

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Шелест Дмитро Андрійович

УДК 621.314

ДИСЕРТАЦІЯ
ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В МЕРЕЖІ З
СОНЯЧНИМИ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯМИ В РЕЖИМІ ЗНИЖЕННЯ
ГЕНЕРОВАНОЇ ПОТУЖНОСТІ

Спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Галузь знань 14 – Електрична інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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



Д.А. Шелест

Науковий керівник

Хоменко Ігор Васильович

кандидат технічних наук, доцент

Харків – 2024

АНОТАЦІЯ

Шелест Д.А. Підвищення якості електричної енергії в мережі з сонячними електростанціями в режимі зниження генерованої потужності. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії (Ph.D.) за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка (14 – Електрична інженерія). – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2024.

Дисертаційна робота присвячена розробці методів та засобів для покращення показників якості електричної енергії генерованої сонячними електростанціями до трифазних електричних мереж, а саме дозволяє знизити долю емісії вищих гармонік струмів та реактивної потужності.

Метою дисертаційної роботи є підвищення показників якості електричної енергії генерованої сонячною електростанцією до трифазних електричних мереж в режимі зниження генерованої потужності.

Об'єкт дослідження – процес передачі електричної енергії до трифазних електричних мереж сонячними електростанціями в режимі зниженої генерованої потужності.

Предмет дослідження – параметри якості електричної енергії в мережах з сонячними електростанціями в режимі зниженої генерованої потужності.

У *вступі* обґрунтовано актуальність теми дисертації, визначені задачі дослідження, показано зв'язок роботи з науковими темами, наведено дані про наукову новизну, практичне значення, апробацію результатів та публікації.

У *першому розділі* виконано аналіз енергетичних параметрів сонячних електростанцій: залежностей генерованої потужності сонячних панелей від сонячної радіації та температури, аналіз характеристик деградації сонячних панелей, проведено огляд конфігурацій сонячних панелей в складі сонячних електростанцій та напівпровідникових перетворювачів силових схем напівпровідникових перетворювачів, що забезпечують процеси відбору

максимальної потужності сонячних панелей та передачу потужності до трифазних електричних мереж. Проведено аналіз вимог вітчизняних та міжнародних стандартів щодо вимог параметрів якості електричної енергії та вимоги до емісії вищих гармонік струмів, генерованих сонячними електростанціями до трифазних електричних мереж. Представлено проблему зниження якості електроенергії, генерованою сонячними електростанціями при зниженні рівня генерованої потужності. Поставлено завдання до наступних розділів.

У *другому розділі* запропоновано структури сонячних електростанцій, що забезпечують передачу потужності від блоків сонячних панелей до трифазних електричних мереж на базі інвертора напруги та інвертора струму. Досліджено роботу узгоджуючих DC/DC перетворювачів, що забезпечують режим відбору максимальної потужності. Синтезовано математичну модель ВАХ сонячних панелей та систему відбору максимальної потужності, що реалізується DC/DC перетворювачем. Запропоновано системи прямого та непрямого визначення точки максимальної потужності, що може бути відібрана перетворювачами від сонячних панелей. Запропоновано компенсаційний алгоритм керування узгоджуючими перетворювачами сонячної електростанції, що забезпечує зниження пульсацій напруги ланок постійного струму сонячної електростанції, яка є живлячою напругою мережевого інвертора, чим досягається покращення якості електроенергії генерованої до трифазних електричних мереж.

У *третьому розділі* виконано дослідження особливостей роботи мережевих інверторів сонячної електростанції, що забезпечують передачу електричної енергії в трифазні електричні мережі в режимі зниження генерованої потужності. Запропоновано систему керування мережевим інвертором струму фотоелектричної електростанції (ФЕС), що забезпечує передачу електроенергії з коефіцієнтом потужності близьким до одиниці та формою струмів близьких до синусоїдальних. Визначені аналітичні залежності, що визначають залежності параметрів якості генерованої електричної енергії від генерованої потужності.

Запропоновано методи підвищення параметрів якості електроенергії в режимі зниження генерованої потужності.

У четвертому розділі виконано розробку комп'ютерної імітаційної моделі, що описує енергетичні процеси в сонячній електростанції з узгоджуючим перетворювачем та мережевим інвертором. Проведено дослідження параметрів якості електричної енергії, що генерується сонячними електростанціями до трифазної електричної мережі. Визначена аналітична умова реалізації коефіцієнту потужності близького до одиниці в режимі зниження рівня генерованої потужності. Отримані результати комп'ютерного моделювання процесу передачі електроенергії від сонячної електростанції на базі трифазного інвертора струму та інвертора напруги з ШІМ до трифазної електричної мережі підтвердили реалізацію високих показників якості електроенергії, генерованої до трифазної електричної мережі, в режимі зниження генерованої потужності.

В п'ятому розділі виконано дослідження мережевого інвертора ФЕС, що працює в режимі автономного живлення. Визначено вимоги, що пред'являються до параметрів напруги генерованої сонячної електростанції та проведено аналіз схемних рішень інверторів, що задовольняють вказані вимоги. Визначено, що при реалізації в ФЕС автономного живлення дворівневого інвертора напруги та застосування LC фільтра можливим є виникнення значення пускового струму, зумовленого зарядом конденсатора фільтра, що може спричинити вихід з ладу силових транзисторів мережі. Розроблена методики розрахунку LC фільтра, яка дозволяє визначити параметрів фільтра за критеріями обмеження пускового струму та забезпечення потрібної якості вихідної напруги. Для підтвердження розробленої методики виконано комп'ютерне моделювання та проведені фізичні досліді.

У висновках наведено основні результати роботи щодо вирішення поставлених задач дослідження.

В дисертації отримані наступні *наукові результати*:

1. *Отримано* подальшого розвитку метод непрямого визначення точки максимальної потужності сонячних панелей, який відрізняється від відомих

визначенням максимальної вихідної напруги узгоджувальних перетворювачів при фіксованому значенні вихідного струму, що дає можливість спростити системи керування фотоенергетичної системи, апаратну реалізацію системи керування узгоджуючими перетворювачами та знижує її вартість.

2. *Вперше* запропоновано метод компенсаційного керування узгоджуючими перетворювачами сонячних електростанцій, що реалізує взаємну синхронізацію каналів керування окремих узгоджуючих перетворювачів в системі відбору потужності та на відміну від відомих забезпечує взаємну компенсацію пульсацій напруги в ланці постійного струму сонячної електростанції від окремих узгоджуючих перетворювачів, що дозволяє досягти зниження пульсацій напруги в ланці постійного струму, чим досягається подальше покращення якості електроенергії генерованої до трифазної електричної мережі.

3. *Вперше* запропоновано метод частотно-адаптивного керування мережевим інвертором напруги сонячної електростанція, який на відміну від відомих дозволяє забезпечити покращенні показники якості електричної енергії генерованої до трифазної електричної мережі в режимі зниження генерованої потужності.

4. *Подальший* розвиток отримав метод управління трифазним інвертором струму з синусоїдальної ШІМ, який відрізняється від існуючих у корекції завдання фазних струмів мережі, що дозволяє знизити пульсації потужності у ланці постійного струму інвертора, при роботі ФЕС на потужності у ланці постійного струму інвертора, при роботі ФЕС на несиметричну трифазну мережу, на 50 % та коефіцієнт нелінійних спотворень мережних струмів на 60 % на відміну від систем управління, не враховують несиметрію мережевих напруг.

5. *Вперше* розроблено метод визначення параметрів LC фільтра інвертора напруги ФЕС, що працює в режимі автономного джерела живлення, який на відміну від існуючих дозволяє визначити параметри фільтра, з урахуванням частоти ШІМ модуляції інвертора, допустимого струму ключів інвертора та

вимог параметрів якості вихідної напруги з коефіцієнтом гармонійних спотворень менше 5%.

Достовірність теоретичних дисертаційних досліджень підтверджено експериментами на обладнанні конструкторського бюро ТОВ «АКУТЕК». Експериментальні результати показали високу ефективність розроблених методів та інструментів для покращення показників якості електроенергії генерованої мережевими інверторами напруги, що впливають на додаткові втрати в електричних мережах від вищих гармонік струмів. Використання розроблених методів дозволило значно підвищити показники якості електроенергії, генерованої в мережі та знизити пускові струми перетворювача.

Практичне значення отриманих результатів для електроенергетичної галузі полягає в наступному:

- розроблено методику розрахунку основних параметрів послідовної фотоенергетичної системи, що забезпечує передачу електричної енергії до трифазної електричної мережі;
- запропоновано методику компенсації пульсацій напруги у ланці постійного струму сонячної електростанції, що забезпечує покращення показників якості електричної енергії генерованої до трифазної електричної мережі;
- запропоновано методику керування мережевим інвертором напруги ФЕС, що забезпечує підвищення показників якості електричної енергії в режимі зниженої генерованої потужності;
- розроблені імітаційні комп'ютерні моделі сонячних електростанцій, що дозволяють проводити дослідження показників якості електричної енергії, проводити визначення втрат потужності в силових перетворювачах сонячних електростанцій, досліджувати та проводити аналіз роботи регуляторів та інші дослідження;
- розроблено методику визначення параметрів LC фільтра інвертора напруги ФЕС, що працює в режимі автономного джерела живлення, яка дозволяє визначити параметри фільтра, з урахуванням частоти ШІМ модуляції інвертора,

допустимого струму ключів інвертора та вимог параметрів якості вихідної напруги з коефіцієнтом гармонійних спотворень менше 5%.

Результати дисертаційної роботи використані на ТОВ «АКУТЕК» при розробці мережевих інверторів напруги та перетворювачів частоти з покращеними показниками якості вихідної напруги (акт про впровадження від 15.04.2024 р.) та в навчальному процесі на кафедрі «Передача електричної енергії» Національного технічного університету «ХПІ» (акт про впровадження 11.09.2023 р.).

Ключові слова: енергетика, відновлювальні джерела електроенергії, сонячна енергетика, параметри якості електроенергії, сонячні електростанції, сонячні панелі, інвертор напруги, інвертор струму, система керування, реактивна потужність, енергоефективність, втрати потужності, математична модель, комп'ютерна модель.

Список публікацій здобувача

Наукові праці, які відображають основні наукові результати дисертації:

1. Shelest D. Modeling of thermal ventilation processes in printed circuit boards of power sources. *Smart Technologies in Urban Engineering* : Book Chapter Lecture Notes in Networks and Systems / O. Plakhtii, V. Nerubatskyi, D. Shelest, D. Hordiienko, I. Khomenko: Springer. 2023. Vol. 808. P. 294-304. (SCOPUS, Switzerland)

2. Шелест Д. Дослідження впливу скін-ефекту на втрати потужності в системах тягового електропостачання постійного струму / О. Плахтій, В. Нерубацький, Д. Шелест, В. Цибульник // *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. Харків, 2021. №4. С. 3-14. (Б)

3. Шелест Д. А. Дослідження системи керування пристрою плавного пуску асинхронного двигуна / О.А. Плахтій, В.П. Нерубацький, Д.А. Гордієнко, Д.А. Шелест, А.В. Синявський // *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. Харків, 2022. №202. С. 62-77. (Б)

4. Шелест Д.А. Динаміка, концепції та перспективи розвитку вітрової енергетики / О.А. Плахтій, В.П. Нерубацький, Д.А. Гордієнко, Д.А. Шелест, А.В. Синявський // *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. Харків, 2022. № 4. С. 3-14. (Б)

5. Шелест Д.А. Огляд конфігурації і стратегії керування мікромережами на основі силової електроніки / В.П. Нерубацький, О.А. Плахтій, Д.А. Гордієнко, А.В. Синявський, Д.А. Шелест // *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. Харків, 2023. Вип. 204. С. 101-115. (Б)

6. Шелест Д. Дослідження передачі електроенергії сонячної електростанції в трифазну електричну мережу / О. Плахтій, І. Хоменко, Д. Шелест, А. Синявський // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика. Харків, 2023. Вип. 2(10), С. 38-44. (Б)

7. Шелест Д.А. Аналіз режимів роботи електричних мереж з урахуванням впливу зубцевих гармонік / І.В. Хоменко, О.А. Плахтій, Д.А. Шелест // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. Харків, 2023. Вип. 2(7). С. 77-84. (Б)

Наукові роботи, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

8. Шелест Д.А. Визначення дії скін-ефекту на додаткові втрати потужності від вищих гармонік в електричних мережах // В.П. Нерубацький, О.А. Плахтій, Д.А. Гордієнко, Д.А. Шелест // *Інтелектуальні транспортні технології: тези доповідей 2-ої Міжнародної науково-технічної конференції* (Харків, 27–29 квітня 2021 р.). Харків: УкрДУЗТ, 2021. С. 139–141.

9. Shelest D. Approximation of the dependence of the active resistance of the conductor on the frequency for the high frequency zone / Scherbak Y., Plakhtii O., Nerubatskyi V., Hordiienko D., Shelest D., Semenenko Y. // *IEEE 19th International Conference on Smart Technologies (EUROCON)* (м. Львів, 6-8 липня 2021 р.). Lviv, Lviv polytechnic National University, 2021. – P. 438-442.

10. Shelest D. Research of energy characteristics of three-phase voltage source inverters with modified pulse width modulation / Plakhtii O., Nerubatskyi V., Mykhalkiv S., Hordiienko D., Shelest D., Khomenko I. // *IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)* (м. Харків, 13–17 вересня 2021 р.). Kharkiv, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», 2021. – P. 422-427.

11. Shelest D. Thermal-Powerloss Approximation Method for Determination of Efficiency in Semiconductor Devices / O. Plakhtii, V. Nerubatskyi, D. Hordiienko, D. Sushko, A. Syniavskyi, D. Shelest // *IEEE 41st International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)* (м. Київ, 10-14 жовтня 2022 р.). Kyiv, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», 2022. – P. 456-461.

12. Шелест Д.А. Віброакустичні засоби діагностики стану силових трансформаторів / Хоменко І. В., Шелест Д. А. // *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я (MicroCAD)* : тези доповідей XXX Міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2022 (м. Харків, 19–22 жовтня 2022 р.). – Харків: Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», 2022. – С. 88.

13. Шелест Д.А. Дослідження механізму вібрації та шумоутворення осердя трансформатора, викликаного магнітострикцією листа з електротехнічної сталі / І.В. Хоменко, Д.А. Шелест // *Енергоефективність та енергетична безпека електроенергетичних систем (EEES-2020)* : збірник наукових праць VI Міжнародної науково-технічної конференції (м. Харків, 20–23 грудня 2022 р.). – Харків: Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», 2022. – С. 75–78.

14. Shelest D. Research of Single-Phase Current Rectifier in the Rectification and Recuperation Modes / O. Plakhtii, N. Karpenko, K. Trubchaninova, M. Filipieva, D. Shelest, K. Ivakina // *IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES)* (м. Кременчук, 27-30 вересня 2023 р.). Kremenchuk, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, 2022. – P. 1-6.

15. Shelest D. Research and calculation of the levels of higher harmonics of

rotary electric machines in active-adaptive networks / Khomenko I., Nerubatskyi V., Plakhtii O., Hordiienko D., Shelest D. // *IOP 4th international conference on sustainable futures: environmental, technological, social and economic matters (ICSF)* (м. Кривий Ріг, 22-26 травня). Kryvyi Rih, Kryvyi rih State Pedagogical University, 2024. Vol.1254. – P. 1-15.

Патент України на корисну модель:

16. Патент UA 151131, МПК H02J 3/26 (2021.12). Трифазний трирівневий силовий активний фільтр для трифазної трипровідної електричної мережі / О.А. Плахтій, В. П. Нерубацький, Д. А. Гордієнко, С. М. Тихонравов, С. Б. Кочук, К. Ф. Фомичов, Д. А. Шелест // Опубл. 08.06.2022, бюл. № 23. 12с.

ABSTRACT

Shelest D.A. Improving the quality of electric energy in a network with solar power plants in the mode of reducing the generated power. – Qualifying scientific work on manuscript rights.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 141 «Electrical Engineering, Power Engineering and Electromechanics» (14 – Electrical engineering). – National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, 2024.

The dissertation is devoted to the development of methods and means for improving the quality indicators of electrical energy generated by solar power plants for three-phase electrical networks, namely, it allows to reduce the rate of emission of higher harmonics of currents and reactive power.

The aim of the dissertation is to increase the quality indicators of the electric energy generated by the solar power plant to three-phase electric networks in the mode of reducing the generated power.

The object of research is the process of transferring electrical energy to three-phase electrical networks by solar power plants in the mode of reduced generated power.

The subject of the study is the parameters of the quality of electric energy in networks with solar power plants in the mode of reduced generated power.

The introduction substantiates the relevance of the dissertation topic, defines research tasks, shows the connection of work with scientific topics, provides data on scientific novelty, practical significance, approval of results and publications.

In *the first chapter*, an analysis of the energy parameters of solar power plants is performed: the dependence of the generated power of solar panels on solar radiation, temperature and degradation characteristics of solar panels, an overview of the configurations of solar panels as part of solar power plants and semiconductor converters of power circuits of semiconductor converters that provide the processes of selecting the maximum power of solar panels and power transmission to three-phase electrical networks. The analysis of the requirements of domestic and international standards

regarding the requirements of the parameters of the quality of electric energy and the requirements for the emission of higher harmonics of currents generated by solar power plants to three-phase electric networks was carried out. The problem of reducing the quality of electricity generated by solar power plants when the level of generated power is reduced is presented. Tasks are set for the following sections.

The *second chapter* presents the structures of solar power plants that provide power transmission from solar panel units to three-phase electrical networks based on a voltage inverter and a current inverter. The study of matching *DC/DC* converters providing the maximum power sampling mode is presented. A mathematical model of the I-V characteristics of solar panels and a maximum power selection system implemented by a *DC/DC* converter are presented. Systems of direct and indirect determination of the point of maximum power, which can be selected by converters from solar panels, are presented. A compensatory algorithm for controlling the matching converters of solar power plants is proposed, which ensures a reduction in the voltage ripples of the direct current lines of the solar power plant, which is the supply voltage of the grid inverter, which improves the quality of electricity generated for three-phase electrical networks.

The *third chapter* presents the results of the study of the features of the network inverters of the solar power plant, which ensure the transmission of electrical energy in three-phase electrical networks. A control system for a grid inverter of a photovoltaic power plant (FES) is proposed, which ensures the transmission of electricity with a power factor close to unity and a shape of currents close to sinusoidal. Analytical dependences that determine the dependence of the quality parameters of the generated electrical energy on the generated power are determined. Methods of increasing the parameters of the quality of electricity in the mode of reducing the generated power are proposed.

The *fourth chapter* presents the results of computer modeling of the process of electricity transmission from a solar power plant based on a three-phase current inverter and a PWM voltage inverter to a three-phase electrical network. The results of the study of the parameters of the quality of electric energy generated by solar power plants to

the three-phase electric network are presented. The analytical condition for realizing a power factor close to unity in the reduced mode is determined

In *fifth chapter*, a study of a grid-tied PV inverter operating in the autonomous power supply mode was performed. The requirements for the voltage parameters of the generated solar power plant are determined and the circuit solutions of inverters that meet these requirements are analysed. It is determined that when implementing a two-level voltage inverter and using an LC filter in a PV power plant, it is possible to have a value of the inrush current caused by the charge of the filter capacitor, which can lead to the failure of the power transistors of the grid. A methodology has been developed for calculating the LC filter, which allows determining the filter parameters according to the criteria of limiting the inrush current and ensuring the required quality of the output voltage. To confirm the developed methodology, computer modelling and physical experiments were performed.

The conclusions present the main results of the work on solving the research objectives.

The following *scientific results* were obtained as a result of the study:

1. The method of indirect determination of the maximum power point of solar panels has been further developed, which differs from the known ones by determining the maximum output voltage of matching converters at a fixed value of the output current, which makes it possible to simplify the control systems of the photovoltaic system, the hardware implementation of the control system for matching converters and reduces its cost.
2. For the first time, a method of compensatory control of matching converters of solar power plants is proposed, which implements mutual synchronisation of control channels of individual matching converters in the power take-off system and, unlike the known ones, provides mutual compensation of voltage fluctuations in the DC link of a solar power plant from individual matching converters, which allows to achieve reduction of voltage fluctuations in the DC link, which further improves the quality of electricity generated by three-phase.

3. For the first time, a method of frequency-adaptive control of the grid-tie voltage inverter of a solar power plant is proposed, which, unlike the known ones, allows to ensure improved quality of electricity generated to the three-phase power grid in the mode of reducing the generated power.

4. The method of controlling a three-phase current inverter with sinusoidal PWM, which differs from the existing ones in correcting the task of the grid phase currents, was further developed, which allows reducing power fluctuations in the DC link of the inverter, when operating the PPES on the power in the DC link of the inverter, when operating the PPES on an asymmetric three-phase network, by 50 % and the coefficient of nonlinear distortion of mains currents by 60 %, unlike control systems that do not take into account the asymmetry of mains voltages.

5. For the first time, a method for determining the parameters of the LC filter of a PV power inverter operating in the mode of an autonomous power supply has been developed, which, unlike the existing ones, allows determining the filter parameters, taking into account the frequency of PWM modulation of the inverter, the permissible current of the inverter keys and the requirements for the quality of the output voltage with a harmonic distortion coefficient of less than 5%.

The validity of the theoretical dissertation research was confirmed by experiments on the equipment of the design bureau of AKUTEK LLC, from which the acts of implementation were obtained. Experimental results showed the high efficiency of the developed methods and tools for improving the quality indicators of electricity generated by mains voltage inverters, which affect additional losses in electrical networks from higher current harmonics. The use of the developed methods made it possible to significantly increase the quality indicators of electricity generated in the network and reduce the starting currents of the converter.

Practical implications of the results for the electric power industry:

- the method for calculating the main parameters of a sequential photovoltaic system that transmits electricity to a three-phase power grid has been developed;

- the method of compensation of voltage fluctuations in the DC link of a solar power plant is proposed, which ensures improvement of the quality of electricity generated to a three-phase electrical network;
- the method of controlling the grid-tie voltage inverter of a PV power plant is proposed, which ensures an increase in the quality of electricity in the mode of reduced generated power;
- the simulation computer models of solar power plants were developed, which allow to study the quality of electricity, determine power losses in power converters of solar power plants, analyse the operation of regulators and other studies;
- the methodology for determining the parameters of the LC filter of a PV power inverter operating in the mode of an autonomous power supply was developed, which allows determining the filter parameters, taking into account the frequency of PWM modulation of the inverter, the permissible current of the inverter keys and the requirements for the quality parameters of the output voltage with a harmonic distortion coefficient of less than 5%.

The results of the dissertation work were used at AKUTEK LLC in the development of network voltage inverters and frequency converters with improved output voltage quality indicators (implementation act dated 04.15.2024) as well as in the educational process at the Department of Electric Energy Transmission of the National Technical University of «KhPI » (act on implementation of September 11, 2023).

Key words: energy, renewable sources of electricity, solar energy, power quality parameters, solar power plants, solar panels, voltage inverter, current inverter, control system, reactive power, energy efficiency, power losses, mathematical model, computer computer model.

List of publications of the applicant

Scientific works in which the main scientific results are published:

1. Shelest D. Modeling of thermal ventilation processes in printed circuit boards of power sources. *Smart Technologies in Urban Engineering*: Book Chapter

Lecture Notes in Networks and Systems / O. Plakhtii, V. Nerubatskyi, D. Shelest, D. Hordiienko, I. Khomenko: Springer. 2023. Vol. 808. P. 294-304. (SCOPUS, Switzerland)

2. D. Shelest. Study of the influence of the skin effect on power losses in DC traction power supply systems / O. Plakhtiy, V. Nerubatskyi, D. Shelest, V. Tsybulnyk // *Information and control systems in railway transport*. Kharkiv, 2021. No. 4. P. 3-14. (B)

3. Shelest D. A.. Study of the control system of the asynchronous motor soft start device / O.A. Plakhtiy, V.P. Nerubatskyi, D.A. Gordienko, D.A. Shelest, A.V. Sinyavsky // *Collection of scientific works of the Ukrainian State University of Railway Transport*. Kharkiv, 2022. No. 202. P. 62-77. (B)

4. Shelest D.A. Dynamics, concepts and prospects of wind energy development / O.A. Plakhtiy, V.P. Nerubatskyi, D.A. Gordienko, D.A. Shelest, A.V. Sinyavskyi // *Information and control systems in railway transport*. Kharkiv, 2022. No. 4. P. 3-14. (B)

5. Shelest D.A. Overview of the configuration and control strategy of microgrids based on power electronics / V.P. Nerubatskyi, O.A. Plakhtiy, D.A. Gordienko, A.V. Sinyavskyi, D.A. Rustle // *Collection of scientific works of the Ukrainian State University of Railway Transport*. Kharkiv, 2023. Issue 204. P. 101-115. (B)

6. Shelest D. Study of the transmission of electricity from a solar power plant into a three-phase electrical network / O. Plakhtiy, I. Khomenko, D. Shelest, A. Sinyavskyi // *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Problems of improving electrical machines and devices. Theory and practice*. Kharkiv, 2023. Issue 2(10), pp. 38-44. (B)

7. Shelest D.A. Analysis of operating modes of electrical networks taking into account the influence of toothed harmonics / I.V. Khomenko, O.A. Plakhtiy, D.A. Rustle // *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Energy: reliability and energy efficiency*. Kharkiv, 2023. Issue 2(7). P. 77-84. (B)

Proceeding and materials of conferences (Approbation):

8. Shelest D.A. Determination of the effect of the skin effect on additional power losses from higher harmonics in electrical networks // V.P. Nerubatskyi, O.A. Plakhtiy, D.A. Gordienko, D.A. Noise // *Intelligent transport technologies: abstracts of reports of the 2nd International Scientific and Technical Conference* (Kharkiv, April 27–29, 2021). Kharkiv: UkrDUZT, 2021. P. 139–141.
9. Shelest D. Approximation of the dependence of the active resistance of the conductor on the frequency for the high frequency zone / Scherbak Y., Plakhtii O., Nerubatskyi V., Hordiienko D., Shelest D., Semenenko Y. // *IEEE 19th International Conference on Smart Technologies (EUROCON)* (c. Lviv , 6-8 July 2021 p.). Lviv, Lviv polytechnic National University, 2021. – P. 438-442.
10. Shelest D. Research of energy characteristics of three-phase voltage source inverters with modified pulse width modulation / Plakhtii O., Nerubatskyi V., Mykhalkiv S., Hordiienko D., Shelest D., Khomenko I. // *IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)* (c. Kharkiv, 13–17 September 2021 p.). Kharkiv, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», 2021. – P. 422-427.
11. Shelest D. Thermal-Powerloss Approximation Method for Determination of Efficiency in Semiconductor Devices / O. Plakhtii, V. Nerubatskyi, D. Hordiienko, D. Sushko, A. Syniavskyi, D. Shelest // *IEEE 41st International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)* (c. Kyiv, 10-14 October 2022 p.). Kyiv, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», 2022. – P. 456-461.
12. Shelest D.A. Vibroacoustic means of diagnosing the condition of power transformers / Khomenko I.V., Shelest D.A. // *Information technologies: science, technology, technology, education, health (MicroCAD): abstracts of reports of XX International Scientific and Practical Conference MicroCAD-2022* (Kharkiv, October 19–22, 2022). - Kharkiv: National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", 2022. - P. 88.
13. Shelest D.A. Investigation of the mechanism of vibration and noise generation of the transformer core caused by magnetostriction of a sheet of electrical steel /

I.V. Khomenko, D.A. Shelest // *Energy efficiency and energy security of electric power systems (EEES-2020)*: collection of scientific papers of the VI International Scientific and Technical Conference (Kharkov, December 20–23, 2022). - Kharkiv: National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", 2022. - P. 75–78.

14. Shelest D. Research of Single-Phase Current Rectifier in the Rectification and Recuperation Modes / O. Plakhtii, N. Karpenko, K. Trubchaninova, M. Filipieva, D. Shelest, K. Ivakina // *IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES)* (м. Кременчук, 27-30 вересня 2023 р.). Kremenchuk, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, 2022. – P. 1-6.

15. Shelest D. Research and calculation of the levels of higher harmonics of rotary electric machines in active-adaptive networks / Khomenko I., Nerubatskyi V., Plakhtii O., Hordiienko D., Shelest D. // *IOP 4th international conference on sustainable futures: environmental, technological, social and economic matters (ICSF)* (м. Кривий Ріг, 22-26 травня). Kryvyi Rih, Kryvyi rih State Pedagogical University, 2024. Vol.1254. – P. 1-15.

