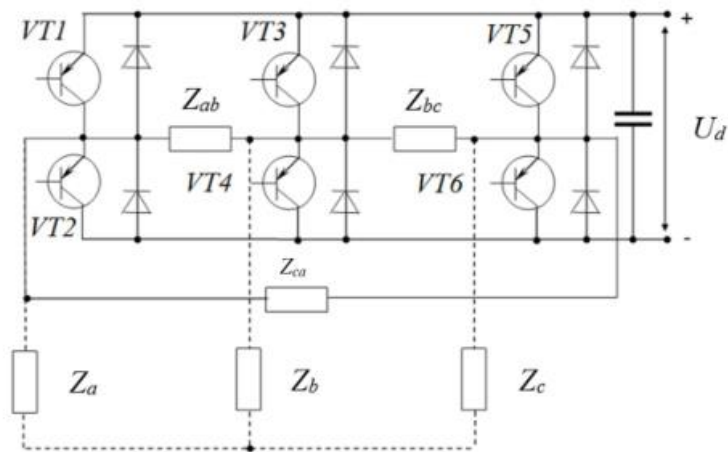


Рис. 1.4. Трифазна мостова схема інвертора

Одним із ефективних способів покращення масогабаритних показників автономних інверторів, що важливо для мобільних автономних систем електропостачання, застосування високочастотного проміжного перетворення. У цьому випадку у складі АІ застосовується безпосередньо високочастотна схема перетворення напруги постійного струму в змінний і реверсивний

випрямляч, що знижує частоту до промислового рівня. Таке технічне рішення АІ дозволяє у кілька разів зменшити масогабаритні показники трансформатора інвертора.

На рис. 1.5 наведено функціональну схему АІ на реверсивному випрямлячі, де високочастотний інвертор і реверсивний випрямляч, виконані на біполярних транзисторах  $VT1$  і  $VT2$ ,  $VT4$  і  $VT6$  відповідно. На рис. 1.5 не показана схема системи управління та захисту, робота якої синхронізована із силовою схемою  $CC$  та реверсивним випрямлячем.

Вхідний фільтр  $\Phi1$ , призначений для зниження комутаційних перенапруг, що виникають під час комутації транзисторів  $VT1$  і  $VT2$  силової схеми  $CC$ , що здійснює перетворення напруги постійного струму в напругу змінного струму підвищеної частоти ( $u_{11}$  - позитивна напівхвиля;  $u_{12}$  - негативна напівхвиля). Трансформатор  $T$  підвищує напруги дорівня, необхідного споживачам електроенергії. Реверсивний випрямляч  $PB$  перетворює напругу підвищеної частоти струму  $u_{21}$  і  $u_{22}$  (рис. 1.6) в напругу промислової частоти  $u_{\text{вих}}$  необхідної якості, яку одержують після вихідного фільтра  $\Phi2$ . При цьому транзистори  $VT3$  і  $VT4$  формують позитивну напівхвилю вихідної напруги, а транзистори  $VT5$  і  $VT6$  негативну напівхвилю.

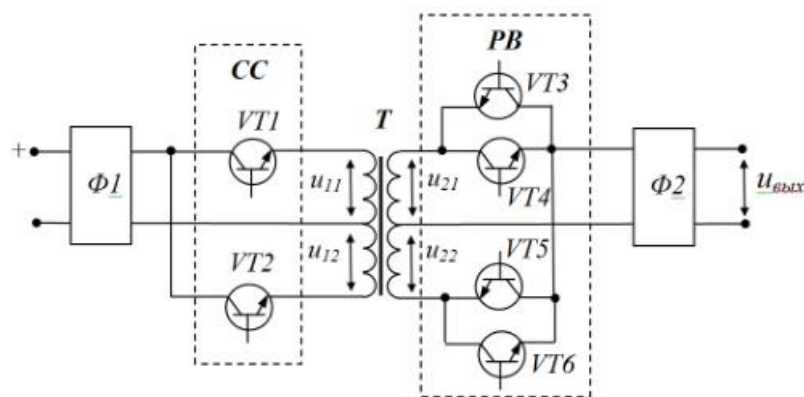


Рис. 1.5. Автономний інвертор на реверсивному випрямлячі:

$\Phi1$  та  $\Phi2$  – вхідний та вихідний фільтр;  $CC$  – силова схема;  $T$  – трансформатор;  $PB$  – реверсивний випрямляч.



Основною перевагою розглянутої схеми АІ з проміжним високочастотним перетворенням (рис. 1.5) є невелика маса і габарити, оскільки вже при частоті проміжного перетворення 800 Гц маса трансформатора зменшується більш ніж у 10 разів. Основним недоліком схеми є невелика потужність, що зазвичай не перевищує 2–2,5 кВт, оскільки при збільшенні проміжної частоти струму збільшується рівень електромагнітних перешкод, створюваних силовими електронними приладами під час комутації. Крім того, значно знижується ККД трифазної системи, якщо використовувати три однофазні інвертори на реверсивних випрямлячах для отримання трифазного джерела напруги змінного струму. У цьому випадку рекомендується, щоб встановлена потужність трифазного інвертора не перевищувала 5-7 кВт.

Однак ця потужність є граничною сумарною потужністю багатьох МФГ.  
МФХ.

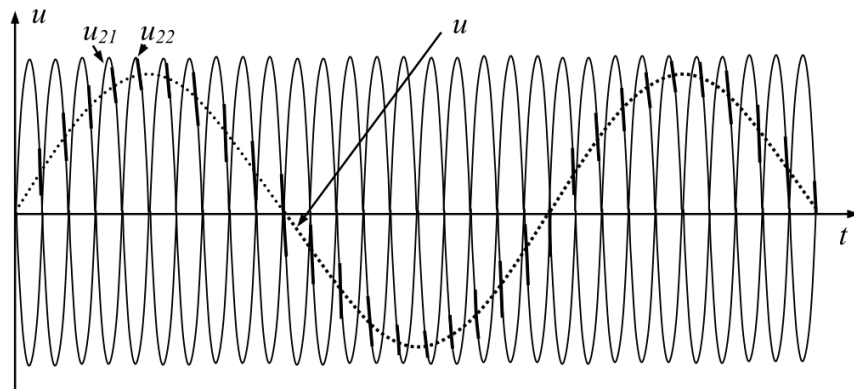


Рис. 1.6. Діаграми напруги, що пояснюють принцип роботи автономного інвертора на реверсивному випрямлячі

Для вибору енергоефективного структурного рішення АІ, для застосування у складі мобільних СФЕУ необхідно розробити критерії оцінки ефективності структурно-схемних рішень інверторів Крім того, при розробці АІ необхідно використовувати сучасні технічні досягнення у створенні основних функціональних елементів перетворювача. Одним з перспективних напрямів, що дозволяє поліпшити енергетичні та експлуатаційно-технічні характеристики АІ та СФЕУ в комплексі, є розробка структурно-схемних АІ на базі однофазної схеми перетворення та однофазно-трьохфазного трансформатора з магнітним

полем (ТОМП), що обертається, а також розробка алгоритму роботи перетворювачем у кількох режимах роботи (з генерацією струму промислової та підвищеної частоти), виконаної з використанням мікропроцесорної техніки.

