

Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет будівництва, транспорту та енергетики
Кафедра “Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент”

“Допущено до захисту ”
Зав. кафедри ЕТС та ЕМ
канд. техн. наук., професор
_____Петро ПЛЄШКОВ
“ ____ ” _____ 2023 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за другим (магістерським) рівнем вищої
освіти
на тему
“Автономна система енергозабезпечення
насосної станції”

Виконав здобувач вищої освіти
2 курсу магістратури, групи ЕЕ-22М
ОПП «Електротехнічні системи
електроспоживання»
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
_____Владислав ГОТОРУК
« ____ » _____ 2023 р.
Керівник роботи
канд. техн. наук, доцент
_____Василь ЗІНЗУРА
« ____ » _____ 2023 р.
Рецензент _____

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Галузь знань 14 Електрична інженерія

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма Електротехнічні системи електроспоживання

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

Плешков П.Г.

«___» _____ 2023 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

Готорука Владислава Володимировича

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи (проекту) Автономна система енергозабезпечення
насосної станції

Autonomous power supply system for a pumping station

2. Керівник роботи (проекту) Зінзура Василь Васильович, канд. техн. наук., доц.

(прізвище, ім'я, по-батькові, науковий ступінь, вчене звання)

3. Строк подання студентом роботи до захисту 28.12.2023 р

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи (проекту) Метою роботи є
створення автономної фотоелектричної насосної установки універсального
застосування для водопостачання, зрошення земель та дренажних систем.
Завдання роботи: 1. Провести аналіз сучасних автономних систем
водопостачання. 2. Провести теоретичні дослідження автономної системи
енергозабезпечення насосної станції. 3. Розробити комп'ютерну імітаційну
модель автономної системи енергозабезпечення насосної станції. 4. З
допомогою комп'ютерного моделювання дослідити можливість
застосування автономної системи для енергозабезпечення насосної станції.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
<i>Охорона праці</i>	<i>к.т.н, доц. Савеленко І.В.</i>		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
<i>1</i>	<i>Вступ</i>	<i>10.10.2023</i>	
<i>2</i>	<i>Аналітичний огляд сучасних систем автономного енергозабезпечення</i>	<i>13.10.2023</i>	
<i>3</i>	<i>Теоретичне дослідження автономних фотоелектричних насосних станцій</i>	<i>30.10.2023</i>	
<i>4</i>	<i>Розробка та моделювання автономної системи енергозабезпечення насосної станції</i>	<i>15.11.2023</i>	
<i>5</i>	<i>Охорона праці</i>	<i>30.11.2023</i>	
<i>7</i>	<i>Висновки</i>	<i>07.12.2023</i>	
<i>8</i>	<i>Оформлення пояснювальної записки КР</i>	<i>11.12.2023</i>	
<i>9</i>	<i>Оформлення презентаційної частини КР</i>	<i>14.12.2023</i>	

Дата видачі завдання

«___» _____ 2023 р.

Підпис керівника _____

Завдання прийнято до виконання

«___» _____ 2023 р.

Підпис здобувача _____

АНОТАЦІЯ

Готорук В. В. Автономна система енергозабезпечення насосної станції.

Спеціальність 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». – ОПП «Електротехнічні системи електроспоживання». – Центральноукраїнський національний технічний університет. – м. Кропивницький, 2023 р.

Метою роботи є створення автономної фотоелектричної насосної установки універсального застосування для водопостачання, зрошення земель та дренажних систем.

Проведено аналітичний огляд ефективності фотоелектричних панелей, а також розглянуто методи відстеження максимальної потужності енергосистеми. Надано класифікацію алгоритмів управління. Встановлено, що однією з ключових властивостей фотоелектричних систем є їх здатність конвертувати сонячне випромінювання в електричну енергію. За останні роки цей процес став дедалі більш ефективним завдяки технологічному прогресу в галузі сонячної енергетики.

У середовищі MATLAB/Simulink створено детальну модель фотопанелі з урахуванням технологічних особливостей фотоелементів. Тобто параметри фотомодуля підібрані відповідно до їх залежності від освітленості та температури. Це дозволяє використовувати модель для будь-якого типу фотомодулів і визначати необхідні характеристики за різних умов освітлення й температури, зокрема вольт-амперні ($I(V)$) та потужнісні ($P(V)$) характеристики.

Ключові слова: автономна система енергопостачання, фотоелектричний модуль, система автоматичного керування

THE SUMMARY

Hotoruk V.V. Autonomous power supply system for a pumping station

Specialty 141 – "Electric power, electrical engineering and electromechanics". – "Electrical power consumption systems". – Central Ukrainian National Technical University. – Kropyvnytskyi, 2023

The purpose of the work is to create an autonomous photovoltaic pumping unit of universal use for water supply, land irrigation and drainage systems.

An analytical review of the efficiency of photovoltaic panels was carried out, and the methods of tracking the maximum power of the power system were also considered. A classification of control algorithms is provided. It has been established that one of the key properties of photovoltaic systems is their ability to convert solar radiation into electrical energy. In recent years, this process has become increasingly efficient thanks to technological progress in the field of solar energy.

In the MATLAB/Simulink environment, a detailed model of the photopanel was created, taking into account the technological features of the photocells. That is, the parameters of the photomodule are selected according to their dependence on illumination and temperature. This allows you to use the model for any type of photovoltaic module and determine the required characteristics under different lighting and temperature conditions, including current-voltage ($I(V)$) and power ($P(V)$) characteristics.

Keywords: autonomous power supply system, photovoltaic module, automatic control system

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД СУЧАСНИХ СИСТЕМ АВТОНОМНОГО ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ	12
1.1 Аналітичний огляд автономних систем енергопостачання	12
1.2 Аналітичний огляд гібридних систем постачання енергії	15
1.3 Особливості систем автоматичного керування автономних систем енергопостачання	23
1.3.1. Фотоелектрична ефективність систем та відстеження точки максимальної потужності.....	23
1.3.2. Відстеження точки максимальної потужності (MPPT).....	26
1.4 Класифікація алгоритмів визначення точки максимуму потужності (MPPT)	29
1.4.1. Метод узгодження електричного навантаження на фотопанелях.....	30
1.4.2. Метод перемикування електричного навантаження	31
1.4.3. Метод постійної напруги.....	32
1.4.4. Алгоритм збурень і спостережень (P&O).....	32
1.4.5. Комбінація методу P&O з CV	33
1.4.6. Модифікований алгоритм dP - P&O	33
1.4.7. Оптимізований метод P&O	35
1.4.8. Модифікований алгоритм збурень і спостережень	35
Висновки до розділу	36
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОНОМНИХ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ НАСОСНИХ СТАНЦІЙ	38
2.1 Опис автономної фотоелектричної системи та постановка задачі.....	38

2.2 Основні вимоги до електроприводу і САК	
насосної установки.....	43
2.3 Визначення параметрів електромеханічної системи	
насосної станції	46
Висновки до розділу	54
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ТА МОДЕЛЮВАННЯ АВТОНОМНОЇ	
СИСТЕМИ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАСОСНОЇ СТАНЦІЇ	55
3.1 Постановка задачі автономного енергозабезпечення	
насосної станції	55
3.2 Комп'ютерна імітаційна модель фотоелектричної	
електростанції насосної установки	62
3.3 Комп'ютерне моделювання автономної системи	
енергозабезпечення насосної станції	76
Висновки до розділу	82
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ	83
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	85
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	87

ВСТУП

Актуальність теми. Одним з найважливіших ресурсів для існування людства є вода. Більшість видів людської діяльності залежать від безперервного доступу до адекватних запасів води, необхідних для виробництва продуктів харчування, побутового споживання, медичного обслуговування, генерування електроенергії та відновлення екосистем. Весь соціум потребує водних ресурсів для стійкого соціального й економічного розвитку.

Протягом усієї історії людства водопостачання було актуальною технічною задачею. Існує нагальна необхідність у стабільному забезпеченні водою посушливих, сільських регіонів. Автономні системи вироблення електроенергії та водопостачання на їхній основі є одним з оптимальних рішень цієї проблеми в майбутньому.

За оцінками експертів, до 2025 року половина населення планети страждатиме від нестачі питної води. Глобальне потепління та забруднення довкілля ще більше загострюють ситуацію. Тому впровадження стійких та ефективних систем водопостачання є ключовим завданням для забезпечення майбутніх потреб людства.

Для зрошення сільськогосподарських угідь, транспортування води на побутові потреби, а також для напування худоби необхідна насосна система з джерелом живлення. У сільській місцевості джерела енергії часто знаходяться на значній відстані від водних ресурсів. Водночас спорудження нових ліній електропередач та трансформаторів у віддалених районах є вкрай затратним. На даний час поширені автономні системи водопостачання на базі двигунів внутрішнього згоряння, що мають такі переваги, як мобільність, простота встановлення, незалежність від наявної інфраструктури. Проте вони потребують обслуговування й заправки паливом, яке є дорогим та шкідливим для довкілля. Тому використання відновлюваних джерел енергії є особливо

актуальним для автономних систем водопостачання у сільській та посушливій місцевості багатьох країн.

За прогнозами, попит на воду до 2050 року зросте на 55% через збільшення населення та розвиток промисловості. Водночас запаси прісної води скорочуються. Тому впровадження інноваційних технологій водопостачання на основі відновлюваних джерел енергії є критично важливим для забезпечення майбутніх потреб людства.

Виробництво електроенергії за допомогою сонячних батарей є відновлюваним джерелом, яке має значні переваги для систем водопостачання: простота та мобільність конструкції, мінімальні вимоги до інфраструктури, стабільна робота, безшумність через відсутність рухомих частин, можливість безпосереднього застосування на місці споживання, легкість монтажу, невеликі витрати на обслуговування.

Використання автономних фотоелектричних насосних установок сприятиме поліпшенню умов життя в певних районах та підтримці екологічної чистоти навколишнього середовища.

Експерти прогнозують, що до 2027 року частка сонячної енергетики у світовому енергобалансі досягне 10%. Це пояснюється падінням вартості фотоелектричних технологій та підвищенням їх ефективності. Тож сонячні установки для водопостачання стануть ще доступнішими для широкого використання по всьому світу.

Мета і задачі роботи. Метою роботи є створення автономної фотоелектричної насосної установки універсального застосування для водопостачання, зрошення земель та дренажних систем.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

1. Провести аналіз сучасних автономних систем водопостачання.
2. Провести теоретичні дослідження автономної системи енергозабезпечення насосної станції.
3. Розробити комп'ютерну імітаційну модель автономної системи

енергозабезпечення насосної станції.

4. З допомогою комп'ютерного моделювання дослідити можливість застосування автономної системи для енергозабезпечення насосної станції.

Об'єкт дослідження – процес перетворення енергії в насосних установках з автономним енергозабезпеченням.

Предмет дослідження – автоматизований електропривід автономної системи водопостачання на базі фотоелектричної насосної станції.

Методи досліджень. У роботі використано фундаментальні засади теорії електроприводу, теорії автоматичного управління, методологію проектування систем електроприводів та їх інтелектуального керування, а також методи моделювання об'єкту дослідження за допомогою програмного комплексу MATLAB/Simulink.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

- запропоновано структуру автономної фотоелектричної насосної станції з системою інтелектуального керування, що дозволяє відстежувати точку максимальної потужності фотоперетворювача та оптимізувати режими роботи насосного агрегату.

- розроблено математичні моделі силового ланцюга та системи автоматичного регулювання запропонованої автономної установки з урахуванням гідродинамічних, електромеханічних та електричних процесів в її основних ланках.

- запропоновано нові підходи щодо налаштування системи керування електроприводом за критеріями мінімізації енергоспоживання та підвищення ефективності використання енергії сонячного випромінювання.

Практична цінність отриманих результатів полягає в наступному:

- запропоновані способи керування електроприводом на базі відстеження точки максимальної потужності фотомодулів забезпечать раціональне використання енергії сонячного випромінювання.

- впровадження автономних фотоелектронасосних комплексів дасть змогу істотно підвищити надійність систем водопостачання у віддалених районах, знизити викиди шкідливих речовин в атмосферу, а також поліпшити економічні та екологічні показники процесу водоподачі в цілому.

Отже, практичне застосування отриманих результатів матиме важливе народногосподарське значення та сприятиме вирішенню однієї з глобальних проблем людства – забезпеченню водою.

Структура роботи. Робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел. Повний обсяг роботи складає 89 сторінок. Основна частина викладена на 79 сторінках друкованого тексту, містить 38 рисунків та 2 таблиці. Список використаних джерел містить 25 джерел та викладений на 3 сторінках.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД СУЧАСНИХ СИСТЕМ АВТОНОМНОГО ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

1.1 Аналітичний огляд автономних систем енергопостачання

На сьогодні потреба людства в енергії зростає неупинно. Втім, вже у найближчі десятиліття виробники енергії зіткнуться з дефіцитом природного палива, такого як нафта, газ чи вугілля. Крім того, постануть гострі екологічні проблеми, пов'язані із забрудненням довкілля в результаті спалювання викопного палива. А також залишається потенційна небезпека ядерної енергетики. Отож, назріває необхідність у дешевій енергії, виробленій із відновлюваних джерел з мінімальним впливом на навколишнє середовище.

Саме тому нині інтенсивно розвивається альтернативна або "чиста" енергетика, що використовує практично невичерпні природні ресурси. Ефективним рішенням для забезпечення надійного та якісного електропостачання споживачів є створення автономних систем електроживлення. Вони містять декілька джерел енергії - основне, резервні та аварійні. Обмежені запаси органічного палива й негативний вплив традиційної енергетики на довкілля розкривають широкі перспективи для застосування відновлюваних джерел енергії у складі таких автономних систем.

Зокрема, сонячна та вітрова енергетика демонструють найбільш стрімкі темпи зростання серед усіх відновлюваних джерел. Це пов'язано з падінням вартості відповідних технологій та їх високою ефективністю. Експерти прогнозують подальше здешевлення "зеленої" енергії та збільшення її частки в загальному енергобалансі.

Одним з різновидів автономних систем енергопостачання є фотоелектричні установки. Вони складаються з взаємопов'язаних компонентів, спроектованих так, щоб забезпечувати передачу бажаної кількості електроенергії від невеликого генеруючого пристрою до споживача.

Існують три основні типи систем енергопостачання: підключені до мережі, автономні та гібридні. Вони можуть використовувати різноманітні джерела енергії, зокрема сонячні батареї, дизельні генератори чи вітрогенератори. У підключених до електричної мережі та автономних системах іноді застосовуються накопичувачі енергії, наприклад акумулятори або суперконденсатори, для зберігання енергії на нічний час, коли сонячне випромінювання недостатнє.

Фотоелектричні установки перетворюють сонячне випромінювання безпосередньо на електрику за допомогою фотоелектричного ефекту. Вони є одним з найпоширеніших видів відновлюваних джерел енергії завдяки простоті та надійності. Згідно звіту Міжнародного енергетичного агентства, частка сонячної фотоелектрики у глобальному виробництві електроенергії досягла 5% у 2021 році та продовжує зростати.

Електроенергія, що генерується фотопанелями в автономних системах, безпосередньо подається на навантаження без приєднання до централізованої мережі електропостачання. Такі автономні фотоелектричні установки вважаються одним з найбільш економічно ефективних способів впровадження сонячної енергетики, особливо у сільській місцевості з тривалими періодами інтенсивного сонячного опромінення та відсутністю підключення до загальнодержавних електромереж. Прикладами застосування є системи зв'язку, водопідйомні насосні станції, маяки та аварійні служби, а також військові об'єкти з потребою в автономних джерелах живлення.

Однак такі системи мають певні недоліки, зокрема накопичувачі енергії з низьким коефіцієнтом корисної дії, обмежену ємність акумуляторних

батарей, що спричиняє втрати та неефективне використання надлишкової енергії.

Автономні фотоелектричні системи мають такі характерні особливості:

- Оскільки система не під'єднана до електромережі, потрібен накопичувальний пристрій, що вимагає додаткових витрат на акумулятори чи конденсатори, інакше доводиться розсіювати надлишкову потужність.
- В автономних системах генеруюча потужність має задовольняти максимальне навантаження споживача.

Графіки споживання електроенергії та потенціалу відновлюваних джерел енергії, таких як сонце та вітер, є мінливими. Тому в автономні системи електропостачання варто включати пристрої для накопичення електричної енергії, щоб компенсувати коливання.

Типова структура автономних сонячних і вітряних електростанцій містить сонячні панелі або вітряки для виробництва електричної енергії, а також акумулятори та інвертори для її зберігання й перетворення. Інвертор перетворює постійний струм з акумуляторів або сонячних панелей на змінний, який можна використовувати для живлення побутових приладів.

Крім того, такі системи часто мають контролери заряду для оптимального управління заряджанням і розряджанням акумуляторів. Деякі системи також під'єднуються до централізованої енергомережі як резервне джерело живлення. Структурна схема типової автономної сонячно-вітряної електростанції показана на рисунку 1.1

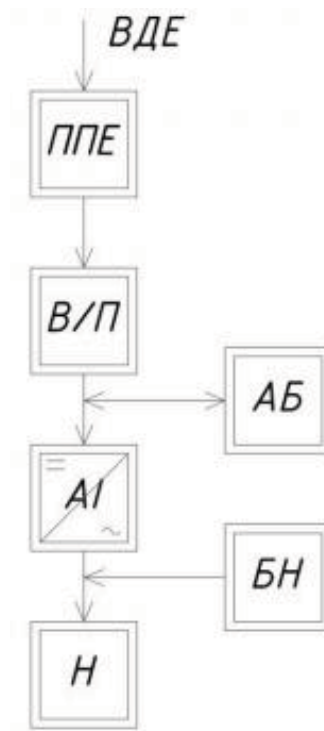


Рис. 1.1. Автономна система з ВДЕ

Джерелом живлення наведеної схеми виступають акумуляторні батареї. Вони взаємодіють з інвертором, в якому потужність накопичувача підібрана під максимальне навантаження споживачів.

Завдяки позитивному енергетичному балансу накопичувача можна визначити середнє навантаження на певному часовому проміжку. Це відбувається коли енергія з відновлюваних джерел, накопичена в акумуляторах, перевищує енергію віддану споживачам з урахуванням ККД та раціональних режимів устаткування.

Додатково в схемі передбачене баластне навантаження для прийому надлишків електроенергії, які не накопичуються в акумуляторах і не споживаються в поточний момент [6].

1.2 Аналітичний огляд гібридних систем постачання енергії

Сучасні дослідження доводять, що використання гібридних систем електропостачання на базі відновлюваних джерел є економічно вигідним

рішенням не лише для електрифікації сільської місцевості, а й для інших регіонів з віддаленою, ненадійною або дорогою мережею централізованого електропостачання. Такі системи також актуальні для великих міст, особливо на тлі зростання цін на газ та інші джерела опалення. Прикладом можуть слугувати Berlin та інші європейські міста, мешканці яких із 2000-х років активно встановлюють фотоелектричні установки для власних потреб.

При спорудженні фотоенергетичних систем, як правило, використовується конфігурація із приєднанням різних джерел на стороні постійного струму. Втім, з появою надійних та порівняно дешевих моделей мережевих інверторів на базі мікропроцесорів та мікроконтролерів, дедалі частіше застосовується з'єднання джерел енергії змінного струму. Така схема забезпечує вищу гнучкість та ефективність використання енергії від різних джерел за рахунок зниження втрат у системі.

Окрім цього, сучасні технології дозволяють інтегрувати фотоелектричні системи безпосередньо в будівлі та споруди. Наприклад, гнучкі сонячні панелі можуть стати частиною даху або фасаду. Такі рішення спрощують монтаж та здешевлюють системи. Перспективним є і застосування перовськітних сонячних елементів, що відзначаються високою ефективністю перетворення сонячного випромінювання.

На даний час у світі відбуваються зміни у енергетичній політиці багатьох держав. Зокрема, спостерігається перехід від застарілої моделі енергетичного сектора з не досить ефективними мережами, великими виробниками та викопним паливом до нової, більш конкурентоспроможної моделі з вирівнюванням можливостей для розвитку та зменшення домінування окремих видів виробництва енергії чи шляхів постачання.

Відповідно до цих змін, надається перевага використанню енергії з відновлюваних та альтернативних джерел для підвищення енергоефективності. Так, європейські країни активно розвивають вітроенергетику та сонячну енергетику, збільшуючи частку "зеленої" енергії

у загальному енергобалансі. Крім цього, набувають поширення розосереджені системи мікрогенерації на основі поновлюваних джерел, що дозволяє зменшити навантаження на мережі та підвищити надійність енергопостачання.

Отже, світова енергетика рухається у напрямку децентралізації, екологічності та ефективності, а відновлювані джерела відіграватимуть все більшу роль у забезпеченні енергетичних потреб людства.

Резервне електропостачання набуває особливої актуальності на тлі зношеності загальних електромереж, адже перерви в електропостачанні, навіть короточасні, можуть призвести до значних збитків. Варто зазначити, що параметри якості електроенергії, яку виробляють автономні електрогенератори, часто перебувають на рівні або навіть вище за якість електроенергії в централізованих мережах. Це доволі важливо для об'єктів, оснащених обладнанням чутливим до якості електроживлення.

Використання відновлюваних джерел енергії в електрифікації об'єктів залежить від низки чинників, серед яких: потреба об'єкта в енергії та потужності, енергетичний потенціал ВДЕ, його зміна в часі. Зважаючи на ці та інші фактори, обирається структура й склад автономної системи електроживлення об'єкта.

Наприклад, для невеликих споживачів доцільно використовувати сонячні батареї разом з акумуляторами, тоді як для промислових об'єктів часто поєднують традиційні та відновлювані джерела в гібридних системах для забезпечення безперебійного живлення. Отже, правильно підібрані рішення на основі відновлюваної енергетики можуть забезпечити високу надійність електропостачання автономних об'єктів

За конструкцією електроустановки автономних систем можуть базуватися на сонячних або вітрових електростанціях, а також на комбінованому (гібридному) використанні дизельної генерації з установками відновлюваної енергетики. За умови спільного застосування дизельна

генерація виконує функції резервного джерела живлення або працює разом з електроустановками на базі відновлюваних джерел енергії (ВДЕ).