Patents of Ukraine for a utility model:

16. Patent UA 151131, IPC H02J 3/26 (2021.12). Three-phase three-level power active filter for a three-phase three-wire electrical network / O. A. Plakhtiy, V. P. Nerubatskyi, D. A. Gordienko, S. M. Tikhonravov, S. B. Kochuk, K. F. Fomichev, D. A. Rustle // Published 08.06.2022, Bulletin No. 23. 12 p.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	5
ВСТУП.....	6
Розділ 1 СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ФОТОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ З НАПІВПРОВІДНИКОВИМИ ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ.....	15
1.1 Тенденції росту сонячної енергетики.....	15
1.2 Вплив зовнішніх факторів на параметри генерованої потужності сонячними панелями.....	19
1.3 Параметри та конфігурації сонячних панелей в складі сонячних електричних станцій.....	23
1.4 Напівпровідникові перетворювачі у системах сонячних електростанцій.....	32
1.5 Схеми перетворювачів, що забезпечують режим відбору максимальної потужності сонячних панелей.....	37
1.6 Схеми мережевих інверторів сонячних електростанцій.....	43
1.7 Вимоги українських і міжнародних стандартів щодо якості електричної енергії генерованих сонячними електростанціями.....	47
1.8 Проблематика зниження параметрів якості електричної енергії генерованою сонячними електростанціями до електричних мереж в режимі неповної генерації.....	51
Висновки до розділу 1.....	55
Розділ 2 ПОСЛІДОВНА ФОТОЕНЕРГЕТИЧНА СИСТЕМА З ПОГОДЖУЮЧИМИ ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ.....	57
2.1 Структура фотоенергетичної системи та особливості роботи узгоджуючих перетворювачів.....	57
2.2 Сонячна панель з узгоджуючим перетворювачем як об'єкт керування.....	60
2.3 Метод непрямого визначення потужності сонячних панелей.....	70
2.4 Управління узгоджувальними перетворювачами під час послідовного	

з'єднання	76
2.5 Вплив пульсацій вхідної напруги узгоджувальних перетворювачів на режими сонячних панелей.....	82
2.6 Метод визначення точки генерації максимальної потужності шляхом поліноміальної апроксимації вольт-амперних характеристик сонячних панелей.....	86
2.7 Метод взаємної компенсації пульсацій в ланці постійного струму сонячної електростанції.....	90
Висновки до розділу 2.....	95
Розділ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ НА БАЗІ МЕРЕЖЕВИХ ІНВЕРТОРА СТРУМУ ТА ІНВЕРТОРА НАПРУГИ.....	96
3.1 Система керування мережевим інвертором струму сонячної електростанції.....	96
3.2 Аналітична умова реалізації коефіцієнту потужності активного випрямляча струму рівного одиниці.....	102
3.3 Алгоритм модуляції сигналів керування силових транзисторів інвертора напруги сонячної електростанції.....	109
Висновки до розділу 3.....	112
Розділ 4 КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ НА БАЗІ ІНВЕРТОРА СТРУМУ В СИСТЕМІ MATLAB.....	113
4.1 Структура комп'ютерної моделі сонячної електростанції на базі інвертора струму.....	113
4.2 Результати моделювання струму генерованого сонячною електростанцією в електричну мережу.....	120
4.3 Структура комп'ютерної моделі сонячної електростанції на базі інвертора напруги.....	124
4.4 Підвищення якості електроенергії мережевого інвертора напруги при роботі з неповною потужністю.....	131

Висновки до розділу 4.....	137
Розділ 5 ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ СОНЯЧНИХ ІНВЕРТОРІВ В РЕЖИМІ АВТОНОМНОГО ДЖЕРЕЛА ЖИВЛЕННЯ.....	138
5.1 Багаторівневі інвертори сонячних електростанцій.....	138
5.2 Покращення якості вихідної напруги дворівневих інверторів ФЕС в режимі автономного джерела живлення.....	141
5.3 Методика визначення параметрів синусного фільтра інвертора напруги, що забезпечує обмеження пускового струму.....	143
5.4 Моделювання роботи інвертора напруги з синусним фільтром розрахованим за запропонованою методикою.....	147
5.5 Фізичні дослідження інвертора з синусним фільтром.....	151
Висновки до розділу 5.....	157
ВИСНОВКИ.....	158
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	160
ДОДАТОК А Список публікацій здобувача.....	173
ДОДАТОК Б Акти Впровадження результатів наукових досліджень	176
ДОДАТОК В Витяг з участі в науково-дослідній роботі.....	179

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АЦП	– аналогово-цифровий перетворювач
ЕР	– екстремальний регулятор
ККД	– коефіцієнт корисної дії
MPPT	– процес пошуку точки максимальної потужності
СЕ	– сонячна енергетика
СУ	– система управління
СФЕМ	– сонячний фотоелектричний масив
ФЕС	– фотоелектрична електростанція
ФЕС	– фотоелектрична електростанція
ШИМ	– широтно-імпульсна модуляція
ШП	– широтно-імпульсний перетворювач
CSI	– інвертор струму
DC/AC	– перетворення постійного струму в змінний
DC/DC	– перетворення постійного струму в постійний
IGBT	– біполярний транзистор з ізольованим затвором
RBIGBT	– біполярний транзистор з ізольованим затвором і зворотною блокувальною здібністю
THD	– коефіцієнт нелінійних викривлень
VSI	– інвертор напруги
ZSI	– імпедансний інвертор

ВСТУП

Актуальність теми. Фотоенергетика є напрямом відновлюваної енергетики, який стрімко розвивається в Україні та в світі загалом [1-4]. Це зумовлено зменшенням кількості видобутку енергетичних ресурсів, підвищенням рівнем викидів двоокису вуглецю та інших забруднюючих речовин енергетичною інфраструктурою планети, а також низкою робіт у галузі створення нових матеріалів для виготовлення сонячних елементів. На сучасному рівні розвитку сонячної енергетики ведуться розробки нових та удосконалення існуючих структур та схемотехнічних рішень з використанням сонячних панелей та напівпровідникових перетворювачів електричної енергії, а також удосконалення програмно-апаратних комплексів для управління, моніторингу та контролю параметрів генерованої електроенергії.

Розвиток сонячної енергетики та інтеграція фотоенергетичних систем (ФЕС) у різні споруди, будівлі та інші енергетичні системи призводять до підвищення вимог до даних систем та якості генерованої електроенергії. Ці вимоги здебільшого стосуються якості та кількості електроенергії, а також функціональних можливостей напівпровідникових перетворювачів, з використанням яких розробляються ФЕС.

Вивченню питань, пов'язаних з якістю електричної енергії та енергоефективності сонячних електростанцій, присвячені роботи українських науковців: Бацала Я.В., Богомолова О.С., Павлов В.Б., Шевченко С.Ю., Войтко С.В., Васько П.Ф., Лежнюк П.Д., Новський В.О., а також закордонні науковці: Лі Вонг (Li Wong), Ньян Лін Аунг (Nyan Linn Aung) та інші.

На підставі власних досліджень, а також аналізі наукових публікацій визначено, що в режимі зниженої сонячної радіації, електроенергія, що генерується сонячними електростанціями має суттєво погіршені показники якості електроенергії. Незважаючи на значну кількість робіт у цьому напрямку, ще залишаються невирішеними питання, пов'язані з покращенням параметрів якості електроенергії генерованою ФЕС до трифазних електричних мереж в режимі

зниженої генерованої потужності, що спостерігаються при зниженні рівня сонячної радіації.

У зв'язку з цим необхідно вирішити завдання щодо розробки та дослідження сонячної електростанції, що забезпечує покращення показники якості електричної енергії в режимі зниженої генерації потужності.

Таким чином, дослідження та проектування фотоенергетичних систем (ФЕС) з урахуванням вимог українських та міжнародних стандартів щодо якості електричної енергії в повному діапазоні генерованої потужності є важливим науковим завданням, вирішенню якого присвячена дисертаційна робота.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дослідження, результати яких викладені в дисертаційній роботі, виконано відповідно до плану науково-дослідних робіт кафедри «Передача електричної енергії» НТУ «ХПІ» в рамках науково-дослідної роботи за темою: «Розробка наукових основ підвищення енергетичної ефективності та покращення якості електроенергії в електричних мережах» (ДР №0121U109440), де здобувач був виконавцем окремих розділів дослідження.

Мета та завдання досліджень. Метою дисертаційної роботи є підвищення якості електричної енергії генерованої сонячною електростанцією до трифазних електричних мереж в режимі зниженої генерованої потужності.

Для досягнення зазначеної мети було поставлено завдання:

- визначення параметрів та конфігурацій сонячних електростанцій, а також визначення вимог вітчизняних та міжнародних стандартів параметрів якості електричної енергії, що генерується сонячними електростанціями;
- розробити метод компенсації пульсацій напруги у ланці постійного струму сонячної електростанції, що забезпечує покращення показників якості електричної енергії генерованої до трифазної електричної мережі;
- розробити метод керування мережевим інвертором напруги ФЕС, що забезпечує підвищення показників якості електричної енергії в режимі зниженої генерованої потужності;

– розробити імітаційні комп'ютерні моделі сонячних електростанцій, що дозволяють проводити дослідження показників якості електричної енергії, проводити визначення втрат потужності в силових перетворювачах сонячних електростанцій, досліджувати та проводити аналіз роботи регуляторів та інші;

– розробити методику визначення параметрів LC фільтра інвертора напруги ФЕС, що працює в режимі автономного джерела живлення, яка дозволяє визначити параметри фільтра, з урахуванням частоти ШІМ модуляції інвертора, допустимого струму ключів інвертора та вимог параметрів якості вихідної напруги з коефіцієнтом гармонійних спотворень менше 5%.

Об'єкт дослідження – електричні процеси в напівпровідникових перетворювачах сонячних електростанцій.

Предмет дослідження – параметри якості електричної енергії, генерованої сонячними електростанціями в режимі зниженої потужності.

Методи дослідження. За виконання дисертаційної роботи використовувалися: теорія електричних ланцюгів, лінійних і нелінійних імпульсних систем, системи диференціальних і алгебраїчних рівнянь під час аналізу електромагнітних процесів; метод гармонійного аналізу (розкладання ряду Фур'є) визначення величин гармонік струму мережі, і навіть імітаційне і фізичне моделювання. Моделювання перехідних процесів у фотоенергетичних системах проводилося з використанням пакетів програм MATLAB і MathCad.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Отримав подальшого розвитку метод непрямого визначення точки максимальної потужності сонячних панелей, який відрізняється від відомих визначенням максимальної вихідної напруги узгоджувальних перетворювачів при фіксованому значенні вихідного струму, що дає можливість спростити системи керування фотоенергетичної системи, апаратну реалізацію системи керування узгоджувальними перетворювачами та знижує її вартість.

2. Вперше запропоновано метод компенсаційного керування узгоджувальними перетворювачами сонячних електростанцій, що реалізує взаємну синхронізацію каналів керування окремих узгоджувальних перетворювачів в системі відбору

потужності та на відміну від відомих забезпечує взаємну компенсацію пульсацій напруги в ланці постійного струму сонячної електростанції від окремих узгоджувачів перетворювачів, що дозволяє досягти зниження пульсацій напруги в ланці постійного струму, чим досягається подальше покращення якості електроенергії генерованої до трифазної електричної мережі.

3. Вперше запропоновано метод частотно-адаптивного керування мережевим інвертором напруги сонячної електростанції, який на відміну від відомих дозволяє забезпечити покращенні показники якості електричної енергії генерованої до трифазної електричної мережі в режимі зниження генерованої потужності.

4. Подальший розвиток отримав метод управління трифазним інвертором струму з синусоїдальної ШІМ, який відрізняється від існуючих у корекції завдання фазних струмів мережі, що дозволяє знизити пульсації потужності у ланці постійного струму інвертора, при роботі ФЕС на потужності у ланці постійного струму інвертора, при роботі ФЕС на несиметричну трифазну мережу, на 50 % та коефіцієнт нелінійних спотворень мережних струмів на 60 % на відміну від систем управління, не враховують несиметрію мережевих напруг.

5. Вперше розроблено метод визначення параметрів LC фільтра інвертора напруги ФЕС, що працює в режимі автономного джерела живлення, який на відміну від існуючих дозволяє визначити параметри фільтра, з урахуванням частоти ШІМ модуляції інвертора, допустимого струму ключів інвертора та вимог параметрів якості вихідної напруги з коефіцієнтом гармонійних спотворень менше 5%.

Практичне значення отриманих результатів полягає в наступному:

- розроблено методику розрахунку основних параметрів послідовної фотоенергетичної системи, що забезпечує передачу електричної енергії до трифазної електричної мережі;
- запропоновано методику компенсації пульсацій напруги у ланці постійного струму сонячної електростанції, що забезпечує покращення показників якості електричної енергії генерованої до трифазної електричної мережі;

- запропоновано методика керування мережевим інвертором напруги сонячної електростанції, що забезпечує підвищення показників якості електричної енергії в режимі зниженої генерованої потужності;

- розроблені імітаційні комп'ютерні моделі сонячних електростанцій, що дозволяють проводити дослідження показників якості електричної енергії, проводити визначення втрат потужності в силових перетворювачах сонячних електростанціях, досліджувати та проводити аналіз роботи регуляторів та інші;

- розроблено методику визначення параметрів LC фільтра інвертора напруги сонячної електростанції, що працює в режимі автономного джерела живлення, яка дозволяє визначити параметри фільтра, з урахуванням частоти ШІМ модуляції інвертора, допустимого струму ключів інвертора та вимог параметрів якості вихідної напруги з коефіцієнтом гармонійних спотворень менше 5%.

Практична значимість підтверджується підприємствами в які було впроваджено результати дисертаційної роботи:

- у навчальний процес НТУ «ХПІ» на кафедрі передачі електричної енергії здобувачів першого та другого рівня вищої освіти за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» за освітньо-професійною програмою «Електроенергетика» в освітніх компонентах «Електричні системи та мережі», «Оптимізація режимів роботи електроенергетичних систем»;

- у ТОВ «АКУТЕК» при розробці мережевих інверторів та перетворювачів частоти потужністю до 120кВт.

Особистий внесок здобувача основних наукових досягнень полягає в розробці нових та удосконаленні методів керування напівпровідникових перетворювачів сонячних електростанцій, які забезпечують покращення показників якості електричної енергії генерованої до трифазної електричної мережі. Результати дисертаційної роботи отримані здобувачем особисто та в співавторстві опубліковані у публікаціях (Додаток А):

У роботах, написаних у співавторстві, здобувачеві належить:

[1] – здобувачем проведене комп'ютерне теплове 3D моделювання напівпровідникових перетворювачів та визначено його теплові режими його

роботи та аналіз теплових режимів. Співавторами: Плахтій О.А – розроблено модель напівпровідникового перетворювача в програмі Matlab та аналітично визначено втрати потужності; Нерубацький В.П. та Хоменко І.В. – проведено фізичних дослід на макеті перетворювача та визначено реальні значення температури; Гордієнко Д.А. – належать результати обробки даних та оформлення публікації;

[2] – здобувачем проведено розрахунки функції Беселя, що визначають відносні значення збільшення опору при росту частоти гармоніки струму. Співавторами: Плахтій О.А – визначено загальні рівняння зростання втрат потужності в електричній мережі в функції частоти та амплітуди вищих гармонік; Нерубацький В.П. та Цибульник В.Р. – належать результати обробки даних та оформлення публікації;

[3] – здобувачем розроблено Matlab модель пристрою плавного пуску, досліджено енергетичні показники. Співавторами: Плахтій О.А – здобувачем розроблено систему керування пристрою плавного пуску з покращеними характеристиками; Нерубацький В.П. та Гордієнко Д.А. – належать результати обробки даних та оформлення публікації;

[4] – здобувачем проаналізовано тенденції розвитку альтернативної енергетики. Співавторами: О.А. Плахтій та Нерубацький В.П. – проведено порівняння енергетичних параметрів силових схем; Гордієнко Д.А. – належать результати обробки даних та оформлення публікації;

[5] – здобувачем виконано розробку стратегії керування електричних мікромереж з альтернативними джерелами живлення. Співавторами: О.А. Плахтій та В.П. Нерубацький – проведено порівняння енергетичних параметрів силових схем мікромереж та порівняння їх характеристик; Синявський А.В. – належать результати обробки даних та оформлення публікації;

[6] – здобувачем розроблено MATLAB-модель сонячної електростанції на базі мережевого інвертора напруги. Співавторами: О.А. Плахтій та І.В. Хоменко В.П. – досліджено показники електромагнітної сумісності сонячної електростанції, та енергетичні показники, а саме залежність втрат потужності від

частоти модуляції мережевого інвертора; Синявський А.В. – належать результати обробки даних та оформлення публікації;

[7] – досліджено вплив зубцевих гармонік на енергетичні показники мережі на комп'ютерній моделі. Співавторами: О.А. Плахтій та І.В. Хоменко – виведено аналітичні рівняння, що визначають амплітуди та частоти зубцевих гармонік;

[8] – здобувачем проведено 3D моделювання в програмі Ansys, яке підтвердило аналітичні рівняння дії скін ефекту. Співавторами: Плахтій О.А та Нерубацький В.П. – проведено виведення рівнянь, що визначають дію скін ефекту на систему електропостачання; Гордієнко Д.А. – належать результати обробки даних та оформлення публікації;

[9] – здобувачем в програмі MathCad розроблені математичні моделі, що визначають апроксимовані залежності збільшення активного опору електричної мережі, і відповідно втрат потужності, від частоти вищих гармонік і параметрів мережі. Співавторами: Плахтій О.А. та Нерубацький В.П. – проведено виведення рівнянь, що визначають дію скін ефекту на систему електропостачання; Гордієнко Д.А. та Семененко Ю.О. – належать результати обробки даних та оформлення публікації;

[10] – здобувачем розроблено удосконалений алгоритм модуляції мережевого інвертора напруги, Співавторами: Плахтій О.А. та Нерубацький В.П. – розроблено комп'ютерні моделі, та проведено моделювання, що підтвердило покращення енергетичних показників; Хоменко І.В. – проведення аналітичних розрахунків режиму роботи перетворювача; Гордієнко Д.А. та Михалків С.В. – належать результати обробки даних та оформлення публікації;

[11] – здобувачем розроблено комп'ютерну Matlab модель, що дозволяє визначати шляхом моделювання статичні та динамічні показники втрат потужності напівпровідникових перетворювачів. Співавторами: Плахтій О.А. – запропоновано метод поліноміальної апроксимацію енергетичних показників силових напівпровідникових приладів для аналізу енергетичних втрат; Нерубацький В.П. – визначено аналітичні вирази, що визначають значення втрат потужності силових напівпровідникових перетворювачів в функції частоти комутації, значення напруги

та струму в силових вентилях; Синявський А.В. – за розробленим алгоритмом проведено поліноміальну апроксимацію енергетичних характеристик ; Гордієнко Д.А. та Сушко Д.Л. – належать результати обробки даних та оформлення публікації;

[12] – здобувачем розглянуто розглянуто сучасні методи діагностики силових трансформаторів. Співавтором: Хоменко І.В. – розглянуто вібрації метод діагностики силових трансформаторів по показнику;

[13] – здобувачем проведено дослідження механізму вібрації та шумоутворення осердя трансформатора. Співавтором: Хоменко І.В. – проведено дослідження та аналіз дії магнітостриції;

[14] – здобувачем розроблена MATLAB модель активного чотириквadrантного випрямляча та проведено дослідження енергетичних показників. Співавторами: Плахтій О.А та Трубочанінова К.А. – розроблено алгоритм системи керування активного випрямляча; Карпенко Н.П. – проведено аналітичні розрахунки роботи перетворювача; Філіп'єва М.В. та Карпенко Н.П. – належать результати обробки даних та оформлення публікації;

[15] – здобувачем розроблено програмний алгоритм визначення значень зубцевих гармонік. Співавторами: Плахтій О.А. та Хоменко І.В. – визначено аналітичні рівняння, що визначають електромагнітні властивості асинхронних машин, які працюють від електричних мереж; Нерубацький В.П. та Гордієнко Д.А. – належать результати обробки даних та оформлення публікації;

[16] – здобувачем виконані креслення та проведено написання опису та формули винаходу. Співавторами: Плахтій О.А. та Нерубацький виконана розробка структурної схеми запатентованого пристрою. Гордієнко Д.А., Тихонравов С.М., Кочук С.Б., Фомичов К.Ф. виконали загальне оформлення патенту. Авторська участь претендента в опублікованих наукових працях узгоджена із співавторами.

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи доповідалися та обговорювалися на Міжнародних науково-технічних конференціях Енергоефективність та енергетична безпека електроенергетичних систем (EEES) (м.

Харків, 2020 р.), Інтелектуальні транспортні технології (м. Харків, 2021 р.), Smart Technologies (EUROCON) (м. Львів, 2021 р.), KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek) (м. Харків, 2021 р.), Electronics and Nanotechnology (ELNANO) (м. Київ, 2022 р.), Modern Electrical and Energy System (MEES) (м. Кременчук, 2023 р.), Sustainable Futures: Environmental, Technological, Social and Economic Matters (ICSF) (м. Кривий Ріг, 2024р.); Міжнародних науково-практичних конференціях MicroCAD (м. Харків, 2022 р.), Енергоефективність та енергетична безпека електроенергетичних систем (м. Харків, 2022 р.).

Публікації. Основні наукові результати висвітлені у 16 наукових працях, які розкривають основний зміст дисертації, з них 6 статей у наукових фахових виданнях України, 1 – у науковому іноземному виданні, що індексуються у міжнародних наукометричних базах даних Scopus та/або Web of Science та 8 – у матеріалах конференцій, з яких 5 проіндексовані у міжнародних наукометричних базах даних Scopus та/або Web of Science.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з анотації двома мовами, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Обсяг дисертації становить 158 сторінок основного тексту, з них: 99 рисунків по тексту; 1 рисунок на 1 окремій сторінці; 13 таблиць по тексту; 1 таблиця на одній окремій сторінці; списку використаних джерел із 123 найменувань на 13 сторінках, 3 додатки на 8 сторінках. Загальний обсяг роботи складає 180 сторінок.

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ФОТОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ З НАПІВПРОВІДНИКОВИМИ ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ

1.1 Тенденції росту сонячної енергетики

1.1.1 Тенденції росту сонячної енергетики в світі

Протягом часу основним джерелом енергії були видобутні невідновлювальні види палива, такі як вугілля, газ, нафта. Однак у зв'язку з обмеженим ресурсом і зростаючою швидкістю споживання палива, зрештою, його стане недостатньо для забезпечення енергетичної інфраструктури планети. Більш того, загроза глобальної зміни клімату, спричиненого викидами двоокису вуглецю та інших газів, при спалюванні викопних видів палива є однією з основних причин актуальності питання щодо скорочення споживання таких видів палива. Цього зниження можна досягти за допомогою початку використання відновлюваних, екологічно чистих джерел енергії.

В даний час можна спостерігати глобальну тенденцію до використання екологічно чистих, відновлюваних джерел енергії для підтримки енергетичної інфраструктури та збереження навколишнього середовища. Найбільш ефективним та нешкідливим джерелом енергії є сонячна енергія. Майже всі відновлювані джерела енергії за винятком ядерної та геотермальної є похідними від сонячної енергії. Сонячна енергетика (СЕ) є одним із найперспективніших напрямів розвитку та використання відновлюваних джерел електроенергії. За оцінками експертів багатьох країн, до 2100 року сонце стане домінуючим джерелом енергії на планеті. У багатьох країнах світу сонячна енергетика отримала активну державну підтримку та стрімко розвивається. На сучасному етапі розвитку відновлюваної енергетики прийнято концепцію створення великих фотоелектростанцій з подальшим підключенням до єдиної енергосистеми за допомогою мережових перетворювачів, які забезпечують перетворення електричної енергії з джерел постійного струму на трифазний змінний. Ця концепція повністю задовольняє ідеологію централізованого виробництва

електроенергії, яка лежить в основі сучасної енергосистеми. Такі об'єкти відновлюваної енергетики займають велику площу і вимагають певного географічного положення для підвищення середньорічної енергії, що виробляється. Також перспективним є і інший спосіб розташування об'єктів відновлюваної енергетики, що полягає у побудові структур розподіленої генерації. Пропоновані системи розподіленої генерації можна охарактеризувати як масиви, що складаються з безлічі незалежних джерел з узгоджувачами перетворювачами, об'єднаних загальною лінією постійного струму.

Останні десятиліття спостерігається стрімке зростання споживання та генерації електроенергії. При чому тенденція зростання генерованої електроенергії відноситься до усіх видів електроенергії. [1]. Розподіл генерованої електроенергії в світі за походженням приведено на рисунку 1.1

При цьому варто зазначити, що зростає доля альтернативних джерел електроенергії. Відносна доля сонячної енергетики в світовому масштабі наразі складає приблизно 3,1%, відносна доля вітрової енергетики – 9,1% , що в сумі складає 12,1% і вже є досить суттєвою часткою [2].

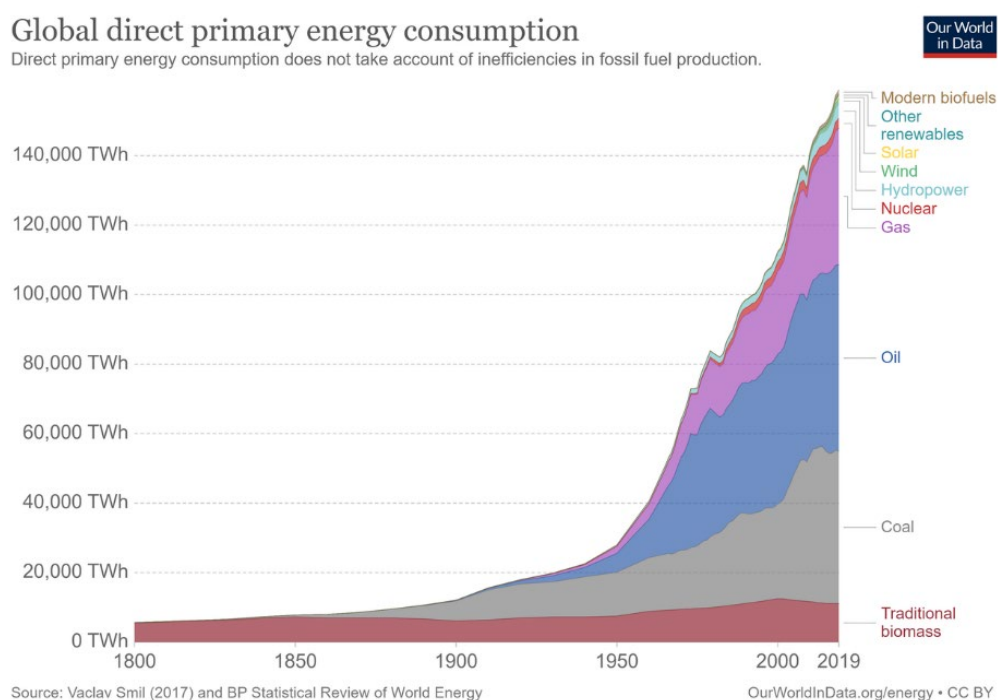


Рисунок 1.1 – Світова генерація електроенергії різними джерелами

Таким чином, можна зробити висновок, що кількість електроенергії, що генерується сонячною енергетикою за останні 10 років експоненціально зростає. Це зумовлено, в першу чергу, перспективністю цих технологій, бо вони дозволяють отримати чисту та дешеву електроенергію, яка так потрібна в сучасному світі.

Сприяє поширенню сонячної енергетики в світі розвиток технології виробництва електроенергії сонячними панелями, які дозволяють отримати більше електричної енергії [3].

Сьогодні широко використовуються монокристалічні сонячні панелі (СП), полікристалічні сонячні панелі та тонкоплівкові сонячні батареї. Найважливішими параметрами сонячних панелей є їх ефективність і вартість [4, 6]. Полікристалічні сонячні батареї мають ККД 15,5...18 %, а монокристалічні – 18,5–23,5 %. Однак монокристалічні сонячні панелі мають більш високу вартість, що пов'язано з тим, що в монокристалічних панелях використовується монокристалічний кремній з дуже високим ступенем очищення понад 99,99 % [5, 7].

Деякі експериментальні зразки сонячних батарей мають ефективність вище 47%. У 2013 році компанія *Sharp* створила тришаровий фотоелемент 4×4 мм з індій-галій-арсенідом з ККД 44,4 %. Ще один спосіб підвищення ККД сонячних панелей – використання додаткових лінз. Так, група фахівців з Інституту сонячних енергетичних систем Товариства Фраунгофера, компаній *Soitec*, *CEA-Leti* і Берлінського центру Гельмгольца створили сонячні панелі з використанням лінзи Френеля, фотоелемента з ККД 44,7 %.

У 2014 році Інститут систем сонячної енергії Фраунгофера створив сонячні батареї, в яких завдяки лінзі, що фокусує світло на дуже маленькому фотоелементі, ефективність становить 45 %. Тому ціни на такі сонячні батареї на порядок вищі. Перспективним напрямком є створення фотоелементів на основі наноантен, які працюють на пряме випромінювання струмів, індукованих в антені малих розмірів (близько 200...300 нм) частин світла (тобто електромагнітним випромінюванням частотою близько 500 ТГц). Наноантени не вимагають дорогої сировини для виробництва та мають потенційну ефективність до 85%. Але ця технологія ще не

готова до серійного виробництва [8]. Підвищення ККД сонячних панелей сприяє їх енергетичній ефективності і подальшому поширенню.

1.1.2 Тенденції розвитку сонячної енергетики в Україні

Існують досить суттєві перспективи використання сонячної електричної енергії, як в світі, так і в Україні. Згідно з опублікованими даними, кількість сонячної енергії, яка поступає на нашу планету за одну годину, більше, ніж вся енергія, яку споживає населення світу протягом року [2, 4].

Сонячна енергетика є відносно новою галуззю в Україні. При цьому темпи її розвитку досить високі порівняно з іншими секторами вітчизняної економіки [5]. Так, за підсумками 2021 року, на сонячну енергетику в Україні припало близько 6% від загального виробництва електроенергії. Сприяє цьому факту те, що практично вся територія нашої держави придатна до розташування сонячних електростанцій. Найбільш сприятливими для цього є південні регіони України (Одеська, Миколаївська, Херсонська, Запорізька та частина Донецької області, АР Крим), де сьогодні зосереджено понад 60% промислових СЕС. Станом на кінець 2021 року сумарна потужність сонячних електростанцій склала 6320 МВт (без урахування тимчасово окупованих територій) [1].