Сьогодні основними напрямками покращення експлуатаційно-технічних та енергетичних характеристик АІ є застосування у їх структурі нової елементної бази, у тому числі замість біполярних польових транзисторів. Оцінка ефективності АІ проводиться в основному лише за двома показниками: вартість та якість вихідної напруги. Для підвищення об'єктивності оцінки ефективності АІ необхідно проводити їхню оцінку також за енергетичними показниками ККД, а також зазначенням активної, реактивної та повної потужності, величина яких змінюється залежно від режиму роботи перетворювача. Крім того, для транспортних систем важливими є масогабаритні показники.

### **Висновки по розділу**

В даний час для електропостачання автономних сільськогосподарських споживачів МФГ та ЛПГ, які займаються виробництвом меду, м'яса, вовни, риби, а також для забезпечення комфортних побутових умов обслуговувальному персоналу, застосовуються бензинові або дизельні станції, що мають низькі техніко-економічні показники, у тому числі невеликий ресурс роботи. Крім того, також виникають проблеми із зарядом акумуляторних батарей безпілотних літаючих апаратів, які здійснюють моніторинг земель та точне розкидання добрив. Тут широкі перспективи розкриваються перед СФЕУ, важливим функціональним елементом яких є сонячна АІ напруга, яка, крім функції перетворення електроенергії постійного струму в змінний, виконує функцію стабілізатора напруги. ЕТХ автономних інверторів істотно впливають на характеристики СФЕУ в комплексі.

Проведено аналіз особливостей роботи та основних експлуатаційно-технічних характеристик відомих технічних рішень АІ. Розкрито їх основні недоліки, що полягають у відносно низьких показниках ККД і надійності, невеликий діапазон стабілізації напруги (для трифазних інверторів). АІ на реверсивних випрямлячах значно покращують масогабаритні показники АІ, але можуть ефективно використовуватися на невеликих потужностях. Крім того, всі типи інверторів, які застосовуються у складі автономних мобільних сонячних енергосистем, є джерелами однофазної напруги промислової частоти струму.

**Наукова проблема.** Сьогодні все більше застосування знаходять відновлювані джерела енергії в різних галузях. Однак їх широкому застосуванню для електропостачання споживачів електроенергії МФГ і ОПГ перешкоджає обмеженість функціональних можливостей і відсутність відповідних критеріїв оцінки ефективності, в тому числі сонячних фотоенергетичних установок.

**Робоча гіпотеза** полягає в тому, що застосування однофазно-трьохфазного трансформатора з обертовим магнітним полем і мікропроцесорною системою управління дозволить забезпечити необхідну якість електроенергії, розширити функціональні можливості автономного інвертора і поліпшити експлуатаційно-технічні характеристики сонячної фотоенергетичної установки в комплексі.

## РОЗДІЛ 2

### ПРИНЦИПОВА ЕЛЕКТРИЧНА СХЕМА АВТОНОМНОГО ІНВЕРТОРА ТА АЛГОРИТМ РОБОТИ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ

Джерелом електроенергії автономного інвертора напруги є сонячна панель (батарея) з номінальною напругою постійного струму 48 В. Як резервне джерело електроенергії застосовується акумуляторна батарея. Сонячна панель та акумуляторна панель підключаються до інвертора через контролер заряду, що дозволяє розподіляти їхній ресурс залежно від поточного режиму роботи (рис. 1).

Принцип роботи. Постійна напруга від сонячних панелей прикладається до конденсатора С6, який виконує дві функції: вхідного фільтра, що забезпечує необхідну якість напруги постійного струму і згладжування пульсацій напруги під час комутації транзисторів польових силової електронної схеми інвертора. Напруга постійного струму перетворюється на напругу змінного струму двома незалежними інверторами, виконані за мостовою схемою на польових транзисторах VT2, VT3, VT6, VT7 і VT4, VT5, VT8, VT9 відповідно (рис.1).

З виходу інверторів напруга прикладається до первинних обмоток ТОМП W11 та W12 через фільтри Ф1 та Ф2. З вихідних обмоток ТОМП W21, W22 і W23 трифазна симетрична система напруги прикладається до шин А, В і С, до яких підключаються споживачі змінного струму (рис. 2.1).

Центральним керуючим елементом принципової електричної схеми управління є 8-розрядний мікроконтролер DD1 типу PIC16F1827 (рис. 2.1). Мікроконтролер здійснює керування польовими силовими транзисторами VT2-VT9 двох інверторів за допомогою високочастотних ШИМ-сигналів.

Керуючі висновки мікроконтролера підключені до силових транзисторів через спеціалізовані мікросхеми-драйвери DA3-DA6, що забезпечує високі регульовальні характеристики та відповідно якість керування.

Діоди VD14-VD21 служать для обмеження стрибків ЕРС трансформатора з магнітним полем, що обертається і захищають відповідно силові транзистори від пробую.

Для підвищення ефективності роботи автономних інверторів з різними видами навантажень у схемі передбачено перемикач режимів SA1. Наприклад, якщо у разі живлення трифазного навантаження (асинхронних електродвигунів з постійним моментом навантаження  $M_c = \text{const}$ ) напруга на виході може регулюватися пропорційно до частоти (режим 1).

$$\frac{U}{f} = \text{const.} \quad (2.1)$$

При живленні електроприводу вентиляторів на виході інвертора може регулюватися пропорційно квадрату частоти (режим 2).

$$\frac{U}{f^2} = \text{const.} \quad (2.2)$$

У разі, коли момент навантаження обернено пропорційний швидкості, напруга на виході інвертора може регулюватися пропорційно до квадратного кореня з частоти (режим 3).

$$\frac{U}{\sqrt{f}} = \text{const.} \quad (2.3)$$

При кожному перемиканні режиму роботи схеми змінюється алгоритм роботи керуючого контролера і відповідно, вихідні сигнали ШИМ драйверами DA3-DA6 (рис. 2.1).