Варто зазначити, що забезпечення безперервного електропостачання потужних споживачів лише за рахунок ВДЕ є неможливим, оскільки сезонні зміни графіків споживання електроенергії не відповідають добовим змінам потенціалу випромінювання сонця та вітру. Поєднання нестабільного, але відновлюваного джерела електроенергії (ВДЕ) зі стабільним дає змогу створити універсальні електричні системи, здатні надійно жити різноманітні децентралізовані об'єкти, а також мати високі техніко-економічні показники. Узагальнену схему гібридної системи зображено на рисунку 1.2.

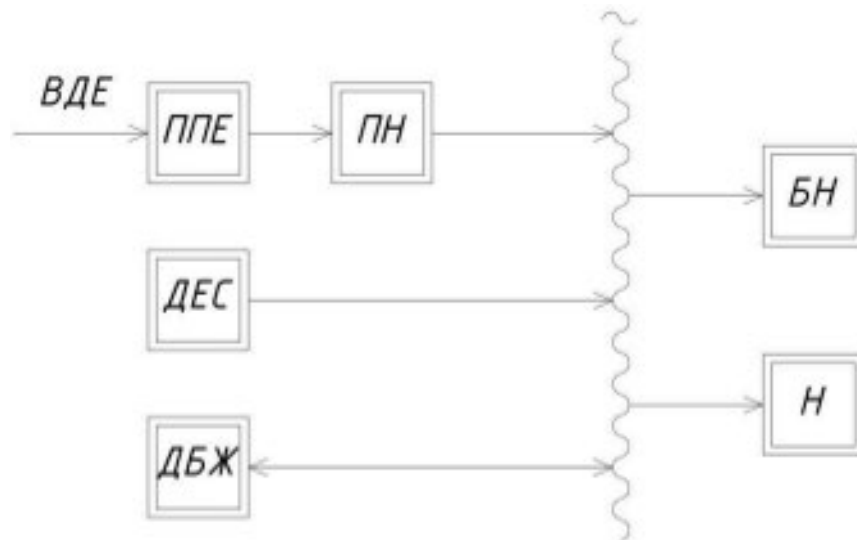


Рис. 1.2. Гібридна система з дизельною електростанцією

Отже, оптимальне поєднання традиційної та відновлюваної енергетики в гібридних системах дозволяє максимально ефективно використовувати переваги кожної технології для забезпечення надійного та економічного електропостачання автономних об'єктів.

За умови високого потенціалу ВДЕ, дизельний генератор вимикається. Коливання генерації та споживання електроенергії від ВДЕ згладжуються

завдяки накопиченню енергії в акумуляторах ДБЖ. Це в свою чергу дозволяє істотно зменшити кількість увімкнень дизельної електростанції (ДЕС).

У випадку роздільної роботи потужність електроустановки відновлюваного джерела енергії повинна бути достатньою. Через те, що миттєва потужність СЕС або ВЕС може перевищувати номінальне навантаження, необхідне використання баластного навантаження для утилізації надлишкової електроенергії.

Раціональне поєднання складових гібридної системи та управління їх роботою дає змогу оптимізувати генерацію, накопичення та розподіл електроенергії для безперебійного живлення споживача при мінімальних витратах на паливо традиційної генерації.

В загальному балансі згаданої вище системи електропостачання частина електроенергії, яка вироблена з ВДЕ, повинна складати не менше 50%, оскільки за менших значень потужності установок ВДЕ збільшується навантаження на ДЕС. Зниження цього показника призводить до збільшення тривалості процесу генерації перетворювача первинного енергоресурсу, що свідчить про недостатню генерацію енергії з ВДЕ та вказує на доцільність паралельної роботи поновлюваної та паливної складових системи живлення.

Втім, реалізація такого режиму ускладнюється необхідністю розширення алгоритму керування енергосистемою за рахунок додаткових компонентів - пристрою синхронізації і інвертора, здатного функціонувати автономно і паралельно з мережею. Структуру даного комплексу зображено на рисунку 1.3.

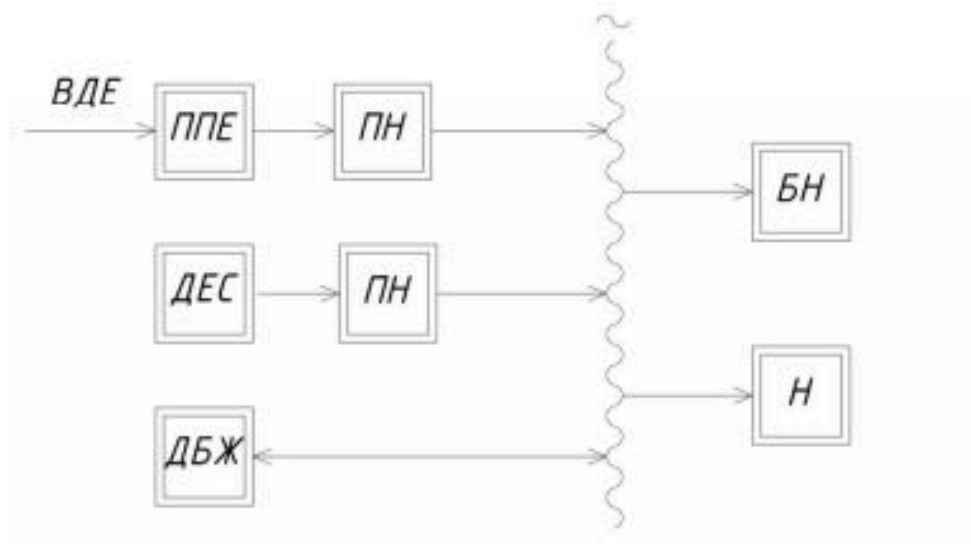


Рис. 1.3. Гібридна система з інверторною ДЕС

Для реалізації ефективного паралельного режиму гібридної системи потрібне вдосконалення алгоритмів керування з урахуванням особливостей роботи як традиційної, так і відновлюваної генерації. Це дозволить оптимізувати виробництво та розподіл електроенергії в системі.

В цих системах в якості перетворювача напруги (ПН) виступають випрямно-інверторні перетворювачі частоти. Подібні перетворювачі є складовою вітрових електростанцій. Ця особливість, а також генерація електроенергії фотоелектричними модулями у вигляді постійного струму, дають змогу об'єднати джерела енергії гібридної системи, як зображено на рисунку 1.4.

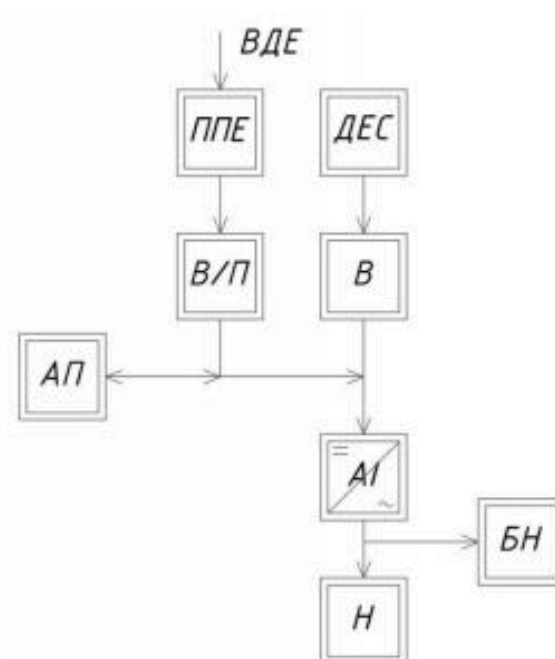


Рис. 1.4. Гібридна енергетична система з ланкою постійного струму

Таке рішення дозволяє спростити структуру системи та алгоритми керування нею за рахунок відсутності необхідності синхронізувати різні джерела між собою. Крім того, перетворення енергії у постійному струмі є більш ефективним, ніж у змінному. Отже, об'єднання генерації гібридної системи на рівні постійного струму дозволяє спростити її реалізацію та підвищити загальну ефективність.

Використання ланки змінного струму має переваги в побудові систем з розподіленою генерацією, зокрема при інтеграції установок відновлюваних джерел енергії в наявні системи електропостачання. Розглянемо гібридну енергосистему із постійно працюючою дизельною електростанцією, яка складається з дизельної станції та установок відновлюваної енергії. Ці установки спільно живлять електромережу, утворену дизельною станцією. У даному випадку дизельна станція є головним джерелом електричної енергії, а установки відновлюваних джерел слугують для економії суттєвої частини палива.

Інтеграція відновлюваних джерел енергії в існуючі системи електропостачання є важливим напрямком розвитку стійкої енергетики. Вона

дозволяє підвищити частку "зеленої" енергії в загальному енергобалансі та знизити викиди парникових газів. При цьому важливо враховувати особливості роботи як традиційних, так і відновлюваних джерел енергії.

Наприклад, сонячні та вітрові електростанції мають непостійний характер генерації, тоді як традиційні джерела, такі як дизельні станції, можуть забезпечувати базове навантаження. Тому поєднання цих джерел в рамках єдиної системи дозволяє взаємно компенсувати їх недоліки та отримати синергетичний ефект.

Умови надійності та стійкості системи електропостачання визначаються співвідношенням потужностей дизельної електростанції та мережних інверторів вітрових чи сонячних електростанцій. Це співвідношення має бути таким, щоб миттєва потужність від відновлюваних джерел не перевищувала 40-50% від потужності дизельної станції, як показано на рисунку 1.5.

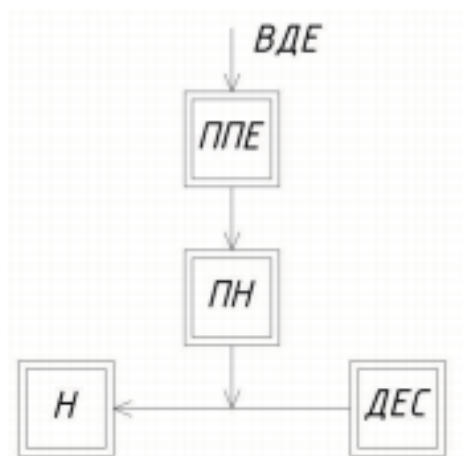


Рис. 1.5. Гібридна система з ДЕС

Перевагами подібних систем є їх простота, яка впливає на зниження початкових капіталовкладень, а також зменшення витрат на обслуговування обладнання.

Проте, основним недоліком подібних систем є незначний обсяг заміщення генерації дизельного палива відновлюваними джерелами. Це обмежує економічний та екологічний ефект від їх впровадження.

Для підвищення частки "зеленої" енергії можна розглянути варіанти збільшення потужностей відновлюваних джерел або використання систем накопичення енергії. Наприклад, установка батарей дозволить акумулювати надлишки енергії від сонця чи вітру та використовувати їх для живлення навантаження у періоди спаду виробітку. Такі гібридні системи дозволяють суттєво підвищити загальну ефективність.

1.3 Особливості систем автоматичного керування автономних систем енергопостачання

1.3.1 Фотоелектрична ефективність систем та відстеження точки максимальної потужності. Оскільки сонячні панелі перетворюють енергію світла на електрику, вони можуть здаватися гарним джерелом електроенергії. Проте їхня ефективність перетворення не надто висока. Здатність панелей перетворювати сонячне світло в електроенергію порівняно недосконала - коефіцієнт корисної дії зазвичай становить 12-20%.

Цей показник може знижуватися ще більше залежно від інтенсивності сонячного випромінювання, температури панелей та умов експлуатації. Отже, аби забезпечити необхідну потужність для споживачів, під'єднаних безпосередньо до фотоелектричної системи, зазвичай потрібні великі та дорогі сонячні станції.

Важливо максимізувати віддачу від сонячних панелей, використовуючи спеціальні схеми відповідності навантаження. З їх допомогою можна підтримувати роботу панелей у точці максимальної потужності або максимально наближеній до неї. Це дає приріст генерації енергії порівняно з безпосереднім під'єднанням споживачів. Адже струм і потужність, яку виробляє фотоелектрична система, залежать від напруги.

Доступна вихідна потужність сонячних панелей змінюється залежно від температури довкілля та інтенсивності сонячного випромінювання.

Внаслідок цього оптимальна робоча точка для переважної більшості двигунів і насосів постійного струму часто відрізняється від точки максимальної потужності самої фотоелектричної системи. Складно точно відслідковувати цю точку через нелінійний характер вольт-амперної характеристики сонячних панелей.

Загальну вартість системи можна зменшити та підвищити її ефективність, гарантуючи роботу панелей у режимі найбільшої віддачі енергії протягом світлого часу. Це означає підтримувати оптимальні умови, за яких панелі виробляють найбільше електрики. Адже узгодження імпедансів у сонячній електростанції, що складається з джерела з великим внутрішнім опором, дає приріст потужності.

Для максимізації віддачі від сонячних панелей використовують електронні системи відстеження точки максимальної потужності (MPPT). Типова схема MPPT містить DC-DC перетворювач між фотоелектричними модулями та навантаженням. Коефіцієнт заповнення імпульсів цього перетворювача регулює спеціальний алгоритм управління для підтримки роботи в режимі максимальної потужності.

Багато дослідників працювали над удосконаленням силових перетворювачів і методів керування ними для відстеження точки максимальної потужності сонячних панелей. Існує ціла низка підходів, але жоден з них не має абсолютних переваг за всіма показниками.

В останні роки запропоновано чимало різних алгоритмів та методів автоматичного визначення і підтримки режиму максимальної потужності сонячних панелей.

Ці підходи відрізняються за складністю реалізації, вартістю, ефективністю, швидкістю та іншими характеристиками. У деяких оглядах порівнювали щонайменше 19 різних методів, аналізуючи їхні переваги та недоліки. Результати узагальнено у вигляді таблиць для полегшення вибору

оптимального алгоритму MPPT залежно від потреб конкретної фотоелектричної системи.

Такі огляди допомагають проектувальникам обрати найкраще рішення для їхніх задач з огляду на складність реалізації, вартість, швидкодію та інші важливі фактори.

Існує кілька основних методів відстеження точки максимальної потужності сонячних панелей:

1. За додатковою провідністю (IncCond)
2. За складовими струму короткого замикання
3. За величиною напруги холостого ходу
4. За максимізацією добутку напруги і струму
5. За кореляцією пульсацій
6. Метод сходження або збурення спостерігача (P&O)
7. З використанням нейронних мереж
8. З використанням нечіткої логіки

На практиці найпоширенішим є метод P&O завдяки простоті реалізації та низькій вартості. Водночас він не досить ефективний за швидкої зміни погодних умов, а також коливається біля точки максимальної потужності за сталих умов. Тому актуальним залишається удосконалення MPPT алгоритмів.

Існує чимало модифікацій базового алгоритму P&O для поліпшення його роботи. Наприклад, у методі збільшення коефіцієнта провідності порівнюється поточна і попередня провідність для зменшення коливань. Однак це ускладнює систему керування і збільшує її вартість.

Методи за складовою струму короткого замикання та складовою напруги холостого ходу прості, але мають спільні недоліки. Зокрема, похибки через лінеаризацію та втрати енергії внаслідок періодичного короткочасного замикання або від'єднання сонячних панелей.

Отже, не існує ідеального універсального методу MPPT. Вибір алгоритму завжди є компромісом між точністю, складністю, вартістю та іншими факторами. Подальші дослідження в цій сфері дозволять удосконалити існуючі підходи.

Типова автономна система з відстеженням MPP складається з:

- фотоелектричних модулів
- навантаження
- понижувального перетворювача постійного струму, що з'єднує PV-панелі та навантаження

Така система (див. Рис. 1.6) буде використана для перевірки методів MPPT з 2-ма типами навантажень:

1. Модифікований метод збурень та спостережень (MP&O)
2. Нечітка логіка на базі MPPT для PV-насосної системи
3. Нейронна мережа на базі MPPT для PV-насосної системи

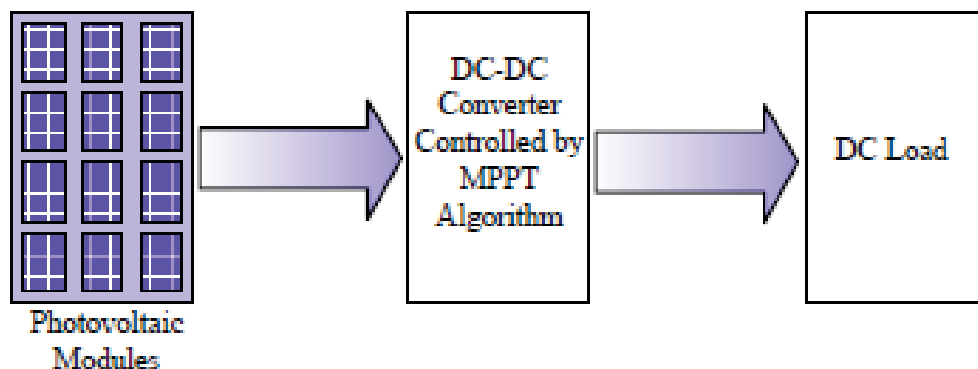


Рис. 1.6. Структурна схема системи MPPT-PV

Це дасть змогу порівняти ефективність різних підходів та обрати оптимальний алгоритм для конкретного застосування.

1.3.2. Відстеження точки максимальної потужності (MPPT).

Управління фотоелектричною системою з високою ефективністю дуже важливе. Треба забезпечити роботу в точці макс. потужності незалежно від навантаження та погодних умов. Інакше кажучи, потрібно максимізувати

передачу потужності на навантаження шляхом узгодження вихідного опору з опором навантаження.

Для цього пропонується система MPPT, здатна відстежувати точку максимальної потужності сонячних панелей та коливання цієї точки через зміну погодних умов. Вона складається з двох частин (див. Рис. 1.7):

1. Перетворювач постійного струму
2. Алгоритм керування MPPT

Це дає змогу максимізувати передачу потужності від фотоелектричного масиву до навантаження. Таким чином система MPPT є ключовим компонентом ефективності будь-якої PV-установки.

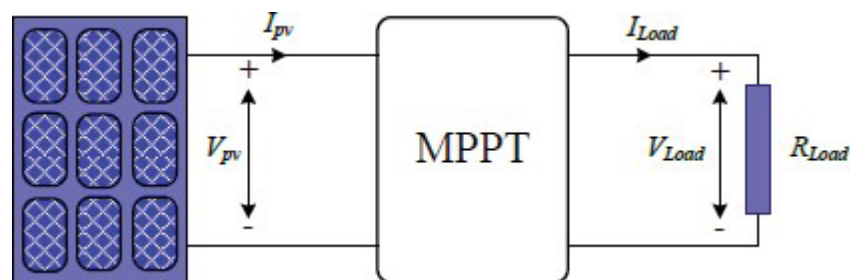


Рис. 1.7. Перетворювач з функцією відстеження максимуму потужності

Максимальна потужність, яку можуть віддати сонячні панелі, залежить від погодних умов та не збігається зі значенням опору навантаження. Для ефективного використання доступної сонячної енергії дуже важливо підтримувати роботу системи в точці максимальної потужності або близько до неї.

Основне завдання MPPT - узгодити опір панелей та навантаження шляхом регулювання ККД перетворювача. Оскільки положення MPP на вольт-амперній кривій змінюється непередбачувано через зміну температури та освітленості, його не можна визначити заздалегідь. Тому потрібен алгоритм MPPT, який би відстежував цю точку в реальному часі для максимального використання енергії

Ви правильно вказали, що існує декілька методів відстеження точки максимальної потужності сонячних панелей. Вони відрізняються за простотою реалізації, вимогами до датчиків, вартістю, ефективністю, швидкодією та апаратною складністю.

Деякі алгоритми MPPT ефективніші за інших в однакових умовах. У ряді оглядів проводився порівняльний аналіз і кількісна оцінка продуктивності різних методів.

Важливо оцінювати динамічну реакцію, точність відстеження та сталу похибку при аналізі нових чи вдосконалених алгоритмів MPPT. Це дозволить обрати оптимальне рішення для конкретних задач та умов експлуатації.

До ключових показників ефективності алгоритмів MPPT належать:

1. Динамічна реакція - швидкість відстеження максимальної точки потужності (MPP) при зміні умов. Чим швидше - тим менші втрати енергії.
2. Точність відстеження - здатність алгоритму утримувати систему на MPP після її досягнення. Але на практиці складно підтримувати оптимальний режим через коливання погодних умов та особливості роботи самих алгоритмів.

Тому компроміс між швидкістю і точністю, а також адаптація до змін - це ключові чинники при розробці ефективних методів MPPT для реальних систем.

Ефективність відстеження є важливим показником для оцінки здатності алгоритму MPPT максимізувати вихідну потужність сонячної системи. Вона визначається як відношення фактичної потужності до теоретично можливої за тих самих умов.

Оскільки атмосферні умови постійно змінюються, кожен MPPT алгоритм має тестуватися і порівнюватися з іншими в широкому діапазоні умов - різної інтенсивності освітлення і температур.

Ефективний метод керування повинен демонструвати стійко високі показники за будь-яких умов. Лише тоді можна з упевненістю рекомендувати його для реального застосування.

Вираз (1.1) може використовувється для визначення ефективності відстеження:

$$\eta_{\text{MPPT}} = \frac{1}{n} \sum_i^n \frac{P_{\text{actual},i}}{P_{\text{max},i}}, \quad (1.1)$$

1.4 Класифікація алгоритмів визначення точки максимуму потужності (MPPT)

Протягом останніх років запропоновано кілька алгоритмів для відстеження точки максимальної потужності (maximum power point tracking, MPPT) з метою оптимізації роботи фотоелектричних систем. Ці алгоритми оптимізації можна розділити на два основні типи: непрямі та прямі методи керування.

Непрямі методи ґрунтуються на обчисленні оптимальної робочої точки на основі вимірювань параметрів системи, таких як напруга, струм, інсоляція тощо. Крім цього, використовують математичні моделі та емпіричні дані для знаходження оптимального режиму. Основним недоліком такого підходу є складність адаптації алгоритму до зміни умов навколишнього середовища та режимів роботи системи.