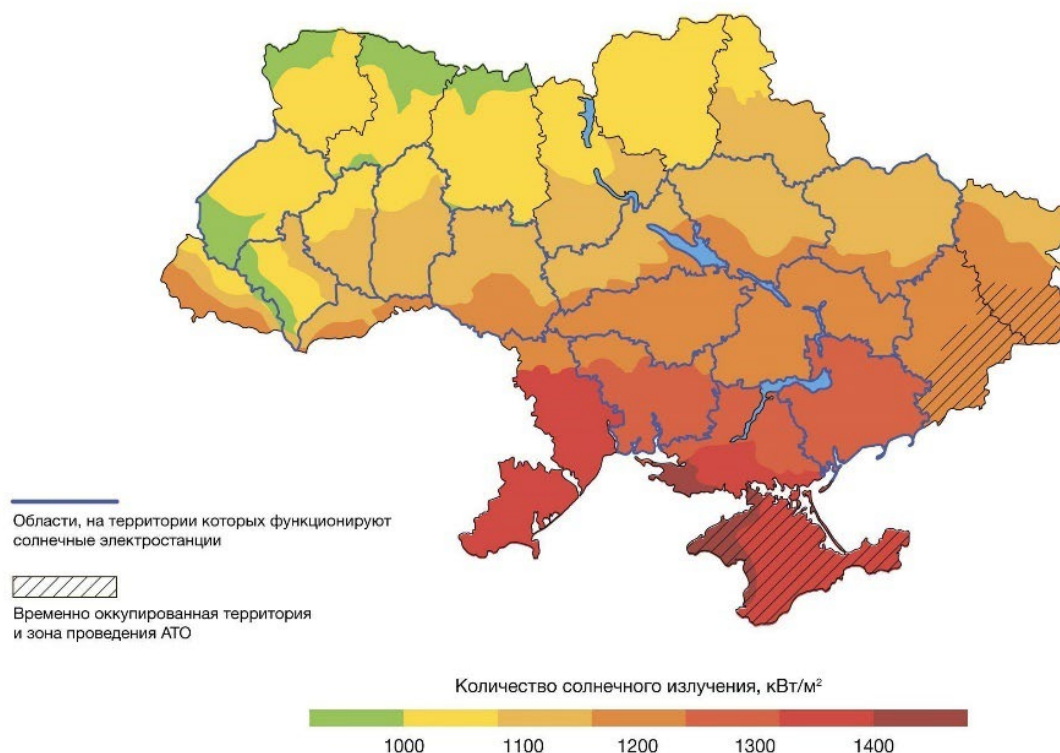


Рисунок 1.2 – Карта середньорічної сонячної радіації на території України

За підсумками останніх років, наша держава мала одні з найвищих темпів розвитку сонячної енергетики в Європі. Проте вторгнення агресора завдало значної шкоди галузі. Дві третини СЕС в Україні перебувають на півдні, де сьогодні тривають активні бойові дії. За різними оцінками, понад 30% сонячних електростанцій на окупованих територіях, а це приблизно 1120-1500 МВт встановленої потужності, зазнали руйнувань.

1.2 Вплив зовнішніх факторів на параметри генерованої потужності сонячними панелями

Однією з найважливіших характеристик сонячних панелей є їх вольт-амперна характеристика, форма якої залежить від рівня сонячного випромінювання та температури. Для прикладу розглянемо вольт-амперну характеристику сонячної

панелі *Era-370W-24V-Mono* при рівнях сонячної радіації від 200 Вт/м² до 1000 Вт/м² (рис. 1.3).

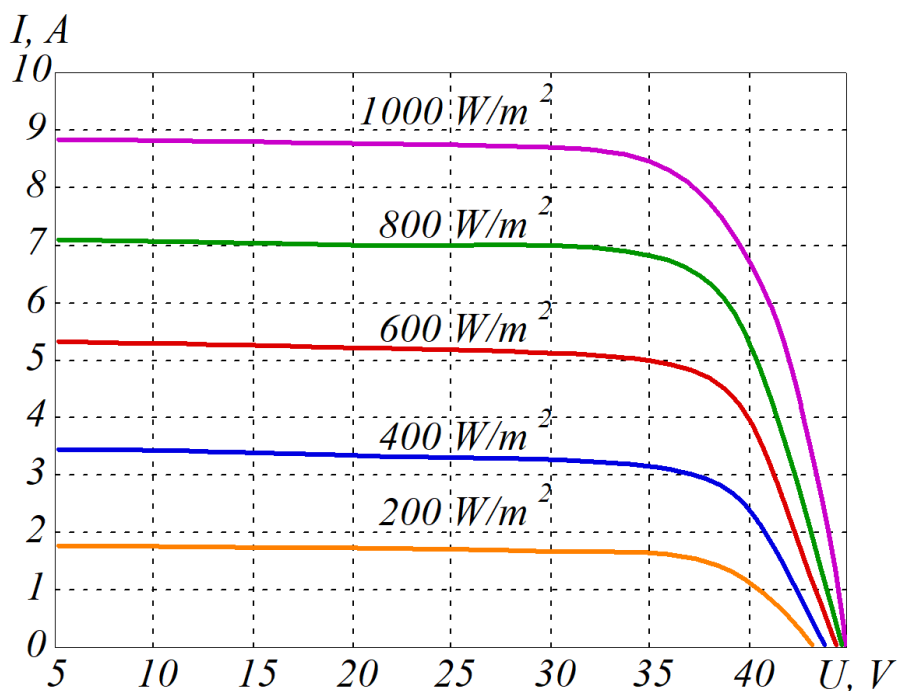


Рисунок 1.3 – Вольт-амперні характеристики сонячної панелі *Era-370W-24V-Mono* при різних рівнях сонячного випромінювання (при температурі навколишнього середовища 25 °С)

При цьому вольт-амперні характеристики сонячних панелей значною мірою залежать від температури панелі. Цікаво, що підвищення температури зменшує генеровану потужність досить суттєво (рис. 1.4).

З огляду на сімейство воль-амперних характеристик можна зробити висновок, що система охолодження сонячних панелей, особливо влітку, дасть можливість суттєво підвищити генеровану потужність.

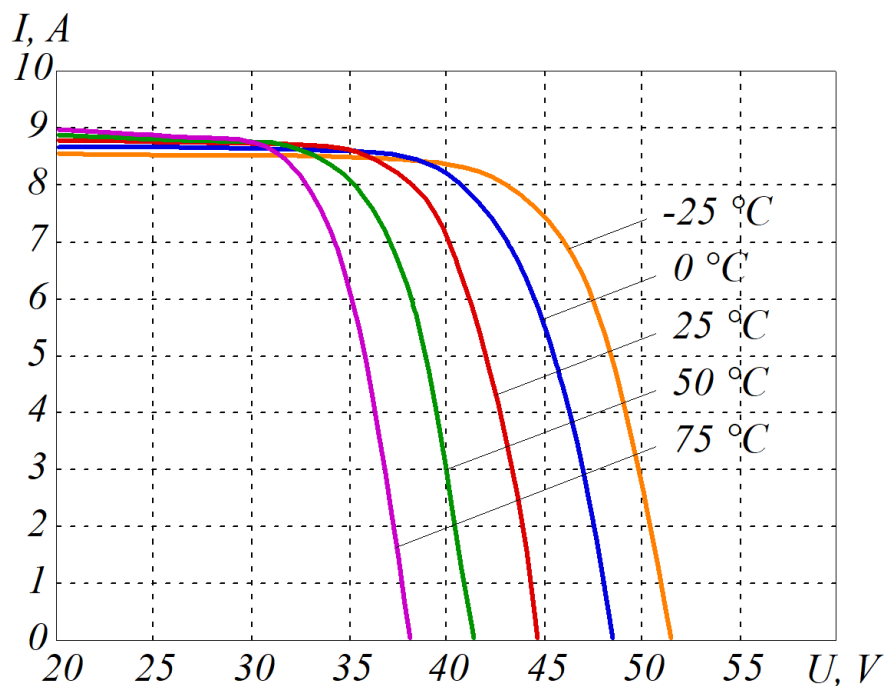


Рисунок 1.4 – Вольт-амперні характеристики сонячної панелі *Era-370W-24V* при різних температурах (при інтенсивності сонячного випромінювання 1000 Вт/м^2)

На рисунку 1.4 можна побачити, що коли сонячні батареї нагріваються, напруга та струм, а отже, і потужність, вироблена сонячною енергією, зменшуються. Отже є сенс охолоджувати сонячні панелі. Таким чином, зниження температури нагрітої сонячної панелі з $75 \text{ }^\circ\text{C}$ до $-25 \text{ }^\circ\text{C}$ збільшить максимальну генеровану потужність приблизно на 35 %.

Коли струм, споживаний сонячною панеллю, змінюється, напруга сонячної панелі змінюється, і, отже, змінюється потужність, вироблена сонячною панеллю. При цьому залежність потужності сонячної батареї від споживаного струму представлена на рисунку 1.5. Видно, що сонячна панель має точку генерації максимальної потужності, яка визначається певною величиною струму, який споживає сонячна панель. Таким чином, регулюючи величину струму, який споживає сонячна батарея, можна увійти в режим максимального вироблення електроенергії. Цей алгоритм отримав назву MPPT (англ. Maximum power point tracking) – відстеження точки максимальної потужності [7, 8]. Більшість традиційних алгоритмів MPPT засновані на концепції відстеження нахилу. Одним

із типових методів відстеження нахилу є алгоритм *Perturb and Observe (P&O)*. Недоліком цього методу є втрата генерованої потужності під час пошуку точки максимальної генерації електроенергії, яка може тривати значний час.

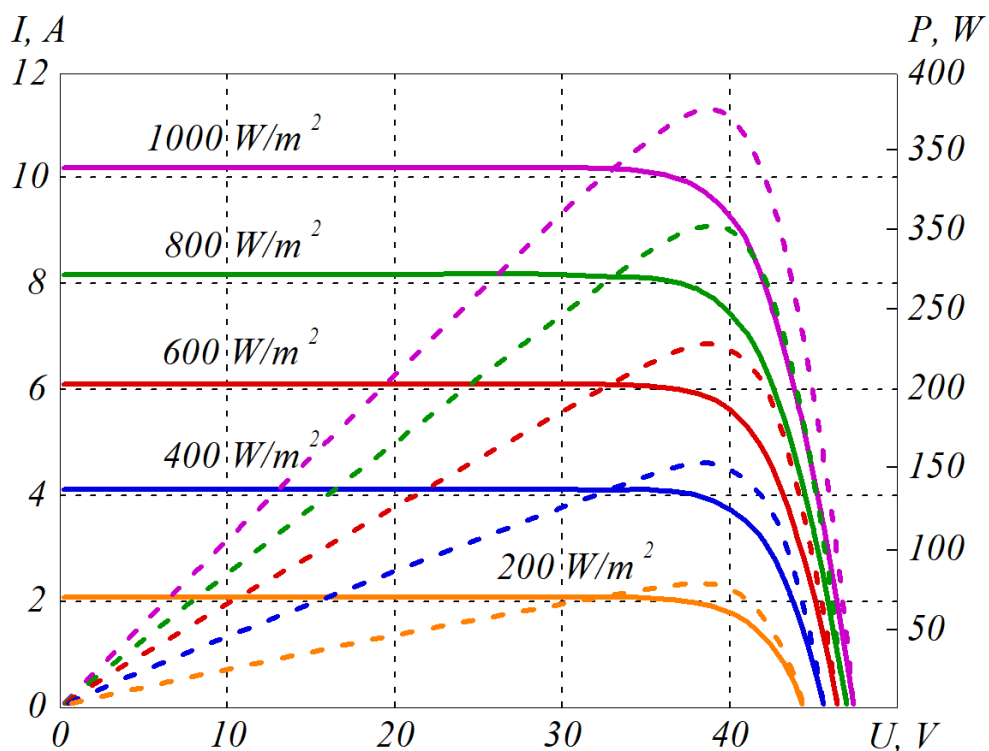


Рисунок 1.5 – Залежність максимальної потужності сонячної батареї як функція споживаного струму та рівня сонячної радіації.

Визначити точку максимальної генерації електроенергії можна також шляхом точного розрахунку шляхом поліноміальної апроксимації вольт-амперних характеристик сонячної панелі та з використанням датчиків сонячної радіації та температури [9-10].

Отримані поліноми дають змогу аналітично визначити точку генерації максимальної потужності сонячної панелі як функцію струму, споживаного гібридним інвертором. Таким чином, регулюючи струм сонячної панелі, можна отримати максимальну потужність, яка функціонально реалізується напівпровідниковим перетворювачем, який отримує живлення від сонячної панелі.

1.3 Параметри та конфігурації сонячних панелей в складі сонячних електричних станцій

1.3.1 Математичні рівняння генерації струму сонячних панелей

Сонячні фотоелектричні масиви (СФЕМ) формуються шляхом послідовного, паралельного та змішаного з'єднання сонячних панелей для досягнення необхідного рівня вихідної напруги та потужності. Основною проблемою під час використання різноманітних сполуки фотоелементів є нелінійний внутрішній опір кожного фотоелектричного модуля, тобто, вольт-амперна характеристика (рис. 1.3), яка особливо проявляє себе при нерівномірному освітленні або частковому затіненні сон I_{ph} ячних панелей.

Існують так само комутовані системи сонячних панелей, які дозволяють реалізувати динамічну перебудову структури зниження впливу часткового затінення [11].

Найпростішою схемою заміщення сонячного фотоелемента є дворезистивна система, що складається з джерела фотоструму I_{ph} , який пропорційний інтенсивності освітлення або потужності сонячного випромінювання, послідовного R_s і паралельного R_{sh} резисторів, а також паралельного діода $VD1$, який визначає нелінійність вихідної напруги. Вихідними параметрами даної моделі є струм I_{cell} та напруга U_{cell} сонячної панелі [23].

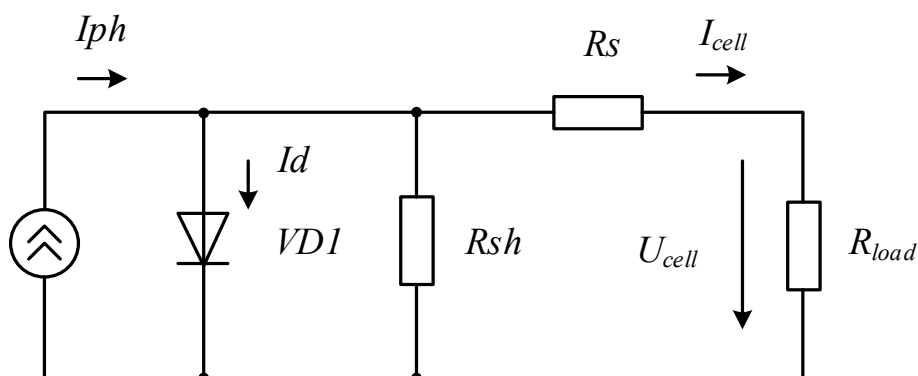


Рисунок 1.6 – Схема заміщення сонячної панелі

При цьому ВАХ сонячної панелі в функції параметрів рівня сонячної радіації, температури можна визначити наступною залежністю:

$$I_{cell} = I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{q \cdot (U_{cell} + I_{cell} \cdot R_s)}{C \cdot N \cdot k_b \cdot T_{opt}}} - 1 \right) - \frac{U_{cell} + I_{cell} \cdot R_s}{R_{sh}}, \quad (1.1)$$

$$I_s = I_{rs} \cdot \left(\frac{T_{opt}}{T_{ref}} \right)^3 e^{\left(\left(\frac{q \cdot E_g}{N \cdot K_b} \right) \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_{opt}} \right) \right)}, \quad (1.2)$$

де I_{cell} - вихідний струм сонячної панелі;

U_{cell} - вихідна напруга сонячної панелі;

I_{ph} - фотострум сонячного елемента;

I_s - струм насичення сонячного елемента;

R_s - послідовний опір еквівалентної схеми заміщення сонячного елемента;

R_{sh} - паралельний опір еквівалентної схеми заміщення сонячного елемента;

N - кількість послідовно-паралельно з'єднаних сонячних елементів у панелі;

k_b - постійна Больцмана;

T_{opt} - поточна температура сонячної панелі;

C - параметр вольтамперної характеристики напівпровідникового переходу фотоелемента;

q - заряд електрона;

I_{rs} - зворотний струм насичення;

E_g - ширина забороненої зони напівпровідника сонячної панелі;

T_{ref} - температура за нормальних умов експлуатації.

Оскільки багато параметрів сонячних панелей, такі як паралельний еквівалентний опір схеми заміщення, струм насичення та інші, в документації не вказані досить точна математична модель може бути отримана шляхом поліноміальної апроксимації вольт-амперних та потужнісних характеристик.

1.3.2 Конфігурації сонячних панелей в складі фотоелектричних електростанцій

Продуктивність послідовно з'єднаних сонячних панелей залежить від рівномірності їх освітленості, температури і розкиду параметрів. При послідовному з'єднанні всі панелі мають той самий загальний струм, незважаючи на те, що більш освітлені панелі генерують більший фотострум порівняно з менш освітленими. У такому разі менш освітлені панелі є навантаженням і за відсутності відповідного захисту можуть вийти з ладу через перегрівання або перенапруження [12].

В даний час зростає тенденція інтегрування сонячних панелей до будівель, споруд та інших будівельних конструкцій. При такому підході розташування стає все важче уникнути часткового затінення від лежачих будівель і дерев протягом цілого дня. Ефект часткового затемнення має два механізми дії: перший полягає у зниженні інтенсивності сонячного випромінювання на поверхні сонячної панелі; другий - у збільшенні втрат на активному опорі еквівалентної схеми при протіканні загального струму через затінену частину панелі.

Застосування шунтуючих діодів при послідовному з'єднанні дозволяє уникнути значного зниження енергії, що генерується, а також убезпечити частково затінені панелі. Іншим рішенням цієї проблеми є застосування паралельного з'єднання в умовах нерівномірного освітлення, але при цьому підвищується вихідний струм і знижується напруга, що не завжди доцільно з точки зору забезпечення необхідної вихідної напруги і високого ККД системи в цілому [13]. При цьому базовими конфігураціями є послідовна та паралельна (рис. 1.7 а, б). Основні недоліки послідовної та паралельної конфігурацій полягають у тому, що вихідні струм та напруга визначаються однією сонячною панеллю відповідно.

У послідовно-паралельному з'єднанні модулі спочатку послідовно з'єднані, щоб отримати необхідну вихідну напругу, а потім-паралельно, для забезпечення необхідного рівня потужності. При цьому, забезпечується оптимальний розрахунковий рівень напруги та струму системи загалом за номінальних умов освітленості (рис. 1.7 в).

Конфігурації з мостовими зв'язками та стільникова дозволяють дещо покращити продуктивність фотоенергетичної системи в цілому в умовах

нерівномірного освітлення без застосування додаткових діодів шунтуючих (рис. 1.7 д, е).

Продуктивність фотоенергетичної системи в основному залежить від ККД сонячних панелей, а також від умов експлуатації та навколишнього середовища: температури сонячних елементів, рівня сонячного випромінювання та умов часткового затінення. Порівняльний аналіз показав, що за інших рівних умов при частковому затінненні та симетричній формі розташування сонячних модулів та відсутності шунтуючих та блокуючих діодів кращі показники має структура з перехресними зв'язками [20].

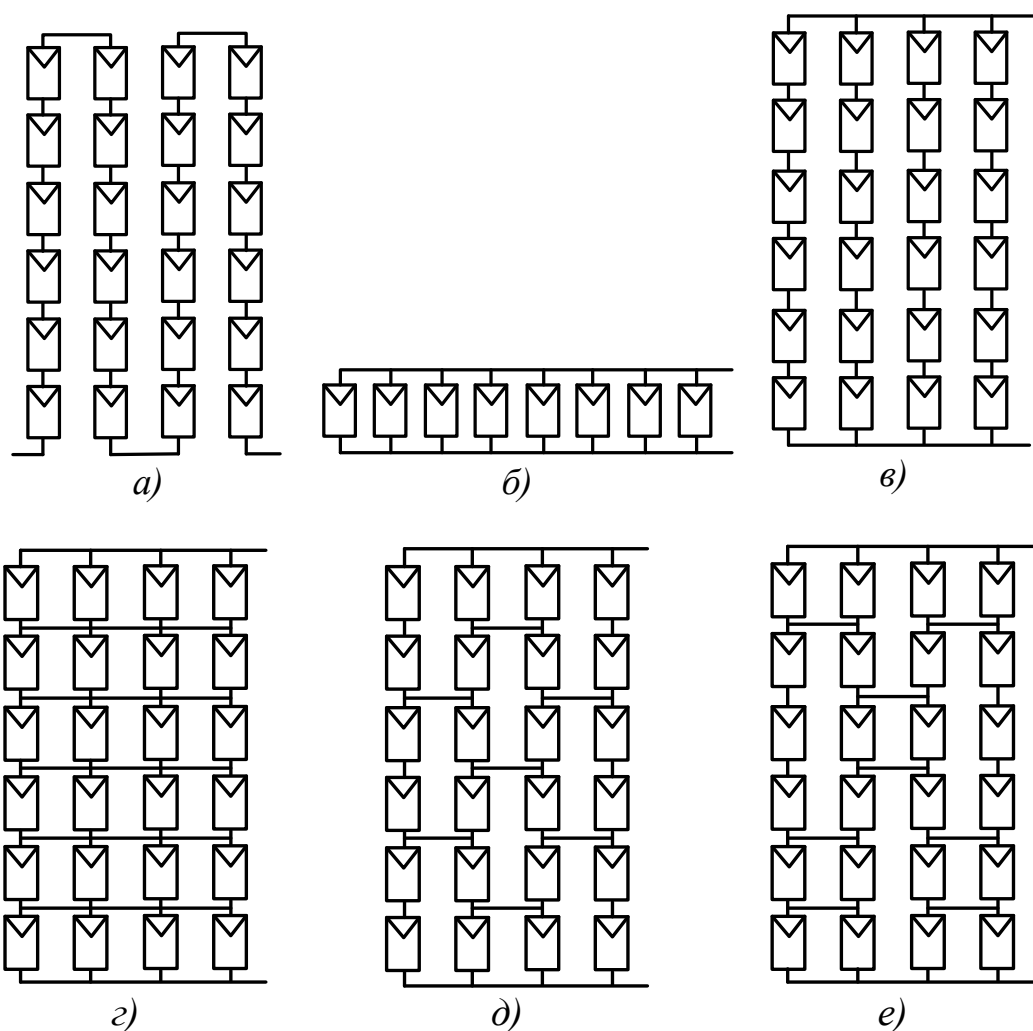


Рисунок 1.7 – Основні типи конфігурації СФЕМ:

а) послідовна конфігурація; б) паралельна конфігурація;

- в) паралельно-послідовна конфігурація;
 г) конфігурація з перехресними зв'язками; д) зміна з мостовими зв'язками; е)
 стільникова конфігурація

Одним з основних методів захисту сонячних панелей в умовах часткового затінення та підвищення ефективності системи в цілому є застосування шунтуючих діодів, які запобігають перегріву сонячних панелей, появі перенапруг, та втраті потужності на активному опорі окремих сонячних елементів.

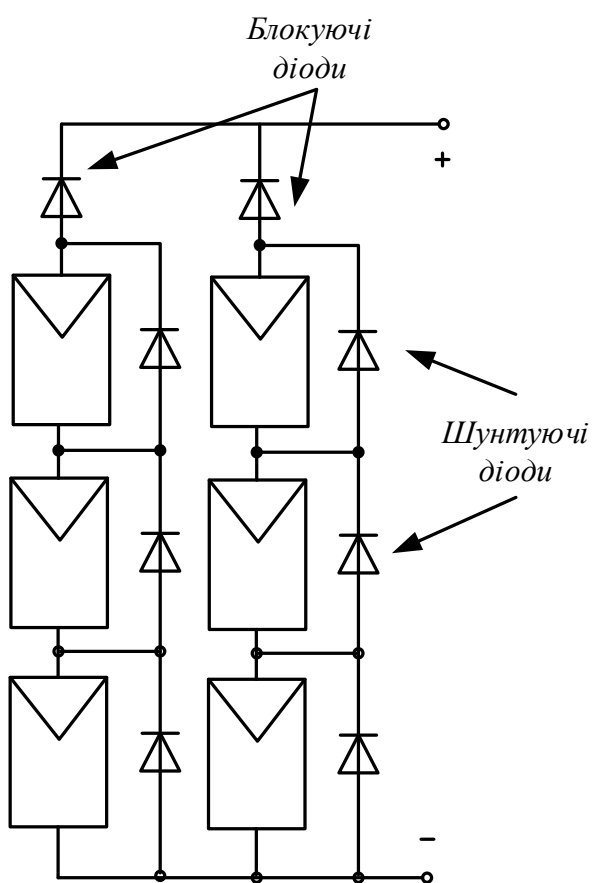


Рисунок 1.8 – Включення шунтуючих та блокуючих діодів

Кожне послідовне з'єднання фотоелементів усередині сонячної панелі також може містити послідовний блокуючий діод (рис.1.8), який запобігає протіканню струму у зворотному напрямку при частковому затіненні або виході з ладу сонячної частини.

Як шунтуючі і блокуючі діоди доцільно використовувати інтелектуальні діоди (*Smart Bypass Diodes*), які забезпечують низький опір у провідному стані, а отже, малу потужність втрат на активному опорі (рис.1.9).

Інтелектуальний шунтуючий діод складається з польового транзистора FET, драйвера управління *Controller FET Driver* та джерела живлення *Charge Pump Voltage Source*, робота якого забезпечується при напрузі прямого падіння зворотного діода транзистора 0,7В.

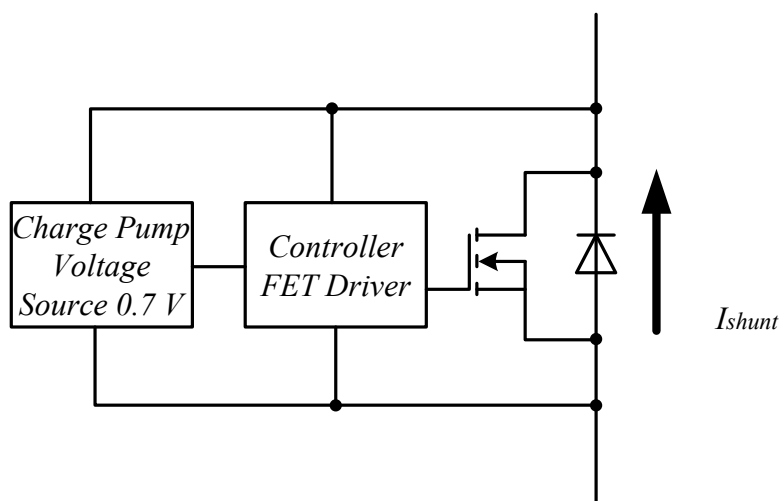


Рисунок 1.9 – Внутрішня структура інтелектуального шунтуючого діода

Принцип роботи такого шунтуючого діода полягає в тому, що при протіканні прямого струму через зворотний діод транзистора, інтервал $t_0 - t_1$ (рис.1.6), джерело живлення отримує напругу прямого зміщення діода 0,7В. Цієї напруги достатньо для переведення основного транзистора в провідний стан на інтервалі часу $t_1 - t_2$, що значно знижує пряме падіння напруги (26 мВ при 8А прямого струму).

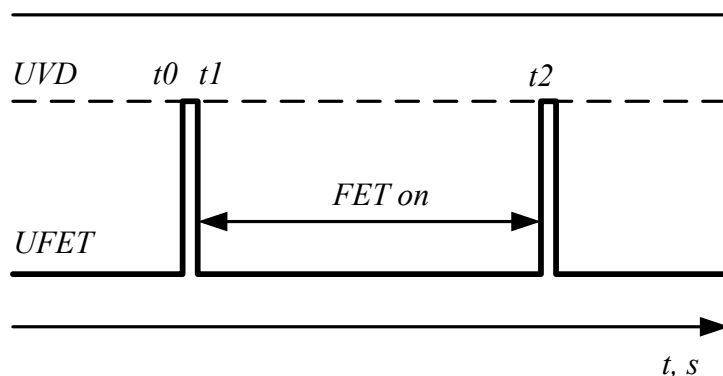


Рисунок 1.10 – Інтелектуальний шунтуючий діод (SM74611 Smart Bypass Diode) діаграма роботи

Після розряду джерела живлення під час включеного стану транзистора процес повторюється. При цьому, значну частину роботи інтелектуального шунтуючого діода (понад 90%) польовий транзистор знаходиться у відкритому стані.

1.3.3 Перетворювачі з функцією відбору максимальної потужності сонячних панелей

Серед сучасних схемотехнічних рішень для розподілених фотоенергетичних систем, які дозволяють знизити вплив часткового затінення та забезпечити відбір максимальної потужності від одиначної сонячної панелі є індивідуальні узгоджувальні перетворювачі, відомі як MPPT контролери (MPPT – maximum power point tracking) (рис.1.11).