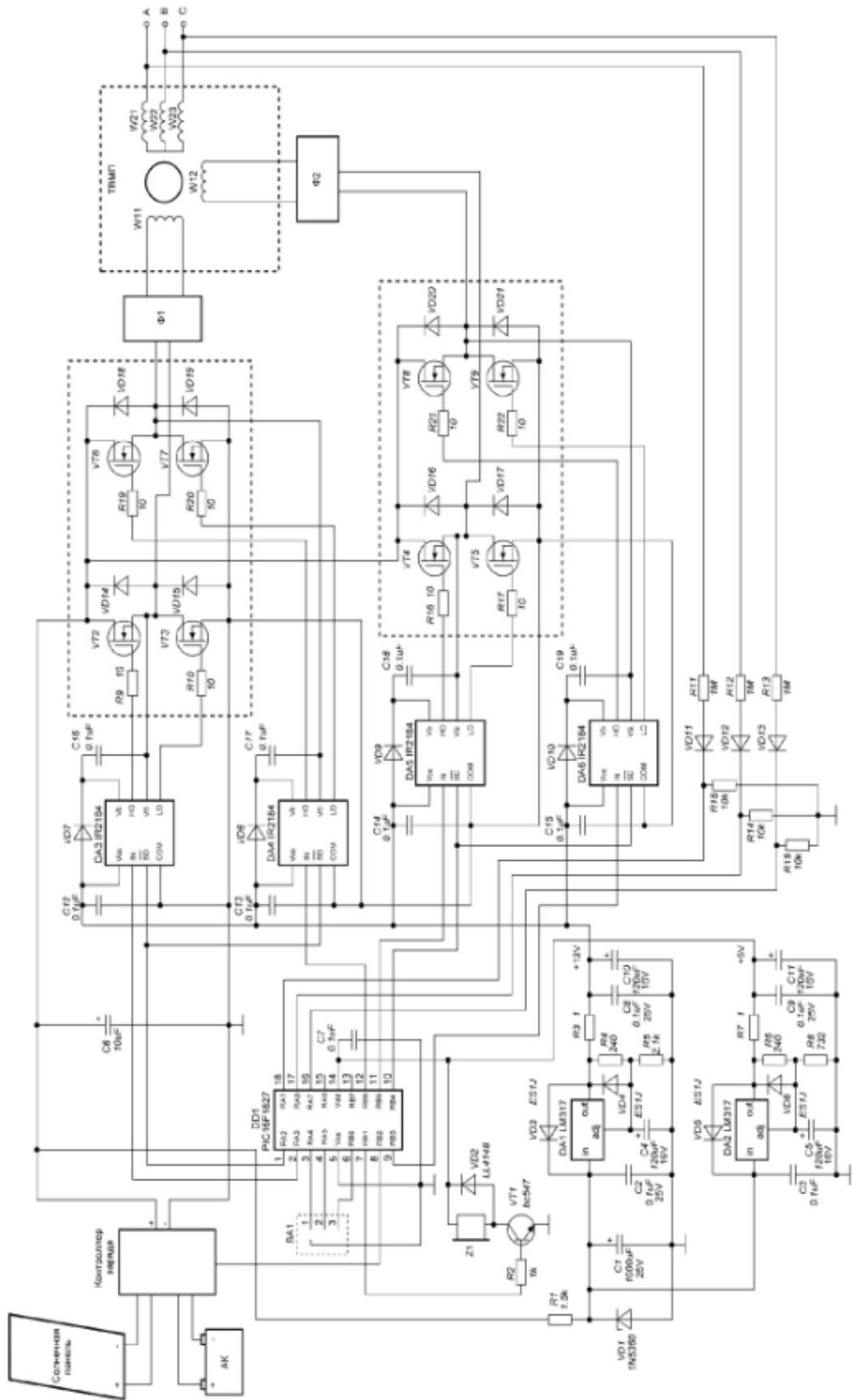


Рис. 2.1. Функціональна електрична схема сонячної фотоелектричної установки

Зворотний зв'язок у принциповій електричній схемі (рис. 2.1) реалізована з виходу ТОМП та за допомогою дільників напруги на резисторах R11-R13, R15, R14 та R18, сигнал подається на аналого-цифрові входи мікроконтролера DD1. При цьому мікроконтролер постійно контролює величину вихідної напруги інвертора та змінює шпаруватість керуючих імпульсів ШІМ таким чином, щоб коливання напруги не виходили за встановлені межі. У випадку, коли напруга на виході інвертора виявляється недостатньою через обмежену потужність, що видається сонячною батареєю (хмарний день або ніч), контролер має додатковий вихід управління (8), що дозволяє перевести контролер заряду в форсований режим і перевести живлення навантаження через інвертор від акумуляторних батарей.

У схемі (рис. 2.1) застосовуються два малопотужні стабілізатори напруги, один для мікроконтролера DD1, другий – для драйверів DA3-DA6. Стабілізатор напруги контролера виконаний на основі регульованої інтегральної схеми DA2 типу LM317 з вихідною напругою 5 В. Стабілізатор напруги драйверів вихідних транзисторів виконаний на основі інтегральної схеми DA1 з вихідною напругою 12 В. Струм, споживаний цією частиною схеми, не перевищує 0,1 А. Вхідна напруга двох стабілізаторів прикладається від первинного параметричного стабілізатора, виконаного на базі баластного резистора R1 і стабілітрона VD1. Даний ланцюжок забезпечує зниження напруги до 25 В від первинного джерела живлення схеми і підключена до виходу контролера заряду. Зважаючи на малий струм, споживання схеми, розсіювана потужність на резисторі R1 мала і практично не впливає на загальний високий ККД інвертора напруги.

У схемі автономного інвертора напруги передбачена звукова сигналізація, виконана на основі звукового випромінювача Z1, яка спрацьовує у разі виникнення аварійного режиму роботи статичного перетворювача напруги або сигналізації при перемиканні різних режимів роботи інвертора.

Оскільки силові електронні транзистори VT2-VT9 працюють у ключовому режимі та мають дуже малий опір у відкритому стані, втрати на них невеликі, тому інвертор має високий ККД у будь-яких режимах експлуатації. Застосування мікроконтролера дозволяє гнучко керувати характеристиками інвертора, а також мати високі експлуатаційні характеристики. Для розробки програми роботи мікропроцесора, що здійснює керування роботою силових електронних приладів сонячного інвертора, розроблено алгоритм.

На рис. 2.2 позначення функціональних елементів та їх вихідних параметрів розкриваються при поясненні принципу роботи системи управління. Застосовувані в алгоритмі позначення  $t_1$  і  $t_2$  - час відкритого стану польових транзисторів VT1, VT2 і VT3, VT4 відповідно, ДН1 і ДН2 - датчики напруги, що фіксують перевищення норми відхилення напруги. Після спрацьовування датчиків ДН1 або ДН2 припиняється подача імпульсів керування на електронні силові прилади інвертора - транзистори VT1-VT4.