На відміну від непрямих, прямі методи керування базуються на безпосередньому відстеженні точки максимальної потужності. Це досягається шляхом модуляції параметрів системи та аналізу її відгуку з метою знаходження оптимального режиму. Такі методи є більш гнучкими та швидко адаптуються до зміни умов функціонування.

Серед методів непрямого керування пошуком точки максимальної потужності можна виділити такі: методику пошуку за таблицями, метод постійної напруги, метод дробової напруги контуру та метод дробового струму короткого замикання. Проте прямі методи відстеження мають перевагу можливості адаптації до змінних атмосферних умов, оскільки функціонують безпосередньо на основі даних про поточний стан системи, без використання попередньо розрахованих чи змодельованих характеристик. До прямих методів відносять техніку збурень та спостережень, метод нарощування провідності, а також методи штучного інтелекту, зокрема нечіткої логіки та нейронних мереж.

Процес пошуку оптимального режиму роботи в цих методах базується на одній чи двох змінних, що характеризують поточний стан системи. Наприклад, метод дробової напруги оперує лише напругою фотоелектричного масиву, а метод дробового струму - лише струмом. Натомість методи збурень і спостережень та нарощування провідності потребують аналізу як напруги, так і струму.

1.4.1. Метод узгодження електричного навантаження на фотопанелях. Одним з найпростіших підходів до забезпечення роботи фотоелектричної системи поблизу точки максимальної потужності є метод узгодження навантаження на панелі. Він базується на визначенні оптимального режиму для типових умов експлуатації або розрахунково. Після цього підбирається навантаження, яке забезпечує отримання потрібних значень напруги та струму.

Ще один поширений простий підхід полягає у виборі середньої напруги акумулятора, близької до типової напруги максимальної потужності для даного типу сонячних панелей. Такий метод часто застосовується в системах зарядки акумуляторів і має переваги простоти реалізації, мінімальних втрат енергії та надійності.

Основним недоліком розглянутих способів є відсутність адаптації до змін інсоляції чи температури навколишнього середовища. Тому за певних умов система може виходити з оптимального режиму роботи. Для покращення ефективності використання сонячної енергії в таких випадках доцільно застосовувати більш "розумні" алгоритми МРРТ.

1.4.2. Метод перемикавання електричного навантаження. Метод перемикавання електричного навантаження було запропоновано Х. Йонджі та Л. Дехенгом у 1993 році як спосіб оптимізації вихідної потужності фотоелектричних панелей. Він базується на використанні контролера для реконфігурації з'єднання окремих панелей та груп акумуляторів. Завдяки перемикавню досягається узгодження навантаження з поточною точкою максимальної потужності.

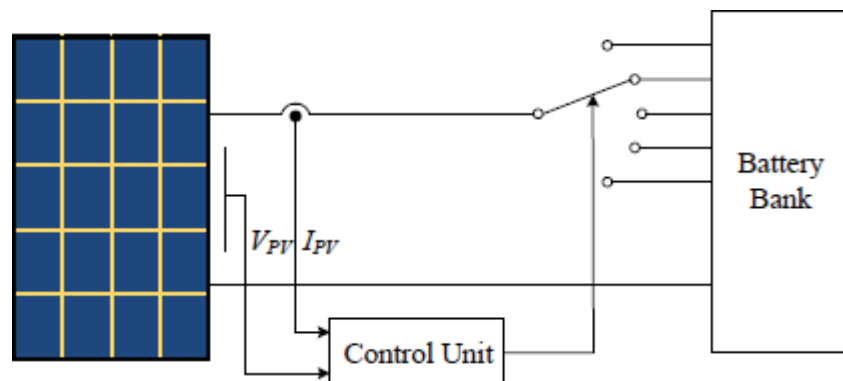


Рис.1.8. Ілюстрація до методу перемикавання навантаження

Однак метод має певні недоліки. По-перше, потрібні додаткові комутаційні пристрої та проводка. По-друге, схема не забезпечує точного відстеження оптимальної точки через ступінчасту зміну напруги. Крім того, складно підтримувати однаковий рівень заряду усіх акумуляторів, що знижує їх строк служби.

Для усунення зазначених недоліків актуальним є розробка методів МРРТ, які б з одного боку забезпечували ефективне відстеження точки максимальної потужності, а з іншого - мали просту реалізацію та не

потребували складних і дорогих схем комутації. Інтеграція MPPT-контролерів безпосередньо в сонячні панелі є одним з перспективних напрямків у цій сфері

1.4.3. Метод постійної напруги. У випадку побудови фотоелектричної системи без акумуляторів можливе застосування спрощеного методу відстеження точки максимальної потужності на основі регулювання за принципом постійної напруги. Суть його полягає у порівнянні поточного значення напруги з заданим опорним рівнем, що відповідає характерному V_{mpp} для даного типу сонячних панелей. На основі різниці цих сигналів формується керуючий вплив на DC-DC-перетворювач з метою підтримання робочої точки системи поблизу оптимального режиму.

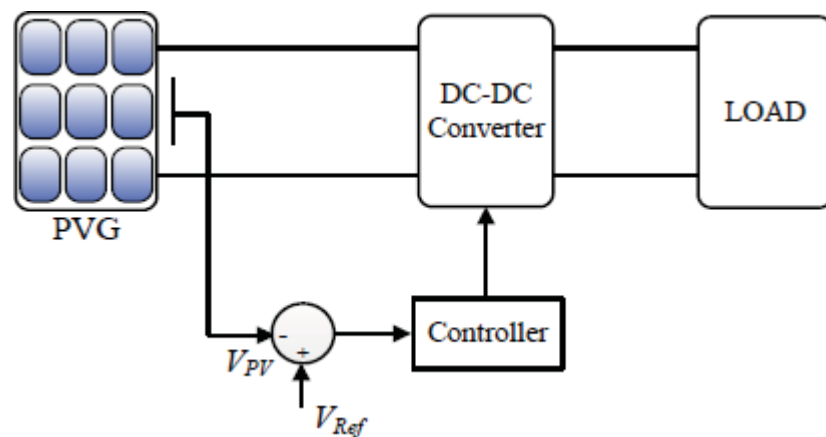


Рис. 1.9. Метод зворотного зв'язку за напругою

Перевагами методу є простота реалізації та невисока вартість. Однак він не враховує зміну умов навколишнього середовища, таких як інсоляція чи температура, що призводить до відхилення від максимальної потужності за певних режимів. Тому актуальною задачею є розробка MPPT-алгоритмів, здатних адаптуватися до динамічної зміни параметрів системи та зовнішніх умов.

1.4.4. Алгоритм збурень і спостережень (P&O). Найпоширенішим алгоритмом відстеження точки максимальної потужності є метод збурень і

спостережень (P&O). В основі його роботи лежить аналіз зміни вихідної потужності сонячних панелей у відповідь на цілеспрямовані “збурення”, тобто зміну напруги чи струму. За напрямком зміни потужності робиться висновок щодо необхідності подальшого збільшення чи зменшення керованого параметра.

Існують два основні способи реалізації P&O: шляхом регулювання опорної напруги за допомогою ПІ-регулятора або безпосереднім вимірюванням потужності за кожним циклом ШІМ. Перевагами є простота та відсутність потреби в інформації про характеристики системи.

Проте метод має суттєвий недолік – він продовжує коливатися навколо точки максимуму після її досягнення, що призводить до додаткових втрат енергії. Для усунення цієї проблеми актуальним завданням є розробка модифікацій P&O з механізмами стабілізації при досягненні оптимального режиму.

1.4.5. Комбінація методу P&O з CV. Традиційний алгоритм P&O демонструє низьку ефективність за умов низької інсоляції. Для вирішення цієї проблеми було запропоновано комбінований підхід, що поєднує метод постійної напруги (CV) та модифікований алгоритм P&O.

Він полягає в наступному: спочатку за допомогою регулювання робочого циклу напруга на панелях підвищується до рівня 76% від напруги холостого ходу. Це значення є близьким до реальної точки максимальної потужності і береться за початкову точку. Далі алгоритм оцінює вихідний струм - якщо він менше 0,7 А, то застосовується метод CV, а якщо більше - то перехід до модифікованого P&O.

Такий підхід дозволяє підвищити ефективність MPPT за низької освітленості шляхом адаптивного перемикавання методів в залежності від поточних умов.

1.4.6. Модифікований алгоритм dP - P&O. Звичайний алгоритм P&O має певні недоліки, зокрема: коливання навколо точки максимуму в

усталеному режимі, невисоку швидкість відстеження, а також проблеми зі стрибкоподібними змінами інсоляції. Для вирішення цих питань було запропоновано модифікований метод dP-P&O.

Відмінністю цього підходу є наявність додаткового блоку вимірювання потужності всередині періоду регулювання, але без внесення завідомих збурень в систему. Отримане таким чином значення дає інформацію про поточну тенденцію зміни вихідної потужності, що дозволяє ефективніше відслідковувати точку максимуму.

Завдяки даній модифікації вдалося частково компенсувати перелічені вище недоліки класичного алгоритму P&O.

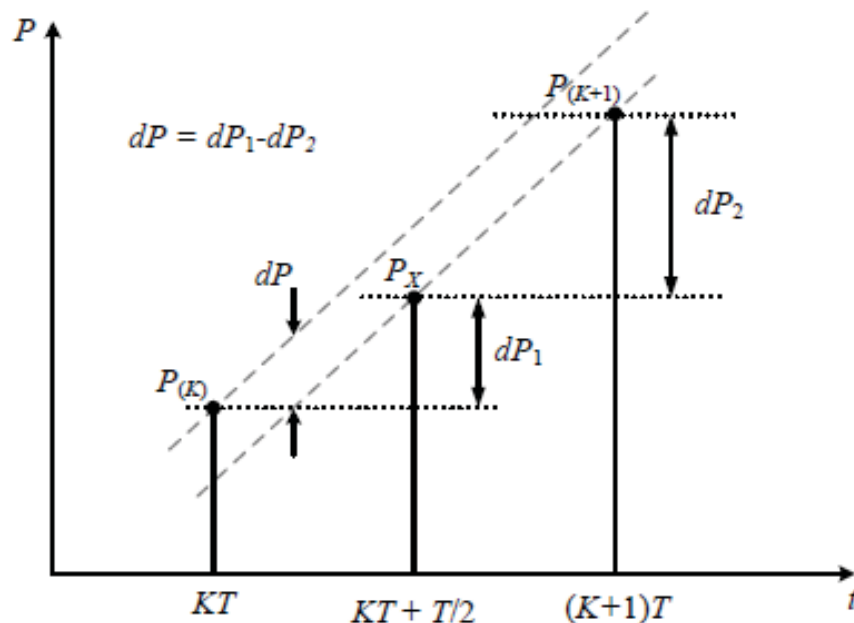


Рис. 1.10 – Вимірювання ел. потужності між 2-ма екземплярами вибірки MPPT

$$\begin{aligned}
 dP &= dP_1 - dP_2 = (P_X - P_K) - (P_{K+1} - P_X) \\
 &= 2P_X - P_{K+1} - P_K
 \end{aligned}
 \tag{1.2}$$

На рис. 1.10:

P_{K+1} – це вимірювання ел. потужності в момент часу відбору проб $(K + 1)$;

P_K – це вимірювання ел. потужності в момент часу відбору проб K ;

dP_1, dP_2 – зміна потужності, яка обумовлена збуренням МРРТ та через збільшення інтенсивності опромінення відповідно.

Зміна стану навколишнього середовища (інсоляції) відображається на зміні вихідної потужності системи між двома сусідніми вимірами. При цьому різниця потужностей ΔP_1 враховує як вплив зовнішніх факторів, так і результат дії алгоритму МРРТ. Використовуючи припущення про лінійну зміну інсоляції в межах періоду відліку, вдалося виділити складову ΔP , обумовлену саме керуванням (1.2).

Ефективність методу dP-P&O підтверджено експериментально у порівнянні зі звичайним P&O. Зокрема, він демонструє здатність правильно відстежувати напрямок до точки максимуму за умови швидкої зміни освітленості, на відміну від класичного підходу. Крім того, швидкість МРРТ також є вищою

1.4.7. Оптимізований метод P&O. Класичний алгоритм P&O з фіксованим кроком регулювання має суттєвий недолік - коливання навколо точки максимальної потужності в усталеному режимі. Це призводить до додаткових втрат частини енергії, доступної для вироблення.

Для вирішення цієї проблеми було запропоновано модифікований метод OP&O, який полягає в оптимізації параметрів алгоритму P&O з урахуванням динамічних властивостей конкретної системи (тип перетворювача і характеристики сонячних панелей). Це дозволяє підвищити загальну ефективність системи та зменшити непродуктивні витрати енергії за рахунок зниження амплітуди коливань в оптимальній робочій точці.

1.4.8. Модифікований алгоритм збурень і спостережень. Метод MOR&O було розроблено для зменшення небажаних коливань навколо точки

максимальної потужності, властивих звичайному алгоритму P&O. Він базується на вимірюванні зміни вихідної потужності, викликані варіаціями зовнішньої освітленості, на кожному кроці регулювання.

Це дозволяє точніше оцінити частку зміни потужності, обумовлену саме дією алгоритму MPPT. Відповідно коригування робочої точки відбувається більш "плавно", без різких коливань. Перевага методу MOR&O у порівнянні з класичним P&O підтверджена моделюванням та практичними випробуваннями - ефективність вища.

Висновки до розділу

1. Проведено огляд систем автономного енергозабезпечення, зокрема фотоелектричних систем. Представлено їх класифікацію залежно від методу підключення до електромережі. Також здійснено аналіз переваг і недоліків таких систем енергопостачання.

2. Проведено аналітичний огляд ефективності фотоелектричних панелей, а також розглянуто методи відстеження максимальної потужності енергосистеми. Надано класифікацію алгоритмів управління.

3. Встановлено, що однією з ключових властивостей фотоелектричних систем є їх здатність конвертувати сонячне випромінювання в електричну енергію. За останні роки цей процес став дедалі більш ефективним завдяки технологічному прогресу в галузі сонячної енергетики.

4. Проведені дослідження показали, що гібридні системи енергозабезпечення поєднують різні джерела енергії, такі як сонячні панелі, вітряки і електромережі, для забезпечення стабільного і неперервного живлення. Це може бути особливо важливо в регіонах з непостійним доступом до електроенергії.

5. Використання ефективних алгоритмів МРРТ є важливим для підвищення продуктивності та економічності фотоелектричних систем. Подальші дослідження в цій сфері спрямовані як на розробку нових підходів, так і на вдосконалення існуючих методів з метою досягнення максимального вилучення енергії за будь-яких умов функціонування.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОНОМНИХ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ НАСОСНИХ СТАНЦІЙ

Виробництво електроенергії за допомогою сонячних батарей є одним з відновлюваних джерел енергії, яке має певні переваги для систем водопостачання. Зокрема, сонячні батареї відзначаються відносною простотою та низькими інфраструктурними потребами. Їх можна використовувати безпосередньо на місці споживання води, а сама установка не потребує складного монтажу. На відміну від традиційних джерел енергії, які часто включають гучні турбіни, фотоелектричні системи працюють практично безшумно.

Ще однією важливою перевагою фотоелектричних систем є їхня надійність та стабільна робота протягом тривалого часу з мінімальним обслуговуванням. Звичайне очищення панелей від пилу та бруду є достатнім для підтримки ефективної роботи системи роками. А за умови відповідного проектування та врахування місцевих кліматичних особливостей, сонячні батареї здатні виробляти необхідний обсяг електроенергії навіть у хмарні дні.

Окремо варто відзначити екологічні переваги сонячної енергетики для систем водопостачання. Адже фотоелектричні системи дозволяють отримувати електрику без спалювання викопного палива чи інших шкідливих викидів, що особливо важливо для населених пунктів і не забруднює довкілля.

2.1 Опис автономної фотоелектричної системи та постановка задачі

Фотоелектричні системи можуть складатися з різних компонентів, таких як сонячні панелі, контролери заряду, інвертори, акумулятори та інше додаткове обладнання. Їх компонування залежить від конкретних потреб та умов застосування.

Одним з ключових елементів є сонячна батарея або фотоелектричний модуль, який перетворює сонячне випромінювання на постійний електричний струм. Сучасні фотомодулі виготовляють на основі монокристалічного, полікристалічного або тонкоплівкового кремнію з ККД до 20-22%.

Для живлення змінного струму використовують інвертори, котрі перетворюють постійний струм фотомодулів на змінний. Існують однофазні та трифазні мережеві інвертори потужністю від декількох сотень Ват до десятків кіловат.

Контролери заряду регулюють процес заряджання і розряджання акумуляторів, запобігаючи їх перезарядці та перерозрядці. Сучасні контролери мають функції відстеження максимальної потужності та керування навантаженням.

Правильний вибір та налаштування всіх компонентів фотоелектричної системи є запорукою її надійної та ефективної роботи протягом тривалого часу.

При проектуванні автономних фотоелектричних систем водопостачання важливо правильно підібрати тип і потужність насосного обладнання відповідно до потреб і умов експлуатації.

Для невеликих систем приватних будинків чи фермерських господарств часто застосовують поверхневі відцентрові насоси невеликої потужності до 1-2 кВт. Вони характеризуються компактністю, низьким рівнем шуму і можливістю встановлення безпосередньо у водоймі.

Для систем водопостачання сіл, невеликих населених пунктів використовують більш потужні (до 10-20 кВт) відцентрові насоси, які встановлюються у свердловинах або водонапірних баштах. Вони здатні подавати тисячі літрів води на день.

Крім насосів, у складі таких систем обов'язково передбачають резервуари-накопичувачі для зберігання води, фільтри та системи очищення. Їх ємність розраховується з урахуванням добового водоспоживання та

автономності роботи в похмурі дні.

Грамотний вибір обладнання є важливою складовою проектування та будівництва надійних автономних фотоелектричних систем для задоволення потреб у водопостачанні.

Двигуни постійного струму, що використовуються в фотоелектричних насосних системах, можуть живитися як безпосередньо від сонячних панелей, так і від акумуляторних батарей.

При живленні напругу від фотопанелей, напруга і струм у ланцюзі будуть змінюватися протягом дня залежно від інтенсивності сонячного випромінювання. Це може викликати нерівномірну роботу насоса. Для стабілізації роботи використовують спеціальні контролери навантаження з MPPT-алгоритмами відстеження точки максимальної потужності.

При використанні акумуляторів, вони виступають буфером між сонячними панелями і насосом, забезпечуючи стабільне живлення незалежно від поточної генерації. Проте потрібно враховувати ємність і кількість циклів заряд-розряд акумуляторів при проектуванні системи.

Отже, вибір схеми електроживлення насосного обладнання залежить від вимог до стабільності подачі води та економічної доцільності при конкретних умовах використання фотоелектричної системи водопостачання.

Дійсно, використання двигунів постійного струму в автономних фотоелектричних насосних системах має певні переваги порівняно з двигунами змінного струму.

Однак останнім часом з'являються сучасні високоефективні синхронні двигуни постійних магнітів на змінному струмі, які за ефективністю не поступаються двигунам постійного струму. Вони компактні, надійні, прості в обслуговуванні.

Також активно розвиваються технології інверторів для фотоелектричних систем. З'являються недорогі і ефективні мікроінвертори, які можуть підключатися безпосередньо до окремих сонячних панелей. Це

спрощує монтаж і підвищує надійність системи.

Тому, при виборі типу двигунів і схем електроживлення для конкретної фотоелектричної насосної системи варто проводити порівняльний аналіз з урахуванням сучасного рівня технологій та економічної ефективності різних варіантів. Це дозволить оптимізувати технічні рішення і досягти максимальної продуктивності таких систем при мінімальній вартості життєвого циклу.

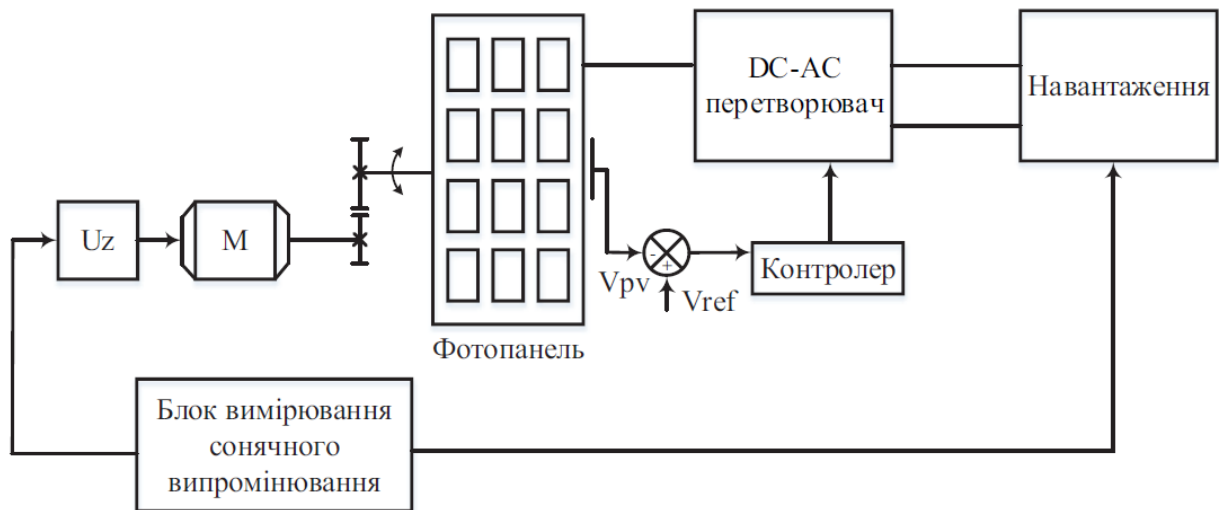


Рис. 2.1. Функціональна схема САК фотоелектричної станції

Для підвищення ефективності роботи та надійності подачі води в такій системі можуть додатково використовуватися накопичувальні ємності (резервуари), які дозволяють зберігати воду при надлишковій генерації електроенергії в сонячні дні. Це забезпечує автономну роботу системи при недостатній інсоляції.