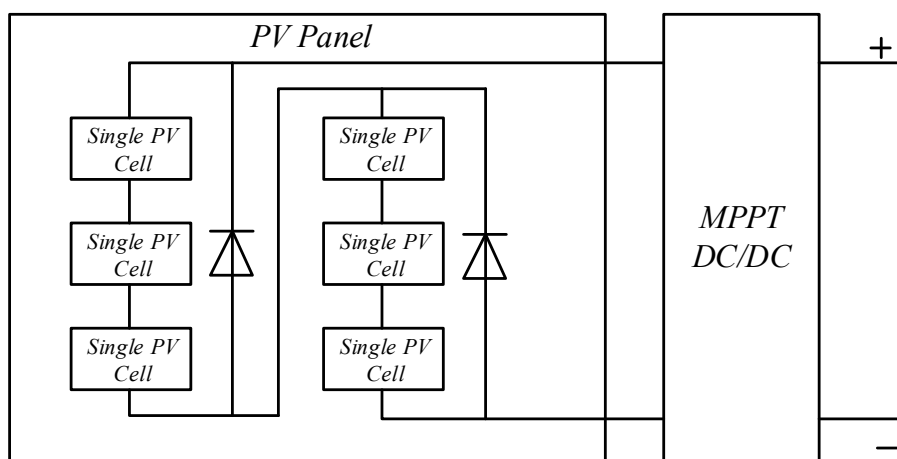
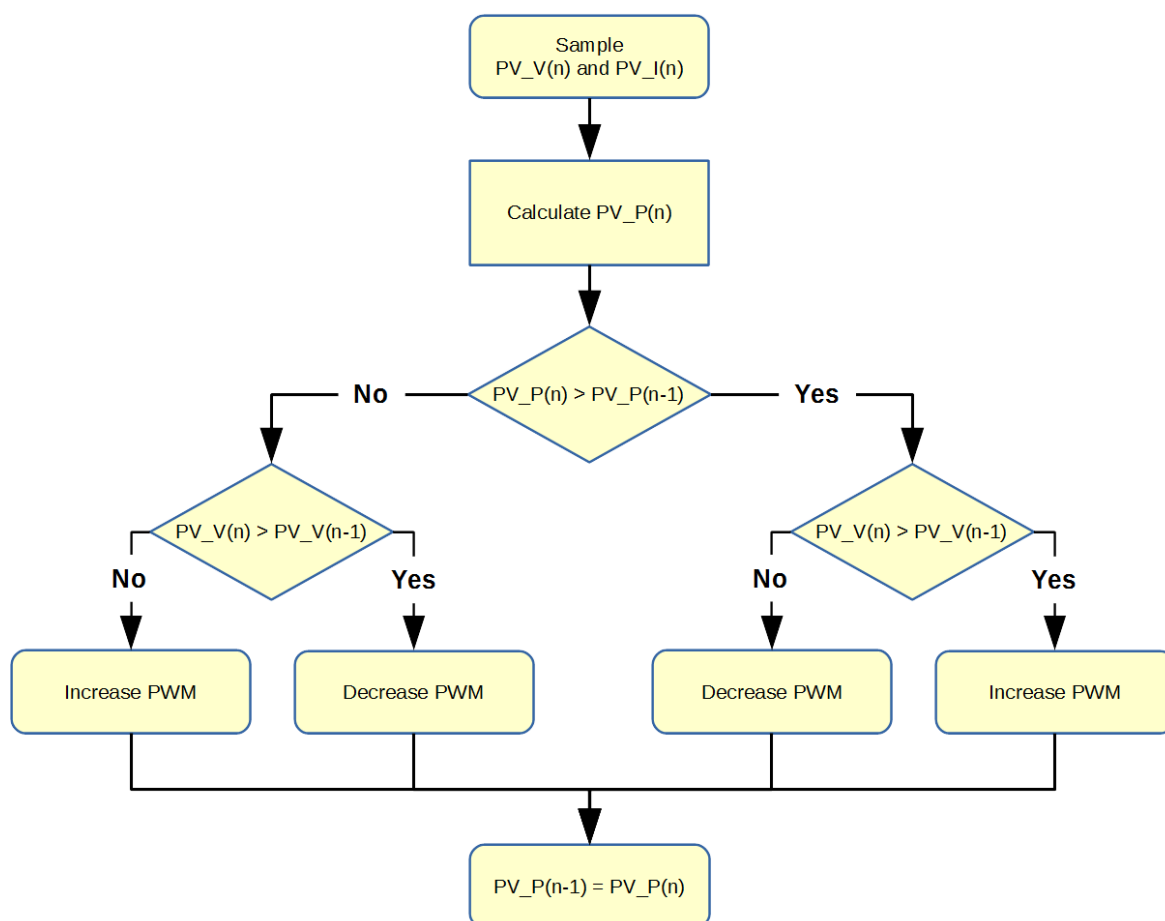


Рисунок 1.11 – Сонячна панель із напівпровідниковим перетворювачем відбору максимальної потужності

Як видно з потужнісних характеристик сонячних панелей рис.1.4, потужність, що генерується сонячними панелями при тому самому рівні сонячної радіації та температури також залежить від величини струму, що від неї споживається.

MPPT контролер - це *DC/DC* перетворювач, метою якого є регулювання вхідного струму (вихідного струму сонячної панелі), таким чином, щоб відібрати з сонячних панелей максимальну можливу потужність.

Найбільш популярним алгоритмом визначення максимальної потужності сонячних панелей є Peterb and Observe (збурення та вимірювання). Даний алгоритм відноситься до класу пошукових алгоритмів, який експериментально визначає точку максимальної потужності шляхом дискретного збільшення струму сонячних панелей, вимірювання отриманого значення потужності, та порівняння з попереднім значенням потужності до збурення. Типовий алгоритм визначення точки максимальної потужності сонячних панелей [14] представлено на рис.1.12.



Рисунку 1.12 – Алгоритм визначення точки максимальної потужності сонячних панелей «*Peterb and Observe*», що використовується в MPPT контролері

Цей клас перетворювачів використовується, як узгоджувальні вихідні параметри сонячних панелей, і встановлюються безпосередньо на кожну сонячну панель, або підключається до цілих блоків сонячних панелей з'єднаних паралельно, послідовно чи послідовно/паралельно. Мікроконвертери та оптимайзери є перетворювачами постійної напруги в постійну і реалізують функцію відбору максимальної потужності.

Сучасна тенденція розвитку схемотехніки для розподілених фотоенергетичних систем полягає у зменшенні числа модулів, що обслуговуються індивідуальними узгоджувальними DC/DC перетворювачами з функцією відбору максимальної потужності, які також можуть забезпечувати гальванічну ізоляцію кожної сонячної панелі, що дозволяє значно знизити негативний вплив часткового ефекту та підвищити ефективність та безпеку системи в цілому.

Таким чином, індивідуальні узгоджувальні перетворювачі вирішують проблему часткового затінення сонячних панелей і оптимізують роботу одиничної панелі з точки зору максимізації енергії і режимів роботи сонячних панелей.

1.4 Напівпровідникові перетворювачі у системах сонячних електростанцій

1.4.1 Структури і конфігурації сонячних електростанцій

Сонячна енергетика стрімко розвивається завдяки технологічному прогресу у виробництві сонячних панелей, підвищенню їх ефективності та зниженню вартості. У зв'язку з цим було розроблено цілу низку топологій фотоенергетичних систем, які можна розділити на дві групи [15].:

- автономні фотоенергетичні системи, які вимагають застосування різноманітних накопичувачів електроенергії;
- фотоенергетичні системи, що підключаються до мережі змінного струму, які можуть містити накопичувачі енергії та можуть використовувати промислову мережу як основний приймач та накопичувач електричної енергії.

У свою чергу системи, що підключаються до мережі змінного струму, можна класифікувати за внутрішньою структурою, а саме:

1. Фотоенергетичні системи з одноступеневим перетворенням електричної енергії, які містять сонячні панелі *Solar Panels* та єдиний перетворювач постійної напруги в змінну *DC/AC*. Мережевий *DC/AC* перетворювач забезпечує функцію відбору максимальної потужності (MPPT), контроль основних параметрів системи, передачу електроенергії, що генерується, в промислову мережу *AC Power Grid* і електромагнітну сумісність (рис. 1.13).

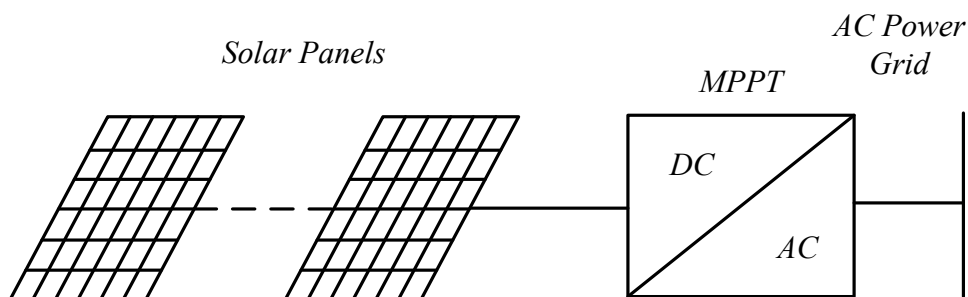


Рисунок 1.13 – Фотоенергетичні системи з одноступінчастим перетворенням енергії

2. Фотоенергетичні системи із двоступеневим перетворенням енергії, в яких присутні два типи перетворювачів з різними функціями:

- перший, узгоджуючий, DC/DC перетворювач забезпечує функцію відбору максимальної потужності MPPT та оптимізацію роботи сонячних панелей;
- другий, мережевий DC/AC перетворювач забезпечує передачу енергії, що генерується в промислову мережу змінного струму, електромагнітну сумісність і контроль основних параметрів системи (рис. 1.14).

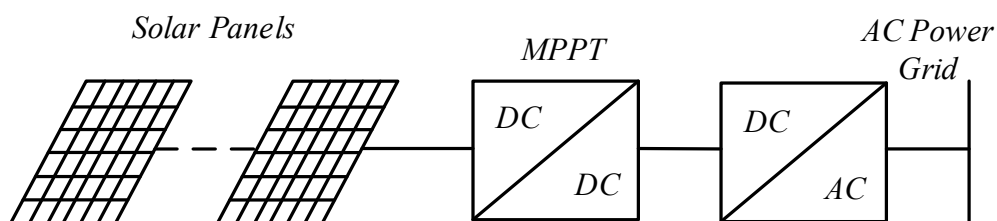


Рисунок 1.14 – Фотоенергетичні системи із двоступінчастим перетворенням енергії

3. Фотоенергетичні системи з багаступінчастим перетворенням енергії характеризується наявністю кількох DC/DC перетворювачів, що забезпечують функцію відбору максимальної потужності MPPT. При цьому узгоджувальні перетворювачі можуть бути підключені паралельно або послідовно по виходу для формування необхідної сумарної вихідної напруги та потужності. Наступний, центральний, DC/AC перетворювач забезпечує передачу енергії, що генерується в промислову мережу змінного струму, електромагнітну сумісність і контроль основних параметрів системи (рис. 1.15).

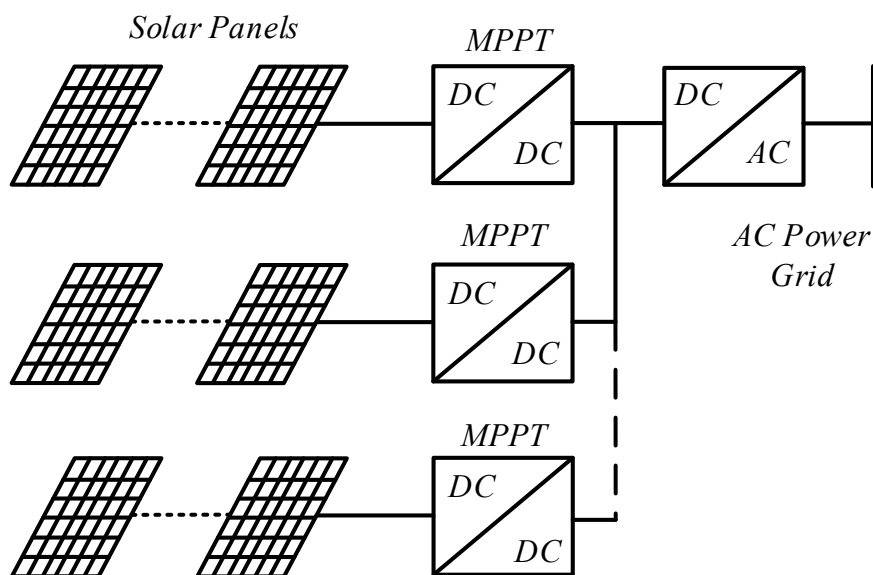


Рисунок 1.15 – Фотоенергетичні системи з двоступінчастим перетворенням енергії

Наведені вище структури дають загальну ідеологію розподілу функцій, що виконуються напівпровідниковими перетворювачами, та застосування індивідуальних DC/DC перетворювачів з метою побудови розподілених фотоенергетичних систем.

В даний час застосовуються чотири основні конфігурації при виробництві комерційних фотоенергетичних систем:

1. Система з центральним інвертором: зазвичай використовується єдиний інвертор перетворення постійної напруги фотоелектричних панелей.

У таких системах сонячні панелі утворюють послідовно-паралельне з'єднання з єдиною лінією постійного струму, що підключається до входу перетворювача мережі (рис. 1.16).

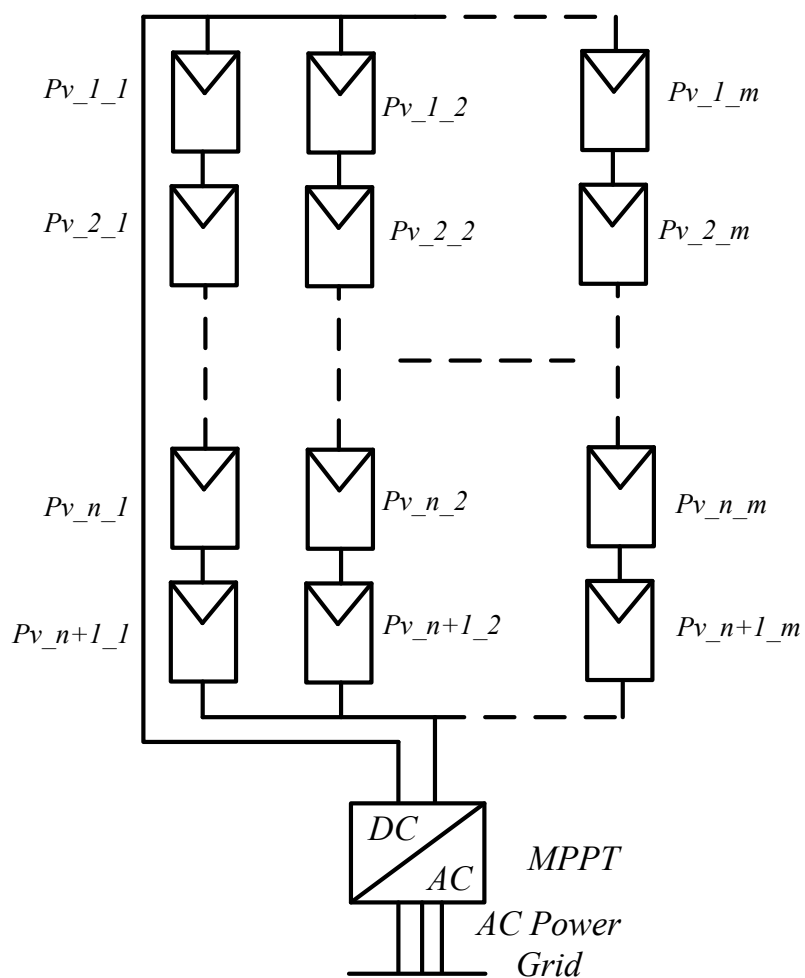


Рисунок 1.16 – Система із центральним інвертором

2. Система з проміжними узгоджувальними DC/DC перетворювачами: кожен послідовний ланцюжок сонячних панелей має індивідуальний узгоджувальний перетворювач, який може також забезпечувати гальванічну розв'язку. При цьому, всі узгоджувальні перетворювачі утворюють єдину лінію постійного струму, яка є джерелом живлення для DC/AC мережного перетворювача (рис. 1.17).

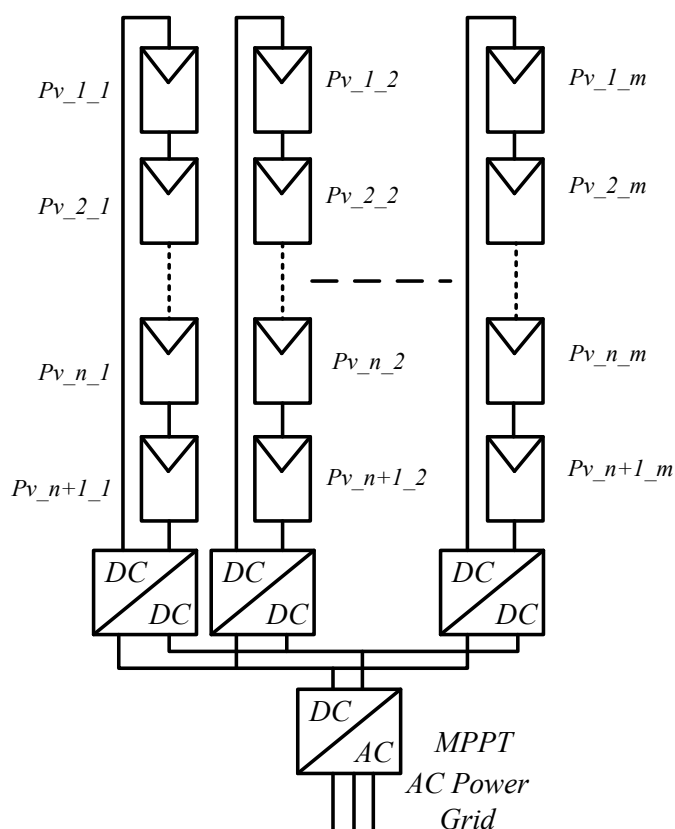


Рисунок 1.17 – Система з проміжним DC/DC перетворювачами та проміжною лінією постійного струму

3. Система з індивідуальними DC/AC перетворювачами: кожен послідовний ланцюжок сонячних панелей має індивідуальний мережевий перетворювач, при цьому, мережеві перетворювачі підключаються паралельно до промислової мережі змінного струму та забезпечують функцію відбору максимальної потужності та електромагнітну сумісність (рис. 1.18).

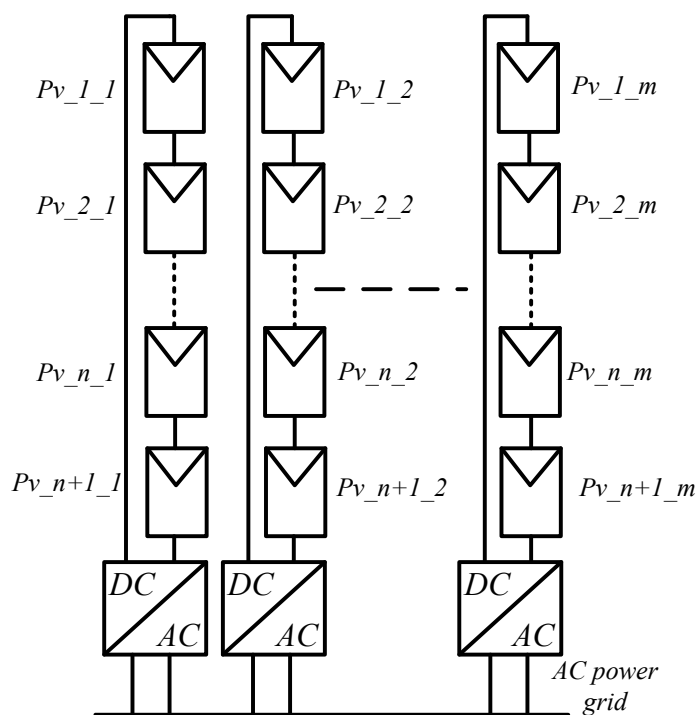


Рисунок 1.18 - Система з індивідуальними DC/AC перетворювачами для підключення до мережі змінного струму

4. Система з індивідуальними DC/AC перетворювачами для кожної сонячної панелі: кожна сонячна панель має індивідуальний мережевий перетворювач, при цьому мережеві перетворювачі підключаються паралельно, утворюючи лінію змінного струму, яка підключається безпосередньо до промислової мережі (рис. 1.19).

Ця топологія застосовується досить рідко у зв'язку з тим, що сонячні панелі з необхідними вихідними параметрами не набули широкого поширення.

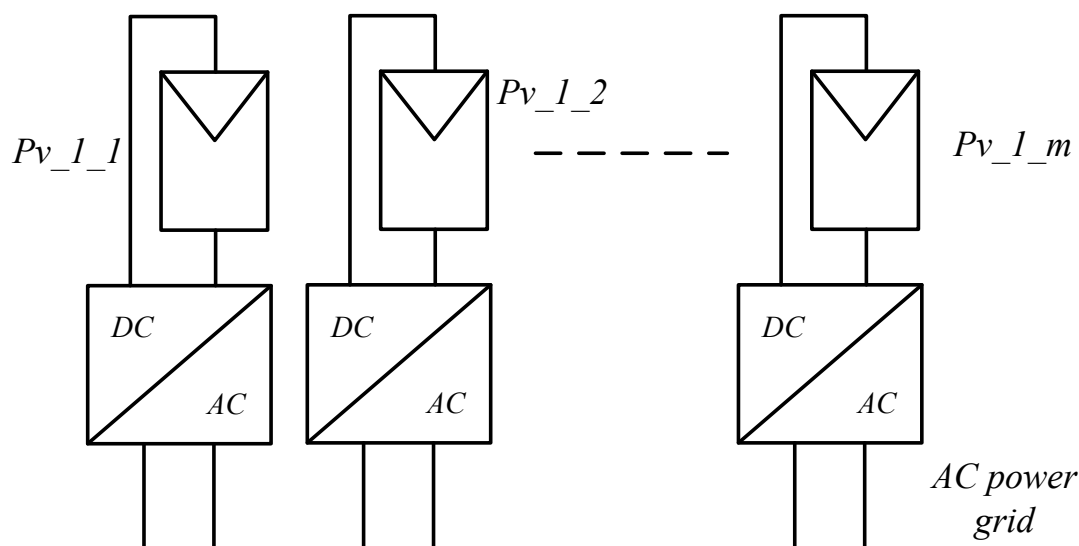


Рисунок 1.19 – Система з індивідуальними DC/AC перетворювачами для кожної сонячної панелі

З розглянутих структур можна зробити висновок, що напівпровідникові перетворювачі, що застосовуються в розподілених фотоенергетичних системах, можна розділити на два типи за функціями, що виконуються, і розташуванням в структурі:

1. DC/DC перетворювачі, що забезпечують функцію відбору максимальної потужності, і встановлюються безпосередньо на сонячну панель або невелику їх кількість;
2. Мережеві інвертори, що забезпечують передачу електричної енергії від ланки постійного струму ФЕС до трифазної електричної мережі.

1.5 Схеми перетворювачів, що забезпечують режим відбору максимальної потужності сонячних панелей

В даний час представлений цілий спектр узгоджувальних DC/DC перетворювачів, мікроконверторів та оптимайзерів.

До цього класу перетворювачів висуваються певні вимоги:

- діапазон регулювання вихідної напруги повинен відповідати вихідним напругам сонячної панелі в точці максимальної потужності за різних умов освітленості;

- застосованість алгоритмів пошуку точки максимальної потужності в повному діапазоні регулювання вихідної напруги, що дозволяє забезпечити максимальну вихідну потужність при будь-яких рівнях освітленості сонячних панелей;

- безперервність та мала пульсація вхідного струму, що дозволяє продовжити термін експлуатації сонячних панелей та підвищити точність визначення точки максимальної потужності;

- постійна вихідна напруга необхідна для забезпечення можливого послідовного або паралельного підключення перетворювачів після виходу;

- гальванічна ізоляція, якщо висувуються додаткові вимоги щодо умов безпеки;

- високий ККД та надійність;

- термін необслуговуваної експлуатації узгоджувальних перетворювачів та сонячних панелей повинні бути приблизно рівними.

Даним вимогам задовольняє ряд перетворювачів без гальванічної ізоляції: знижуючий (*Buck*), підвищуючий (*Boost*), підвищуючий-знижуючий (*Buck-Boost*), *SEPIC* (*Single-Ended Primary Inductance Converter*) та перетворювач Кука (рис. 1.20).

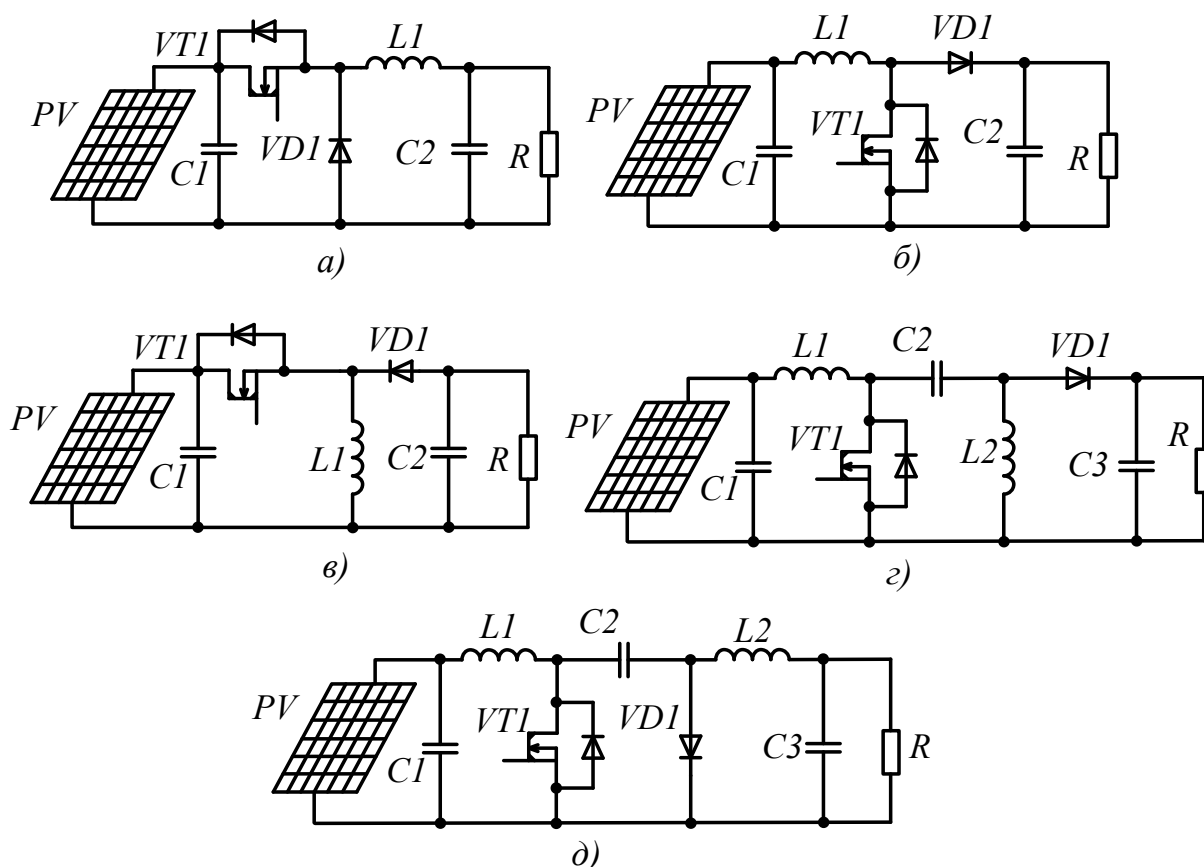


Рисунок 1.20 – Основні топології застосовуваних узгоджувальних перетворювачів без гальванічної ізоляції: а) знижуючий перетворювач (Buck); б) підвищуючий перетворювач (Boost); в) підвищуючий-знижуючий перетворювач (Buck-Boost); г) перетворювач SEPIC; д) перетворювач Кука

Знижувальний перетворювач (*Buck converter*) (рис. 1.20, а) забезпечує регулювання вихідної напруги в діапазоні від нуля до величини вхідної напруги (насправді верхня межа дещо менша, що пов'язано з втратами в ключових елементах схеми). Знижуючий перетворювач є найпростішим з погляду схемотехніки та системи управління.

У схемі синхронного понижуючого перетворювача діод замінений польовим транзистором MOSFET. Так як падіння напруги на MOSFET транзисторі значно менше падіння напруги на діоді при тому самому струмі, то ККД схеми значно зростає за рахунок зниження статистичних втрат, особливо при значеннях вихідної напруги, порівнянних з падінням напруги на діоді. Інша особливість даного

перетворювача полягає в тому, що синхронний перетворювач працює тільки в режимі безперервних струмів, що пояснюється здатністю транзистора MOSFET проводити струм в обох напрямках (від стоку до витоку і навпаки).

Знижуючий перетворювач у загальному випадку має лінійну регулювальну характеристику, що спрощує застосування алгоритмів пошуку точки максимальної потужності у всьому діапазоні регулювання та підвищує їхню швидкість.

Підвищуючий перетворювач (*Boost converter*) (рис. 1.20, б) використовується у тих випадках, коли потрібно отримати вихідну напругу, що перевищує напругу джерела живлення. Важливою особливістю перетворювача, що підвищує, є те, що він споживає від джерела живлення безперервний струм (у понижувальному перетворювачі необхідно використовувати додатковий фільтруючий вхідний конденсатор для забезпечення безперервного струму джерела). Слід зазначити, що часто можна зустріти модифіковану схему перетворювача, що підвищує синхронний перетворювач. У такому перетворювачі, як і в знижувальному, діод замінюється на MOSFET транзистором, що дозволяє підвищити ККД перетворювача.

Підвищуючий - знижуючий перетворювач (рис. 1.20, в) містить єдиний дросель і забезпечує інвертовану вихідну напругу як вище, так і нижче за вхідний. Основною перевагою даного перетворювача є мала кількість компонентів, а основним недоліком - великі пульсації вхідної напруги без додаткового ємнісного фільтра та перенапруги на ключових елементах схеми.

Регулювальні характеристики як підвищуючого, так і інвертуючого перетворювачів істотно нелінійні, що негативно впливає на реалізацію функції відбору максимальної потужності.

Перетворювач Кука (рис. 1.20, д), також забезпечує інвертовану вихідну напругу як вище, так і нижче вхідної по відношенню до вхідної напруги. Основною перевагою даного перетворювача є безперервність вхідного та вихідного струмів, а основним недоліком-перенапруга на ключових елементах та складність структури.

Основною відмінністю перетворювача SEPIC є інвертована вихідна характеристика (рис. 1.20, г). Цей перетворювач забезпечує вхідний струм без пульсацій, що позитивно впливає термін служби сонячних панелей.

Для підвищення безпеки та забезпечення захисту фотоенергетичних систем мережевий інвертор вимагає гальванічної ізоляції, яка може бути отримана шляхом включення мережевого трансформатора на частоті мережі або високочастотного трансформатора у DC/DC перетворювачі.

Для малих і середніх потужностей більш переважно використання високочастотних трансформаторів, які мають значно меншу вагу, габарити та вартість.

Найбільш простим та широко застосовуваним перетворювачем для фотоенергетичних систем без гальванічної ізоляції є понижувальний (*Buck*) перетворювач (рис. 1.20, а).

Знижувальний перетворювач (рис. 1.20, а) має наступні переваги при використанні спільно з сонячними панелями:

1. Не інвертована полярність вихідної напруги.
2. Низька пульсація вхідного струму при використанні конденсатора, що фільтрує.
3. Висока надійність та ККД.
4. Простота конструкції та системи, низька вартість компонентів.
5. Забезпечення роботи сонячної панелі в точці максимальної потужності за лінійної регульовальної характеристики.

Найбільш поширені топології перетворювачів, які застосовуються для забезпечення гальванічної ізоляції сонячних панелей, такі: SEPIC з гальванічною ізоляцією; мостовий перетворювач; напівмостовий перетворювач; двотактний перетворювач (рис. 1.21).