Для зміни величини частоти струму на виході АІ необхідно змінити частоту напруги генератора  $u_{зг}$  (рис. 2.2). При цьому, розрахунки показали, що зі збільшенням частоти рівня 200 Гц, ККД автономного інвертора зменшиться на 5 – 8 %.

### **Висновки по розділу**

На етапі проектування або вибору АІ запропоновано оцінювати їх ефективність за такими критеріями:

- ККД, що визначається за результатами розрахунку статичних динамічних втрат у силових електронних приладах та втрат у системі управління;

- масогабаритні показники, що включають показники розрахунку силової електронної схеми, трансформатора, вхідного та вихідного фільтрів;



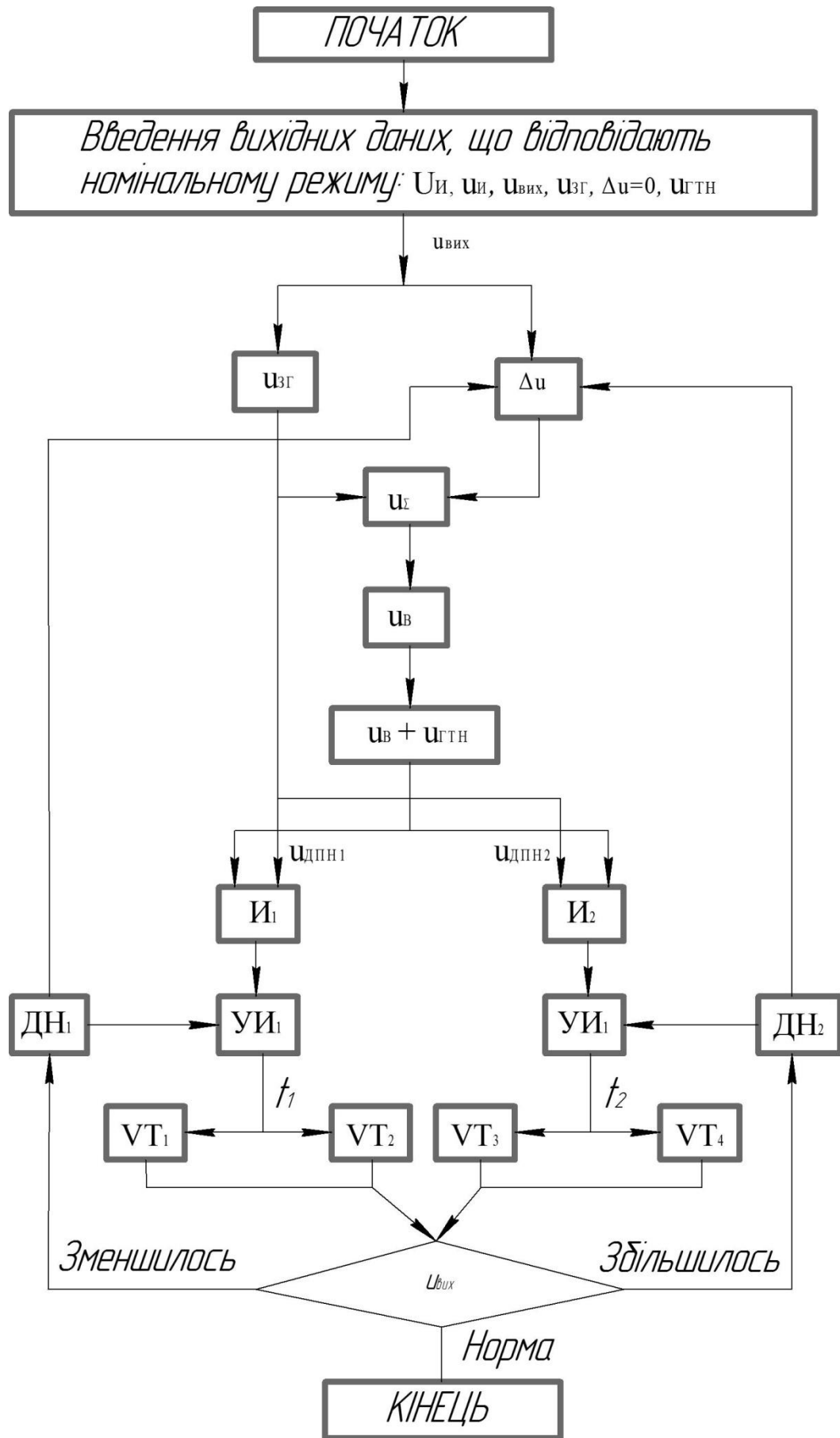


Рис. 2.2. Алгоритм роботи системи керування автономним інвертором

- показники якості напруги, що оцінюються за величиною коефіцієнта гармонік;

- показники активної, реактивної та повної потужності.

Розроблено функціональну схему АІ, виконану на однофазній мостовій схемі та однофазно-трьохфазному ТОМП. Перетворення напруги постійного струму і стабілізація напруги змінного струму здійснюються з використанням опорного сигналу системи управління сигналу пилкоподібної схеми. Для поліпшення якості вихідної напруги інвертора та поліпшення масогабаритних показників і ККД вихідного фільтра розроблено структурну схему системи управління, де в якості опорного сигналу застосовується сигнал трикутної форми.

Основними недоліками розглянутих схем АІ є наявність фазозсувного конденсатора великої ємності, включеного між первинними обмотками ТОМП. При цьому для стабілізації вихідної трифазної напруги АІ необхідно змінювати ємність фазозсувного конденсатора, тому що при несиметричних режимах роботи навантаження спотворюється форма кругового магнітного поля, що обертається, що додатково вносить спотворення у форму напруги.

Розроблена функціональна схема АІ на ТОМП, де силова електронна схема перетворення виконана на двох однофазних інверторах, що містять по два напівпровідникових прилади, зсув напруг на виході яких, для отримання магнітного поля, що обертається, здійснюється фазозсувним пристроєм системи управління.

Розроблено принципову електричну схему автономного інвертора, виконану на базі польових транзисторів і однофазно-трьохфазного трансформатора з магнітним полем, що обертається, з використанням мікропроцесорної техніки та алгоритм роботи системи управління з перетворення та стабілізації напруги.