Для підвищення ефективності використання площі сонячних панелей, може використовуватись система їх автоматичного позиціонування за сонцем у двох площинах (азимут та кут нахилу). Це збільшує виробіток електроенергії до 30-40% протягом дня.

Також до складу системи можуть входити зарядні контролери акумуляторних батарей, системи контролю параметрів та дистанційного керування, додаткове насосне обладнання тощо.

Отже, сучасні фотоелектричні насосні системи водопостачання можуть складатися з широкого спектру взаємопов'язаних підсистем і компонентів для забезпечення максимально надійної та ефективної подачі води споживачам.

Для підвищення ефективності управління в сучасних фотоелектричних станціях все частіше використовують інтелектуальні системи керування на базі мікроконтролерів або промислових логічних контролерів.

Такі системи здійснюють постійний моніторинг основних параметрів (потужності сонячних панелей, напруги і струму в ланцюгах постійного та змінного струму, витрати води тощо) і на основі попередньо заданих алгоритмів оптимізації видають керуючі сигнали на виконавчі механізми (контролери сонячних трекерів, інвертори, насосне обладнання).

Такий інтелектуальний підхід дозволяє підвищити загальну ефективність вироблення і споживання електроенергії фотоелектричною станцією, автоматизувати процеси управління та контролю.

При розробці такої станції велику увагу слід приділити вибору ефективних та надійних компонентів - сонячних панелей, інверторного обладнання, систем накопичення енергії. Важливо правильно підібрати їх потужність та характеристики під конкретні потреби у водо- чи електропостачанні з урахуванням кліматичних умов розташування станції.

Також в проекті мають бути реалізовані сучасні рішення в сфері автоматизації та дистанційного моніторингу для контролю параметрів, оптимізації режимів роботи, підвищення надійності та ефективного використання виробленої електроенергії.

Потенціал для вдосконалення існує також у галузі гібридних систем на основі фотоелектричних панелей з іншими джерелами енергії – вітрогенераторами, дизель-генераторами тощо.

2.2 Основні вимоги до електроприводу і САК насосної установки

Розглянувши технологічну установку, визначимо ключові вимоги до її електроприводу. Головним об'єктом автоматичного регулювання тут є насос - пристрій безперервної дії з постійним навантаженням. За принципом роботи насоси поділяють на декілька типів: лопатеві, що переміщують рідину за допомогою обертання робочого колеса, струминні, де використовується енергія потоку іншої речовини, та об'ємні насоси витискання - роторні чи поршневі.

У даній системі застосовано саме лопатевий відцентровий насос. Його підбір здійснено, виходячи з потрібних показників напору H та продуктивності Q , розрахованих для конкретної системи подачі рідини. Ці вихідні параметри визначаються на етапі проектування.

Щодо обраного насоса висунуто такі умови: продуктивність - не менше 36 м³/год, напір - до 59 м. Крім цього, важливо забезпечити надійну та ефективну роботу насоса протягом тривалого часу.

Для досягнення поставлених цілей електропривід має забезпечувати плавне регулювання швидкості та моменту на валу двигуна в широкому діапазоні відповідно до зміни навантаження. Це дозволить оптимізувати споживання електроенергії і знос компонентів привода та насоса.

Для виконання завдань керування роботою насоса електропривід має забезпечувати наступне:

- запуск та зупинку насосного агрегату;
- автоматичне регулювання частоти обертання вала електродвигуна з метою підтримання постійного тиску в споживчій мережі;
- аварійне вимикання за сигналом датчиків у разі виходу параметрів за допустимі межі;
- захист електродвигуна від нештатних режимів.

Динамічні характеристики системи мають задовольняти наступним

ВИМОГАМ:

- похибка регулювання у сталих режимах - до 3%;
- перерегулювання тиску при запуску - не більше 5%, що забезпечить надійну роботу обладнання та трубопроводів;
- перерегулювання тиску при зміні навантаження - не більше 10%.

Дотримання зазначених показників дозволить підвищити загальну ефективність та надійність функціонування насосної станції. Зокрема, буде зменшено механічне та гідравлічне навантаження на елементи системи.

При проектуванні автоматизованої системи керування (АСК) насосною станцією необхідно передбачити заходи з техніки безпеки відповідно до чинних в Україні норм, зокрема:

- "Санітарні норми проектування пром. підприємств" щодо умов праці персоналу;
- "Правила улаштування електроустановок" стосовно монтажу електрообладнання;
- "Пожежна автоматика будинків та споруд" в частині протипожежного захисту;
- вимоги ССБП до виробничого устаткування по забезпеченню загальної безпеки.

Крім того, всі струмоведучі елементи АСК мають бути захищені від випадкових дотиків, а доступ до рухомих частин насосів обмежений. Також слід передбачити захисне занулення електрообладнання.

Оскільки станція розташована поблизу житлової забудови, необхідно мінімізувати шумове забруднення. Крім того, має бути комплекс протипожежних заходів і засобів гасіння для запобігання надзвичайним ситуаціям.

Дотримання перелічених вимог дозволить забезпечити безпечну та надійну експлуатацію насосної станції.

Розміщення насосної станції має забезпечувати зручний доступ

персоналу для оперативного обслуговування та ремонту, як у штатному режимі, так і в аварійних ситуаціях.

Конструкція та розташування розподільних щитів і пультів керування повинні дозволяти легкий огляд та можливість швидкого доступу.

На устаткуванні мають бути передбачені маркування та позначення для прискорення монтажних і ремонтних робіт.

Також необхідно розробити та впровадити інструкцію з техніки безпеки при експлуатації насосів, в якій детально викласти вимоги з:

- монтажу обладнання;
- введення в експлуатацію та налагодження;
- технічного і сервісного обслуговування;
- під'єднання та від'єднання електроустаткування.

Дотримання даних рекомендацій сприятиме підвищенню оперативності та безпеки обслуговування і ремонту насосної станції.

Впровадження спроектованої автоматизованої насосної станції має забезпечити суттєвий економічний ефект, а саме:

- економію електричної енергії завдяки оптимізації режимів роботи на основі зворотного зв'язку;
- зменшення витрат перекачуваної рідини внаслідок точного підтримання заданих параметрів;
- скорочення кількості задіяного устаткування та спрощення технологічної схеми;
- застосування менш дорогих, але достатньо надійних та ефективних компонентів системи;
- невеликі строки окупності проекту.

Отже, автоматизація насосної станції з використанням сучасних технічних рішень є економічно доцільною та швидко окуповується. Це дозволяє підвищити ефективність роботи всієї системи подачі рідини.

2.3 Визначення параметрів електромеханічної системи насосної станції

Оскільки досліджувана система не прив'язана до конкретного джерела водопостачання і може використовуватися універсально, було вирішено порівняти її з вже наявною аналогічною автономною системою. Для порівняння обрано дизельну насосну станцію ДНУ-144/88, яка застосовується автономно і має схоже призначення. Ця станція має певні технічні характеристики, зокрема потужність двигуна, продуктивність, напір та інші показники, які наведені в наступній таблиці. Технічні характеристики цієї дизельної насосної станції наведено в табл. 2.1

Таблиця 2.1 – Технічні характеристики ДНУ – 144/188

№ з/П	Параметр	Значення
1	Частота обертання, об/хв	1500
2	Напір насосу, м	59,0
3	Макс. висота, м	8,2
4	Номінальна подача насосу, м ³ / год	36,0
5	Номінальна потужність, кВт	11,8

Використовуючи наведені вище параметри, проведемо визначення потужності двигуна.

Величина напору, що створюється насосом, визначається за виразом:

$$H = H_{ГВ} + H_{ГН} + h_{ВВ} + h_{ВН}, \quad (2.1)$$

де $H_{ГВ}$ – висота всмоктування, м в.ст.;

$H_{ГН}$ – висота нагнітання, м в.ст.;

$h_{ВВ}$ – втрати напору в трубі всмоктування, м в.ст.;

$h_{ВН}$ – втрати напору в трубі нагнітання, м в.ст.;

Корисна потужність насоса визначається за виразом:

$$N_k = Q \cdot p, \quad (2.2)$$

де Q – величина подачі подача $\text{м}^3/\text{с}$;

p – величина напору, Па.

Якщо для вимірювання подачі використовувати одиницю $[\text{м}^3/\text{год}]$ а для напору – $[\text{м}]$, то потужність насосу буде дорівнювати

$$N_k = 0.0027 \cdot Q \cdot H = 0,0027 \cdot 36 \cdot 59 = 5.7348 \text{ (кВт)}. \quad (2.3)$$

Потужність, що споживається насосом від двигуна визначається наступним чином:

$$N = \frac{N_k}{\eta_H} \quad (2.4)$$

До складу загального коефіцієнта корисної дії насоса входять механічні, об'ємні та гідравлічні втрати потужності.

Механічні втрати зумовлені тертям в підшипниках та ущільненнях. Гідравлічні втрати виникають через подолання опору потоку рідини при її русі каналами насоса. Об'ємні втрати пов'язані з перетіканням частини рідини з зони високого тиску в зону низького тиску всередині насоса, а також витоками через сальникові ущільнення.

Коефіцієнт корисної дії характеризує ефективність роботи та досконалість конструкції насоса. Для насосів кращих конструкцій ККД може досягати 94%. Для невеликих насосів зазвичай становить 60-75%, для середніх насосів - 70-80%, а для великих насосів - 80-90%.

В процесі перекачування забруднених рідин ККД з часом знижується

через погіршення гідравлічних та об'ємних характеристик. При поганому технічному обслуговуванні зменшується механічний ККД, що призводить до додаткових витрат електроенергії та зростання експлуатаційних витрат.

ККД є важливим показником, що визначає економічну ефективність застосування насоса при зміні таких параметрів як напір, подача та потужність. Регулярне технічне обслуговування та моніторинг ККД дозволяють оптимізувати режими роботи насосного обладнання.

Щорічні витрати на електроенергію для роботи насоса у 30-40 разів перевищують початкову вартість самого насосного обладнання. Тому навіть невелике зниження ККД на 3-4% робить доцільним заміну насоса на новий або проведення капітального ремонту.

Оскільки за потужністю і продуктивністю досліджуваний насос можна віднести до насосів середнього типорозміру, то з урахуванням наведених вище даних можна очікувати значення його ККД на рівні 70-80%.

Для уточнення і підвищення ККД можна рекомендувати:

- Встановити частотний перетворювач для регулювання швидкості обертання насоса. Це дозволить оптимізувати режими роботи.
- Проводити регулярне технічне обслуговування та очищення насоса.
- Застосувати високоякісні підшипники та ущільнення.
- Використовувати сучасні зносостійкі і корозійностійкі матеріали в місцях найбільшого зношування.

Застосування цих заходів дозволить не лише підвищити ККД, але й збільшити міжсервісний ресурс роботи устаткування та знизити експлуатаційні витрати.

Таким чином:

$$N = \frac{5.7348}{0.8} = 7.1685 \text{ (кВт)}. \quad (2.5)$$

Коефіцієнт запасу обирається згідно наступних виразів:

$$\begin{aligned}
 N \leq 2\text{кВт} - K_{\text{зап}} &= 1.5; \\
 2\text{кВт} < N < 5\text{кВт} - K_{\text{зап}} &= 1.5 \div 1.25; \\
 5\text{кВт} < N < 50\text{кВт} - K_{\text{зап}} &= 1.25 \div 1.15; \\
 50\text{кВт} < N < 100\text{кВт} - K_{\text{зап}} &= 1.15 \div 1.05; \\
 N > 100\text{кВт} - K_{\text{зап}} &= 1.05.
 \end{aligned}$$

Необхідна потужність двигуна насосу визначається за виразом:

$$P = N \cdot K_{\text{зап}} = 7.1685 \cdot 1.24 = 8.889 \text{ (кВт)}. \quad (2.6)$$

Згідно з (3.6) обираємо відцентровий насос марки Pedrollo F 40/250B [53]. В табл. 3.2 наведено його технічні характеристики

Таблиця 2.2. Технічні характеристики насосу Pedrollo F 40/250B

№ з/п	Назва параметру	Значення
1	Потужність, кВт	11,0
3	Номінальна подача, м ³ / год	36,0
5	Всмоктуючий патрубок, мм	65,0
7	Діапазон температур води, °С	-10...+90
2	Номінальна напруга, В	380
4	Номінальний напір, м	60,0
6	Напірний патрубок, мм	40,0

У якості електричного двигуна насосу обираємо АД виробництва АВВ марки 160MLA 4 [54].

Кутова частота напруги статора двигуна:

$$\omega_0 = 2 \cdot \pi \cdot f = 2 \cdot 3.14 \cdot 50 = 314 \text{ (рад/с)}$$

Значення синхронної швидкості:

$$\omega_{\text{xx}} = \frac{\omega_0}{p_n} = \frac{314}{2} = 157 \text{ (рад/с)}$$

Номінальна швидкість обертання:

$$\omega_n = \omega_{\text{xx}} \cdot (1 - s_n) = 157 \cdot (1 - 0.028) = 152.604 \text{ (рад/с)}$$

Величина номінального моменту асинхронного двигуна:

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{11000}{152.604} = 72.081 \text{ (Н} \cdot \text{м)}$$

Критичний момент:

$$M_k = \lambda \cdot M_n = 3 \cdot 72.081 = 216.243 \text{ (Н} \cdot \text{м)}$$

Фазна номінальна напруга АД:

$$U_n = \frac{U_{\text{лн}}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 219.393 \text{ (В)}$$

Фазний номінальний струм статора АД:

$$I_n = \frac{P_n}{3 \cdot U_n \cdot \cos \varphi \cdot \eta} = \frac{11000}{3 \cdot 219.393 \cdot 0.875 \cdot 0.87} = 21.954 \text{ (А)}$$

Максимальне значення напруги АД:

$$U_{na} = \sqrt{2} \cdot U_n = \sqrt{2} \cdot 219.393 = 310.268 (\text{В})$$

Максимальне значення струму АД:

$$I_{na} = \sqrt{2} \cdot I_n = \sqrt{2} \cdot 21.954 = 31.048 (\text{А})$$

Максимальна величина потокозчеплення статора двигуна в режимі х.х.
($r_1 = 0$):

$$\Psi_{1xx} = \frac{U_{na}}{\omega_0} = \frac{310.268}{314} = 0.99 (\text{Вб})$$

Для здійснення перерахунку параметрів Г-подібної схеми заміщення двигуна в Т-подібну скористаємось наступною методикою:

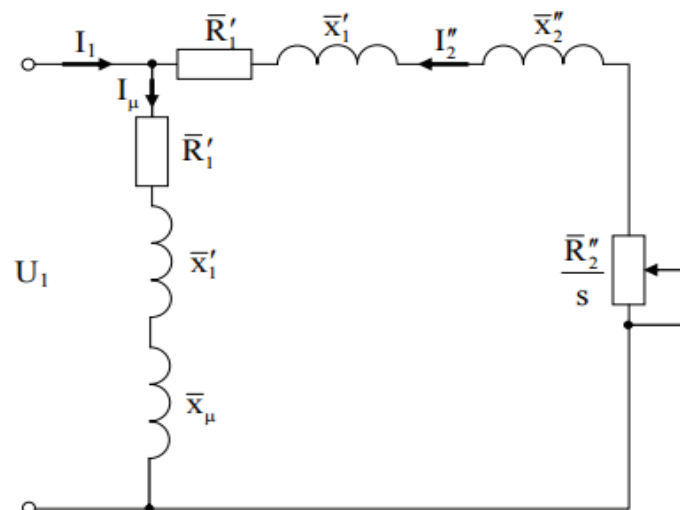


Рис. 3.2. Г-подібна схема заміщення АД

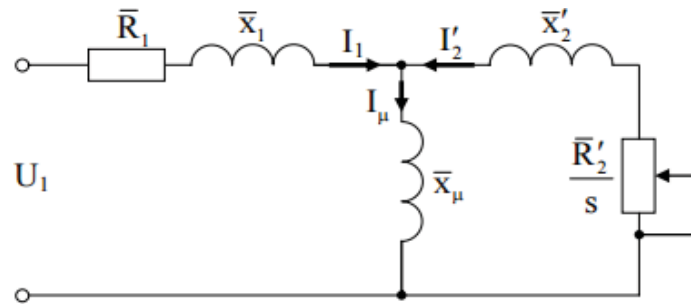


Рис. 3.3. Т-подібна схема заміщення АД

Визначення параметрів Т-подібної схеми заміщення АД в абс. одиницях:

$$x_1 = \bar{x}_1 \cdot \frac{U_n}{I_n} = 0.085 \cdot \frac{219.393}{21.954} = 0.8494 (Ом)$$

$$R_1 = \bar{R}_1 \cdot \frac{U_n}{I_n} = 0.043 \cdot \frac{219.393}{21.954} = 0.4297 (Ом)$$

$$x_2' = \bar{x}_2' \cdot \frac{U_n}{I_n} = 0.13 \cdot \frac{219.393}{21.954} = 1.2991 (Ом)$$

$$R_2' = \bar{R}_2' \cdot \frac{U_n}{I_n} = 0.032 \cdot \frac{219.393}{21.954} = 0.31978 (Ом)$$

$$x_\mu = \bar{x}_\mu \cdot \frac{U_n}{I_n} = 3.2 \cdot \frac{219.393}{21.954} = 31.9785 (Ом)$$

Індуктивність намагнічуючого контуру АД:

$$L_m = \frac{x_\mu}{\omega_0} = \frac{31.9785}{314} = 0.1018 (Гн)$$

Значення індуктивностей розсіювання статора і ротора двигуна:

$$L_{1\sigma} = \frac{x_1}{\omega_0} = \frac{0.8494}{314} = 0.0027 (\Gamma\text{H})$$

$$L_{2\sigma} = \frac{x_2'}{\omega_0} = \frac{1.2991}{314} = 0.00413 (\Gamma\text{H})$$

Значення індуктивностей статора і ротора двигуна:

$$L_1 = L_m + L_{1\sigma} = 0.1018 + 0.0027 = 0.1045 (\Gamma\text{H})$$

$$L_2 = L_m + L_{2\sigma} = 0.1018 + 0.00413 = 0.10593 (\Gamma\text{H})$$

Параметри α , β , γ , σ :

$$\alpha = \frac{R_2'}{L_2} = \frac{0.3197}{0.1059} = 3.0188 (\text{Ом} / \Gamma\text{H})$$

$$\sigma = L_1 - \frac{L_m^2}{L_2} = 0.1045 - \frac{0.1018^2}{0.1059} = 0.0066 (\Gamma\text{H})$$

$$\beta = \frac{L_m}{L_2 \cdot \sigma} = \frac{0.1018}{0.1059 \cdot 0.0066} = 145.649 (1 / \Gamma\text{H})$$

$$\gamma = \frac{R_1}{\sigma} + \alpha \cdot L_m \cdot \beta = \frac{0.4297}{0.0066} + 3.019 \cdot 0.102 \cdot 145.65 = 109.86 (\text{Ом} / \text{Гн})$$

Висновки по розділу

1. Автономні фотоелектричні системи водопостачання є перспективним напрямком забезпечення потреб у воді віддалених споживачів з використанням екологічно чистої сонячної енергії.

2. Ключовими компонентами таких систем є сонячні панелі, насосне обладнання, системи накопичення та перетворення електроенергії, а також засоби автоматизації та контролю для оптимізації режимів роботи.

3. Головним об'єктом автоматизації в даній системі є відцентровий насос, призначений для перекачування рідини з певними витратами та напором.

4. Електропривод насоса повинен забезпечувати плавне регулювання швидкості та моменту з метою оптимізації енергоспоживання та зносу обладнання.

5. Проектні рішення повинні задовольняти вимоги чинних нормативів з техніки безпеки та охорони праці. Конструкція і розташування обладнання мають забезпечувати зручність експлуатації та обслуговування.

6. Автоматизація станції дозволить досягти значної економії ресурсів та поліпшити техніко-економічні показники системи. Таким чином, застосування сучасних автоматизованих систем керування є доцільним та ефективним рішенням для даного технологічного процесу.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА ТА МОДЕЛЮВАННЯ АВТОНОМНОЇ СИСТЕМИ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАСОСНОЇ СТАНЦІЇ

3.1 Постановка задачі автономного енергозабезпечення насосної станції

Асинхронний електродвигун є однією з найбільш поширених електричних машин сьогодення. Він виступає важливим перетворювачем електроенергії в механічну роботу. Головною перевагою асинхронного двигуна є відсутність безпосереднього контакту між обертовими та нерухомими частинами, на відміну від двигуна постійного струму, де такий контакт забезпечується за допомогою колекторно-щіткового вузла.

Однак, попри очевидні переваги, асинхронний електродвигун має досить складний математичний опис. Це пов'язано насамперед з його режимами роботи та особливостями конструкції. Зокрема, асинхронний двигун складається зі статора та ротора. У статорі розташовується обмотка змінного струму, яка створює обертове магнітне поле. Ротор живиться за рахунок наведених струмів і обертається з дещо меншою швидкістю, ніж магнітне поле статора.

Математична модель асинхронного двигуна враховує безліч факторів - магнітні властивості матеріалів, геометрію двигуна, характер навантаження тощо. Аналіз ускладнюється тим, що параметри ротора залежать від швидкості обертання. Тому розрахунки асинхронних двигунів часто здійснюють за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення.

При математичному описі роботи асинхронного двигуна використовується низка спрощень та припущень. Це дозволяє отримати адекватну математичну модель, яка з достатньою для практики точністю описує процеси в двигуні.

В більшості розрахунків приймають такі припущення:

- 1) Відсутність втрат в сталі (гістерезису та вихрових струмів).
- 2) Фазні обмотки симетричні та зсунуті в просторі на кут 120 градусів (для трифазних двигунів).
- 3) Магнітопровід не насичений, тобто залежність між магнітним потоком та магніторушійною силою лінійна.
- 4) Синусоїдальний розподіл магнітного поля в повітряному зазорі.
- 5) Величина повітряного зазору не змінюється.
- 6) Заміна розподілених обмоток еквівалентними зосередженими.
- 7) Симетричність ротора відносно його осі обертання.