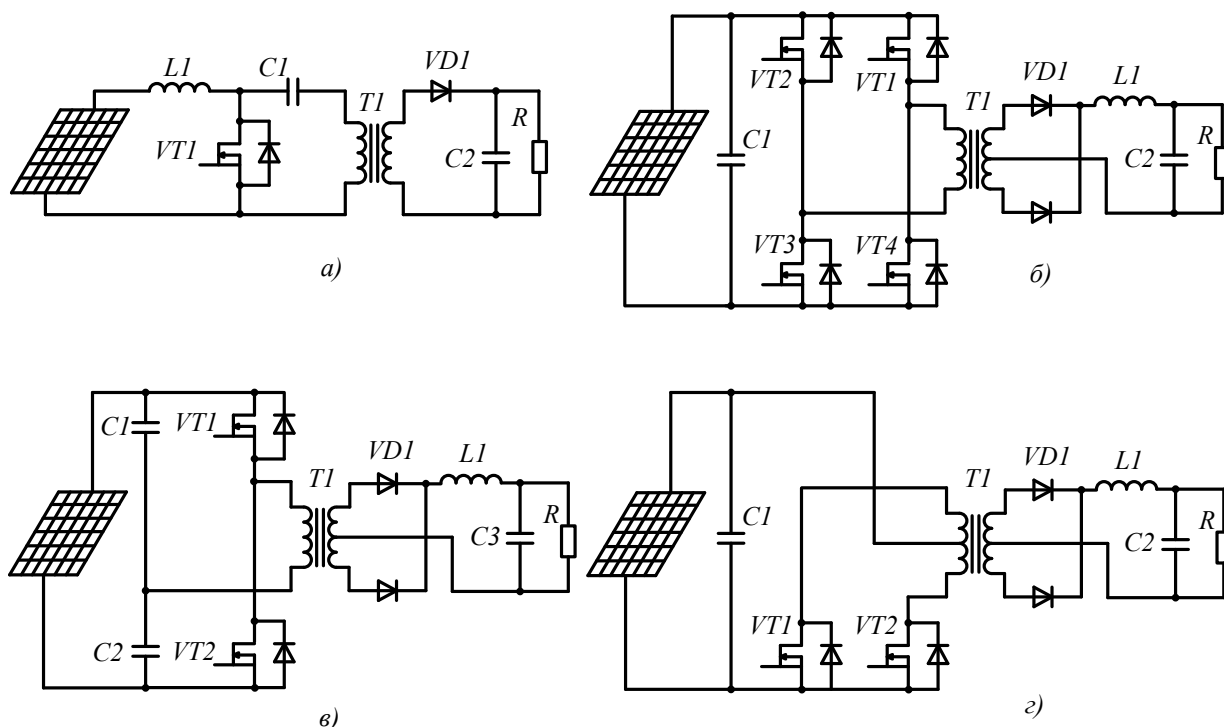


Рисунок 1.21 – Топології узгоджувальних перетворювачів з гальванічною ізоляцією: а) *SEPIC (Isolated Single Ended Primary Inductance converter-перетворювач з несиметрично навантаженою первинною індуктивністю)*; б) мостовий перетворювач; в) напівмостовий перетворювач; г) двотактний перетворювач

Вибір конкретної схеми перетворювача також багато в чому залежить від певної структури розподіленої фотоенергетичної системи, величин необхідної вихідної напруги та струму, вимог щодо гальванічної ізоляції кожної сонячної панелі, а також надійності та вартості системи загалом.

1.6 Схеми мережевих інверторів сонячних електростанцій

Перетворювачі *DC/AC*, що забезпечують зв'язок між сонячними панелями або індивідуальними узгоджувальними перетворювачами з промисловою мережею змінного струму, є невід'ємною частиною сучасних фотоенергетичних систем.

В даний час застосовується велика кількість топологій перетворювачів як одно-, так і трифазних для підключення відновлюваних джерел енергії до мережі змінного струму, які можна класифікувати за такими ознаками:

1. За кількістю ступенів перетворення енергії перетворювачі класифікуються як:

- перетворювач, що підключається безпосередньо до сонячних панелей, який забезпечує режим роботи в точці максимальної потужності, електромагнітну сумісність та контроль параметрів мережі, перетворення рівня напруги;

- перетворювач з додатковим DC/DC перетворювачем (або їх послідовним або паралельним з'єднанням), що забезпечує функцію відбору максимальної потужності. При цьому, функцію перетворення параметрів електричної енергії можуть виконувати обидва перетворювачі.

2. За наявності гальванічної ізоляції між сонячними панелями та мережею змінного струму: з гальванічною ізоляцією та без гальванічної ізоляції.

3. За типом трифазного мережевого інвертора:

а) Інвертори напруги (рис.1.22), при цьому необхідна наявність додаткового перетворювача, що підвищує, для підтримки напруги в ланці інвертора на необхідному рівні (в загальному випадку на 20 % вище амплітуди напруги мережі живлення) і забезпечення режиму роботи в точці максимальної потужності сонячних панелей. Загальним недоліком застосування інвертора напруги як мережного перетворювача є застосування додаткового перетворювача, що підвищує втрати потужності в системі. Також для зниження напруги на сонячних панелях підключають середню точку промислової мережі до середньої точки вхідної напруги інвертора.

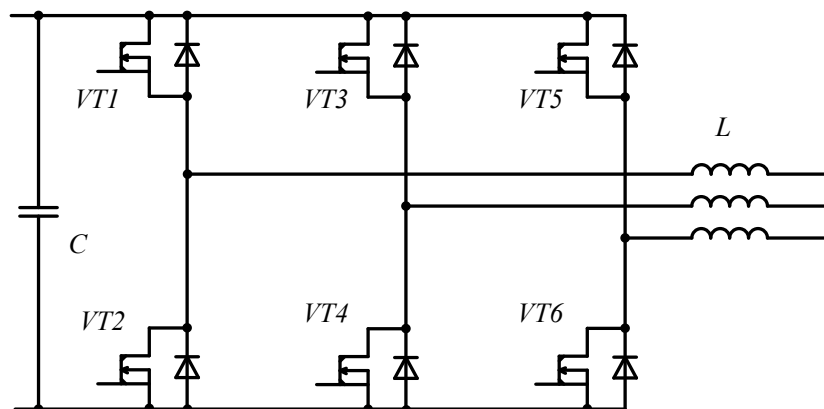


Рисунок 1.22 – Схема трифазного мережевого інвертора напруги з MOSFET транзисторами

б) Інвертори струму є альтернативним рішенням у порівнянні із застосуванням інверторів напруги (рис. 1.23). Інвертор струму може бути підключений безпосередньо до сонячної панелі і забезпечувати режим роботи в точці максимальної потужності без застосування додаткового перетворювача за рахунок можливості роботи при зміні входної напруги в широких межах. При цьому, входна напруга повинна бути обмежена на рівні 80 - 90 % від амплітуди фазної напруги мережі живлення за умов роботи перетворювача в підвищуючому режимі.

Основним недоліком застосування інверторів струму у застосуванні сонячної енергетики є необхідність застосування двоквадратних ключів знакозмінної напруги, що збільшує статистичні втрати провідності у ключах.

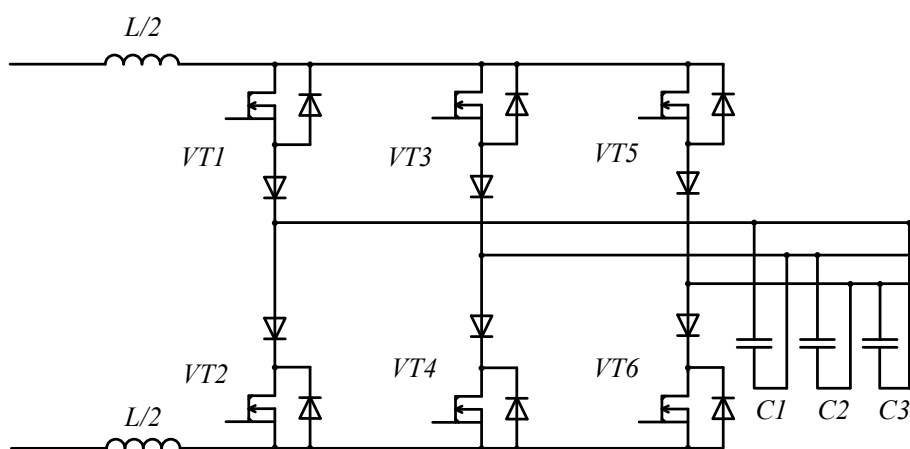


Рисунок 1.23 – Схема трифазного мережевого інвертора струму

в) Імпедансні інвертори (ZSI) є комбінацією перших двох типів з погляду властивостей входного ланцюга (рис. 1.24).

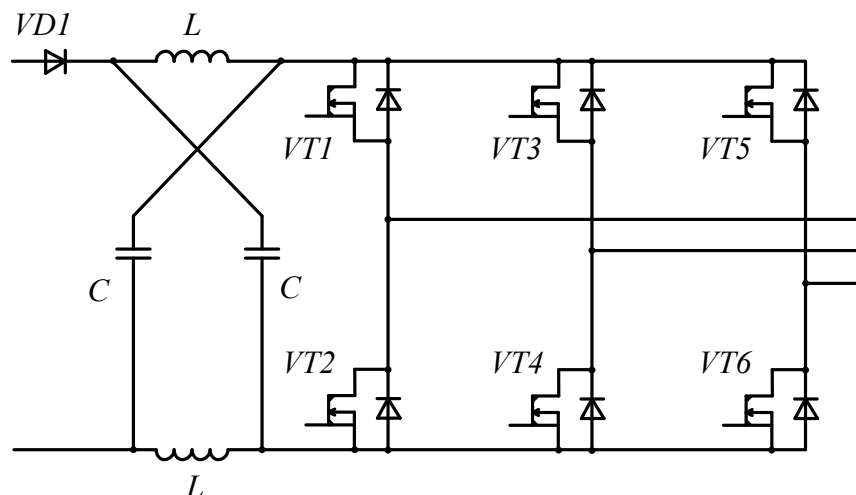


Рисунок 1.24 – Загальна структура трифазних імпедансних інверторів

Основним недоліком застосування імпедансних інверторів є необхідність застосування додаткового діода VDI та великої кількості реактивних компонентів.

4. За кількістю рівнів напруги:

а) дворівневі перетворювачі знаходять застосування у низьковольтних промислових мережах змінного струму;

б) багаторівневі перетворювачі використовують ідею формування синусоїдальної напруги з кількох рівнів напруги та застосовуються, в основному, для високовольтних промислових мереж змінного струму.

В цілому, для інтеграції в низьковольтні електричні мережі джерел відновлюваної енергії, і, зокрема, сонячних, найбільш широке застосування отримали трифазні дворівневі перетворювачі, як інвертори струму, так і інвертори напруги.

При цьому, інвертори струму та інвертори напруги, що працюють в режимі формування синусоїдальної форми струмів, що генерується до електричних мереж мають свої особливості. Інвертор напруги для реалізації режиму корекції коефіцієнту потужності вимагає напруги в ланці постійного струму вище амплітудного значення лінійної напруги електричної мережі. Що вимагає досить суттєвої кількості послідовно з'єднаних сонячних панелей, чи застосування підвищуючого DC/DC перетворювача, що забезпечує потрібний рівень напруги.

1.7 Вимоги українських і міжнародних стандартів щодо якості електричної енергії генерованих сонячними електростанціями

Обмеження гармонік у фотоелектричних системах є важливим загальним аспектом якості електричної енергії.

Струм, генерований сонячними електростанціями до електричних мереж містить певну кількість спотворень, які мають основну частоту, що відповідає частоті напруги мережі, вищі гармоніки, що відповідають частоті комутації силових транзисторів перетворювачів в складі ФЕС, та гармоніки кратні частоті комутації. Загальний коефіцієнт гармонійних спотворень (THD), є найпопулярнішим показником для вимірювання рівня гармонійних спотворень напруги та струму. THD визначається як відношення середньоквадратичного значення всіх гармонічних компонентів до середньоквадратичного значення основного компонента. Зазвичай, він виражається у відсотках (%). Ці спотворення у формах сигналів напруги та струму призводять до зміни їхніх нормальних характеристик або форми. Це класифікується як серйозна проблема якості електроенергії. Як обговорювалося вище, у фотоелектричній системі гармоніки можуть виникати завдяки використанню інвертора, перетворювача та інших силових електронних пристроїв. У цьому контексті фотоелектричні електростанції містять кілька силових електронних пристроїв, які створюють спотворення. Крім того, амплітуди високої гармоніки струму та напруги створюють додаткові втрати в електромережі та несправність пристроїв захисту з боку мережі. Тому введено суворе регулювання, щоб забезпечити менший рівень гармонійних спотворень у точці загального зв'язку (РСС). Гармонійні спотворення можна охарактеризувати та виміряти за допомогою повного гармонійного спотворення (THD) напруги або струму.

ДСТУ ІЕС 61727:2019 Системи фотоелектричні. Характеристики точок підключення до інженерних мереж (ІЕС 61727:2004, IDT). Стандарт ДСТУ ІЕС 61727:2019 поширюється на фотоелектричні системи номінальною потужністю не більше 10 кВА з однофазним або трифазним змінним струмом на виході системи,

призначені для застосування у приватному секторі. Стандарт визначає, що фотоелектрична система (photovoltaic system. PV system) - це система, що перетворює сонячну енергію на електричну за допомогою прямого перетворення та використовує її для часткового або повного покриття електричних навантажень споживача та/або передачі її в мережу. Стандарт визначає вимоги до гармонійного спектру струму сонячного інвертора та зазначає, що сумарний коефіцієнт гармонійних складових не повинен перевищувати 5%.

Також стандарт вимагає, щоб коефіцієнт потужності фотоелектричної системи був не меншим за 0,9 при зниженні вихідної потужності інвертора до 50% від її номінального значення.

Допустимий вміст вищих гармонік струму генерованого сонячними електростанціями згідно вимог стандарту ДСТУ ІЕС 61727:2019 представлено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Допустимий вміст вищих гармонік струму генерованого до сонячними електростанціями

Порядок гармонік	Максимально допустиме значення коефіцієнту гармонійних спотворень, %
Непарні гармонійні складові	
3 - 9	4
11 - 15	2
17 - 21	1,5
23 - 33	0,6
Парні гармонійні складові	
2 - 8	4
10 - 32	2

Під час просування вимог до інтеграції фотоелектричної системи в мережу вводяться різні стандарти гармонійних спотворень; однак вони схожі, за винятком EREC G83 і VDE-AR-N4105, які є особливо суворими, у яких встановлений THD

для інтеграції *PV* має бути менше 3%. Стандарт IEEE Std 519 - Рекомендовані практики та вимоги до контролю гармоній в електроенергетичних системах забезпечує основу для обмеження гармонік. Відповідно до стандарту IEEE-519 важливі наступні моменти. Граничні значення гармонійного струму вказують максимальну величину гармонічного струму, яку клієнт може ввести в електричну систему, тобто клієнт несе відповідальність за підтримку гармонічних компонентів струму відповідно до допустимих меж. Обмеження струму змінюються залежно від відношення струму короткого замикання на РСС до струму навантаження (I_{sc}/I_L). Постачальник електроенергії відповідає за підтримку якості напруги в енергосистемі.

Таблиця 1.2 – Вимоги міжнародних стандартів щодо параметрів якості напруги в точці підключення фотоелектричних електростанцій

Стандарт	Напруга мережі, кВ	Максимальний вміст індивідуальних гармонік, %	Максимальне значення коефіцієнту гармонійний спотворень напруги, %
IEEE 519	<1	5%	8%
	15-69	3%	5%
	69-161	1,5%	2,5%
	>161	1%	1,5%
IEC 61000-3-2	13-69	3%	5%
	69-161	1,5%	2,5%
	>161	1%	1,5%

Таблиця 1.3 – Вимоги міжнародних стандартів щодо допустимого вмісту вищих гармонік генерованих фотоелектричними системами

Стандарт	Тип гармонік	Порядок гармонік	Допустимий вміст гармонік	Допустиме значення коефіцієнту гармонійних спотворень
IEEE 1547 аналогічний AS/NZS 4777.2 Австралія, Китай,	непарні	3-9	<4%	5%
		11-15	<2%	
		17-21	<1,5%	
		23-33	<0,6%	
		Більше 33	<0,3%	
	парні	2-8	<1%	
		10-32	<0,5%	
EREC G83	непарні	3-7	<2% чи <0,77%*	3%
		9-11	<2,4% чи <0,21%*	
		11-15	<0,15%	
	парні	2-6	<0,03	
		16-40	<0,23%	
IEC 61000-3-2	непарні	3-7	<3,45 чи <1,15%*	5%
		9-11	<0,6% чи <0,3%*	
		11-15	<0,225%	
	парні	2-6	<1.6% <0,45%*	
		8-40	<0.345%	

*в залежності від потужності та конфігурації системи.

З огляду на існуючі українські та міжнародні стандарти можна зробити наступні висновки:

- В Україні є два діючі стандарти з різними вимоги, що визначають параметри якості напруги живлення в електричних мережах та вносять невизначеність в їх застосування;

- Українські стандарти, що обмежують гармонійний склад струмів загальнопромислових та побутових приладів діють виключно для пристроїв малої та середньої потужності (потужність трифазного пристрою до 51,75кВт). У той же час, гармонійний склад потужних споживачів, таких як тягові підстанції постійного струму залізниць та метрополітенів, потужні частотні перетворювачі та інші споживачі, не регламентуються

- Аналогічно стандартами регламентуються параметри якості електричної енергії сонячних електростанцій малої потужності (до 10кВА). У той же час, генерація вищих гармонік струмів потужними сонячними електростанціями не обмежується;

- В Україні ВІДСУТНІ стандарти, що обмежують долю спожитої реактивної потужності в електричних мережах;

- Міжнародні стандарти мають більш жорсткі вимоги до параметрів якості електричної енергії ніж українські, що є проблемою до узгодження стандартів та фактичних параметрів якості електроенергії України та ЕС.

1.8 Проблематика зниження параметрів якості електричної енергії генерованою сонячними електростанціями до електричних мереж в режимі неповної генерації

Українських ґрунтовних досліджень якості електроенергії генерованої сонячними електростанціями на 26.02.2024 практично немає. Проте такий аналіз проводили закордонні дослідники.

В дослідженні [16] було проведено аналіз параметрів якості електричної енергії побутовою сонячною електростанцією. Згідно дослідження при зниженні рівня генерації електричної енергії коефіцієнт гармонійних спотворень струму генерованого сонячним інвертором погіршується від 7,8% до 43%.

В роботі [17] проведено дослідження показників якості сонячного інвертора Enphase IQ-60-2-INT. В даному дослідженні представлені результати досліджень показників якості електричної енергії генерованої до електричної мережі сонячним гібридним інвертором Enphase IQ-60-2-INT. В даному дослідженні визначено, що В діапазоні генерованої потужності від 300Вт до 5,4 кВт коефіцієнт гармонійних спотворень форми струму змінюється від 9 до 120%, а коефіцієнт потужності змінюється від 0,99 при максимальній потужності до 0,32 при мінімальній потужності, що свідчить про суттєве погіршення показників якості електроенергії генерованої фотоелектричними системами в режимі зниження генерованої потужності, що і визначає тематику досліджень.

В дослідженні [18] представлені аналогічні дослідження показників якості електроенергії генерованої до мікромережі сонячної електростанції потужністю 1МВт. Згідно дослідження в діапазоні генерованої потужності якість генерованого струму знижується до значення коефіцієнту гармонійних спотворень 23.87% і рівня коефіцієнту гармонійних спотворень напруги в точці підключення 9,92%.

В дослідженнях [19-20] представлено аналіз показників якості електричної енергії, проте недоліком цих досліджень є відсутність аналізу причин виникнення даного явища та відсутності методів запобіження даного явища.

Згідно з даним дослідженням, при зміні потужності генерованою сонячними панелями коефіцієнт гармонійних спотворень змінювався від 10 до 122%. Графіки, що відповідають експерименту, представлені на рисунку 1.25 та рисунку 1.26.

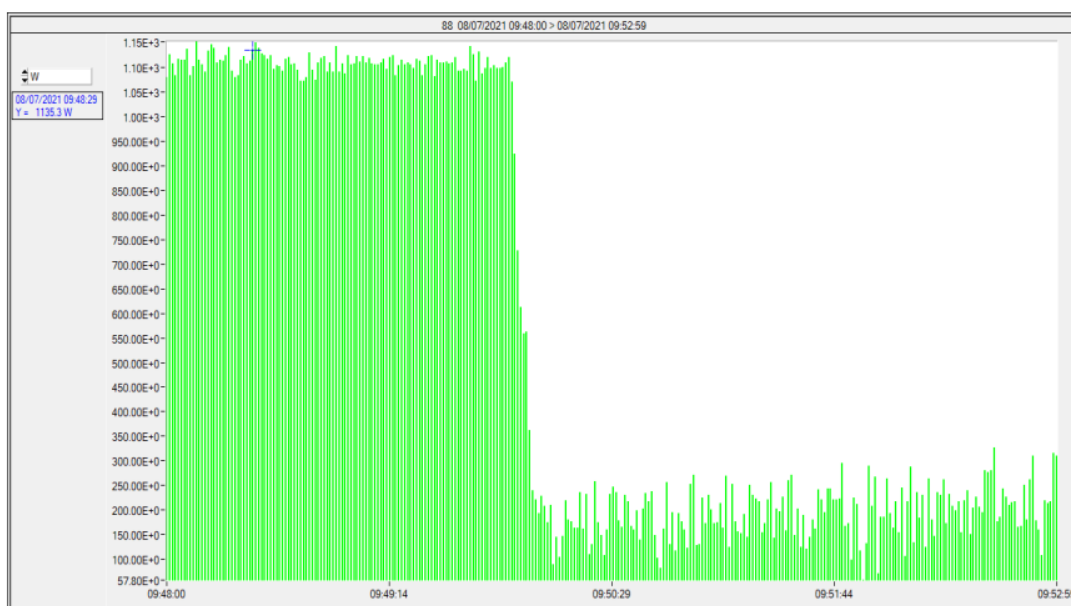


Рисунок 1.25 – Потужності генеровані сонячним інвертором Enphase IQ-60-2-INT до електричної мережі

Значення коефіцієнту гармонійних спотворень під час експерименту представлено на рисунку 1.26.

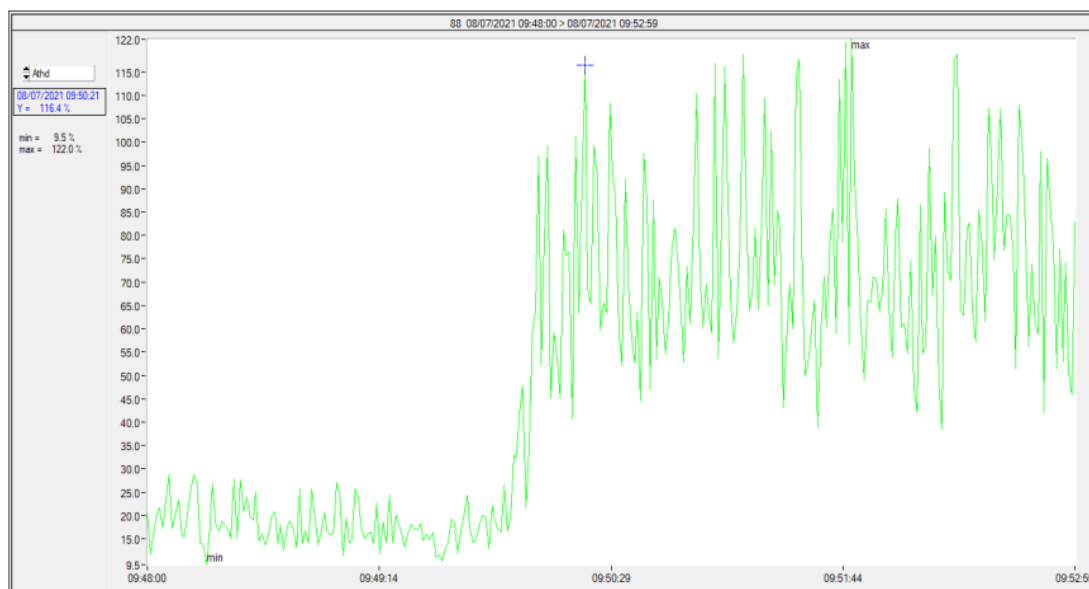


Рисунок 1.26 – Коефіцієнт гармонійних спотворень струму генерованого до електричної мережі інвертором Enphase IQ-60-2-INT при зміні генерованої потужності

Також в роботі [21] представлено дослідження залежності коефіцієнта потужності сонячного інвертора при варіації генерованої потужності, результати яких наведено на рисунку 1.27 та рисунку 1.28.

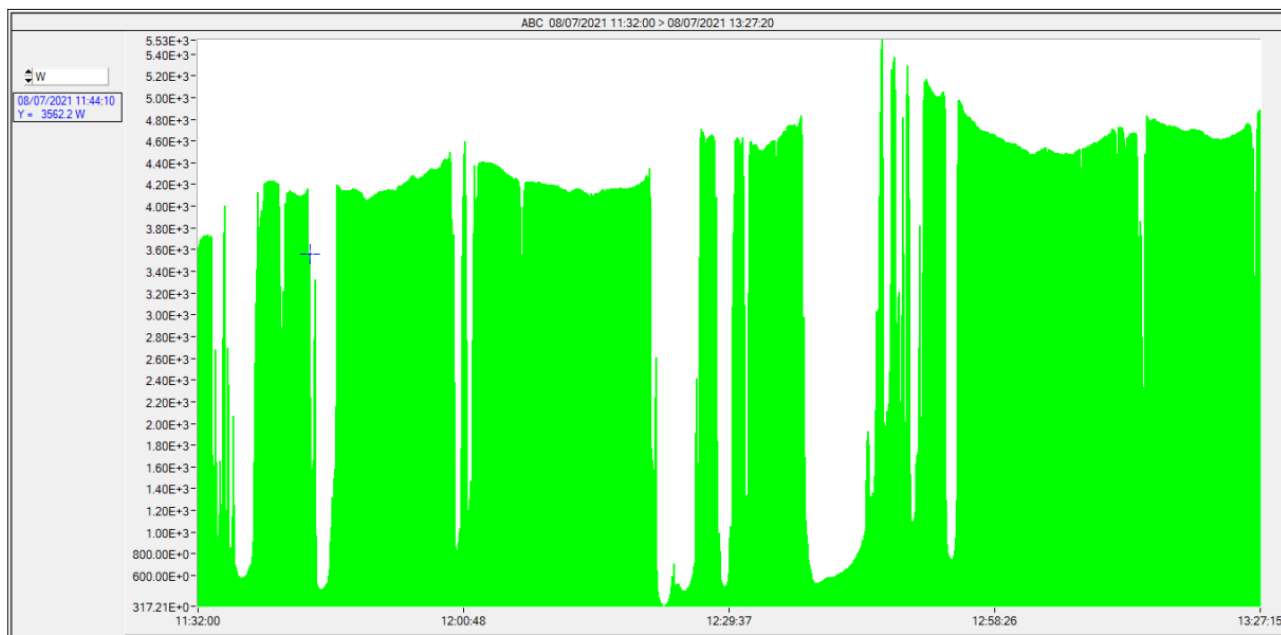


Рисунок 1.27 – Графік генерації потужності сонячного інвертора в часі

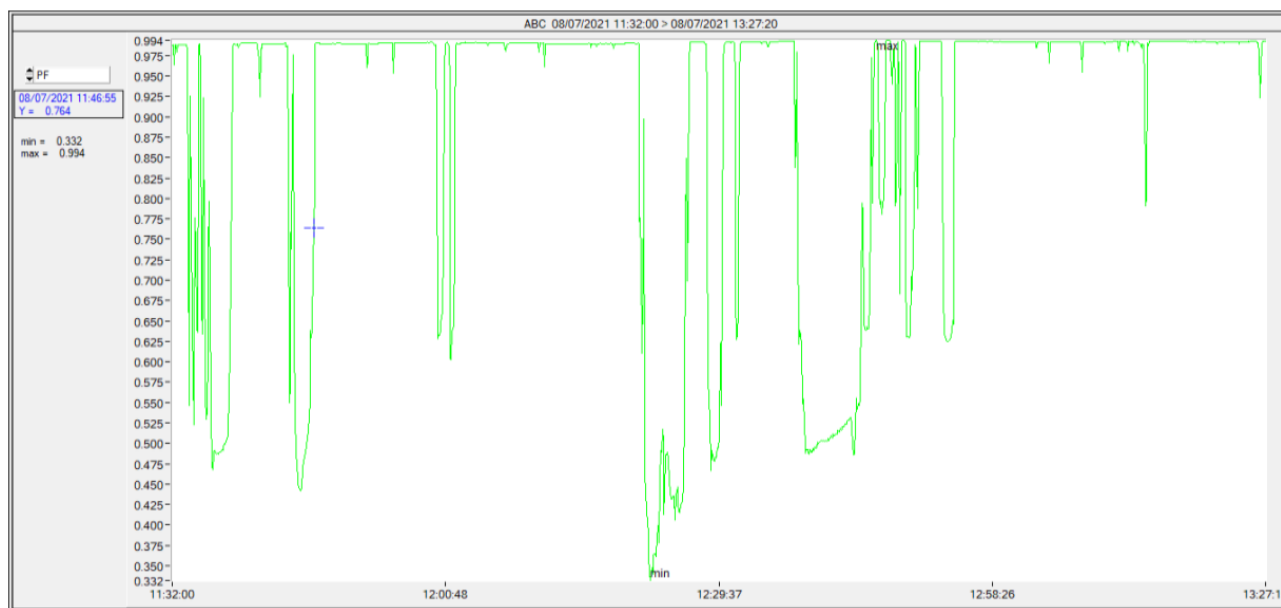


Рисунок 1.28 – Графік коефіцієнта потужності сонячного інвертора в часі

З огляду на представлені дослідження можна зробити висновок, що при умові зниження генерованої потужності, якість електроенергії, яка генерується сонячними електростанціями до трифазних електричних мереж суттєво знижується та не відповідає вимогам вітчизняних та міжнародних стандартів [22, 30].