## РОЗДІЛ 3

### МЕТОДИКА ТА РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

#### 3.1 Методика експериментальних досліджень та електрообладнання

Для підтвердження результатів теоретичних досліджень розроблено випробувальний стенд (рис. 3.1) з дослідження роботи однофазно-трьохфазного ТОМП, виконаного на базі асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором (рис. 3.1 – елемент 1) та асинхронного двигуна з фазним ротором (рисунок 3.2).

До складу обладнання випробувального стенду входять (рис. 3.1):

- латр, елемент 3 – виконує функції інвертора – джерела напруги однофазного змінного струму;
- осцилограф, елемент 2;
- блок вимірювальних приладів, елемент 4.

Метою дослідження було отримання та оцінка якості трифазної симетричної системи напруг, що отримується з однофазної напруги змінного струму, використовуючи як ТОМП асинхронний двигун з короткозамкненим (рис. 3.1) та фазним ротором (рис. 3.2).

На рис. 3.3 наведені фотографії блоку фазозсувних конденсаторів, які підключалися до первинних обмоток ТОМП для забезпечення електричного зсуву струмів у первинних обмотках і створення магнітного поля, що обертається. Зміна ємності конденсаторів здійснюється за допомогою трифазних автоматичних вимикачів (рис. 3.3 а). На рис. 3.3 б наведені конденсаторні батареї, зміна ємності яких дозволяє стабілізувати напругу.

На рис. 3.1 показаний асинхронний двигун із короткозамкненим ротором 1, потужністю 400 Вт, а на рис. 3.3 – асинхронний двигун із фазним ротором потужністю 1 кВт. Ротори електричних машин зафіксовані жорстко до корпусу.



Рис. 3.1. Зовнішній вигляд випробувального стенду: 1 – ТОМП; 2 – осцилограф; 3 – латр; 4 – вимірювальні прилади

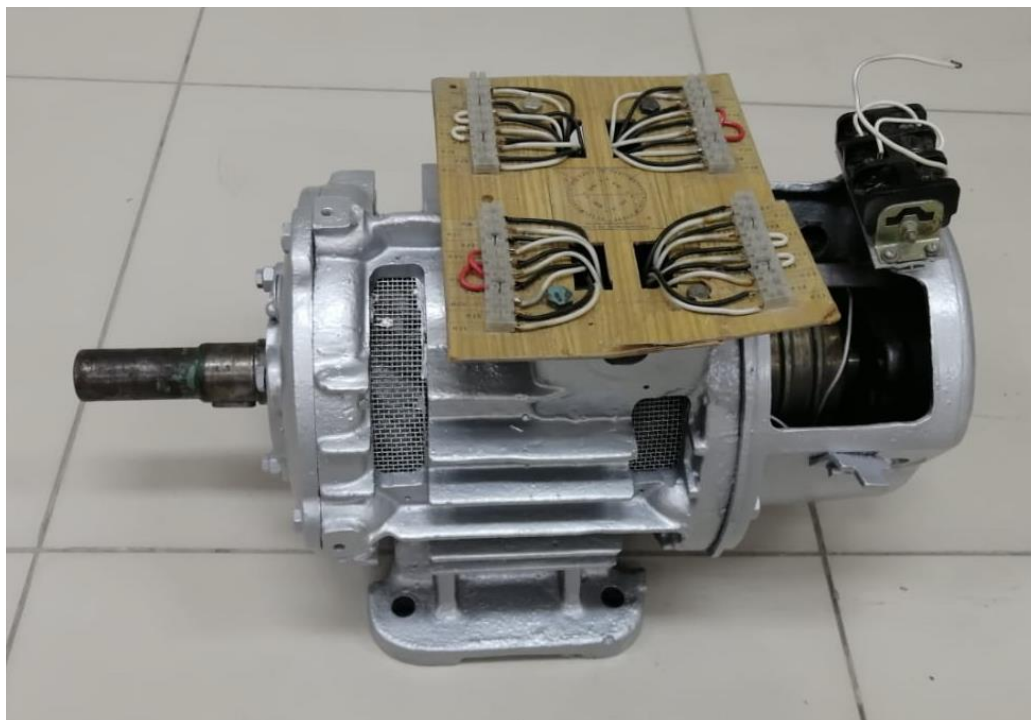
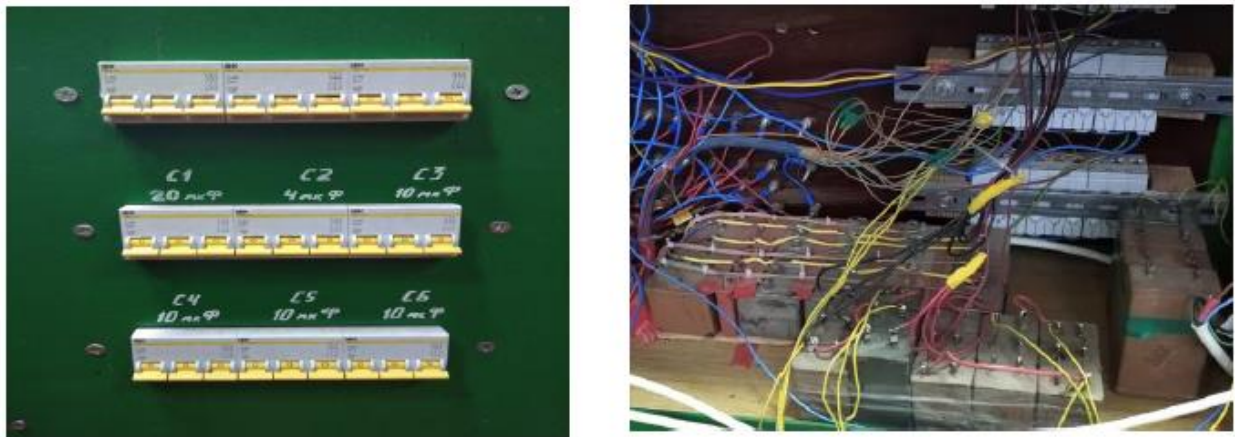


Рис. 3.2. ТОМП на асинхронному двигуні із фазним ротором



а)

б)

Рис. 3.3. Блок фазозсувних конденсаторів: а) - передня панель; б) - конденсатори блоку

Для проведення експериментальних досліджень розроблено розгорнуту електричну схему первинних і вторинних обмоток ТОМП (рис. 3.4).

Методика проведення експериментальних досліджень включає проведення наступних випробувань: за допомогою латру (елемент 3 рис. 3.1) подавати змінну напругу від 24 до 48 на первинні обмотки ТОМП; вимірювати величину напруги на вході та виході ТОМП; на всіх етапах вимірювання напруги фіксувати його значення та форму за допомогою осцилографа на виході ТОМП.