Застосування даних спрощень істотно полегшує опис та аналіз складних електромагнітних процесів в асинхронному двигуні. Проте в окремих випадках може виникнути необхідність побудови більш точних математичних моделей з урахуванням тих чи інших нелінійних ефектів.

Сучасні обчислювальні потужності дозволяють будувати детальні математичні моделі асинхронних двигунів в системі фазних змінних з урахуванням прийнятих спрощень та обмежень.

Проте через залежність параметрів ротора від кута повороту, структурна схема такої моделі виходить досить складною. Адже коефіцієнти зв'язку між потокозчепленнями та струмами залежать від значення кута повороту ротора двигуна відносно магнітної осі обмотки статора.

Це призводить до необхідності використання в моделі тригонометричних функцій змінних коефіцієнтів або їх апроксимацій. Крім цього, зв'язки між змінними статора і ротора також є нелінійними.

Тому, незважаючи на потужності сучасних комп'ютерів, розрахунок та аналіз подібних моделей асинхронного електропривода є досить складним завданням. Часто застосовуються різноманітні спрощення та лінеаризації для полегшення математичного опису.

Величина втрат енергії в технологічному процесі залежить від

технологічного навантаження, що визначається потребами споживача, а також від величини гідравлічних втрат напору на устаткуванні насосної станції. Гідравлічні втрати напору в свою чергу залежать від опору окремих елементів гідравлічної схеми.

Для організації техпроцесу з мінімальними витратами енергії, в першу чергу необхідно зменшити втрати напору між вихідним трубопроводом насосного агрегату та мережею споживачів. Крім цього, в процесі експлуатації може змінюватися величина тиску на вході насоса.

Такий взаємозв'язок параметрів вимагає встановлення в системі регулюючих елементів - дросельних клапанів чи регулюючих засувки. Ці елементи створюють гідравлічний опір, проте дозволяють підтримувати стабільний тиск у магістральному трубопроводі споживачів. За рахунок дросельних елементів відбувається перерозподіл тиску та напору в різних ділянках системи.

На величину втрат енергії при дросельному регулюванні впливає не лише регулюючий елемент, а й інші чинники. Зазвичай при проектуванні обирається насосний агрегат з деяким запасом за напором і подачею. Крім того, нове обладнання, що замінює старе, може мати завищені характеристики. Додатково на величину тиску на виході агрегату впливає діапазон зміни значень вхідних тисків перед насосом.

Все це в комплексі призводить до великих витрат енергії під час техпроцесу, що можуть сягати понад 45% від номінальної потужності агрегату.

Для мінімізації втрат на регулювання тиску в мережі необхідно усунути додаткові гідравлічні опори між насосом та магістраллю споживачів. Тобто потрібно повністю відкрити запірно-регулюючу арматуру і передати функцію регулювання безпосередньо насосному агрегату.

Теорія роботи нагнітачів стверджує, що зміна величини частоти обертання приводу насоса чи вентилятора впливає на його напірну

характеристику. Крім того, тиск, що створює насос, пропорційний квадрату частоти обертання робочого колеса.

Якщо налаштувати роботу приводу насоса так, щоб він змінював частоту обертання у відповідь на зміну параметрів техпроцесу (витрат у мережі та тиску на вході агрегату), можна стабілізувати тиск у мережі споживачів практично без втрат енергії. Адже при такому способі керування виключаються втрати напору на дросельних елементах, а отже, і відповідні втрати гідравлічної енергії.

Крім того, регулювання тиску зміною частоти обертання насоса дозволяє знизити енергоспоживання ще з однієї причини. Сам насос має певний ККД – відношення механічної потужності на валу до гідравлічної потужності, що віддається в напірний трубопровід. І цей ККД залежить від режиму роботи насоса.

Отже, регулювання тиску зміною швидкості дозволяє вести роботу насоса в оптимальному за ККД режимі.

Відповідно до теорії подібності, зі зменшенням частоти обертання максимальне значення ККД насоса трохи знижується і зсувається вліво по характеристиці. А при аналізі необхідної зміни частоти відповідно до зміни витрати в мережі, можна побачити, що зі зниженням витрат потрібно зменшувати швидкість обертання.

В цьому випадку коефіцієнт корисної дії насоса буде вищим, ніж при роботі на номінальній частоті. Отже, регулювання швидкості згідно технологічного навантаження дає подвійний позитивний ефект:

- 1) Економія енергії за рахунок усунення гідравлічних втрат
- 2) Підвищення ККД самого насоса при перетворенні механічної енергії в гідравлічну

Такий підхід дозволяє комплексно знизити енергоспоживання насосної системи.

Застосування частотного регулювання приводом насоса дає можливість

також істотно знизити експлуатаційні витрати на обслуговування обладнання та систем. Наприклад, зменшення перепаду тиску між всмоктувальним і напірним патрубками агрегату подовжує термін роботи сальникових ущільнень, майже повністю усуває гідроудари, забезпечує стабільність тисків у трубопроводах та мінімізує витрати на обслуговування.

Можливість енергозбереження при частотному регулюванні асинхронних двигунів визначається їх конструкцією та технічними параметрами та характеристиками навантаження.

Зокрема, у асинхронних двигунів є широкий діапазон регулювання швидкості, низькі моменти інерції, високі пускові моменти. Це дозволяє оптимізувати їх роботу відповідно до поточного навантаження та досягти суттєвої економії електроенергії.

Використання режиму змінення частоти напруги дозволяє підтримувати номінальний обертовий момент практично незалежно від поточної частоти обертання валу. Водночас, зменшення напруги забезпечує зниження споживаного струму і, як наслідок, економію електроенергії.

Застосування частотно-регульованого електроприводу для насосних станцій має певні особливості, пов'язані з широким використанням відцентрових насосів. Для них витрати пропорційні частоті обертання робочого колеса, тиск пропорційний квадрату частоти, а споживана потужність залежить від частоти в степені три. Відповідно до емпіричних формул перерахунку відцентрових насосів ці параметри можна виразити так:

$$\frac{Q}{Q_0} = \frac{n}{n_0}; \quad \frac{H}{H_0} = \left(\frac{n}{n_0} \right)^2; \quad \frac{N}{N_0} = \left(\frac{n}{n_0} \right)^3 \quad (3.1)$$

Енергія, що споживається двигуном з електричної мережі:

$$N = Q \cdot \eta_n (H_2 - H_1), \quad (3.2)$$

Виходячи з наведених залежностей параметрів відцентрових насосів від частоти обертання, доцільно застосовувати електропривод із частотним керуванням.

Для приведення в рух турбомеханізмів, зокрема відцентрових насосів, слід застосувати квадратичну залежність напруги живлення від частоти - $U/f^2 = \text{const}$. Завдяки цьому при зміні частоти підтримується постійний пусковий момент на валу двигуна, що забезпечує стабільний розгін навантаження.

$$U_{1m} = \left(U_{1d}^2 + U_{1q}^2 \right)^{\frac{1}{2}} = \psi^* \sqrt{\alpha_1^2 + \left(\omega^* p_n \right)^2} \quad (3.3)$$

$$U_{1m} = \left(\psi^* + (\psi_n^* - \psi_0^*) \frac{\omega^* p_n}{\omega_{on}} \right) \sqrt{\alpha_1^2 + \left(\omega^* p_n \right)^2} \quad (3.4)$$

Крім того, підтримання співвідношення U/f^2 компенсує зменшення магнітного потоку при зниженні напруги живлення. Це дозволяє зменшити втрати активної потужності в процесі регулювання в порівнянні з лінійною залежністю напруги від частоти.

Напруги, які прикладаються до обмоток двигуна визначаються:

$$\begin{pmatrix} u_{1a} \\ u_{1b} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_0(t) & -\sin \theta_0(t) \\ \sin \theta_0(t) & \cos \theta_0(t) \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \alpha_1 \psi^* \\ \omega^* p_n \psi^* \end{pmatrix} \quad (3.5)$$

$$\hat{\theta} = \omega^* p_n$$

Для реалізації даного алгоритму керування частотним електроприводом необхідно знати параметр α_1 , який визначається на підставі стандартних випробувань асинхронного двигуна.

При цьому в процесі роботи немає потреби вимірювати фазні струми статора чи кутову швидкість для реалізації керуючого алгоритму.

Потреба у вимірюваннях струмів статора та кутової швидкості для використання алгоритму (3.5) відсутня. Для того, щоб встановити взаємозв'язок алгоритму курування (3.5) слід скористатись виразом модуля напруги статора двигуна:

$$\begin{aligned} u_{1d} &= \alpha_1 \psi^* \\ u_{1q} &= \omega^* p_n \psi^* \\ \psi^* &= \psi_0^* + (\psi_a^* - \psi_0^*) \frac{\omega^* p_n}{\omega_{0n}} \end{aligned} \quad (3.6)$$

На рис. 3.1 наведена структурна схема зазначеного алгоритму керування.

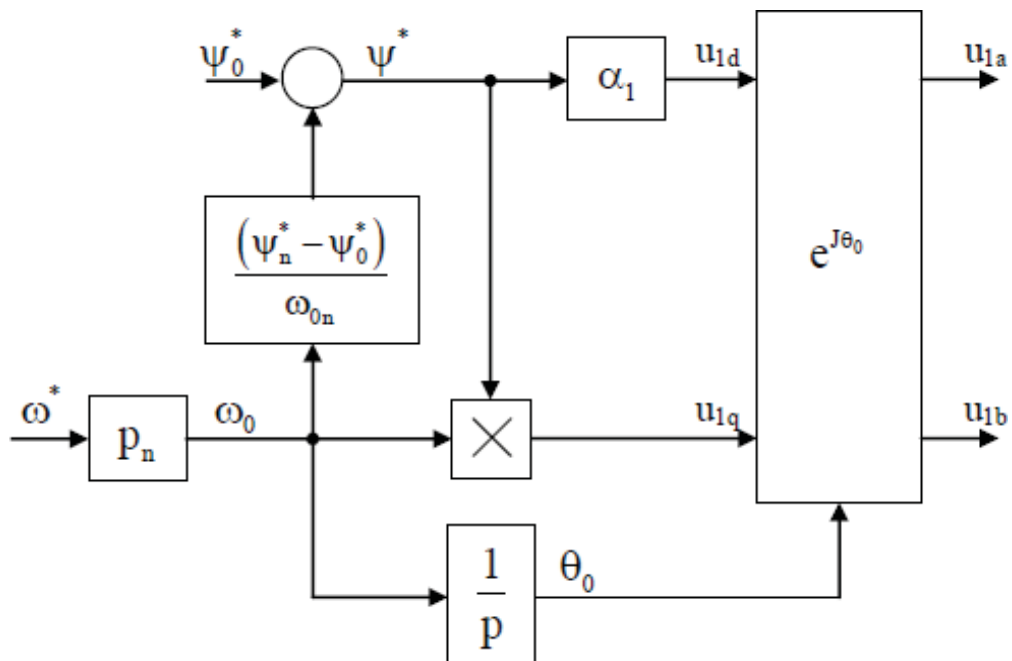


Рис. 3.1 Узагальнена структурна схема алгоритму керування

З огляду на те, що було прийняте рішення змоделювати реальну та

економічну систему, то застосування системи керування електроприводом є недоцільним. Адже двигун в такому випадку буде працювати безпосередньо від мережі живлення.

Для моделювання роботи асинхронного двигуна в середовищі MATLAB/Simulink слід скористатися стандартним блоком під назвою "Asynchronous Machine". Цей блок дозволяє налаштувати основні параметри асинхронного двигуна та реалізувати його роботу в складі моделі електромеханічної системи.

Використання готового блоку спростить побудову моделі та дасть можливість сконцентруватися на дослідженні саме гідравлічної частини системи підкачування рідини з огляду на завдання оптимізації за енергоефективністю.

3.2 Комп'ютерна імітаційна модель фотоелектричної електростанції насосної установки

Фотопанель – це пристрій, здатний трансформувати сонячне випромінювання в електроенергію. Для адекватного моделювання роботи такого приладу ключовими вхідними даними є показники навколишнього середовища, а саме інтенсивність сонячного опромінення та температура повітря. Результатом роботи фотопанелі будуть такі характеристики як струм, напруга чи вихідна потужність. Зміна вхідних даних призводить до зміни вихідних показників, отже правильний вибір моделі має вирішальне значення.

Поширеною є модель з одним діодом та додатковими послідовним і паралельним резисторами для більш точного відображення фізичних процесів. Вплив як освітленості, так і температури на робочі характеристики фотомодуля має бути адекватно представлений. Чим складніша еквівалентна схема, тим більше невідомих параметрів потрібно ідентифікувати. Проте технічна документація від виробників часто не містить достатньо інформації

про температурні коефіцієнти чи залежності параметрів від інтенсивності випромінювання. Тож доводиться робити певні припущення щодо фізичної поведінки компонентів для побудови адекватної математичної моделі фотопанелі".

Отже, головною метою моделі є отримання максимально наближених до експериментальних даних значень вихідної потужності фотопанелі у будь-який момент часу.

Зовнішня вольт-амперна характеристика $I(V)$ фотопанелі являє собою нелінійне рівняння з великою кількістю параметрів, які можна класифікувати на: надані виробником, відомі фізичні сталі та такі, що підлягають визначенню. Інколи застосовують спрощені методи, в яких невідомі компоненти вважаються сталими та не підлягають розрахунку. Наприклад, в роботі [61] було враховано лише послідовний опір R_s без паралельного для побудови моделі помірної складності. Аналогічне спрощення з великим значенням паралельного опору зроблено в [62]. Інші дослідники знехтували паралельним та послідовним опорами, вважаючи їх або дуже малими, або дуже великими відповідно. З іншого боку, в літературі трапляються публікації [63-66], де саме ці дві внутрішні характеристики фотомодуля визнаються дуже важливими і такими, що мають бути враховані з високою точністю. Окрім опорів, визначенню підлягають такі параметри як фотострум, струм насичення і коефіцієнт ідеальності.

Враховуючи вищесказане обираємо до встановлення фотопанель типу АХМ144-9.

Ідеальна схема фотопанелі з 1 діодом наведена на рис. 3.2.

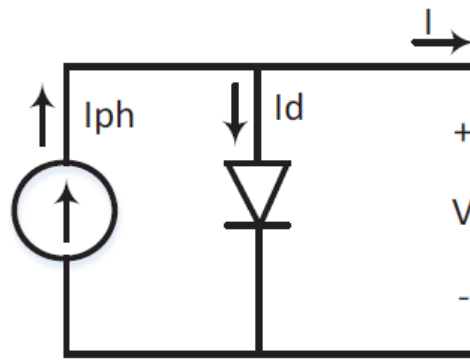


Рис. 3.2. Ідеальна схема фотопанелі з 1 діодом

Вихідний струм згідно 1-го закону Кірхгофа:

$$I = I_{ph} - I_d \quad (3.7)$$

де I_{ph} – це фотострум;

I_d – це діодний струм, визначається згідно виразу:

$$I_d = I_0 \left[\exp\left(\frac{V}{A \cdot N_s \cdot V_t}\right) - 1 \right] \quad (3.8)$$

де V – напруга на діоді.

$$V_t = \frac{k \cdot T_c}{q} \quad (3.9)$$

Усі складові напруги V у рівнянні (5.2), що стоять у чисельнику під експоненційною функцією, мають обернену пропорційність до температури фотоелемента. Відповідно, ці компоненти змінюються залежно від умов навколишнього середовища. У даній роботі цей параметр позначається «а» і

називається тепловою напругою:

$$a = \frac{N_s \cdot A \cdot k \cdot T_c}{q} = N_s \cdot A \cdot V_t \quad (3.10)$$

Отже, у представленій моделі враховується залежність ключових параметрів фотопанелі від температури. Коефіцієнт ідеальності також обирається на основі типу фотоелемента.

Схема фотопанелі з послідовним опором наведена на рис. 3.3.

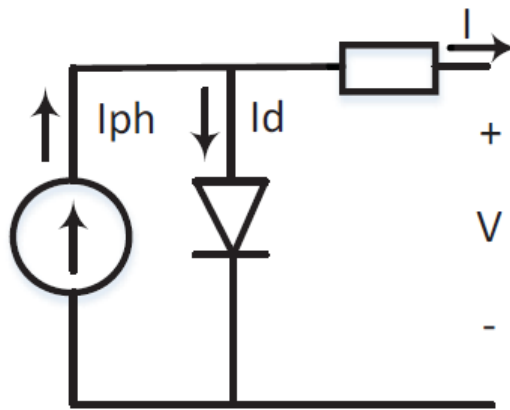


Рис. 3.3. Схема фотопанелі з послідовним опором

У разі врахування опору рівняння (3.11) набуває вигляду:

$$I_d = I_0 \left[\exp \left(\frac{V + I \cdot R_s}{a} \right) - 1 \right] \quad (3.12)$$

Схема фотопанелей з послідовними і паралельними опорами наведена на рис. 3.4.

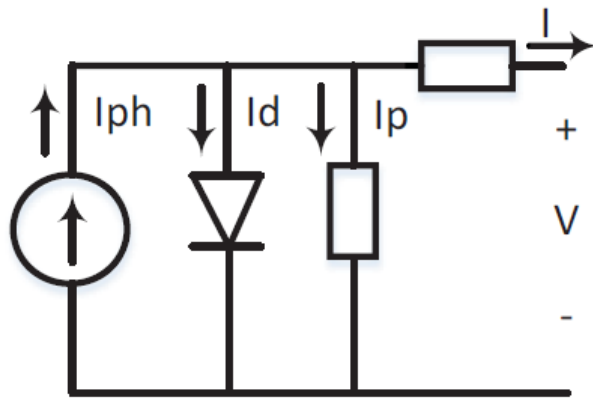


Рис. 3.4. Схема фотопанелей з послідовними і паралельними опорами

Згідно першого закону Кірхгофа маємо:

$$I = I_{ph} - I_d - I_p \quad (3.13)$$

де I_p – величина витокк струму в паралельному опорі.

Вихідний струм визначається згідно виразу:

$$I_d = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V + I \cdot R_s}{a}\right) - 1 \right] - \frac{V + I \cdot R_s}{R_p} \quad (3.14)$$

В роботі обрано 4 параметри, які необхідно визначити: I_0 , I_{ph} , R_p , R_s .

У відповідності до схеми на рис. 3.4, вихідний струм становить:

$$I = I_{ph,ref} - I_{0,ref} \left[\exp\left(\frac{V}{a_{ref}}\right) - 1 \right] \quad (3.15)$$

Вираз (3.15) дає змогу визначити $I_{ph,ref}$. У випадку замкнення фотоелементу отримаємо вираз:

$$I_{sc,ref} = I_{ph,ref} - I_{0,ref} \left[\exp\left(\frac{V}{a_{ref}}\right) - 1 \right] = I_{ph,ref} \quad (3.16)$$

Можна зробити припущення, що:

$$I_{sc,ref} \approx I_{ph,ref} \quad (3.17)$$

Фотострум визначається згідно виразу:

$$I_{ph} = \frac{G}{G_{ref}} (I_{ph,ref} + \mu_{sc} \cdot \Delta T) \quad (3.18)$$

Струм I_0 визначається згідно виразів:

$$I_0 = I_{0,ref} \left(\frac{T_c}{T_{c,ref}} \right)^3 \exp \left[\left(\frac{q \cdot \epsilon_G}{A \cdot k} \right) \cdot \left(\frac{1}{T_{c,ref}} - \frac{1}{T_c} \right) \right] \quad (3.19)$$

$$I_0 = I_{sc,ref} \cdot \exp \left(\frac{-V_{oc,ref}}{a} \right) \left(\frac{T_c}{T_{c,ref}} \right)^3 \exp \left[\left(\frac{q \cdot \epsilon_G}{A \cdot k} \right) \cdot \left(\frac{1}{T_{c,ref}} - \frac{1}{T_c} \right) \right] \quad (3.20)$$

Значення R_p і R_s знаходяться шляхом чисельного вирішення наступних рівнянь:

$$I_{mp,ref} = \frac{P_{mp,ref}}{V_{mp,ref}} = \frac{P_{mp,ex}}{V_{mp,ref}} =$$

$$= I_{ph,ref} - I_{0,ref} \left[\exp \left(\frac{V_{mp,ref} + I_{mp,ref} \cdot R_s}{a} \right) - 1 \right] - \frac{V_{mp,ref} + I_{mp,ref} \cdot R_s}{R_p} \quad (3.21)$$

$$R_p = \frac{V_{mp,ref} + I_{mp,ref} \cdot R_s}{I_{sc,ref} - I_{sc,ref} \left\{ \exp \left[\frac{V_{mp,ref} + I_{mp,ref} \cdot R_s - V_{oc,ref}}{a} \right] \right\} + I_{sc,ref} \left\{ \exp \left[\frac{-V_{oc,ref}}{a} \right] \right\} - \left(\frac{P_{max,ex}}{V_{mp,ref}} \right)} \quad (3.22)$$

Комп'ютерні моделі, які враховують вказані вище співвідношення, зображені на рис. 3.5 – 3.11.