Висновки до розділу 1

Проведений аналітичний огляд показав, що на сучасному етапі розвитку сонячної енергетики в Україні та світі розробка та вдосконалення існуючих фотоенергетичних систем є перспективним та актуальним завданням.

При практичній реалізації фотоенергетичних установок, що підключаються до мережі, важливу роль відіграють напівпровідникові перетворювачі, які виконують дві основні функції: оптимізацію режимів роботи сонячних панелей та підключення даних систем до промислових мереж змінного струму.

Перевага об'єктів, що розглядаються, при зв'язку з мережею полягає в тому, що сонячна енергія приймається вдень, коли генерація електричної енергії максимальна, і навантаження електричної мережі досить суттєве.

Зазначені основні концепції можуть бути просто реалізовані в двокаскадній перетворювальній структурі з ланкою постійного струму. Індивідуальні узгоджувальні перетворювачі, що забезпечують MPPT контролери, можуть бути виконані за схемою знижувального перетворювача без гальванічної ізоляції. Потім мережевий інвертор струму чи інвертор напруги перетворює вихідну постійну напругу послідовного з'єднання узгоджувальних перетворювачів в джерело трифазного синусоїдального струму, що збігається по фазі з напругою трифазної мережі 380 В, забезпечуючи електромагнітну сумісність.

У загальному випадку доцільно використовувати кілька послідовних ємнісних секцій у ланці постійної напруги, які забезпечать необхідний рівень вхідної напруги мережевих інверторів.

У режимі наявності сонячного випромінювання, мережевий інвертор підтримує заданий струм, що передається до трифазної електричної мережі, який визначається максимальної потужністю СП.

При цьому, існує проблема суттєвого зниження якості електричної енергії, генерованої сонячними електростанціями в режимі генерації зниження генерованої потужності.

Для досягнення зазначених цілей дисертаційної роботи необхідний розгляд та вирішення наступних завдань:

1. Розробка та дослідження послідовної фотоенергетичної системи з використанням *DC/DC* перетворювачів з функціями відбору максимальної потужності. Розробка методів зниження пульсацій струмів в ланці постійної напруги фотоелектричної системи. Створення методики розрахунку основних параметрів послідовної фотоенергетичної системи.

2. Розробка та дослідження алгоритмів керування мережевих інверторів ФЕС, що забезпечують покращені показники якості і електричної енергії генерованої сонячними електростанціями в режимі неповної генерації потужності.

3. Розробка комп'ютерних моделей сонячних електростанцій та дослідження параметрів якості електричної енергії генерованої до трифазних електричних мереж та визначення причин зниження параметрів якості електроенергії при генерації малої потужності.

РОЗДІЛ 2

СТРУКТУРА ФОТОЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ ТА ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ УЗГОДЖУЮЧИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

У попередньому розділі показано, що при проектуванні фотоенергетичних систем доцільно застосування напівпровідникових перетворювачів двох типів:

- індивідуальні узгоджувальні перетворювачі для сонячних панелей (знижуючий перетворювач із вхідним ємнісним фільтром за сукупністю техніко-економічних показників є найпростішим і дешевим перетворювачем, який забезпечує оптимізацію умов експлуатації та режимів роботи сонячних панелей) для забезпечення незалежної роботи сонячних панелей у точці максимальної потужності;
- мережні трифазні інвертори, що забезпечують передачу електричної енергії до трифазної мережі змінного струму.

Метою даного розділу є синтез структури послідовної фотоенергетичної системи та визначення принципів управління узгоджувачами.

2.1 Загальна структура фотоенергетичної системи

З урахуванням аналізу існуючих розподілених фотоенергетичних систем запропоновано структуру, яка включає наступні основні вузли (рис. 2.1): фотоелектричні перетворювачі (сонячні панелі) $PV_1, PV_2 \dots PV_n$; індивідуальні узгоджувальні DC/DC перетворювачі, що забезпечують відбір потужності сонячних панелей у точці максимальної потужності, та мережеві інвертори (інвертор струму та інвертора напруги), які забезпечують передачу електричної енергії до трифазної мережі змінного струму [23-25].

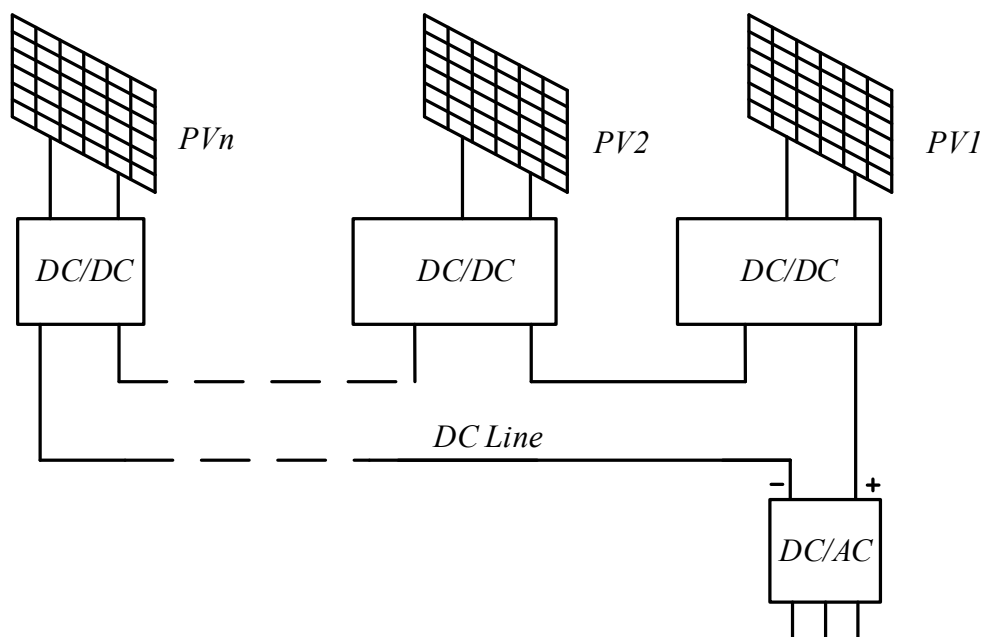


Рисунок 2.1 – Загальна структура фотоенергетичної системи під час послідовного підключення DC/DC

Індивідуальні узгоджувальні перетворювачі, що встановлюються на кожній сонячній панелі, дають можливість розглядати дані системи як одновимірні масиви з деякого числа незалежних об'єктів. При цьому, одиничний об'єкт системи (рис. 2.2) складається із: сонячної панелі PV та DC/DC перетворювача.

DC/DC перетворювачі послідовно підключаються до загальної ланки постійного струму. Лінія постійного струму є джерелом енергії для мережевого інвертора струму, при цьому ключ $VD2$ шунтує вихідну ємність узгоджувального перетворювача $C2$ (рис. 2.2).

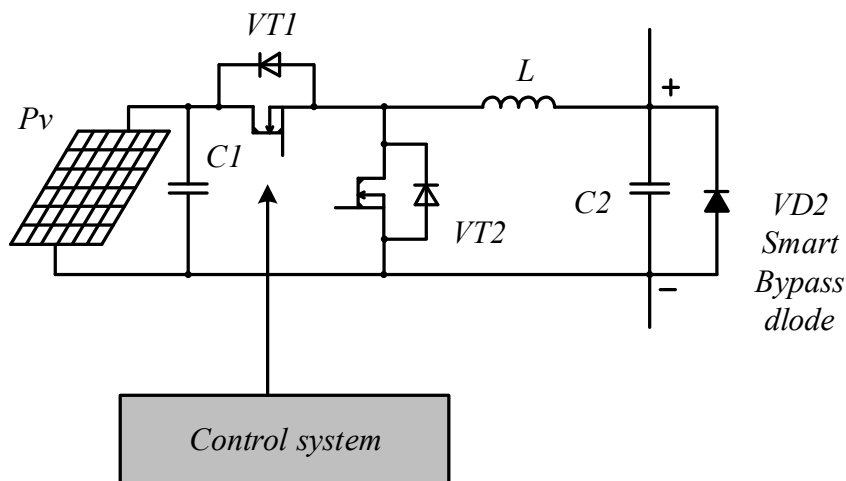


Рисунок 2.2 – Внутрішня структура одиничного модуля сонячної панелі з перетворювачем відбору максимальної потужності

Шунтуючий діод $VD2$ дозволяє забезпечити працездатність системи при виході з ладу узгоджувача перетворювача.

В якості мережевих інверторів ФЕС можуть бути використані інвертори напруги чи інвертори струму. Енергія, що передається в електричну мережу інвертором, визначається сумарним рівнем освітлення сонячних панелей та ефективністю системи [26, 27].

Інвертор струму, як мережевий перетворювач, (рис. 2.3) забезпечує передачу енергії до трифазної електричної енергії, і можливість плавного регулювання струму, спожитого з ланки постійного напруги. При цьому, інвертор струму може бути виконано на базі MOSFET чи IGBT транзисторів. У випадку застосування MOSFET транзисторів обов'язковим є застосування послідованих діодів для запобігання зворотнього протікання струму через силовий ключ. У випадку використання IGBT транзисторів без зворотніх діодів послідовні транзистори не потрібні [28].

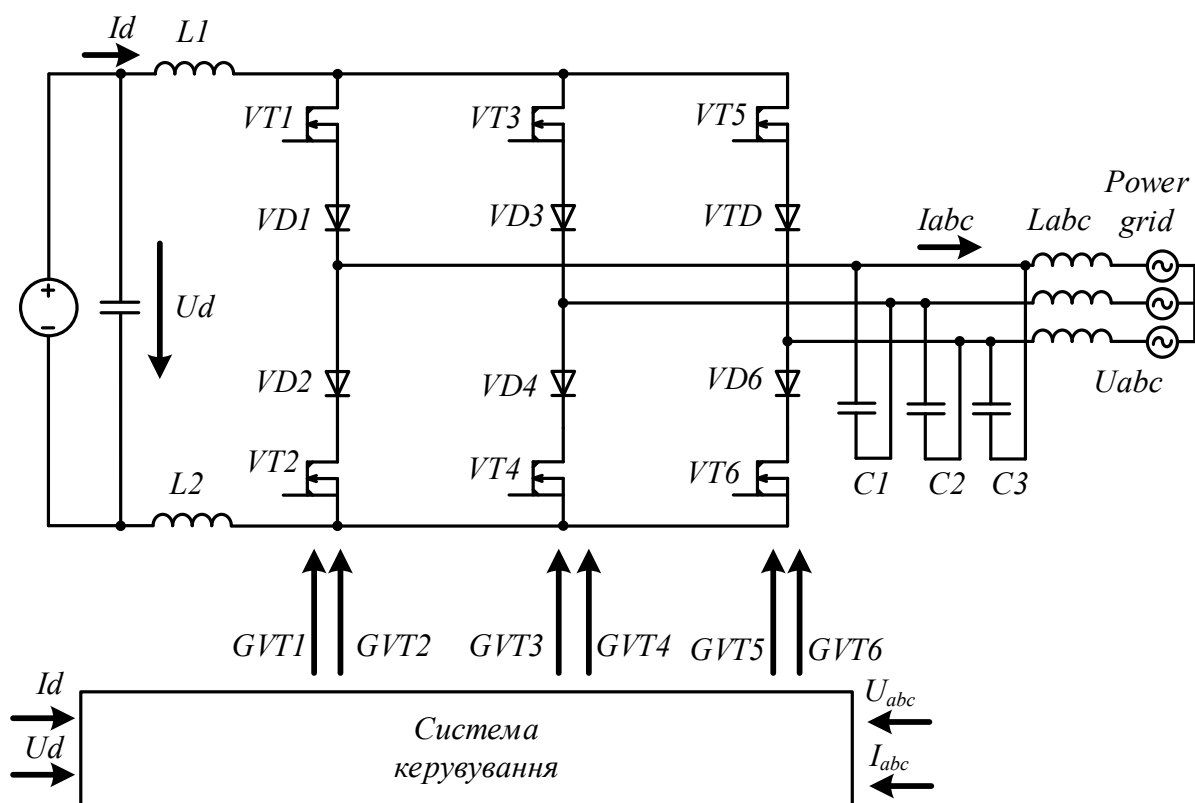


Рисунок 2.3 - Внутрішня структура мережного інвертора струму, підключеного до трифазної мережі змінного струму

Інвертор струму (рис 2.3) включає: розділену фільтрову індуктивність $L1$, $L2$ у ланці постійного струму, ємнісний мережевий фільтр $C1$ - $C3$, двоквадрантні ключі знакозмінної напруги $VT1$ - $VT6$ (послідовне з'єднання діодів та MOSFET транзисторів) і систему керування.

Система керування забезпечує синхронізацію струму інвертора з фазами мережевої напруги та регулювання переданої, в мережу, потужності [29].

Як напівпровідникові ключі, в даному інверторі струму використано послідовне з'єднання MOSFET транзисторів і діодів [28, 31].

2.2 Сонячна панель з узгоджуючим перетворювачем як об'єкт керування

Основними недоліками фотоелектричних пристроїв відновлюваної енергетики є нестабільність генерованої електричної енергії у часі. Отже актуальним завданням є динамічний пошук точки максимальної потужності, що отримується від фотоелементів та генерація отриманої електроенергії до

електричної мережі чи в накопичувач. Одним з основних методів вирішення даного завдання є управління узгоджувальним перетворювачем відбору максимальної потужності, що підключає фотоелектричний генератор (сонячну панель) до решти послідовної фотоенергетичної системи.

Загальний принцип пошуку точки максимальної потужності (MPPT) полягає в тому, що починаючи з мінімального значення виконується збільшення величини вхідного струму узгоджувального перетворювача з деяким кроком за часом і порівнюються послідовні значення потужності, що генерується. Якщо друге отримане значення потужності сонячної панелі більше за попереднє, то наступний крок проводиться за величиною струму в напрямку збільшення, а в іншому випадку регулювання відбувається в напрямку зменшення вхідного струму узгоджувального перетворювача. Дана процедура пошуку точки максимальної потужності повторюється ітеративно через деякий час з причини можливої зміни точки максимальної потужності в часі (наприклад, при зміні умов освітленості). Реалізація алгоритму пошуку точки максимальної потужності у розподілених фотоенергетичних системах можлива на кількох рівнях схемної реалізації [32]:

1. Застосування алгоритмів MPPT до єдиної схеми з'єднання сонячних панелей, при цьому необхідне застосування діодів, що шунтують і блокують зворотнє протікання струму внаслідок впливу нерівномірного розподілу сонячного випромінювання на окремі сонячні панелі, при цьому, в системі необхідний один узгоджувальний перетворювач.

2. Застосування алгоритмів MPPT до певної кількості груп з'єднаних сонячних панелей, що дозволяє знизити негативний вплив нерівномірного розподілу освітленості.

3. Застосування MPPT до кожної сонячної панелі індивідуальне, у своїй необхідно застосування узгоджувальних перетворювачів кожної сонячної панелі.

Існує велика кількість алгоритмів пошуку точки максимальної потужності, які також можна класифікувати за кількістю параметрів, що вимірюються:

1. Алгоритми керування та пошуку точки максимальної потужності при вимірі одного параметра, струму або напруги сонячної панелі. При цьому, не

забезпечується максимальна точність через роботу алгоритму за характеристиками сонячної панелі без урахування впливу температури та розкидання параметрів (дані алгоритми потребують періодичного калібрування для підвищення точності). Основною перевагою зазначених вище алгоритмів є простота апаратної та програмної складових контролера.

2. Алгоритми керування та пошуку MPPT при вимірі двох параметрів, зазвичай струму та напруги, сонячної панелі. При цьому забезпечується максимальна точність, оскільки робота алгоритмів заснована на пошуку точки максимальної потужності за поточним станом сонячної панелі з урахуванням впливу температури та розкиду параметрів. Основною перевагою таких алгоритмів є висока точність та відсутність необхідності періодичного калібрування контролера [33-36].

Найбільш точними алгоритмами пошуку точки максимальної потужності є алгоритми, що ґрунтуються на вимірі двох і більше параметрів сонячних панелей, але даний метод вимагає застосування кількох датчиків, що ускладнює схему системи управління.

Можливі шляхи вдосконалення характеристик систем керування та режимів узгоджувальних перетворювачів при пошуку точки максимальної потужності полягає в наступному:

- використання непрямих датчиків потужності сонячних панелей, що дозволяє спростити систему датчиків;
- використання спеціальних зворотних зв'язків, що покращують динамічні характеристики процедури пошуку екстремуму потужності сонячних панелей (екстремального регулятора ЕР).

Для прикладу застосування непрямих датчиків потужності та екстремальних регуляторів приймемо в першому наближенні ідеалізовану еквівалентну схему фотоелектричного генератора (рис. 2.4, а) та відповідні характеристики: зовнішня (рис. 2.4, б) і характеристика потужності (рис. 2.4, в).

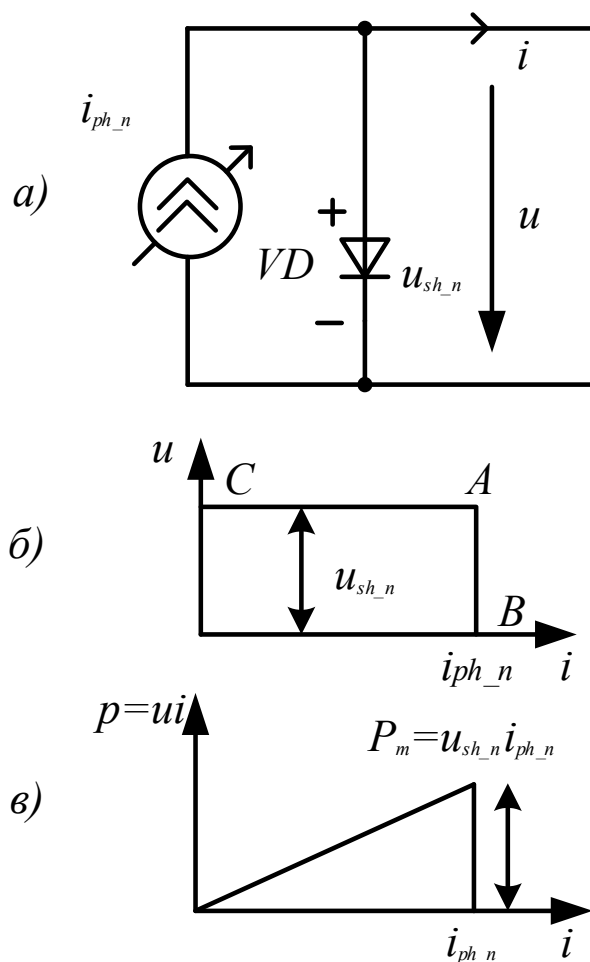


Рисунок 2.4 – Ідеалізована еквівалентна схема сонячної панелі

(фотоелектричного елемента) та його характеристики: а) схема заміщення сонячної панелі; б) спрощена вольт-амперна характеристика сонячної панелі; в) залежність потужності сонячної панелі від струму

За схемою заміщення на рисунку 2.4, величина внутрішнього джерела фотоструму i_{ph_n} сонячної панелі залежить від інтенсивності сонячного випромінювання. Шунтуючий діод з напругою u_{sh_n} враховує наявність у сонячній панелі p - n -переходу і викликає обмеження вихідної напруги СП. В режимі холостого ходу діод VD відкривається, що призводить до обмеження вихідної напруги на рівні u_{sh_n} , в режимі короткого замикання струм навантаження обмежується на рівні i_{sh_n} , що відповідає зовнішній характеристиці ділянці АС-обмеження напруги і ділянці АВ-обмеження струму (рис.2.4, б).

Максимум вихідної потужності відповідає граничній точці А зовнішньої характеристики (рис.2.4, в). Якщо максимальне значення внутрішнього фотоструму позначити $i_{ph_n_max}$ то відносне значення внутрішнього струму $i = \frac{i_{ph_n}}{i_{ph_n_max}}$, змінюється в межах від 0 до 1.

В процесі відбору потужності від СП необхідно керувати узгоджувачем перетворювачем таким чином щоб утримувати роботу точку потужності СП на зовнішній характеристиці в положенні, що якомога ближче до точки максимальної потужності. Дану задачу виконує екстремальний регулятор (ЕР) [37].

Для прикладу розглянемо інвертуючий DC/DC перетворювач, що працює в режимі переривчастого струму (рис. 2.5). Він містить ємнісний фільтр C_d , керований ключ S , накопичувальний дросель L , зворотний діод VDI і навантаження, що враховується джерелом проти-ЕДС. Процеси в сталому режимі, коли середні на періоді ШІМ значення напруги на дроселі і струму в конденсаторі рівні нулю, показані на графіках. Напруга навантаження u_{load} , підтримується постійною. Вихідна напруга u у процесі пошуку екстремуму вихідної потужності може змінюватися. Діаграми рисунку 2.5 б-г відповідають режиму найбільшої напруги СП при якому $u = u_{sh_n}$ (рис. 2.4 б).

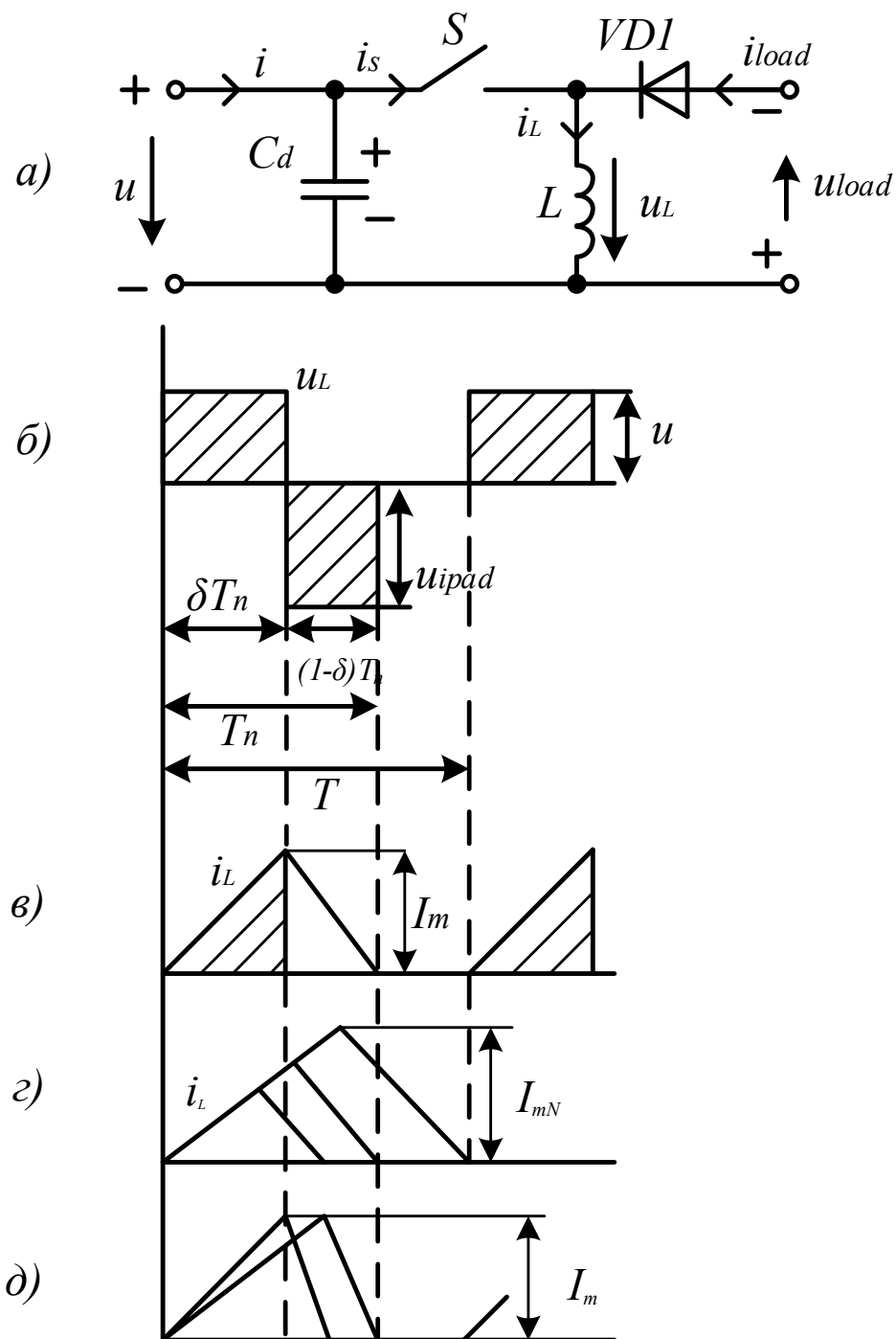


Рисунок 2.5 – Еквівалентна схема інвертуючого широтно-імпульсного перетворювача і процеси, що протікають в ній: а) схема інвертуючого DC/DC перетворювача, що працює в режимі переривчастого струму; б) напруга на дроселі перетворювача; в) струм дроселя перетворювача; г) варіації струму індуктивності в процесі ШІМ модуляції

Відносне значення вихідної напруги, що визначається виразом

$$\tau = \frac{u_{load}}{u_{sh_n}}, \quad (2.1)$$

в інвертуючому широтно-імпульсному перетворювачі (ШІП) може змінюватись у широких межах, теоретично від 0 до ∞ . Типовим значенням відносної напруги навантаження $\tau = 1$. Коефіцієнт заповнення ШІМ δ приймається з умови рівності заштрихованих на рисунку 2.5 б площ, оскільки вони відповідають однаковому приросту струму дроселя L .

$$u_{sh_n} \delta T_n = u_{sh_n} (1 - \delta) T_n \Rightarrow \tau = \frac{u_{load}}{u_{sh_n}} = \frac{\delta}{1 - \delta} \Rightarrow \delta = \frac{\tau}{1 + \tau} \quad (2.2)$$

Коефіцієнт заповнення ШІМ δ характеризує відносну частку інтервалу наростання струму від загальної тривалості періоду T_n струмового імпульсу. В окремому випадку при $\tau = 1$ маємо $\delta = 0.5$.

На рисунку 2.5 г показані процеси зміни амплітуди струму в залежності від потужності випромінювання при $u = u_{sh_n} = const$. У номінальному режимі має місце найбільша амплітуда струму I_{mN} . Для цього режиму припускаємо, що безструмової паузи немає. Період ШІМ T , при цьому, не залежить від амплітуди струму, а швидкості наростання та спаду струму зберігаються, тобто має місце геометрична збіжність зображених на рисунку 2.5, г трикутників [38]. У сталому режимі на періоді середній струм в конденсаторі дорівнює нулю. Тому вхідний струм перетворювача i дорівнює середньому значенню струму ключа i_S , показано на рисунку 2.5, в штрихуванням. При $I_m = I_{mN}$.

$$i_N = \frac{1}{2} I_{mN} \delta \quad (2.3)$$

При $I_m < I_{mN}$ скористаємося умовою подібності трикутників, з якого випливає, що площа трикутника пропорційна квадрату його висоти, тобто

$$i = i_N \left(\frac{I_m}{I_{mN}} \right)^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{I_m^2}{I_{mN}} \delta \quad (2.4)$$

При відході від точки екстремуму - точки максимальної потужності - на ділянку обмеження струму, відбувається зниження вхідної напруги перетворювача u . Оскільки $u_{load} = const$, швидкість спаду струму i_L зберігається такою ж, а швидкість наростання струму i_L знижується пропорційно u (рис. 2.5, д). Середнє значення струму транзистора перетворювача i_S буде змінюватися зворотно-пропорційно вхідної напруги. Таким чином вихідний струм сонячної панелі може бути визначено за виразом

$$i = \frac{1}{2} \cdot \frac{I_m^2}{I_{mN}} \delta \cdot \frac{u_{sh_n}}{u} \quad (2.5)$$

Рівність (2.5) є найбільш загальною; в окремому випадку $u = u_{sh_n}$ воно справедливе для ділянки обмеження напруги на зовнішній характеристиці сонячної панелі [39].

Отримані залежності є статистичними в тому сенсі, що вони справедливі для усталеного процесу у вхідному фільтрі. В екстремальному регуляторі стан роботи в режимі максимальної потужності СП досягається з певним наближенням, тому що безперервно йде процес пошуку екстремуму при відхиленні параметрів схеми, перш за все, за величиною внутрішнього струму i_{ph_n} .

На рисунку 2.6 показана структура системи екстремального регулювання, в якій перетворювач заміщений залежним безінерційним джерелом струму i . Схема заміщення силової частини структури коректна лише за умови обмеження величини струму $i < i_{ph_n}$. В протилежному випадку величина вихідної напруги $u \rightarrow -\infty$, що не відповідає реальним процесам.

На схемі екстремального регулювання (рис 2.6) зображено:

$\PhiГ$ – фотогенератор (сонячна панель);

i – залежне джерело струму, що враховує перетворювач;

ДП, ДН та ДП – датчики струму, напруги та потужності;

ЛЧ – логічна частина;

СОС – ступеневий зворотний зв'язок;

s – параметр, регульований шляхом незалежного завдання кроку (кроковий параметр)

При пошуку екстремуму потужності сонячної панелі, величина вхідного струму перетворювача i змінюється поступово шляхом зміни деякого крокового параметра s з незалежним кроком $\pm \Delta s$. В окремому випадку, величина кроку за часом T_{step} може збігатися з періодом ШІМ T , але в загальному випадку відрізняється від нього. Всередині інтервалу кроку T_{step} величина i вважається постійною, згідно з розглянутою вище ідеологією управління за середніми значеннями. Після чергового кроку поточне значення енергії, що відбирається, або середньої потужності p на кроці, порівнюється з попереднім значенням. Якщо потужність отримала позитивне збільшення, то продовжується рух у попередньому напрямку (збільшення вхідного струму перетворювача) [40].