### 3.2 Експериментальні дослідження

При дослідженні ТОМП, виконаного на базі асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором, первинні та вторинні обмотки вкладалися в пази статора електричної машини. При дослідженні ТОМП, виконаного на асинхронному двигуні з фазним ротором, первинні обмотки вкладалися в пази ротора.

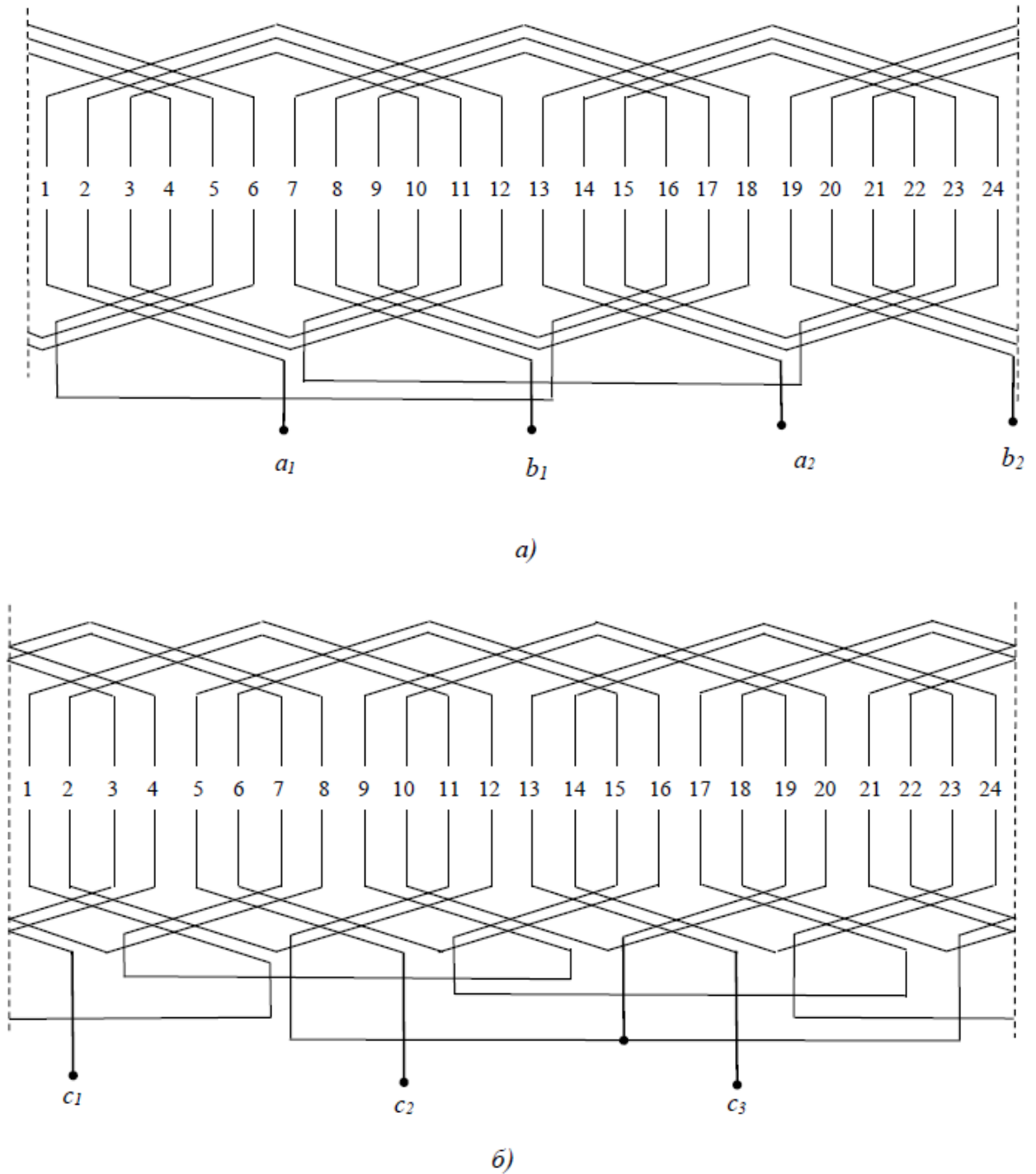


Рис. 3.4. Розгорнута схема обмоток ТОМП: а) – первинних однофазних; б) – вторинної трифазної системи

На рис. 3.5 наведено осцилограми трифазної системи напруги на виході ТОМП, виконаного на базі асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором, а на рис. 3.6 – з фазним ротором. Як видно з розглянутих рисунків на виході

ТОМП, виконаного на електричній машині з фазним ротором, форма трифазної системи напруги мають менші спотворення.

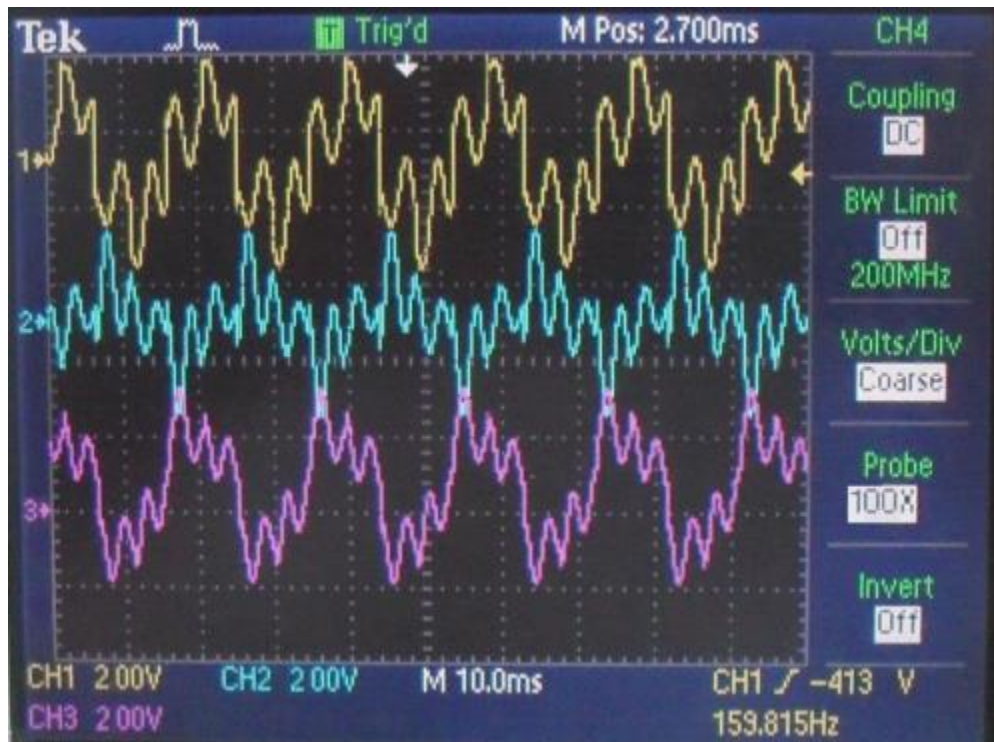


Рис. 3.5. Осцилограми трифазної системи напруги ТОМП, виконаної на асинхронному двигуні з короткозамкненим ротором