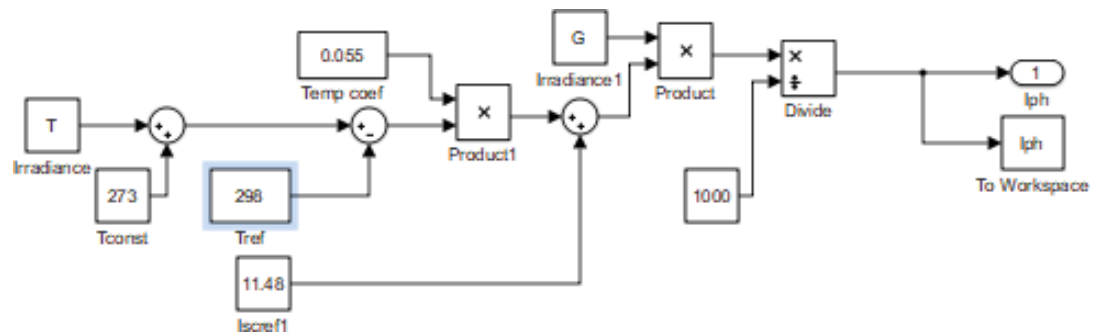


Рис. 3.5. Модель для визначення струму I_{ph}

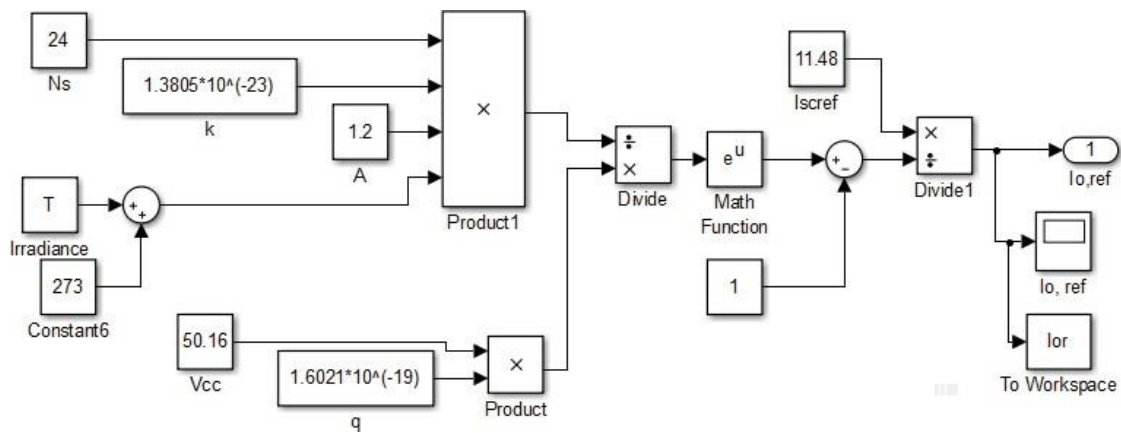
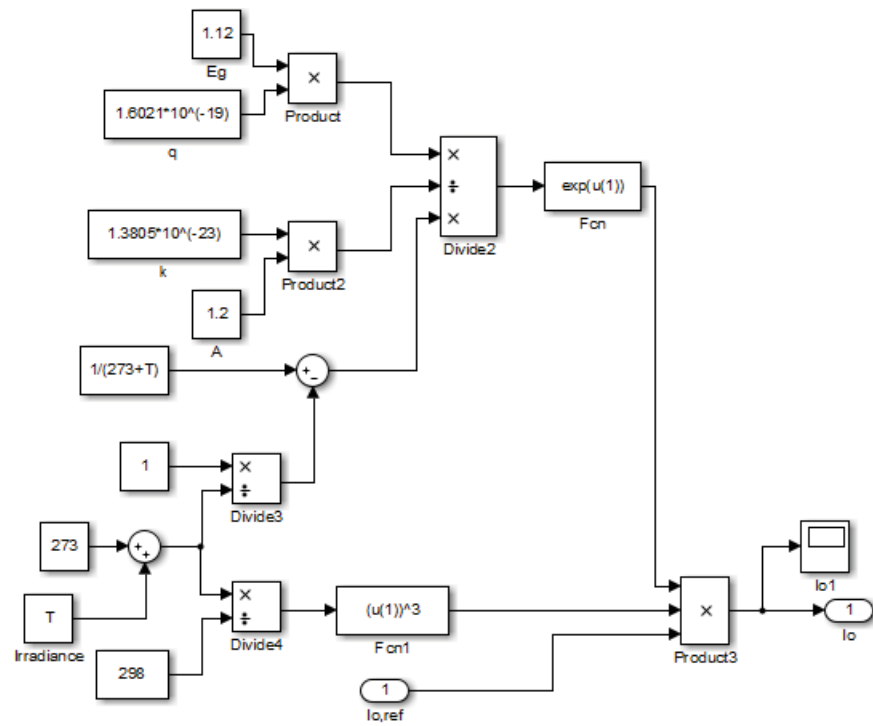
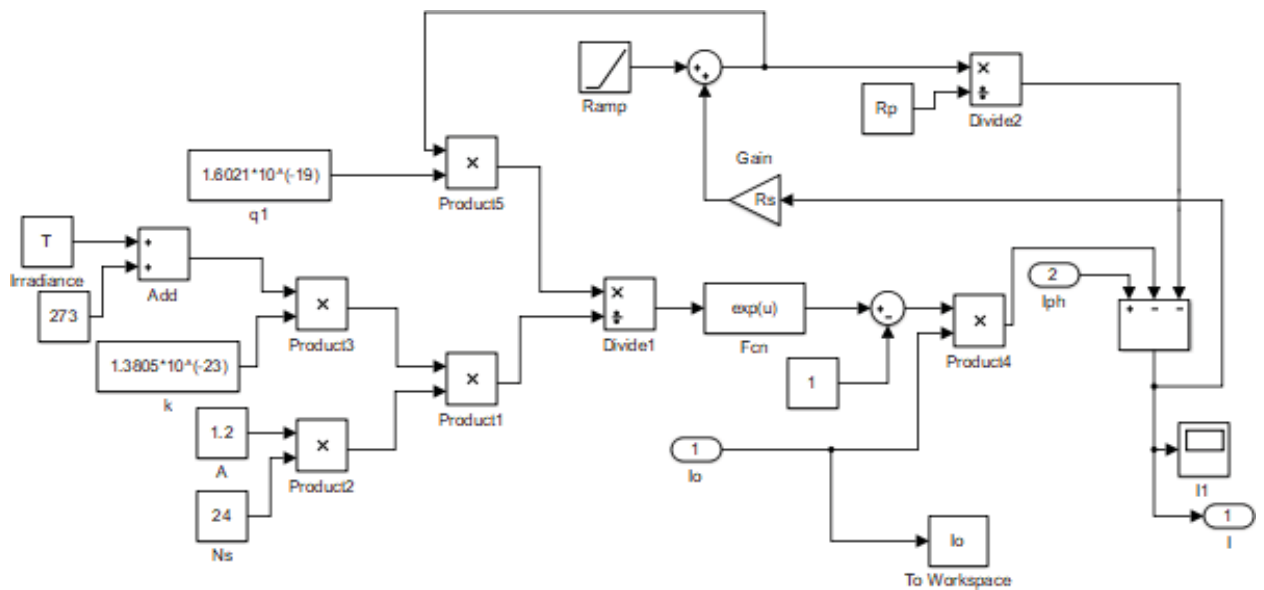


Рис. 3.6. Модель для визначення струму $I_{0,ref}$

Рис. 3.7. Модель для визначення струму I_0 Рис. 3.8. Модель для визначення струму I зі складовою опору R_p

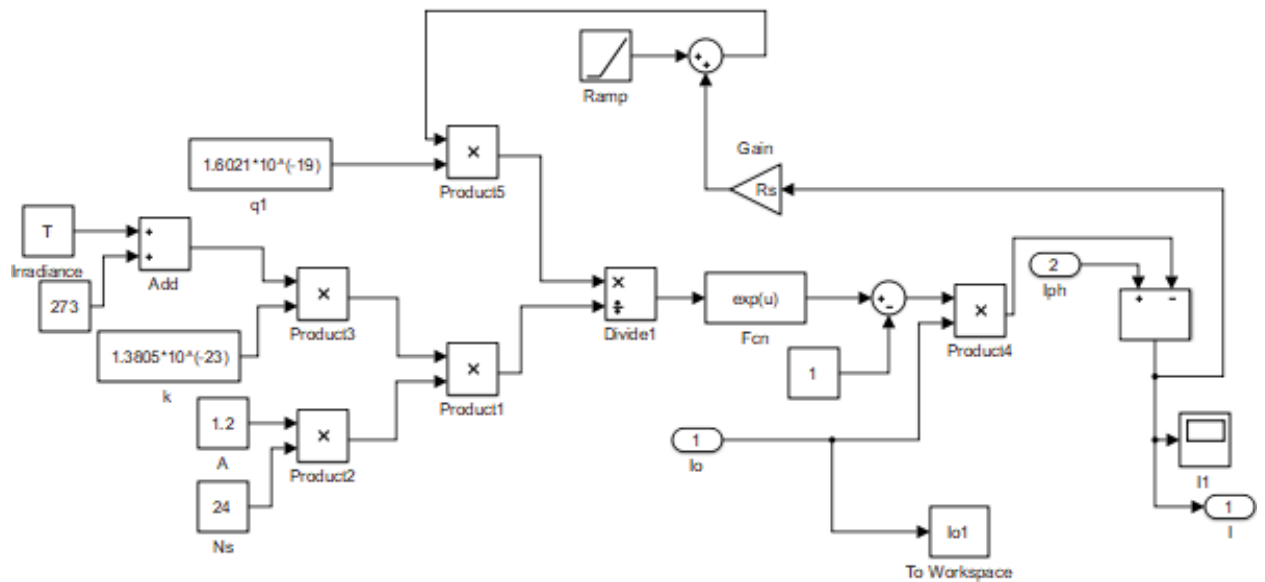


Рис. 3.9. Модель для визначення струму I без складової опору R_p

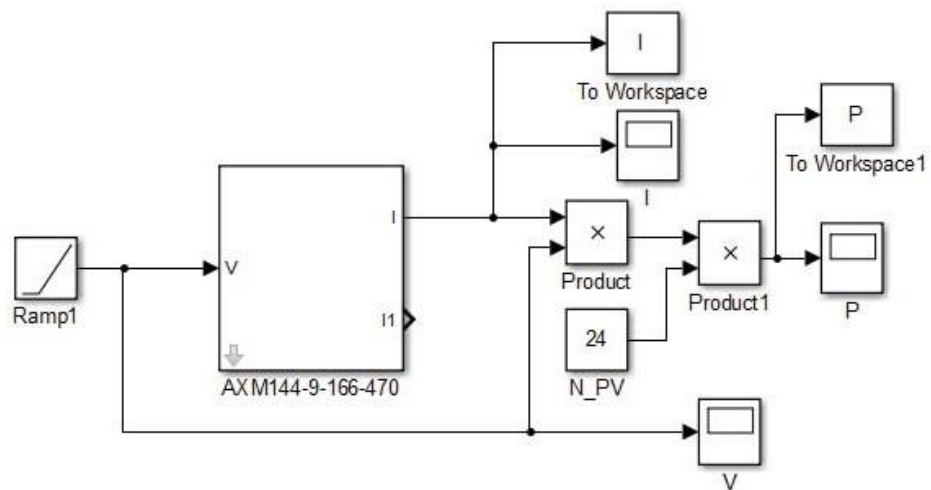


Рис. 3.10. Модель фотопанелі

Вольт-амперні характеристики, отримані шляхом моделювання, наведені на рис.

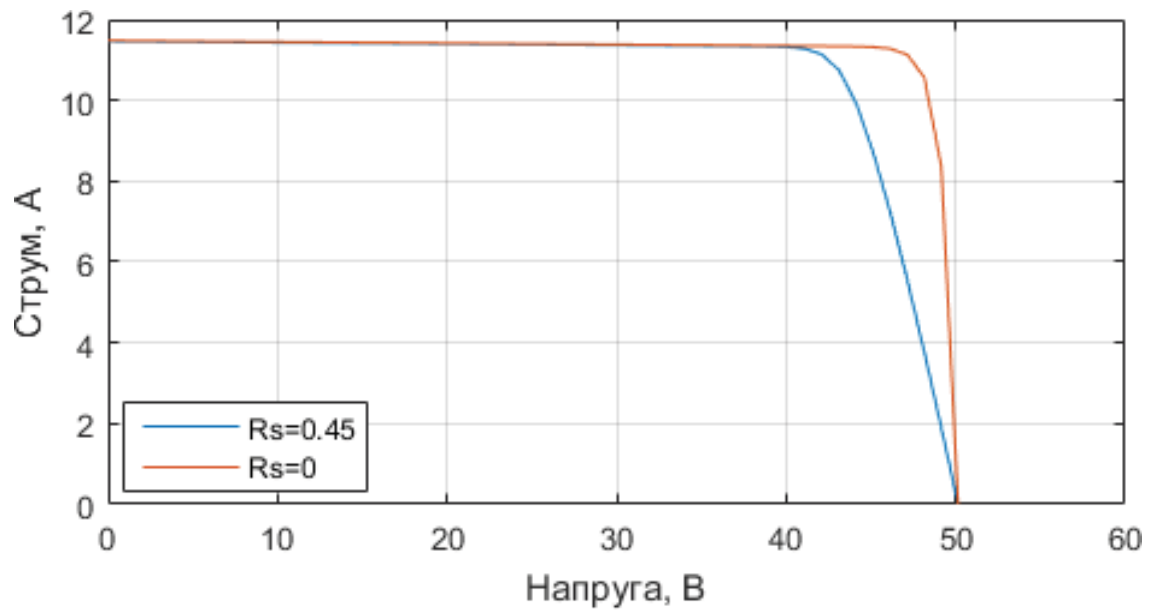


Рис. 3.11. Вольт-амперна характеристика фотопанелі з R_p при зміні R_s

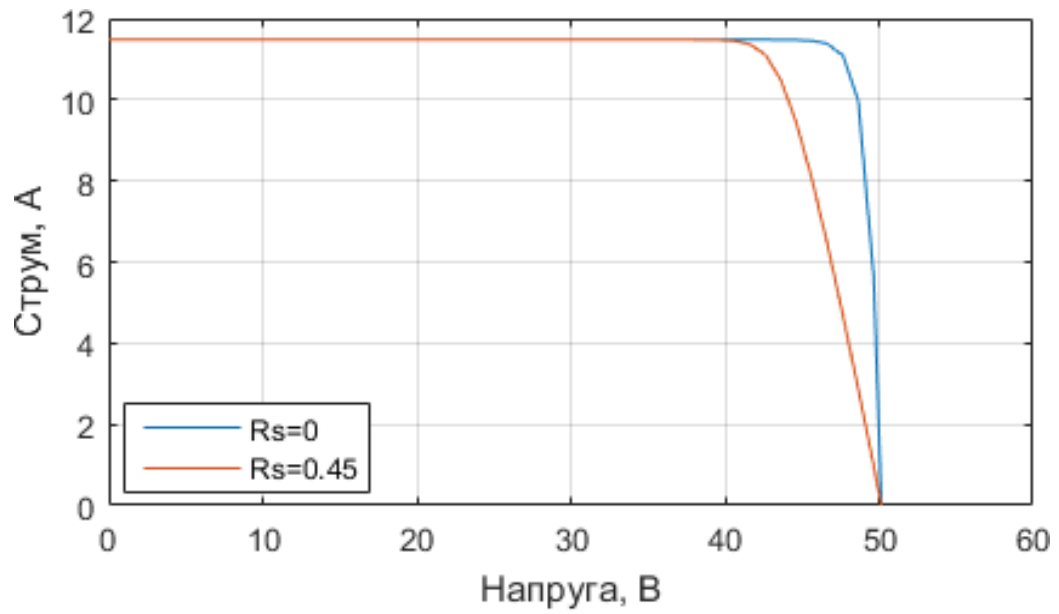


Рис. 3.12. Вольт-амперна характеристика фотопанелі без R_p при різних значеннях R_s

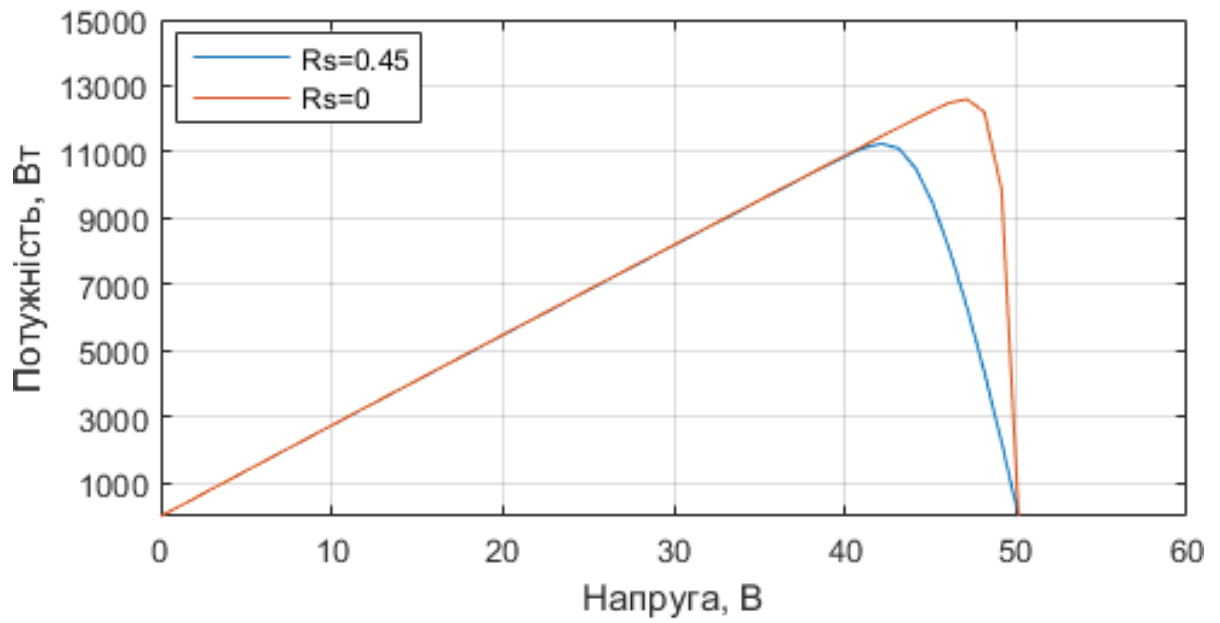


Рис. 3.13. Характеристика фотопанелі з R_p при різних значеннях опору R_s

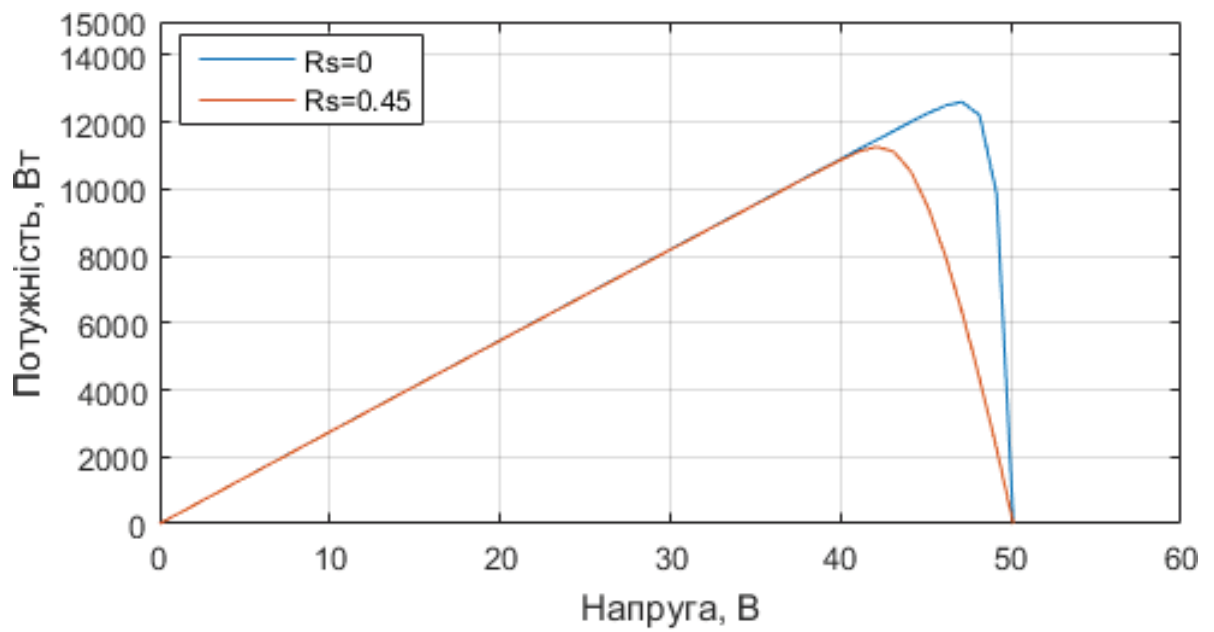


Рис. 3.14 Характеристика фотопанелі без опору R_p при різних значеннях R_s

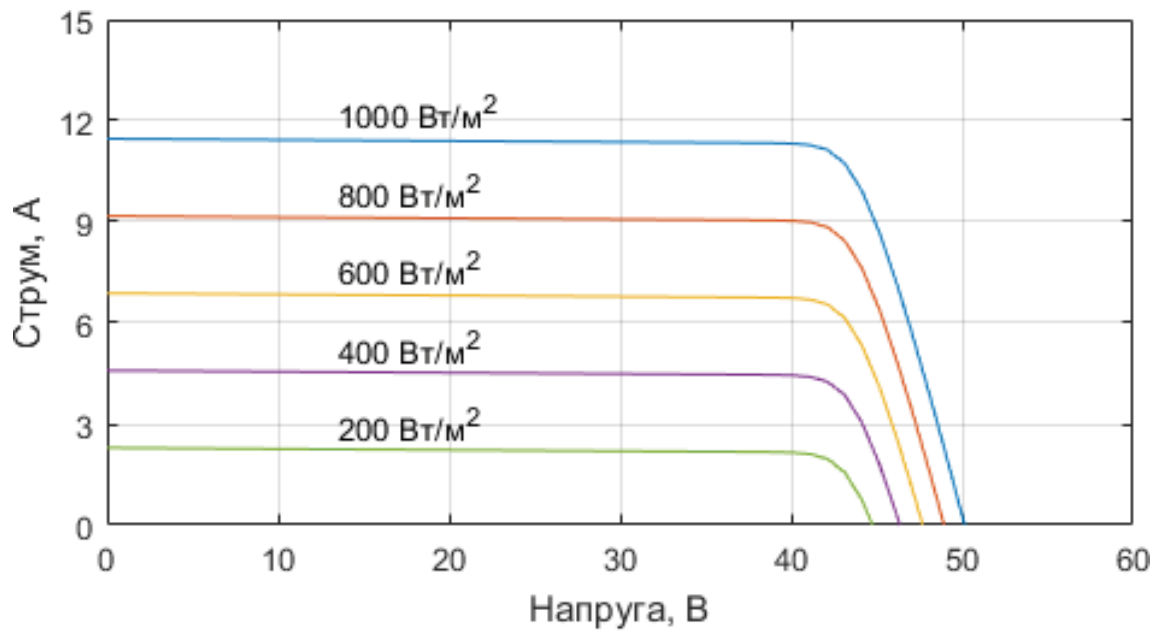


Рис. 3.15. Вольт-амперна характеристика фотопанелі з R_p при різних значеннях опромінення G