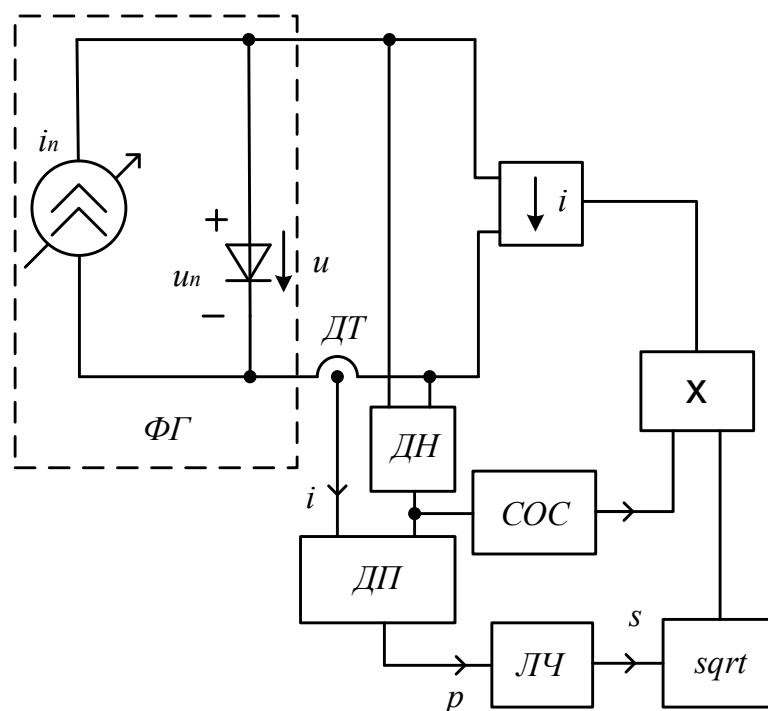


Рисунок 2.6 – Загальна структура схеми екстремального регулювання

В іншому випадку, коли отримана величина потужності менша за попередню, напрямок руху змінюється на протилежний і вхідний струм перетворювача зменшується. Зазначений алгоритм реалізується структурною схемою логічної частини, показаної на рисунку 2.7. Динамічні властивості структури повинні бути орієнтовані на мінімізацію відносного запізнення в каналі екстремального регулятора, яке може мати наслідком порушення стійкості квазівстановленого режиму. Отже, необхідно розділити інтервали часу T_{step} і T , приймаючи $\alpha = T_{step}/T$ порядку 10. При цій пропорції дискретизація сигналів у блоці датчика потужності, яка йде з кроком T , що створює мале запізнення каналу екстремального регулятора [41].

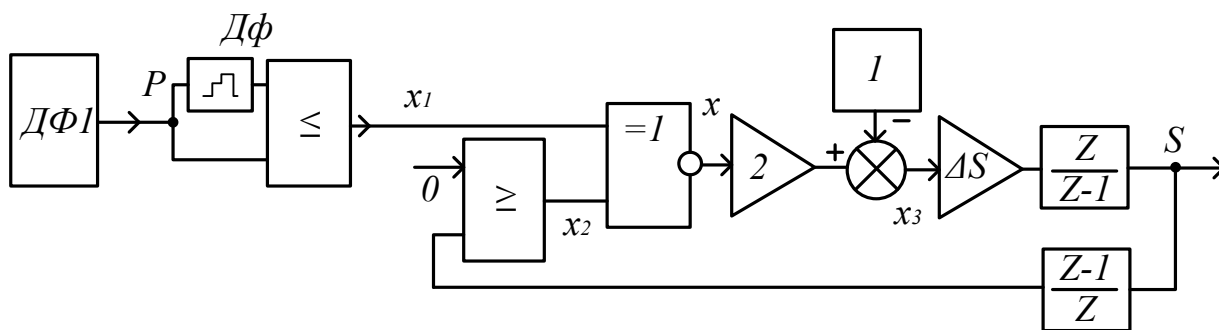


Рисунок 2.7 – Логічна частина системи екстремального регулювання

Поточне значення потужності p , як ступінчаста функція часу, що формується дискретним фіксатором $ДФІ$ в блоці $ДР$, що працює з кроком часу T , порівнюється компаратором з попереднім значенням потужності на початку кроку T_{step} .

Результатом порівняння є логічна змінна x_1 , яка дорівнює одиниці при зростанні потужності та нулю при її зменшенні. Логічна змінна x_2 визначає збільшення чи зменшення крокового параметру: при його зростанні дорівнює одиниці, а інакше – нулю. Таблиця істинності операції відповідає логічній функції $\overline{x_1 \oplus x_2}$.

Вихідна логічна величина x вказує майбутній напрямок руху: при $x = 1$ параметр s повинен бути збільшений, а при $x = 0$ – зменшений. Далі ця однополярна логіка перетворюється на знакозмінну x_3 : $x_3 = 1$ при $x = 1$, та $x_3 = -1$ при $x = 0$. Наступний дискретний інтегратор ΔS дає кроковому параметру на кроці T_{step} збільшення, що дорівнює $\pm \Delta s$. Дискретний інтегратор забезпечений обмежувачами по верхньому і нижньому значенням вихідного сигналу, чим запобігається вихід робочої точки за крайні точки аргументу оптимізованої характеристики потужності [42].

2.3 Метод непрямого визначення потужності сонячних панелей

При прямому визначення потужності СП визначається миттєве значення потужності з наступним усередненням на періоді ШІМ T .

$$p = u \cdot i, \quad P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt \quad (2.6)$$

Цей спосіб найпростіший, але має наступні недоліки:

- потрібні два датчики: напруги та струму;
- для отримання достатньої точності необхідний малий крок інтегрування Δt , що знижує швидкість обчислювальної процедури.

Ці недоліки нівелюються при переході до непрямого виміру потужності, принцип якого полягає в наступному. На такті, ШІМ T енергії передається, насамперед, в навантаження. Для інвертуючого ШІП, який працює в режимі струму, що переривається, енергія передана в навантаження дорівнює запасу енергії, накопиченої в дроселі перетворювача L .

$$A_H = \frac{L \cdot I_m}{2} \quad (2.7)$$

Крім того, зміниться запас енергії у вихідному конденсаторі C_d :

$$\Delta A_C = C_d \frac{(u_\kappa^2 - u_n^2)}{2} \quad (2.8)$$

Де u_κ , u_n – значення напруги на конденсаторі в кінці та на початку такту.

Якщо знехтувати втратами енергії, то середня потужність, що відбирається, визначається рівністю

$$P = T^{-1} (A_H + \Delta A_C) \quad (2.9)$$

Величина струму I_m задається у системі управління перетворювача і може бути взята безпосередньо за значенням коефіцієнта модуляції ШІМ, а для

визначення величини накопиченої енергії ΔA_C достатній лише датчик вихідної напруги u . Істотно також, що в формулу 2.8 входять лише тактові значення цієї напруги, і не потрібно вводити малий крок інтегрування Δt для усереднення потужності [43].

Недоліком непрямого датчика потужності є необхідність точних параметрів L і C_d . Фактично вони відомі з деякою похибкою через допуски на точність величин L і C_d при виготовленні дроселя і конденсатора. Однак в даному застосуванні датчика потужності цей недолік несуттєвий через те, що датчик необхідний лише для фіксації знаку різниці між тактовими значеннями потужності. Тому для застосування даного метода в розрахунках допускається невелике відхилення реальних значень параметрів L і C_d від фактичних.

На рисунку 2.8 зображена структурна схема непрямого датчика потужності СП. Вона реалізує співвідношення (2.7-2.9), при цьому вхідний сигнал u дискретизується з тактом T , тоді, як сигнал I_m надходить вже дискретним.

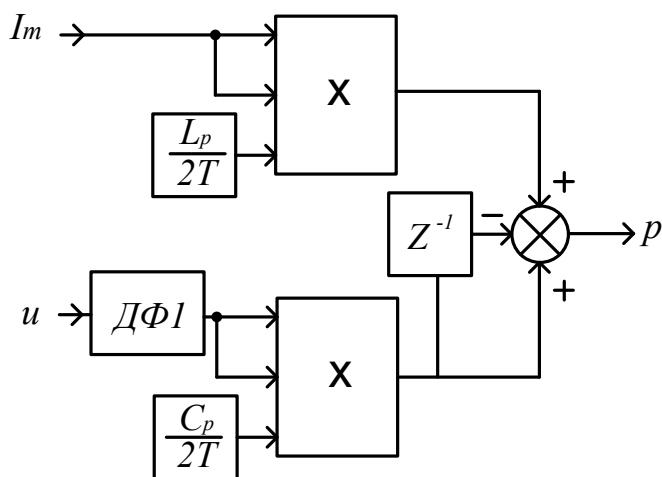


Рисунок 2.8 – Визначення потужності СП за значеннями енергії в реактивних елементах узгоджуючого перетворювача

При пошуку екстремуму потужності, на динамічні властивості екстремального регулятора енергії, що відбирається, істотно впливає вибір крокового параметра часу, який змінюється з незалежним кроком Δs [44]. Наведемо деякі варіанти вибору крокового параметра s

$$s = i, \quad s = g = \frac{i}{u}, \quad s = p = i \cdot u \quad (2.10)$$

В першому варіанті кроковим параметром струму приймається середній вхідний струм перетворювача на періоді ШІМ. Цей, а також інші варіанти вибору крокового параметра охоплюються загальною формулою, в якій зручно перейти до відносної напруги

$$s = u^{*m}, \quad u^* = \frac{u}{u_{sh_n}} \quad (2.11)$$

Підставимо в (2.10) значення струму з (2.5), і вирішимо рівняння відносно параметра I_m , що фактично регулюється, в схемі інвертуючого ШІП

$$I_m = \sqrt{\frac{2I_{mN} \cdot s}{\delta}} u^{*n} \quad (2.12)$$

де $n = 0,5(1-m)$ чи $m = 1 - 2n$.

У окремих випадках (2.10), зіставляючи з (2.11), отримуємо, відповідно, $n=0,5$, $n=1$ і $n=0$. За винятком варіанта, де перетворювач представлений незалежним джерелом потужності ($n=0$), інші варіанти вимагають введення додаткового зворотного зв'язку n -го ступеня напруги u . Вона враховується блоком СОС структурі рисунку 2.6.

Розглянемо умови щодо вибору ступеня зворотного зв'язку (величина n). Основним наслідком зміни n є зміна форми функції, що максимізується (потужності p , що відбирається) в околиці точки екстремуму [45]. Зіставимо, з цієї точки зору, два окремі випадки, які відповідають уявленню перетворювача джерелом струму i ($n = 0,5$) та вхідною провідністю g ($n = 1$), що незалежно змінюються. На рисунку 2.9 показано, як зміниться при цьому оптимізована

функція p . На інтервалі обмеження напруги маємо $u = u_{sh_n} = const$, тому потужність лінійно залежить від струму i , і від провідності $g = \frac{i}{u_{sh_n}}$.

При досягненні екстремальної точки А навіть мале збільшення струму понад i_n веде до замикання діода і стрімкого спаду напруги u , а разом з ним і потужності (рис. 2.9 а).

При збільшенні провідності g понад граничну $\frac{i_{ph_n}}{u_{sh_n}}$ стрибка потужності не відбувається, оскільки напруга u плавно знижується в міру збільшення провідності згідно із законом:

$$u = \frac{i_{ph_n}}{g} \quad (2.13)$$

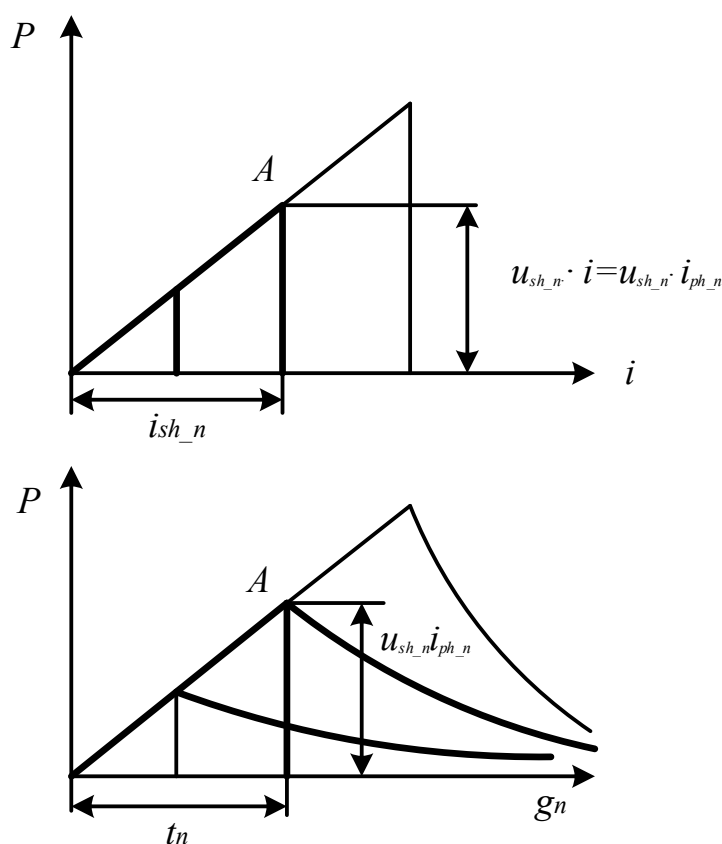


Рисунок 2.9 – Вид оптимізованої функції: а) оптимізована функція при $n = 0,5$,
б) оптимізована функція при $n = 1$

При $n=1$ рівняння для потужності на відрізках обмеження напруги та струму

$$p = g \cdot u_{sh_n}^2, \quad p = \frac{i_{ph_n}^2}{g} \quad (2.14)$$

Наведений вище алгоритм пошуку екстремуму приводить у фінальній стадії до переходу робочої точки на характеристиках рис. 2.9 через точку екстремуму А і назад, тобто, строго встановленої (стабільної) робочої точки не досягається. Однак ступінь нестабільності цього встановленого стану тим вище, чим крутіше змінюється характеристика в околиці точки екстремуму [46].

При довільному n маємо для ділянки обмеження напруги,

$$(u = u_{sh_n}, u^* = 1) \quad (2.15)$$

$$s = i u^{*m} = i = \frac{p}{u_{sh_n}}, \quad (2.16)$$

Звідки

$$p = s \cdot u_{sh_n} \quad (2.17)$$

Для ділянки обмеження струму $i = i_n$

$$s = i \cdot u^{*m} = \frac{1}{u_{sh_n}^m \cdot i^{m-1}} \cdot (i \cdot u)^m = \frac{p^m}{u_{sh_n}^m \cdot i_{ph_n}^{m-1}}, \quad p = u_{sh_n} \cdot i_{ph_n}^{\frac{m-1}{m}} \cdot s^{\frac{1}{m}}. \quad (2.18)$$

Граничне значення крокового параметра між ділянками не залежить від значення m

$$s_\tau = i_{ph_n} \quad (2.19)$$

На рисунку 2.10 показано, яку зміну зазнає форма оптимізуємої функції потужності при зміні n в широкому діапазоні.

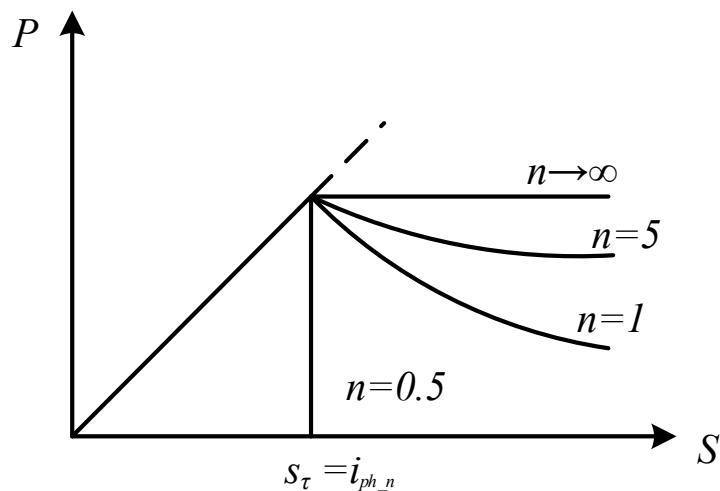


Рисунок 2.10 – Зміна форми оптимізується при широкому діапазоні зміни ступеня зворотного зв'язку

Як бачимо, екстремум зі збільшенням n стає дедалі «розмитим», що знижує негативні ефекти, пов'язані з розривом функції, чи її похідної. Крім поліпшення форми екстремуму, високі значення n підвищують чутливість системи управління до збільшення вхідної напруги, що сприяє скороченню динамічних відхилень фактично відбираємої потужності від її екстремального значення. Однак зростає вплив неконтрольованих відхилень порогової напруги u_{sh_n} від розрахункового значення, що веде до неконтрольованих змін характеристик екстремального регулятора. Доцільним компромісом між цими факторами є значення n порядку 5. Зазначимо, що ланцюг ступневого зворотного зв'язку по напрузі формує завдання по амплітуді струму $I_{m(n)}$ майбутнього такту ШІМ T . Тому на її виході сигнал завдання по $I_{m(n)}$ дискретизується та затримується на один такт [47].

2.4 Управління узгоджувальними перетворювачами під час послідовного з'єднання

Використання непрямого методу вимірювання енергії, що генерується сонячною панеллю також можливе при використанні узгоджувального, знижуючого перетворювача. Розглянемо модель сонячної панелі з узгоджувачем та його послідовне з'єднання (рис. 2.1 і рис. 2.2). При послідовному з'єднанні сонячних панелей існує можливість управління узгоджувальними перетворювачами вихідних напруг U_{load} для досягнення точки максимальної потужності. Так як сумарний струм системи в лінії постійного струму буде єдиним для всіх перетворювачів, то точка максимальної потужності для кожної сонячної панелі визначатиметься струмом завдання системи управління мережним інвертором струму. Алгоритм управління узгоджувальними перетворювачами вихідних напруг (рис. 2.11) включає два цикли [48].

Цикл пошуку початкової напруги *StartUp Loop Control*, який пов'язаний з особливостями включення перетворювачів при нерівномірному розподілі сонячного випромінювання забезпечує пошук і встановлення початкової напруги при зниженому рівні потужності сонячного випромінювання. Цей цикл забезпечує режим встановлення вихідної напруги узгоджувальних перетворювачів кроковим методом. При цьому відбувається циклічна зміна шпаруватості керуючих імпульсів доти, доки система управління не визначить вихідну напругу більше заданого порогового рівня U_{load_ref} . Після знаходження вихідної напруги СУ переходить до циклу пошуку максимальної вихідної напруги перетворювача [49].

Цей цикл оперує двома змінними: поточне виміряне значення вихідної напруги узгоджувального перетворювача $U_{load_current}$ поточний коефіцієнт заповнення δ . При цьому на кожному циклі управління $U_{load_current}$ порівнюється з деяким пороговим значенням вихідної напруги U_{load_ref} , а тривалість імпульсу, що управляє, змінюється від нульового до максимального з деяким кроковим параметром s . Умовою виходу з цього циклу є виконання співвідношення:

$$U_{load_current} > U_{load_ref} \quad (2.20)$$

Цикл пошуку максимальної вихідної напруги U_{max} *Loop Control* реалізується кроковим методом та оперує трьома змінними: поточне виміряне значення вихідної напруги узгоджувального перетворювача $U_{load_current}$; значення вихідної напруги, виміряне на попередньому кроці управління узгоджувального перетворювача $U_{load_previous}$; поточна тривалість керуючого імпульсу δ .

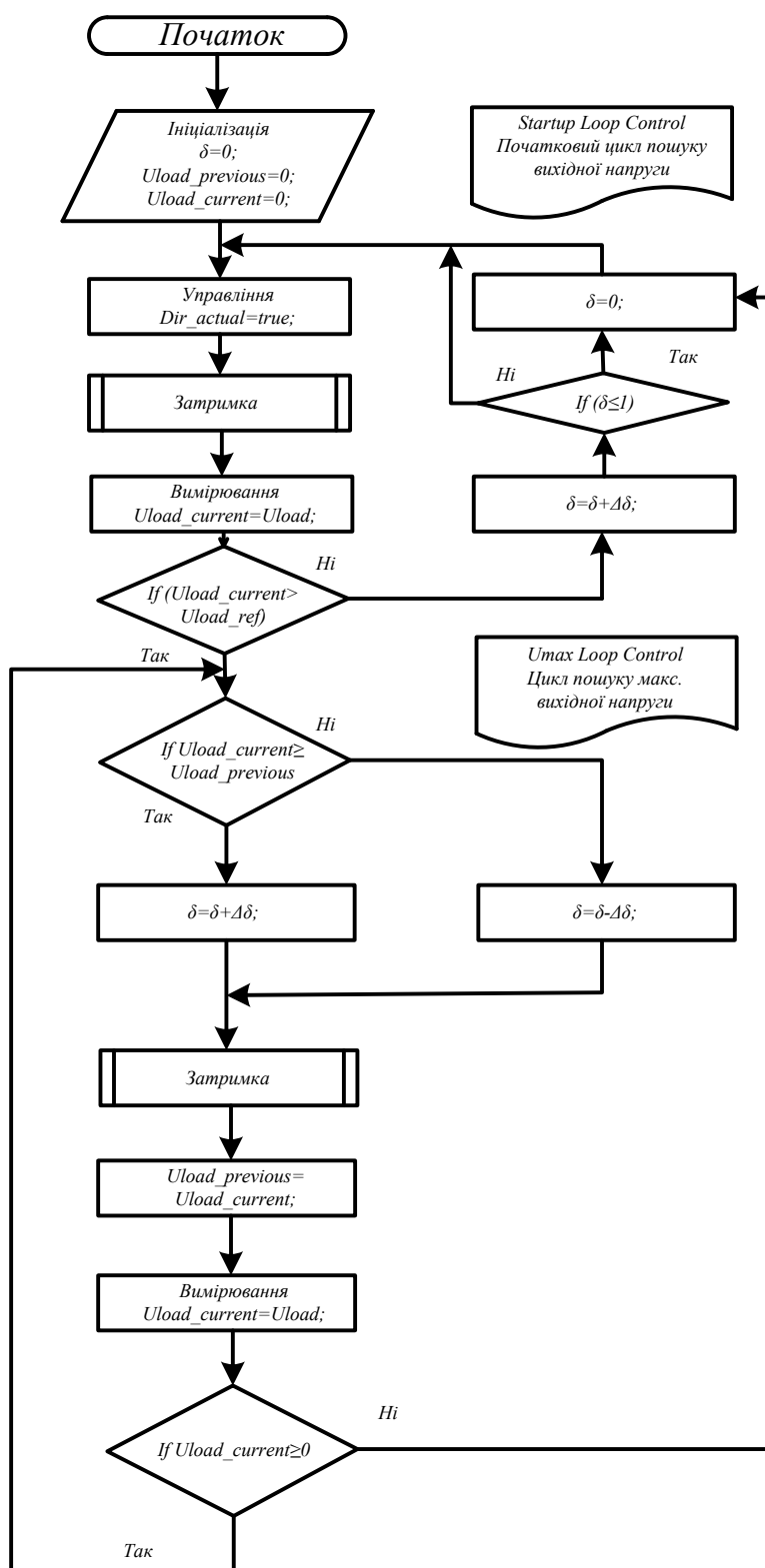


Рисунок 2.11 – Алгоритм управління узгоджувальним перетворювачем

Після виконання співвідношення (2.20) система керування переходить до циклу пошуку максимальної вихідної напруги.

На кожному кроці відбувається вимірювання вихідної напруги $U_{load_current}$ та порівняння з попереднім $U_{load_previous}$. Якщо поточна напруга більша, ніж напруга, виміряна попередньому кроці, тобто, збільшується, то тривалість керуючих імпульсів змінюється на величину $\Delta\delta$ із протилежним знаком.

Таким чином, реалізується алгоритм пошуку максимальної вихідної напруги узгоджувального перетворювача. Якщо в процесі вимірювання отримано нульове значення вихідної напруги, то СУ переходить до циклу пошуку вихідної напруги *StartUp Loop Control*. Це можливо у разі значного зниження інтенсивності сонячного випромінювання на сонячній панелі або повного затінення [50].

Точність встановлення максимальної вихідної напруги при даному алгоритмі управління визначається дискретністю зміни шпаруватості імпульсів, що управляють, але значне зниження величини кроку також негативно впливає на динамічні властивості алгоритму і швидкість досягнення точки максимальної потужності. Затримки в алгоритмі управління необхідні для встановлення вихідної напруги перетворювача після чергового періоду управління.

Порівняно з методом непрямого визначення генерованої потужності для інвертуючого перетворювача, даний метод має деякі переваги: можливість застосування даного методу до будь-якого типу узгоджувального перетворювача з лінійною регулювальною характеристикою; немає обмежень щодо режиму роботи перетворювача (режим переривчастого струму для інвертуючого перетворювача) [51].

Застосування цього методу управління в ФЕС накладає суттєве обмеження на спільну роботу систем управління узгоджувальними перетворювачами та інвертором мережі. Дане обмеження полягає у співвідношенні величин реакції вихідної напруги узгоджувального перетворювача на вплив власної системи управління U_{load_buck} і системи управління мережевим інвертором U_{load_csi} (рис. 2.12).

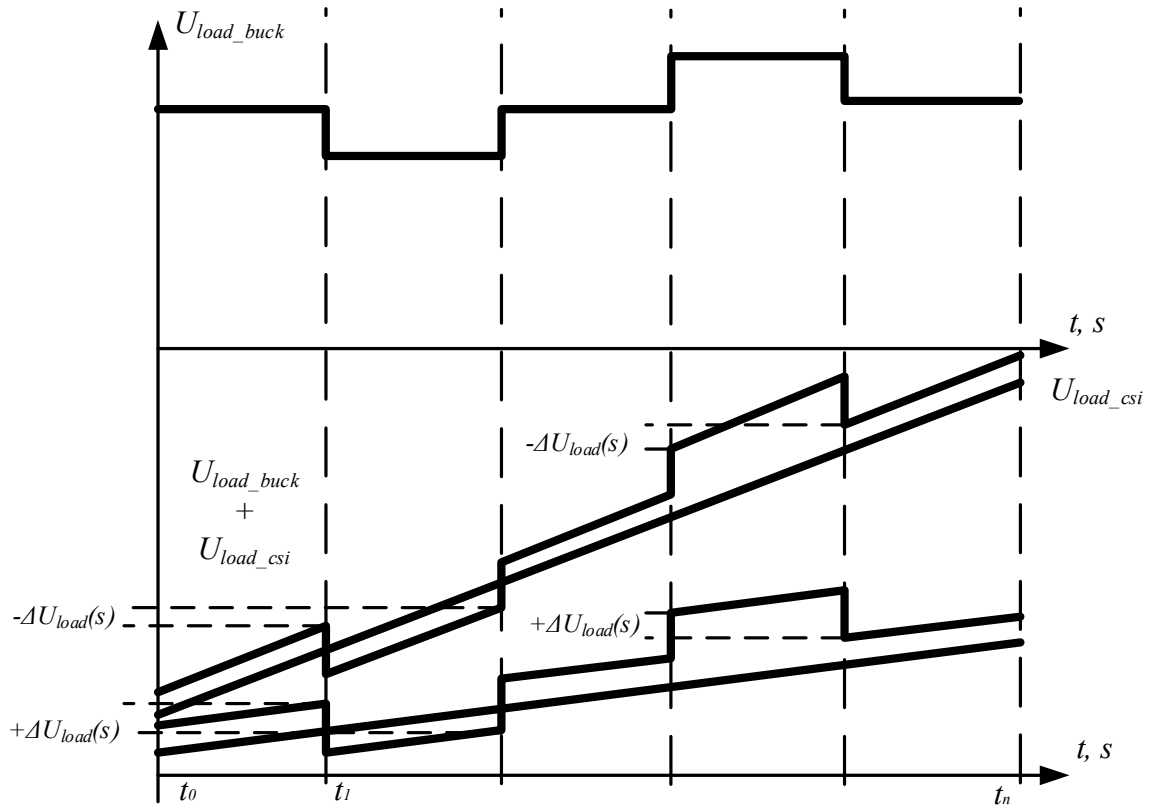


Рисунок 2.12 – Геометрична інтерпретація спільної роботи СУ
узгоджувального та мережевого перетворювачів

На рисунку 2.12 наведено геометричну інтерпретацію спільної роботи систем управління узгоджуючого та мережевого перетворювача. Для правильного визначення зміни коефіцієнта заповнення керуючих імпульсів узгоджувального перетворювача необхідно (вибору величини крокового параметра s , щоб знак зміни вихідної напруги збігався з напрямом зміни коефіцієнта заповнення імпульсів керуючих $\Delta\delta$ [53].

В іншому випадку СУ приймає неправильне рішення про подальшу зміну δ .

$$U_{load_buck}(t_i) - U_{load_buck}(t_{i-1}) > U_{load_csi}(t_i) - U_{load_csi}(t_{i-1}), \quad (2.21)$$

$$\frac{dU_{load_buck}}{dt} > \frac{dU_{load_csi}}{dt}, \quad (2.22)$$

Таким чином, можна визначити умову сталої роботи систем управління узгоджувальними перетворювачами (2.21) або (2.22). Тобто, мінімальна похідна вихідної напруги узгоджувального перетворювача, внаслідок управління власною системою управління повинна бути більшою за максимальну похідну тієї ж напруги внаслідок управління мережевого інвертора струму.

2.5 Вплив пульсацій вхідної напруги узгоджувальних перетворювачів на режими сонячних панелей

При роботі узгоджувальних перетворювачів разом із сонячними панелями з'являються пульсації вихідної напруги панелей (на конденсаторі $C1$, рис. 2.2) з частотою комутації напівпровідникових ключів. Дані пульсації призводять до зниження потужності відбираємої від сонячних панелей внаслідок відхилення від точки максимальної потужності на вольт-амперній або потужностній характеристиках.

$$P_{cell} = U_{cell} \cdot I_{ph} - U_{cell} \cdot I_s \left(e^{\frac{q \cdot (U_{cell} + I_{cell} \cdot R_s)}{C \cdot N \cdot k_b \cdot T_{opt}}} - 1 \right) - U_{cell} \left(\frac{U_{cell} + I_{cell} \cdot R_s}{R_{sh}} \right), \quad (2.23)$$

де P_{cell} – вихідна потужність сонячної панелі.

Вихідна потужність сонячної панелі (рис. 2.13) за відсутності пульсацій визначається рівнянням (2.23). Враховуючи вольт-амперну характеристику сонячної панелі та амплітуду пульсацій вихідної напруги, можна визначити відхилення від точки максимальної потужності в сталому режимі (2.24).