Як відомо, одним із критеріїв характеризуючих достовірність досліджень є збіг основних характеристик, отриманих в результаті теоретичних та експериментальних досліджень. Оцінка здійсненості цієї вимоги може бути здійснена за усередненими значеннями неузгодженості характеристик, отриманих при комп'ютерному моделюванні з характеристиками, отриманими під час експериментального дослідження. Завдання вирішувалося за допомогою методу статичної оцінки точності результатів досліджень, які проводяться на фізичній моделі.

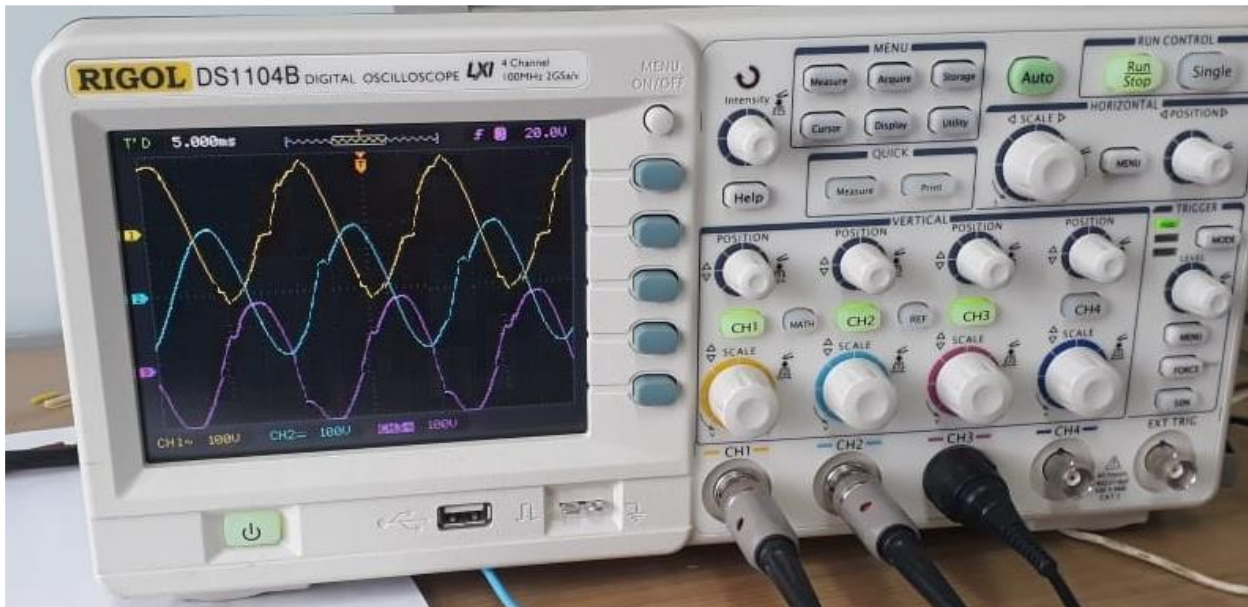


Рис. 3.6. Осцилограми трифазної системи напруги ТОМП, виконаної на асинхронному двигуні з фазним ротором

Оскільки експеримент проводився тільки на ТОМП, проводилося порівняння його електричних параметрів (діючих значень напруги і струму, а також тривалість перехідних процесів) з параметрами трансформатора, отриманими в результаті комп'ютерного моделювання.

Модель дослідження представлялася у вигляді таких функцій:

$$\left. \begin{aligned} Y_1 &= F_1(X) \\ Y_2 &= F_2(X) \\ Y_3 &= F_3(X) \end{aligned} \right\}, \quad (3.1)$$

де  $Y_1, Y_2, Y_3$  – критерії порівняння, що є діючими значеннями фазної напруги і струму на навантаженні  $U_H$  і  $I_H$ , а також час тривалості перехідних процесів  $t_{пп}$ ;

$X$  – керуючий вплив, що змінюється у процесі експерименту якою було обрано потужність навантаження  $P_H$ .

Область визначення керуючого впливу  $X$  була задана виходячи з аналізу можливих режимів роботи фізичної моделі та становила  $0; 0,5P_H; P_H$ .



Оцінка достовірності отриманих результатів проводилася в такий спосіб. Кількість вимірювань фізичних параметрів визначення  $Y_1, Y_2, Y_3$  становило – 10 при кожному значенні. Довірчий інтервал визначався на підставі критерію Ст'юдента.

$$\Delta Y = \pm t(\beta, k) \frac{S^*}{\sqrt{k}}, \quad (3.2)$$

де  $k = n - 1$ ;  $n$  – число повторних змін;

$t(\beta, k)$  – критерій Ст'юдента;

$S^*$  – наближене значення середньої квадратичної помилки, що визначається виразом.

$$S^* = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y)^2} \quad (3.3)$$

Основні дані статичної обробки результатів наведено у таблиці 3.1, де  $\Delta$  – відхилення досліджуваного параметра від середнього значення. Зіставлення результатів комп'ютерного моделювання та досліджень на фізичній моделі дало добрий збіг довірчих граней (розбіжність не більше  $\pm 5,5$  %) та середніх значень (розбіжність від - 4,05 до +5,5 %).

Таблиця 3.1 - Результати експериментальних досліджень (ЕД) та комп'ютерного моделювання (КМ).

	U		$\Delta, \%$	I		$\Delta, \%$	t <sub>пп</sub>		$\Delta, \%$
	Середнє значення, В			Середнє значення, А			Середнє значення, мс		
	ЕД	КМ		ЕД	КМ		ЕД	КМ	
0	228	222	-2,2	0	0	0	0	0,13	0
0,5P <sub>H</sub>	217	224	+4,3	1,0	0,96	-5	128	124	-4,1
P <sub>H</sub>	28	219	+5,6	1,45	1,53	+4,6	137	143	+3,7

Таким чином, наведені експериментальні дослідження підтверджують достовірність отриманих теоретичних висновків не тільки з дослідження

ТОМП, але і АІ, виконаного на його базі, тому що комп'ютерна та метод опису схеми заміщення інвертора залишаються одними і тими самими.