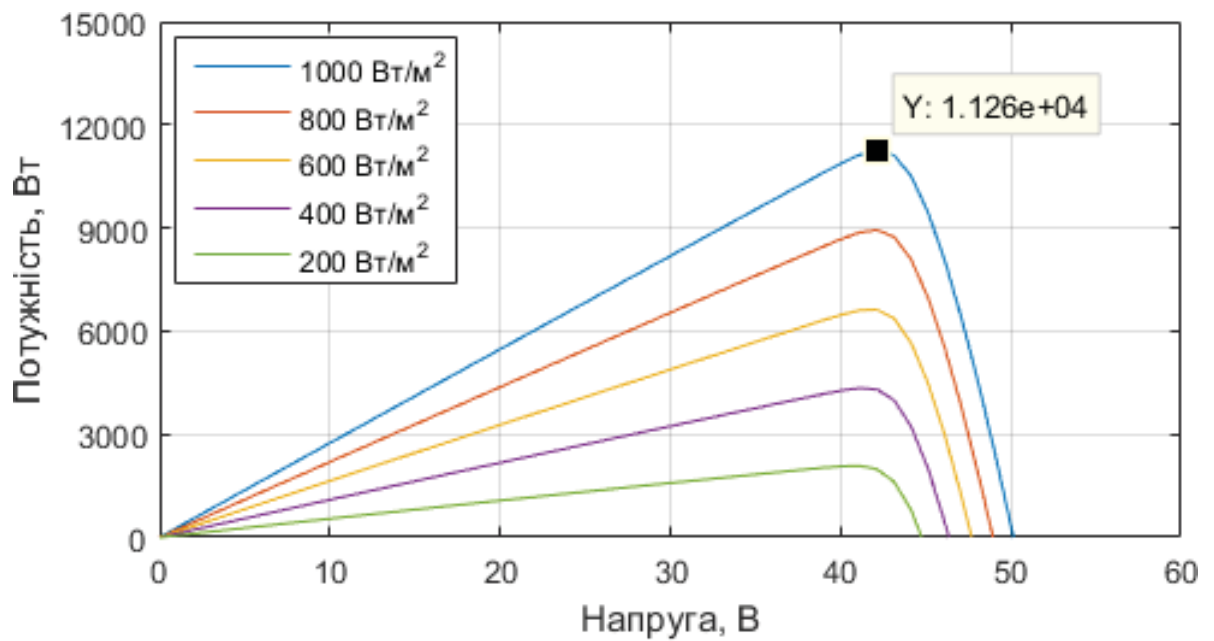


Рис. 3.16. Характеристика фотопанелі з R_p при різних значеннях опромінення G

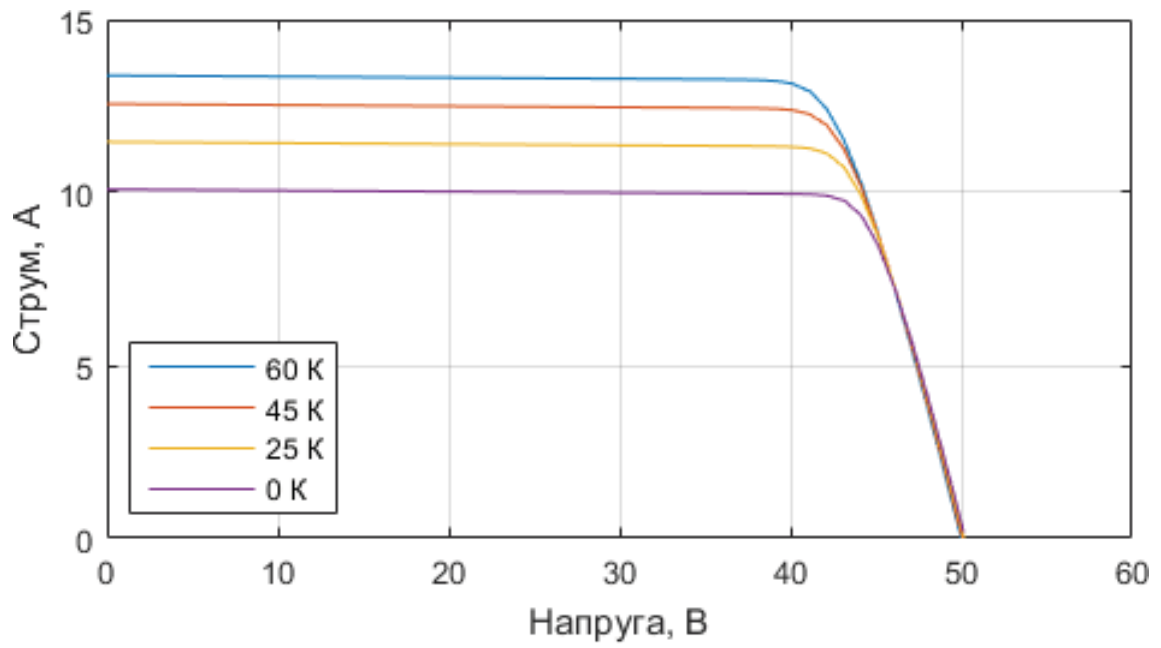


Рис. 3.17. Вольт-амперна характеристика фотопанелі з R_p при різних значеннях температури T

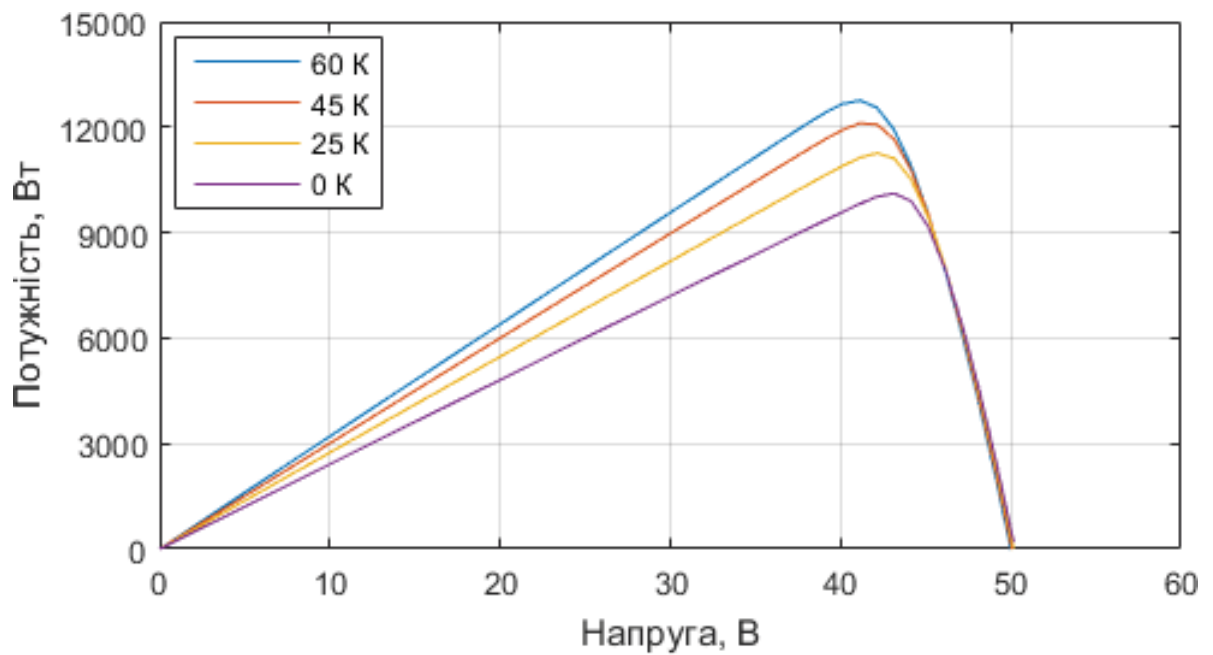


Рис. 3.18. Характеристика фотопанелі з R_p при різних значеннях температури T

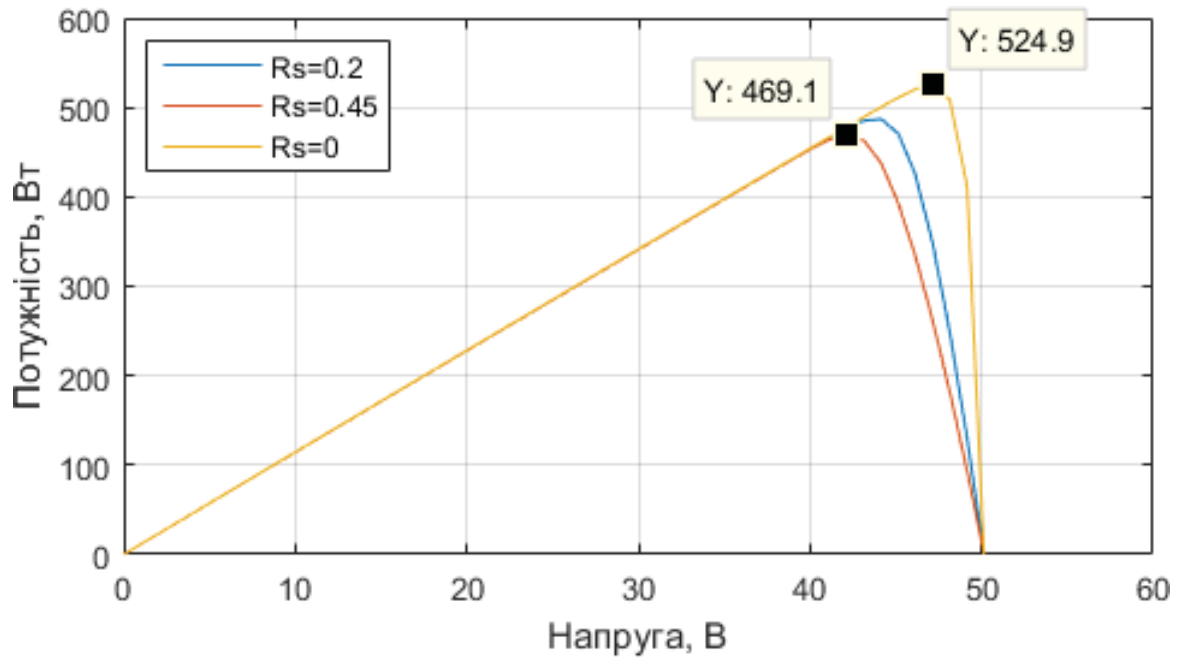


Рис. 3.19. Вольт-амперна характеристика фотопанелі для різних значень R_s в моделі з опором R_p

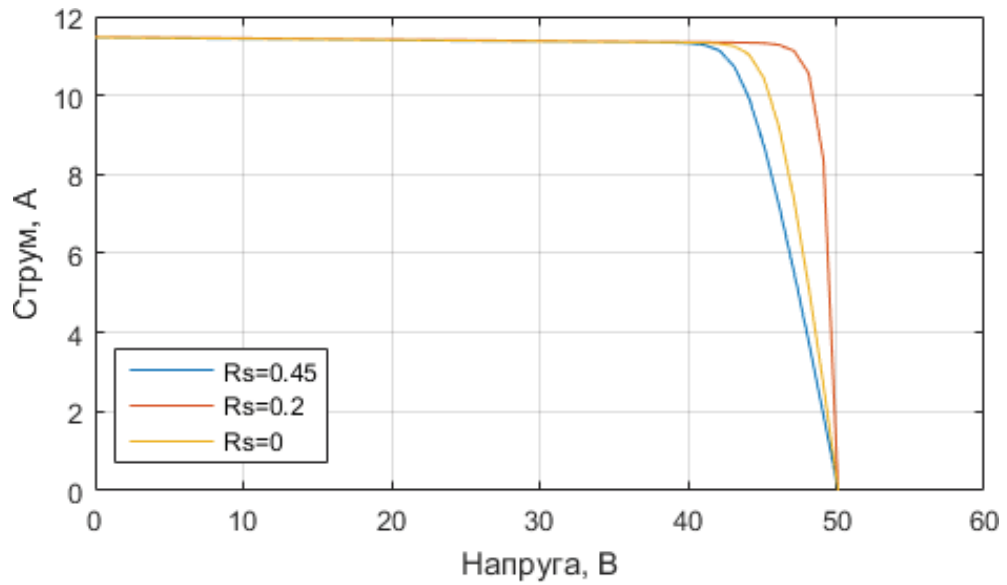


Рис. 3.20. Вольт-амперна характеристика фотопанелі для різних значень R_s в моделі з опором R_p

3.3 Комп'ютерне моделювання автономної системи енергозабезпечення насосної станції

Застосовуючи методи моделювання, проведемо дослідження динамічних та статичних властивостей ключового компонента автономної фотоелектричної системи – асинхронного електропривода – при живленні інвертора із ШІМ від фотопанелі

У цьому розділі було розроблено комп'ютерну модель автономної системи водопостачання в середовищі MATLAB/Simulink. Змодельовано реальну систему, що складається з АД, рівнянь, насосу, інвертора та дискретного генератора ШІМ.

Дослідження дасть змогу визначити оптимальні параметри системи та режими роботи для забезпечення ефективного використання енергії від фотоелектричних панелей. Також буде проаналізовано вплив зміни інтенсивності сонячного випромінювання та інших зовнішніх факторів.

На рис. 3.21 наведено узагальнену модель системи.

Насос в цій моделі представлено з допомогою наступного виразу:

$$K = \frac{M_n}{\omega_n^2} = \frac{72}{152.6^2} = 0.00292 \quad (6.1)$$

Результати моделювання наведені на рис. 3.22 – 3.23.

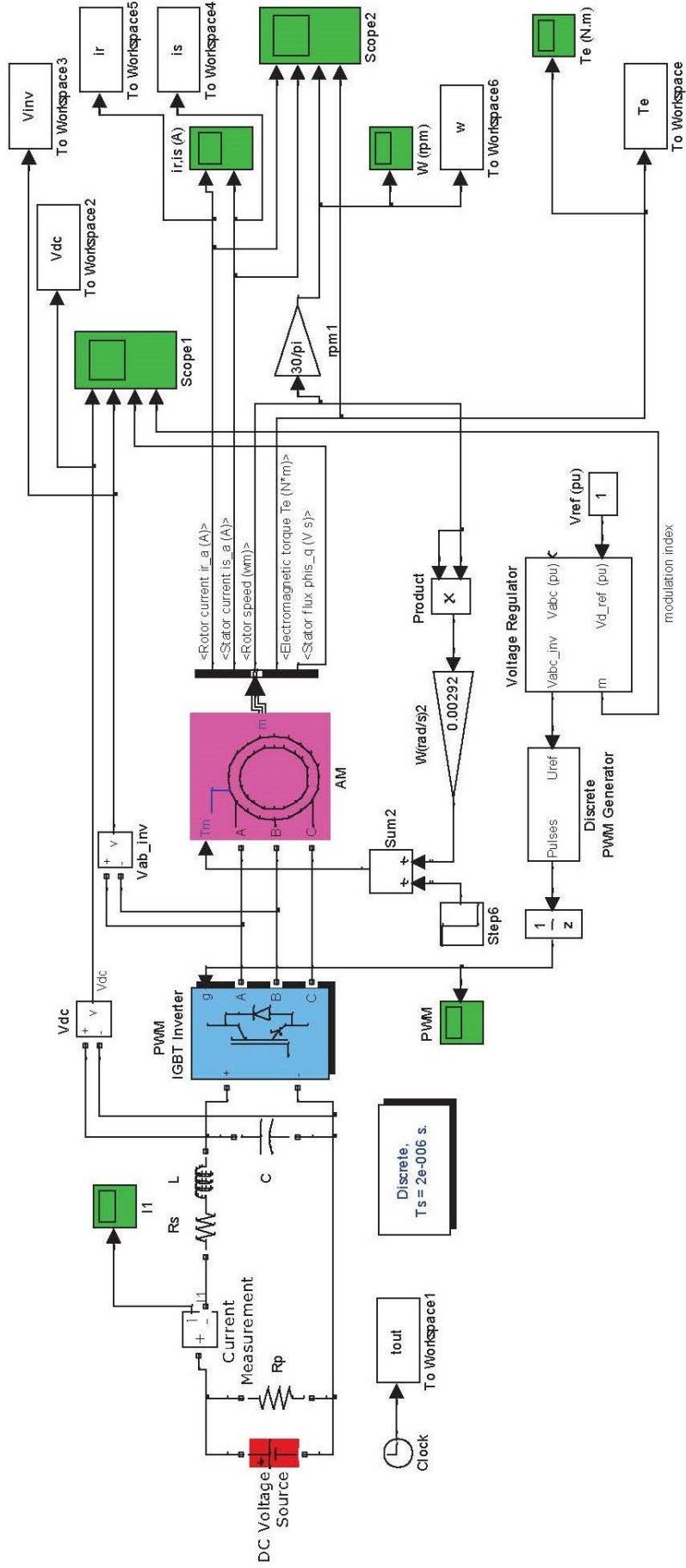


Рис. 3.21. Узагальнена комп'ютерна модель системи

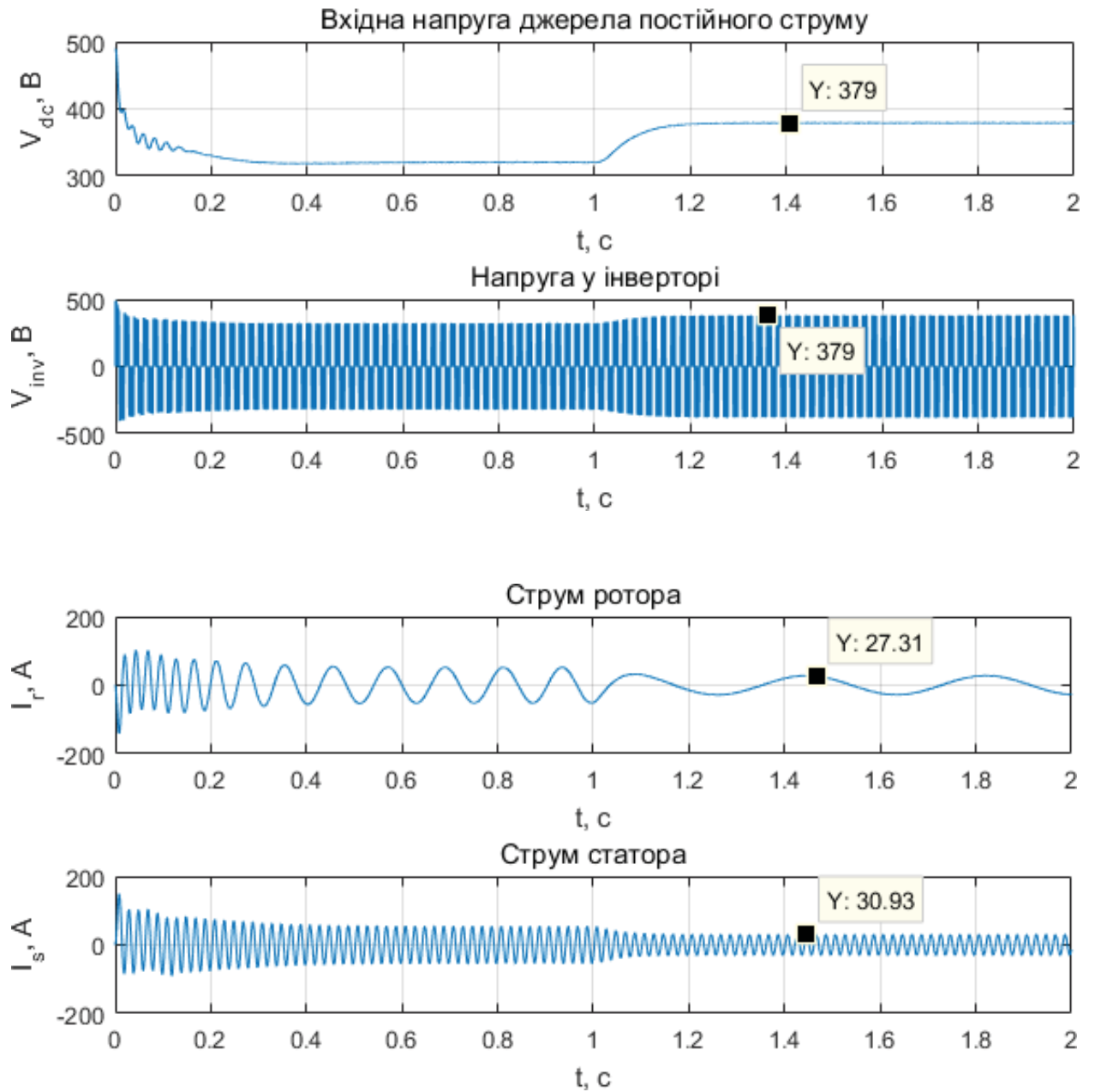


Рис. 3.22. Графіки перехідних процесів струму та напруги асинхронного двигуна при номінальному значенні напруги

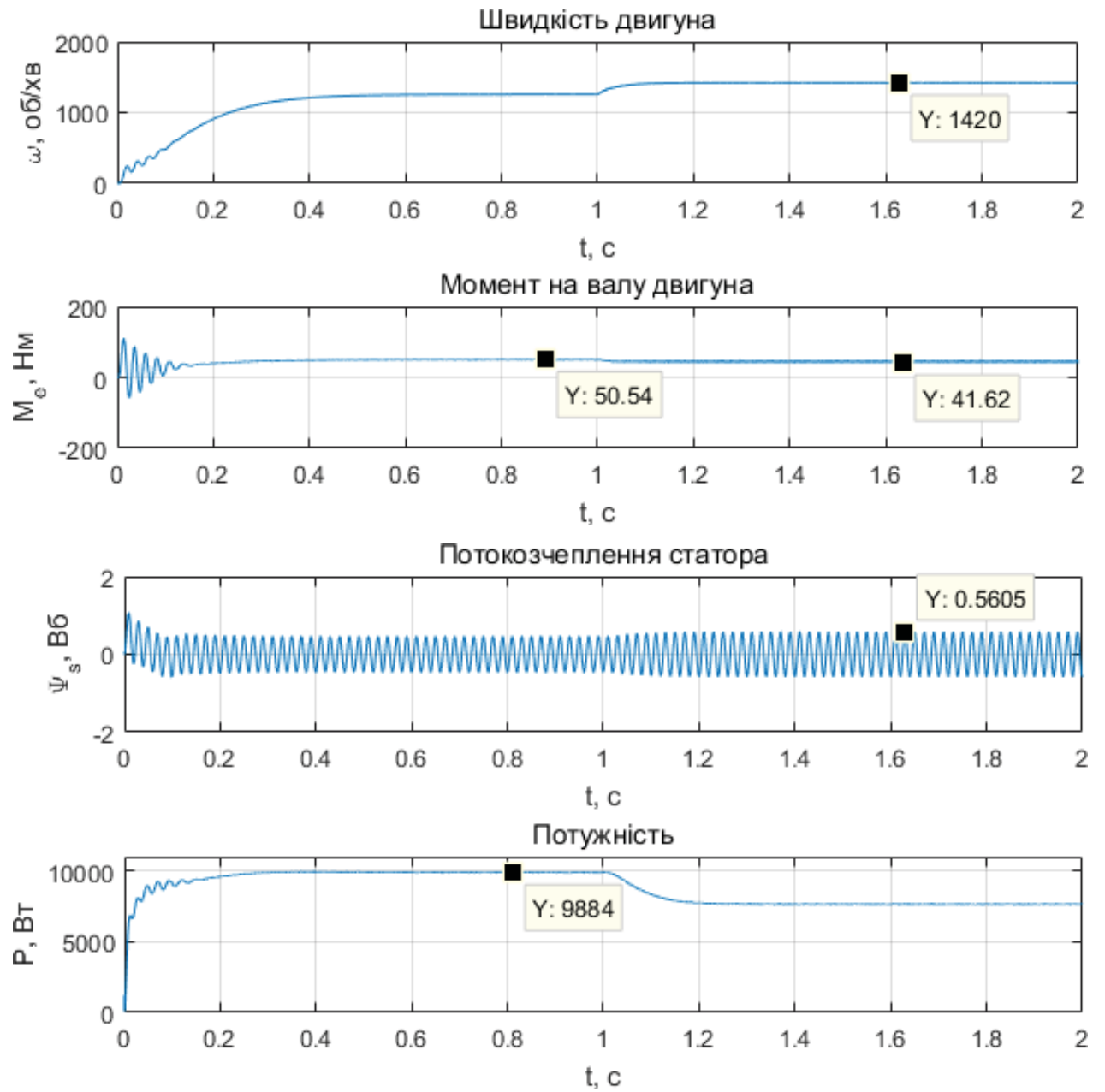


Рис.3.23. Графіки перехідних процесів швидкості обертання валу, моменту, потокзчеплення та потужності асинхронного двигуна при номінальному значенні напруги

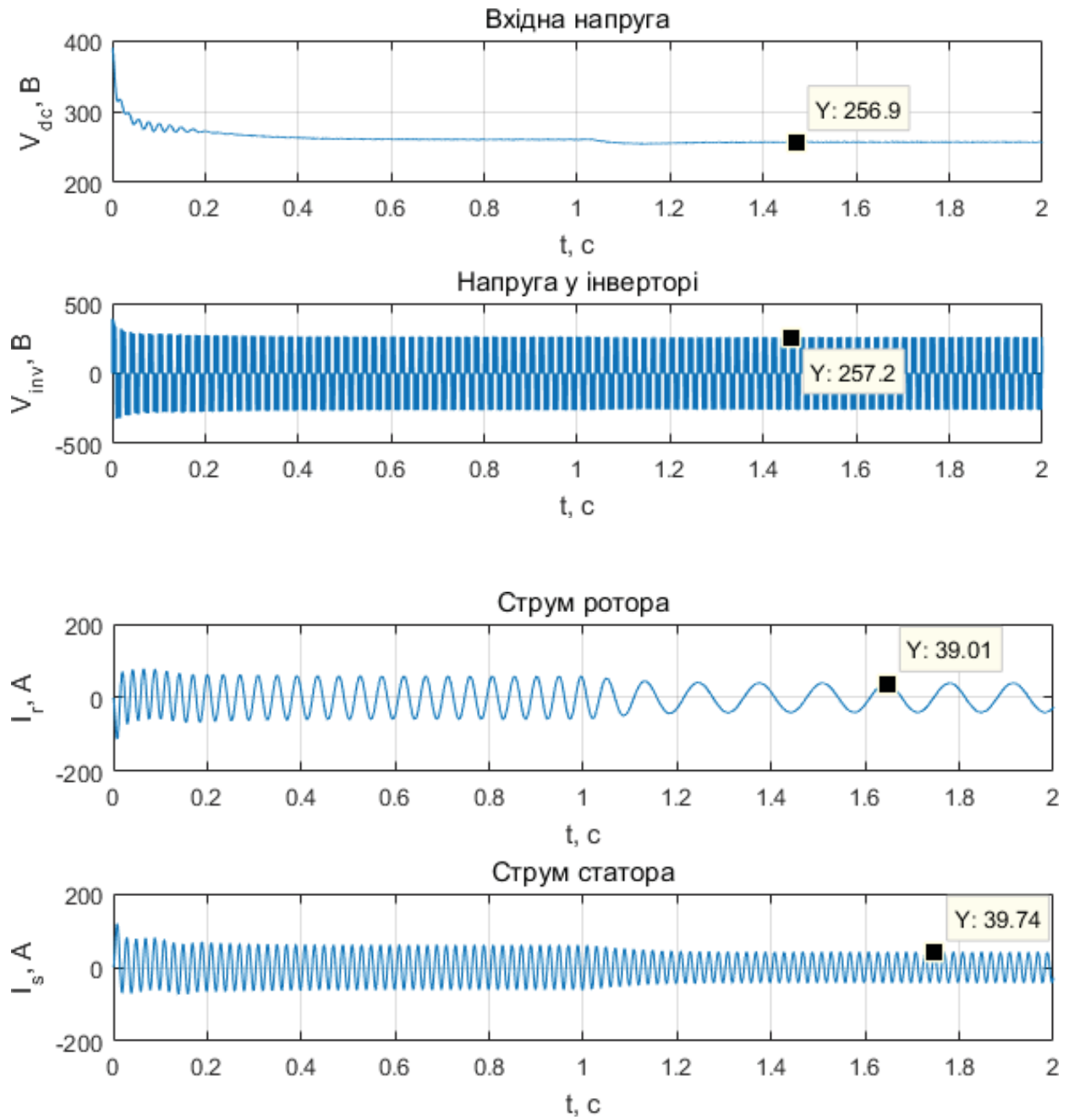


Рис. 3.24. Графіки перехідних процесів струму та напруги асинхронного двигуна при зниженій напрузі

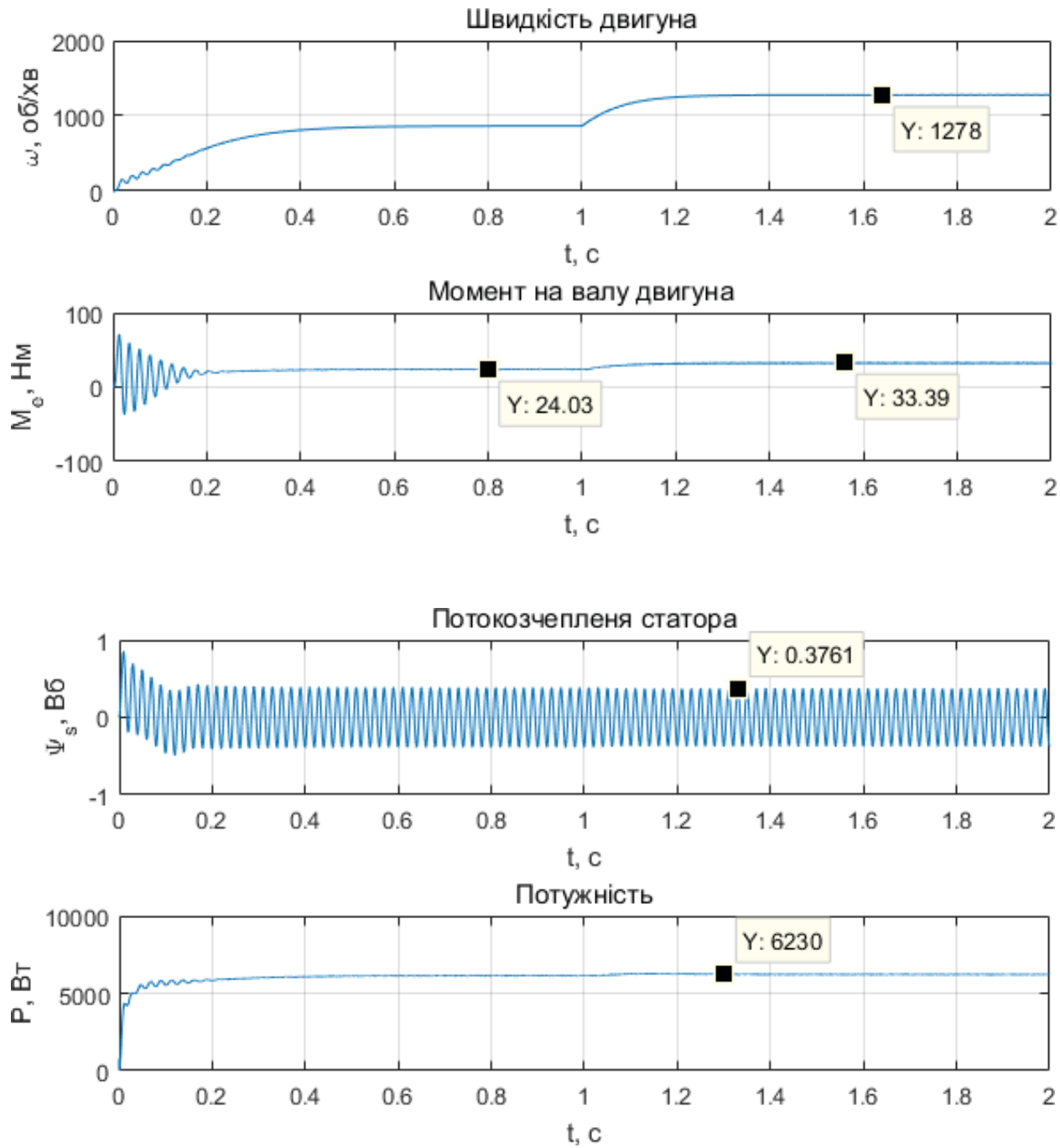


Рис.3.25. Графіки перехідних процесів швидкості обертання валу, моменту, потокозчеплення та потужності асинхронного двигуна при номінальному значенні напруги

Висновки по розділу

1. Проведено аналіз основних процесів, що відбуваються в насосах, електродвигунах та електромеханічних системах. Розроблено математичні моделі та структурну схему системи частотного керування АД.

2. У середовищі MATLAB/Simulink створено детальну модель фотопанелі з урахуванням технологічних особливостей фотоелементів. Тобто параметри фотомодуля підібрані відповідно до їх залежності від освітленості та температури. Це дозволяє використовувати модель для будь-якого типу фотомодулів і визначати необхідні характеристики за різних умов освітлення й температури, зокрема вольт-амперні ($I(V)$) та потужнісні ($P(V)$) характеристики.

3. Розроблена модель є універсальною і дає можливість проводити комп'ютерне моделювання роботи фотоелектричних систем за різноманітних реальних умов. Це спрощує проектування та налагодження таких систем без потреби в проведенні трудомістких натурних випробувань.

4. Проведені дослідження показали, що запропонована в роботі система є працездатною, а її характеристики близькі до номінальних значень.

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ

Роботи на електроустановках з точки зору безпеки поділяють на три категорії згідно нормативних документів:

1) роботи із зняттям напруги, що проводяться на установках або їх частинах після відключення живлення та унеможливлення доступу до струмоведучих елементів;

2) роботи без відключення напруги безпосередньо на струмоведучих частинах або поруч з ними;

3) роботи без зняття напруги на неструмоведучих елементах під напругою.

За наявності одночасних робіт на установках напругою до і понад 1000 В категорія визначається виходячи з вищого рівня.

Роботи без зняття напруги на струмоведучих частинах чи поряд з ними мають проводитись щонайменше двома фахівцями: керівник з групою допуску IV, інші - з групою III. Такі роботи вимагають додаткових запобіжних заходів.

Виконуючи роботи без зняття напруги на струмоведучих частинах або поряд з ними в електроустановках з напругою понад 1000 В, обов'язковим є застосування засобів захисту працівника від струмоведучих елементів чи заземлення. За умови ізоляції від землі такі роботи здійснюють згідно спецінструкцій або технологічних карт із визначеними запобіжними заходами.

Під час робіт без зняття напруги на струмоведучих частинах або поряд з ними в установках до 1000 В необхідно дотримуватись наступних вимог:

- ізолювати сусідні струмоведучі елементи під напругою, до яких можливий випадковий дотик;

- працювати у діелектричному взутті, стоячи на ізолювальних підставках чи килимі;

- використовувати інструмент з ізолювальними руків'ями, а також ізолюваним стрижнем (для викруток); за відсутності такого інструменту слід застосовувати діелектричні рукавички.

Під час робіт із застосуванням ізолювальних засобів захисту на струмоведучих частинах під напругою необхідно дотримуватись таких вимог:

- тримати ізолювальні елементи цих засобів за рукави до обмежувального кільця;

- розташовувати ізолювальні частини таким чином, щоб уникнути небезпеки перекриття ізоляції між фазами чи замикання на землю;

- використовувати лише сухі та чисті ізолювальні елементи із неушкодженим лаковим покриттям.

За наявності дефектів користуватися ними забороняється.

Під час застосування електрозахисних засобів (штанги, кліщі, вимірювальні прилади) допускається наближення працівника до струмоведучих частин на безпечну відстань.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Проведено огляд систем автономного енергозабезпечення, зокрема фотоелектричних систем. Представлено їх класифікацію залежно від методу підключення до електромережі. Також здійснено аналіз переваг і недоліків таких систем енергопостачання.

2. Проведено аналітичний огляд ефективності фотоелектричних панелей, а також розглянуто методи відстеження максимальної потужності енергосистеми. Надано класифікацію алгоритмів управління. Встановлено, що однією з ключових властивостей фотоелектричних систем є їх здатність конвертувати сонячне випромінювання в електричну енергію. За останні роки цей процес став дедалі більш ефективним завдяки технологічному прогресу в галузі сонячної енергетики.

3. Проведені дослідження показали, що гібридні системи енергозабезпечення поєднують різні джерела енергії, такі як сонячні панелі, вітряки і електромережі, для забезпечення стабільного і неперервного живлення. Це може бути особливо важливо в регіонах з непостійним доступом до електроенергії.

4. Використання ефективних алгоритмів MPPT є важливим для підвищення продуктивності та економічності фотоелектричних систем. Подальші дослідження в цій сфері спрямовані як на розробку нових підходів, так і на вдосконалення існуючих методів з метою досягнення максимального вилучення енергії за будь-яких умов функціонування.

5. Автономні фотоелектричні системи водопостачання є перспективним напрямком забезпечення потреб у воді віддалених споживачів з використанням екологічно чистої сонячної енергії. Ключовими компонентами таких систем є сонячні панелі, насосне обладнання, системи накопичення та перетворення електроенергії, а також засоби автоматизації та контролю для оптимізації режимів роботи.

6. Автоматизація станції дозволить досягти значної економії ресурсів та поліпшити техніко-економічні показники системи. Таким чином, застосування сучасних автоматизованих систем керування є доцільним та ефективним рішенням для даного технологічного процесу.

7. Проведено аналіз основних процесів, що відбуваються в насосах, електродвигунах та електромеханічних системах. Розроблено математичні моделі та структурну схему системи частотного керування АД.

8. У середовищі MATLAB/Simulink створено детальну модель фотопанелі з урахуванням технологічних особливостей фотоелементів. Тобто параметри фотомодуля підібрані відповідно до їх залежності від освітленості та температури. Це дозволяє використовувати модель для будь-якого типу фотомодулів і визначати необхідні характеристики за різних умов освітлення й температури, зокрема вольт-амперні ($I(V)$) та потужнісні ($P(V)$) характеристики.

9. Розроблена модель є універсальною і дає можливість проводити комп'ютерне моделювання роботи фотоелектричних систем за різноманітних реальних умов. Це спрощує проектування та налагодження таких систем без потреби в проведенні трудомістких натурних випробувань.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кваліфікаційна робота магістра : метод. рекомендації до змісту, структури та оформлення кваліфікаційної роб. : для студ. спец. 141 - Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / [уклад. П. Г. Плешков, К. Г. Петрова, Н. Ю. Гарасьова та ін.] ; М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. - Кропивницький : ЦНТУ, 2023. - 74 с.
2. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи для здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» за освітньо-професійними програмами «Електротехнічні системи електроспоживання» та «Енергетичний менеджмент» / [П. Г. Плешков, Н. Ю. Гарасьова, А. І. Котиш] ; М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. – Кропивницький : ЦНТУ, 2017 - 48 с.
3. Шкрабець, Ф. П. Основи електропостачання : навч. посіб. / Ф. П. Шкрабець, П. Г. Плешков. - Кіровоград : РВЛ КНТУ, 2010. - 408 с.
4. Основи ефективного використання електричної енергії в системах електроспоживання промислових підприємств: навч. посіб. / [О. І. Соловей, В. П. Розен, П. Г. Плешков та ін.]; Кіровоград. нац. техн. ун-т. – Черкаси: Чабаненко Ю., 2015. – 316 с.
5. Правила улаштування електроустановок. – К.: Мінрегіонвугілля України, 2017. – 617 с.
6. Бурбело М.Й. Проектування систем електропостачання. Приклади розрахунків / Бурбело М.Й. – Вінниця: Універсум-Вінниця, 2005. – 148 с
7. A. O. Omole, "Analysis, modeling and simulation of optimal power tracking of multiple-modules of paralleled solar cell systems," Master of Science Thesis, The Florida State University College of Engineering, 2006.
8. K. H. Hussein, et al., "Maximum photovoltaic power tracking: an

algorithm for rapidly changing atmospheric conditions," *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings-*, vol. 142, pp. 59-64, 1995.

9. E. Koutroulis, et al., "Development of a microcontroller-based, photovoltaic maximum power point tracking control system," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 16, pp. 46-54, 2001.

10. L. Fangrui, et al., "Comparison of P&O and hill climbing MPPT methods for grid-connected PV converter," in *Industrial Electronics and Applications, 2008. ICIEA 2008. 3rd IEEE Conference on*, 2008, pp. 804-807.

11. T. Noguchi, et al., "Short-current pulse-based maximum-power-point tracking method for multiple photovoltaic-and-converter module system," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 49, pp. 217-223, 2002.

12. J. Ahmad, "A fractional open circuit voltage based maximum power point tracker for photovoltaic arrays," in *Software Technology and Engineering (ICSTE), 2010 2nd International Conference on*, 2010, pp. V1-247-V1-250.

13. V. Salas, et al., "Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 90, pp. 1555-1578, 2006.

14. T. Hiyama, et al., "Identification of optimal operating point of PV modules using neural network for real time maximum power tracking control," *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol. 10, pp. 360-367, 1995.

15. R. M. Hilloowala and A. M. Sharaf, "A rule-based fuzzy logic controller for a PWM inverter in a stand alone wind energy conversion scheme," *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol. 32, pp. 57-65, 1996.

16. R. Faranda and S. Leva, "Energy comparison of MPPT techniques for PV Systems," *WSEAS transactions on power systems*, vol. 3, pp. 446-455, 2008.

17. R. Faranda and S. Leva, "Energy comparison of MPPT techniques for PV Systems," *WSEAS transactions on power systems*, vol. 3, pp. 446-455, 2008.

18. N. Khaehintung, et al., "FPGA implementation of MPPT using variable step-size P&O algorithm for PV applications," in *Communications and*

Information Technologies, 2006. ISCIT'06. International Symposium on, 2006, pp. 212-215.

19. B. Subudhi and R. Pradhan, "A comparative study on maximum power point tracking techniques for photovoltaic power systems," *Sustainable Energy, IEEE Transactions on*, vol. 4, pp. 89-98, 2013.

20. P. Bhatnagar and R. Nema, "Maximum power point tracking control techniques: State-of-the-art in photovoltaic applications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 23, pp. 224-241, 2013.

21. M. A. Eltawil and Z. Zhao, "MPPT techniques for photovoltaic applications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 25, pp. 793-813, 2013.

22. X. Weidong and W. G. Dunford, "A modified adaptive hill climbing MPPT method for photovoltaic power systems," in *Power Electronics Specialists Conference, 2004. PESC 04. 2004 IEEE 35th Annual*, 2004, pp. 1957-1963 Vol.3.

23. D. P. Hohm and M. E. Ropp, "Comparative study of maximum power point tracking algorithms using an experimental, programmable, maximum power point tracking test bed," in *Photovoltaic Specialists Conference, 2000. Conference Record of the Twenty-Eighth IEEE*, 2000, pp. 1699-1702.

24. T. Tafticht, et al., "A new MPPT method for photovoltaic systems used for hydrogen production," *COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, vol. 26, pp. 62-74, 2007.

25. T. Tafticht, et al., "An improved maximum power point tracking method for photovoltaic systems," *Renewable Energy*, vol. 33, pp. 1508-1516, 2008.