### **Висновки по розділу**

Розроблено експериментальну установку з дослідження роботи однофазно-трьохфазних ТОМП, виконаних на асинхронному двигуні з короткозамкненим та фазним ротором. У першому випадку первинна та вторинна обмотки ТОМП розміщуються на статорі, а у другому: первинні – у пазах ротора, а вторинні – у пазах статора. Дослідження показали, що ТОМП, виконаний на електричній машині з фазним ротором, має покращений спектральний склад вихідної напруги, ніж ТОМП, виконаний на базі асинхронної машини з короткозамкненим ротором.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Широкі перспективи розкриваються перед СФЕУ, що здійснюють електропостачання МФГ та ЛПГ, що займаються виробництвом меду, м'яса, вовни, риби, а також забезпечують комфортні побутові умови обслуговуючого персоналу. Важливим функціональним елементом СФЕУ є сонячний АІ, який здійснює перетворення напруги постійного струму змінний. Експлуатаційні характеристики АІ істотно впливають на характеристики СФЕУ в комплексі. Розкрито недоліки експлуатованих АІ та напрями покращення їх експлуатаційно-технічних характеристик.

Розроблено функціональні схеми трифазних АІ, виконані на однофазній мостовій силовій електронній схемі та однофазно-трьохфазному ТОМП з покращеними експлуатаційно-технічними та енергетичними характеристиками. Розкрито особливості їх роботи, переваги та недоліки.

Розроблено принципову електричну схему АІ на однофазно-трифазному ТОМП, виконану з використанням мікропроцесорної техніки, та алгоритм роботи системи управління з перетворення та стабілізації напруги для розробки програми.

Розроблено електричну схему заміщення АІ на однофазно-трьохфазному ТОМП з підключеним джерелом та навантаженням та методику інженерного розрахунку параметрів схеми заміщення.

Для підтвердження результатів попередніх досліджень розроблено експериментальну установку з дослідження роботи однофазно-трифазних ТОМП, виконаних на асинхронному двигуні з короткозамкненим та фазним ротором. Дослідження показали, що ТОМП, виконаний на електричній машині з фазним ротором, має покращений спектральний склад вихідної напруги, ніж ТОМП, виконаний на базі асинхронної машини з короткозамкненим ротором.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Медиковський М. , Мельник Р. Інформаційна технологія моделювання енергодинамічних режимів вітрової електричної станції за наявності акумулюючого елемента. в Fundamental and applied research in the modern world. Abstracts of the 7th International scientific and practical conference, Boston, USA, 2021.
2. М. Медиковський, В. Кравчишин, Р. Мельник та О. Шуневич, «Дослідження режимів управління енергодинамічними процесами в системах електропостачання за наявності акумулюючих елементів,» Науковий вісник НЛТУ України, т. 26, № 7, р. 291 298, 2016.
3. Р. Мельник, «Аналіз алгоритмів оцінювання ефективності сонячних електростанцій,» в 10 Міжнародна науково практична конференція «Нетрадиційні і поновлювальні джерела енергії як альтернатива первинним джерелам енергії в регіоні», м. Львів, Україна, 2019.
4. С. Кудря, Л. Яценко та Г. Душина, Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України, Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 2008.
5. О. Кармазін, Балансова надійність електроенергетичних систем в умовах зростання частки відновлюваної енергетики. Автореферат, Київ: Національної академії наук України, 2019.
6. В. Павловський, Л. Лук'яненко, І. Гончаренко та А. Захаров, «Обмеження потужності відновлюваних джерел енергії за умови приєднання до електричної мережі,» Праці ІЕД НАНУ, № 43, рр. 18-23, 2016.
7. П. Лежнюк, В. Комар та С. Кравчук, Балансова надійність електричної мережі з фотоелектричними станціями: монографія, Вінниця: ВНТУ. 2018.
8. І. Щур та В. Климко, «Техніко-економічне обґрунтування параметрів гібридної вітро-сонячної системи для електропостачання окремого об'єкта.

Електромеханічні і енергозберігаючі системи,» Електромеханічні і енергозберігаючі системи, № 2, pp. 92-100, 2014.

9. М. Кузнецов, О. Лисенко та О. Мельник, «Особливості стохастичної оптимізації гібридних енергосистем на базі ВДЕ,» Відновлювана енергетика, № 2, pp. 6-15, 2018.

10. М. Кулик та О. Згуровець, «Можливості використання великих накопичувачів електроенергії для стабілізації частоти в об'єднаних енергосистемах з потужними сонячними електростанціями,» Відновлювана енергетика, № 3, р. 6–14.

11. Д. Лежнюк, В. Комар та С. Кравчук, «Оцінювання стабільності генерування сонячних електростанцій у задачі забезпечення балансової надійності,» Наукові праці ВНТУ, № 2, р. Наукові праці ВНТУ. 2016.

12. А. Барило, М. Бенменні, В. Будько, М. Будько та П. Васько, Відроджувальні джерела енергії. Монографія, Київ, 2020.

13. В. Кравчишин, Інтелектуалізація управління комплексною системою генерації електричної енергії, Львів: Національний університет «Львівська політехніка», 2019.

14. М. Бик, С. Фроленкова, О. Букет та Г. Васильєв, «Технічна електрохімія. Частина 2. Хімічні джерела струму,» КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ. 2018.

15. Ю. Попов, В. Тюптя та В. Шевченко, «Методи оптимізації. Навчальний електронний посібник для студентів спеціальностей “Прикладна математика”,» Електронне видання. Ел. бібліотека факультету кібернетики Київського національного університету імені Тараса Шевченка, Київ. 2003.

16. Соколовський О.Ф., Ковальчук В.В. Принципова електрична схема автономного інвертора. *Наукові читання–2022: матеріали науково-практичної конференції науково- педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених факультету інженерії та енергетики. 7 червня 2022 р. Житомир: Поліський національний університет, 2022. С. 16-18.*

17. Соколовський О. Ф., Ковальчук В. В. Автономні інвертори сонячних електростанцій. *Збірник тез доповідей XXIII Міжнародної наукової конференції "Сучасні проблеми землеробської механіки"* (16–18 жовтня 2022 року). МОН України, Національний університет біоресурсів і природокористування України, Житомирський агротехнічний фаховий коледж. Київ. Житомир. 2022. С. 350-355.

18. Ковальчук В. В. Особливості конструкції та роботи автономних сонячних фотоенергетичних установок. *Збірник тез VII Всеукраїнської науково-практичної конференції «Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь»* 31 березня 2021 року, м. Житомир. С. 275-276.