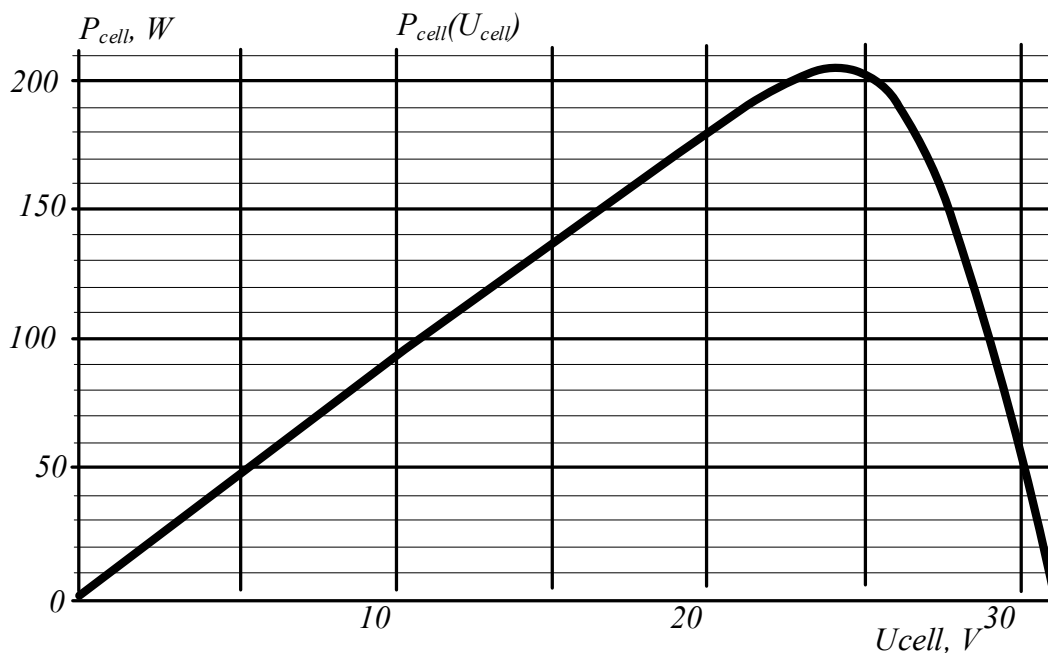


Рисунок 2.13 - Графіки залежності вихідної потужності сонячної панелі без пульсацій вихідної напруги

$$P_{cell} = (U_{mpp} \pm \Delta U) \cdot I_{ph} - (U_{mpp} \pm \Delta U) \cdot I_s \left(e^{\frac{q \cdot (U_{cell} + I_{cell} \cdot R_s)}{C \cdot N \cdot k_b \cdot T_{opt}}} - 1 \right) - (U_{mpp} \pm \Delta U) \cdot \left(\frac{(U_{mpp} \pm \Delta U) + I_{cell} \cdot R_s}{R_{sh}} \right) \quad (2.24)$$

де U_{mpp} – вихідна напруга сонячної панелі у точці максимальної потужності;
 ΔU – амплітуда пульсацій вихідної напруги сонячної панелі (вихідної напруги узгоджувального перетворювача).

Пульсації потужності сонячної панелі можна лінійно апроксимувати для визначення величин втрат енергії, що генерується, при відхиленнях від точки максимальної потужності, як показано на рисунку 2.14. При цьому відхилення $\Delta P(\Delta U_-)$ при зниженні напруги зазвичай менше відхилення $\Delta P(\Delta U_+)$ при підвищенні напруги внаслідок форми ВАХ сонячної панелі.

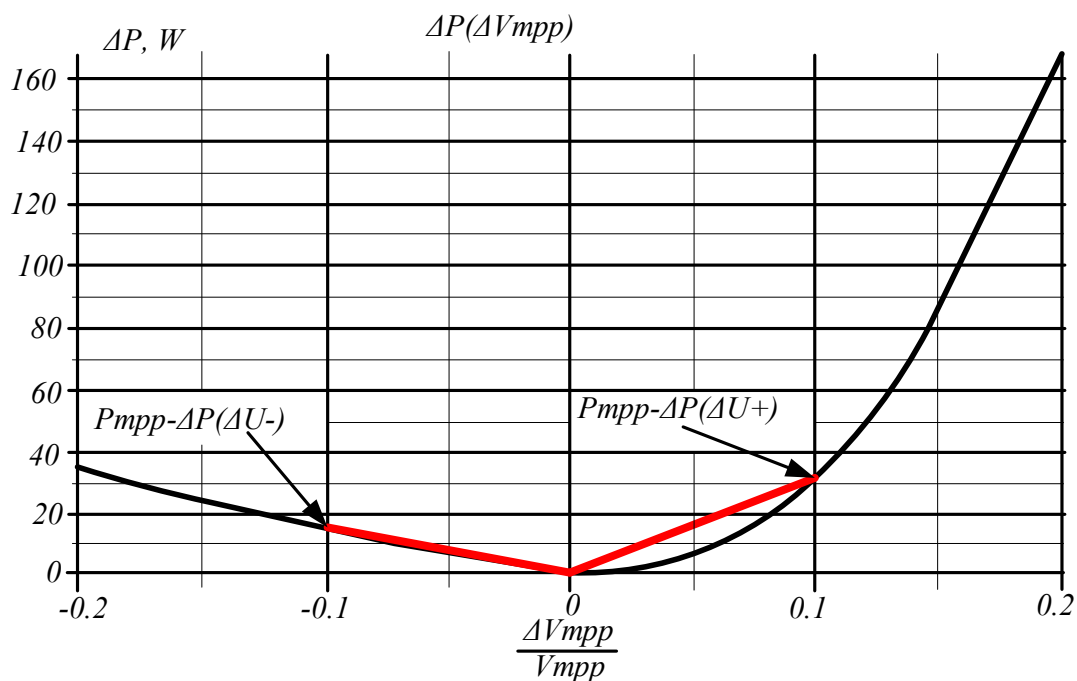


Рисунок 2.14 – Відхилення від точки максимальної потужності сонячної панелі під час роботи з узгоджувальним перетворювачем

Пульсації вихідної потужності сонячної панелі з прийнятими припущеннями показані рисунку 2.15

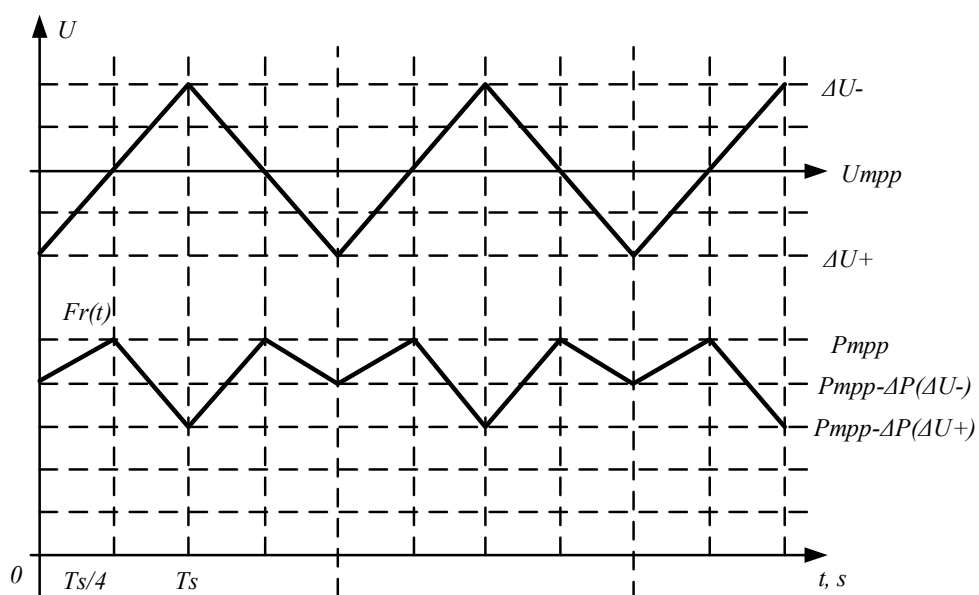


Рисунок 2.15 – Пульсації вихідної потужності та напруги сонячної панелі

Для визначення середнього значення вихідної потужності при впливі пульсацій вихідної напруги необхідно проінтегрувати функцію пульсацій $Fr(t)$ на напівперіод частоти керуючих імпульсів узгоджувального перетворювача:

$$P_{cell} = \int_0^{\frac{T_s}{2}} Fr(t) dt = \frac{T_s}{4} (P_{mpp} - \Delta P(\Delta U -) + P_{mpp} - \Delta P(\Delta U +) + 2 \cdot P_{mpp}), \quad (2.25)$$

де Fr - функція, що описує пульсації вихідної потужності сонячної панелі; T_s - період керуючих імпульсів узгоджувального перетворювача; P_{mpp} - вихідна потужність панелі у точці максимальної потужності; $\Delta P(\Delta U -)$ - відхилення вихідної потужності сонячної панелі від точки максимальної потужності при зниженні вихідної напруги; $\Delta P(\Delta U +)$ - відхилення вихідної потужності сонячної панелі від точки максимальної потужності при підвищенні вихідної напруги;

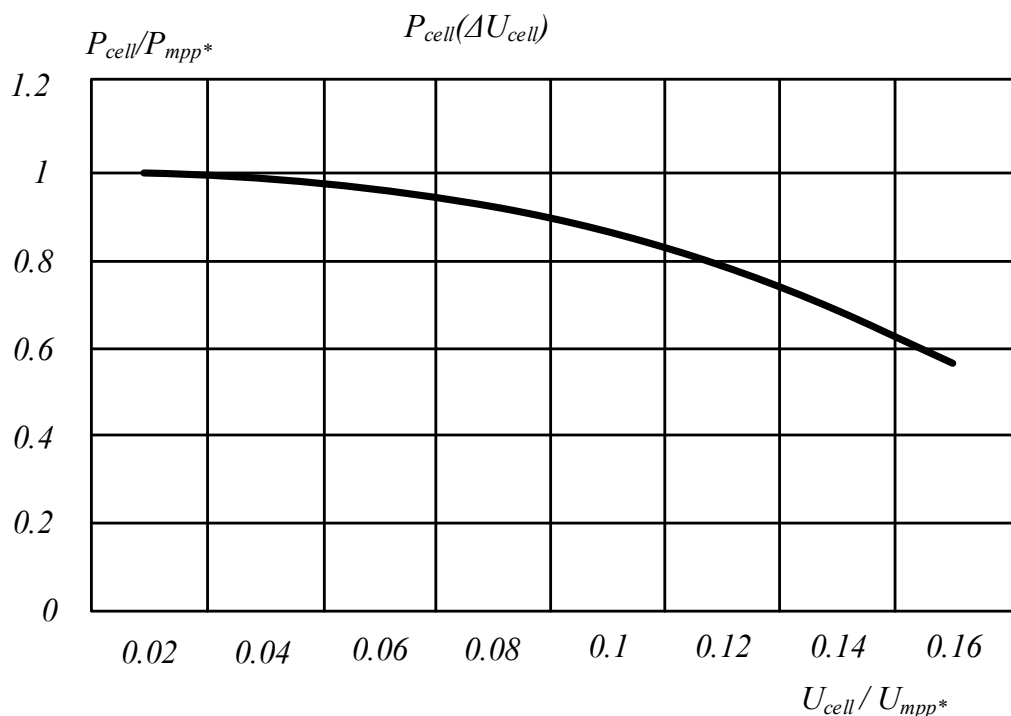


Рисунок 2.16 – Графік залежності зниження вихідної потужності СП від амплітуди пульсацій вихідної напруги

Графік залежності зниження вихідної потужності від амплітуди пульсацій вихідної напруги у відносних одиницях (рис. 2.16) показує, що для забезпечення відбору максимальної потужності сонячної панелі необхідно враховувати допустимі пульсації вхідної напруги на рівні 4-5%. Дані умови накладають додаткові вимоги при розрахунку та виборі вхідного конденсатора узгоджувального перетворювача.

2.6 Метод визначення точки генерації максимальної потужності шляхом поліноміальної апроксимації вольт-амперних характеристик сонячних панелей

Однією з найважливіших характеристик сонячних панелей є їх вольт-амперна характеристика, форма якої залежить від рівня сонячного випромінювання та температури. Для прикладу розглянемо вольт-амперну характеристику сонячної панелі *Era-370W-24V-Mono* (рис. 2.17).

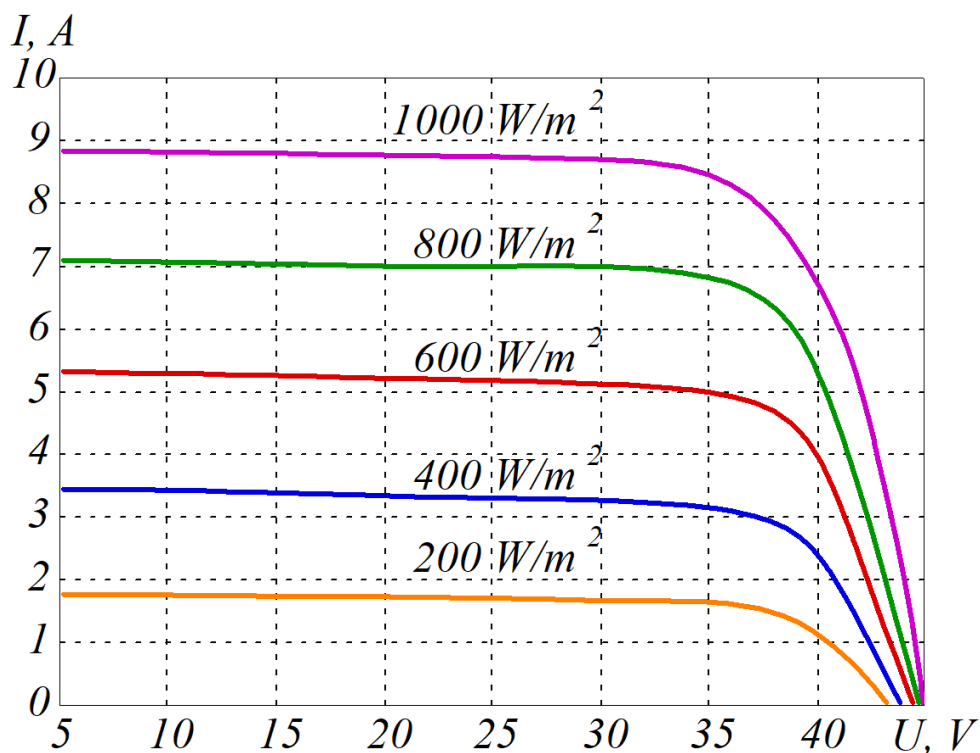


Рисунок 2.17 - Вольт-амперні характеристики одиничної сонячної панелі *Era-370W-24V-Mono*

Визначення точки максимальної потужності може бути визначено, як пошуковим алгоритмом, так і шляхом безпосереднього розрахунку. При цьому, недоліком пошукового алгоритму є зниження генерованої потужності під час процесу пошуку [58].

Запропоновано методику визначення точки максимальної потужності шляхом визначення застосування датчика освітленості сонячних панелей та поліноміальної апроксимації вольт-амперних характеристики

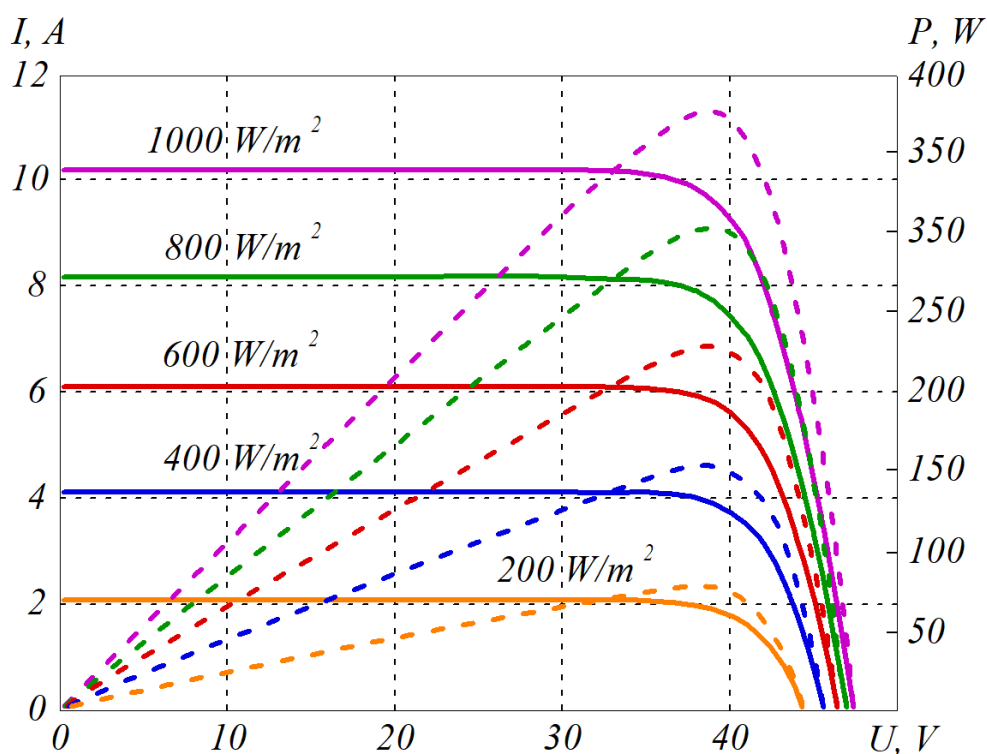


Рисунок 2.18 - Залежність максимальної потужності сонячної батареї як функція споживаного струму та рівня сонячної радіації блоку сонячних панелей потужністю 370 кВт

Визначити точку максимальної генерації електроенергії можна також шляхом точного розрахунку шляхом поліноміальної апроксимації вольт-амперних характеристик сонячної панелі та з використанням датчиків сонячної радіації та температури [56].

Результати поліноміальної апроксимації сімейства вольт-амперних характеристик сонячних панелей *Era-370W-24V-Mono* при різних рівнях випромінювання сонця:

– при інтенсивності сонячного випромінювання 1000 Вт/м²:

$$i_{pv_1000}(u) = -44500 \cdot u^5 + 31375 \cdot u^4 - 7716 \cdot u^3 + 764.46 \cdot u^2 - 24.9 \cdot u + 18.2; \quad (2.26)$$

– при інтенсивності сонячного випромінювання 800 Вт/м²:

$$i_{pv_800}(u) = -46402 \cdot u^5 + 33583 \cdot u^4 - 8494 \cdot u^3 + 866.8 \cdot u^2 - 29.1 \cdot u + 14.7; \quad (2.27)$$

– при інтенсивності сонячного випромінювання 600 Вт/м²:

$$i_{pv_600}(u) = -1980888 \cdot u^6 + 176912 \cdot u^5 - 60166 \cdot u^4 + 9587 \cdot u^3 - 698.9 \cdot u^2 + 18 \cdot u + 11; \quad (2.28)$$

– при інтенсивності сонячного випромінювання 400 Вт/м²:

$$i_{pv_400}(u) = -209032 \cdot u^6 + 189327 \cdot u^5 - 64729 \cdot u^4 + 10272 \cdot u^3 - 739.4 \cdot u^2 + 18.68 \cdot u + 7.097. \quad (2.29)$$

Ступінь поліномів в рівняннях (2.26) – (2.29) була обрана за критерієм максимальної відносної похибки апроксимації <3%.

При цьому функція потужності сонячної панелі може бути визначена як

$$P_{pv}(u) = i_{pv}(u) \cdot u \quad (2.30)$$

Таким чином, напруга при якій буде отримано максимум генерованої

потужності може бути визначено, як точку екстремума функції потужності від напруги

$$\frac{dP_{pv}(u)}{du} = \frac{d[i_{pv}(u) \cdot u]}{du} = 0. \quad (2.31)$$

Достатність виконання умов пошуку екстремуму максимальної потужності блоку сонячних панелей функції $P_{pv}(u)$ полягає наступному. Функція потужності сонячної панелі $P_{pv}(u)$ неперервна на проміжку значень напруги сонячної панелі від нуля до напруги холостого ходу має всередині проміжку стаціонарну або критичну точку $u = u_0$. Тоді:

а) якщо у цієї точки існує такий окіл, в якому при $u < u_0$ виконується нерівність $P_{pv}'(u) < 0$, а при $u > u_0$ — нерівність $P_{pv}'(u) > 0$, тоді $u = u_0$ — точка мінімуму функції $P_{pv} = f(u)$;

б) якщо у цієї точки існує такий окіл, в якому при $u < u_0$ виконується нерівність $P_{pv}'(u) > 0$, а при $u > u_0$ — нерівність $P_{pv}'(u) < 0$, тоді $u = u_0$ — точка максимуму функції $P_{pv} = f(u)$;

в) якщо у цієї точки існує такий окіл, що в ньому і ліворуч і праворуч від точки u_0 знаки похідної однакові, тоді в точці u_0 екстремума немає.

Отримані поліноми дають змогу аналітично визначити точку генерації максимальної потужності сонячної панелі, як функцію вхідного струму узгоджуючого перетворювача [59]. Таким чином, регулюючи струм сонячної панелі, можна отримати максимальну потужність, яка функціонально реалізується напівпровідниковим перетворювачем, що отримує живлення від сонячної панелі. Для реалізації даного алгоритму необхідне додання датчика рівня сонячної радіації за яким СК визначає відповідний поліном ВАХ [43].

2.7 Метод взаємної компенсації пульсацій в ланці постійного струму сонячної електростанції

В наслідок нерівномірної освітленості сонячних панелей, що входять до складу сонячної електростанції відбір потужності реалізується від окремих модулів сонячних панелей декількома DC/DC перетворювачами, які можуть бути підключені послідовно, паралельно, або паралельно-послідовно, для отримання первинного рівня напруги в ланці постійного струму [60].

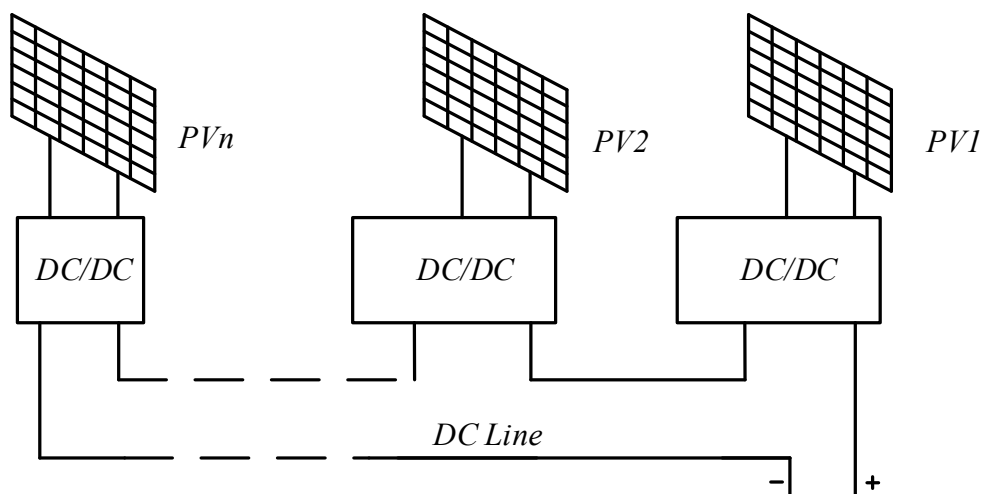


Рисунок 2.19 Схема послідовного підключення DC/DC перетворювачів ФЕС

Як було визначено в першому розділі, в якості узгоджувачів перетворювачів можуть бути використані понижуючі DC/DC перетворювачі.

Схема чотирьох перетворювачів відбору максимальної потужності представлено на рисунку 2.20.

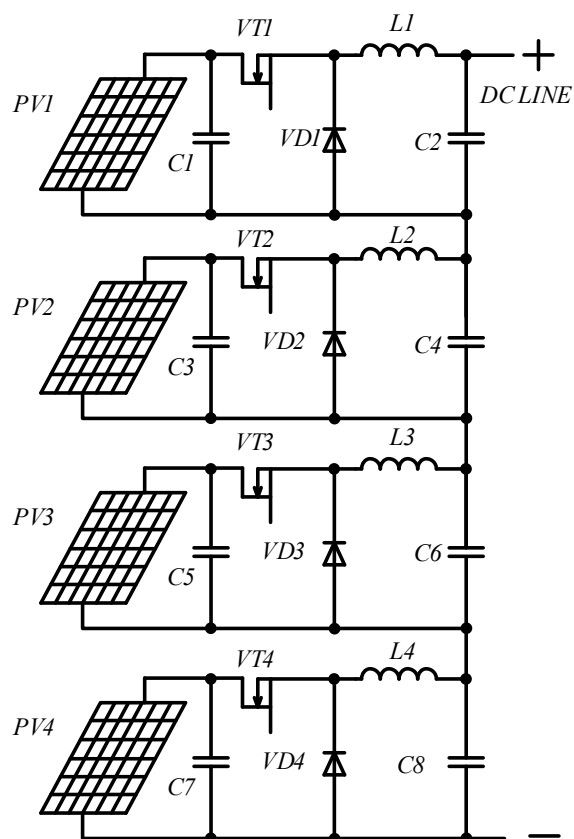


Рисунок 2.20 – Схема послідовного з'єднання узгоджуючих перетворювачів ФЕС понижуючого типу

Відбір максимальної потужності сонячних панелей реалізується шляхом ШІМ-регулювання для отримання вихідного струму, що відповідає максимальній потужності підключених сонячних панелей [60-65].

Фаза пульсацій вихідної напруги DC/DC в часі прив'язана до фази опорного ШІМ сигналу. Процеси, що протікають у понижуючому узгоджуючому перетворювачі ФЕС представлено на рисунку 2.21.

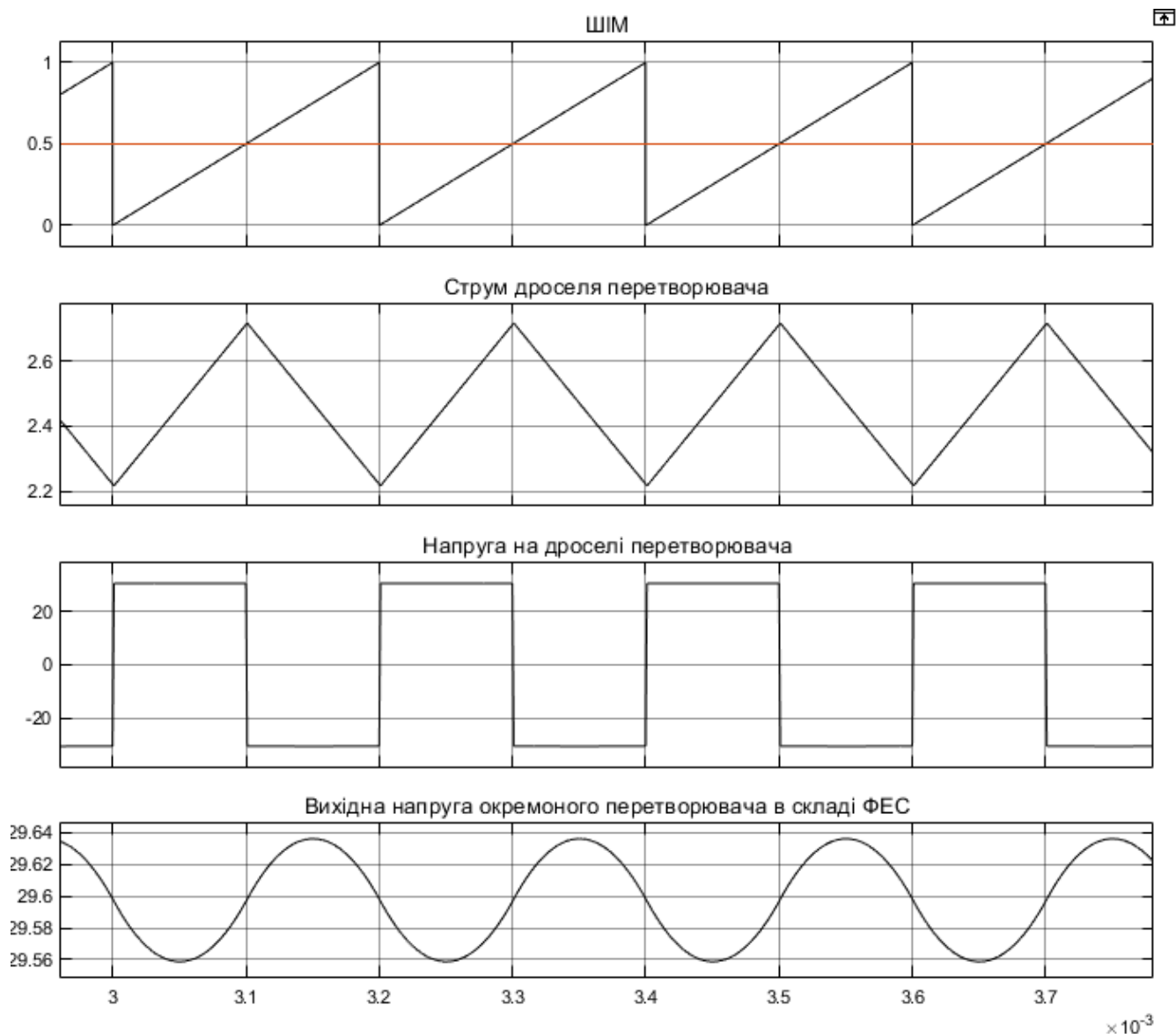


Рисунок 2.21 – Процеси, що протікають понижуючому узгоджуючому перетворювачі ФЕС

Суть запропонованого методу компенсації пульсацій напруги в ланці постійного струму полягає в синхронізації систем керування окремих DC/DC перетворювачів, а саме синхронізації опорних пилоподібних сигналів в ШІМ та реалізації взаємного зміщення їх на величину компенсаційного кута φ [66, 67].

Принцип синхронізації за взаємного фазового зсуву опорних ШІМ в каналах керування окремих узгоджуючих перетворювачів представлено на рисунку 2.22.

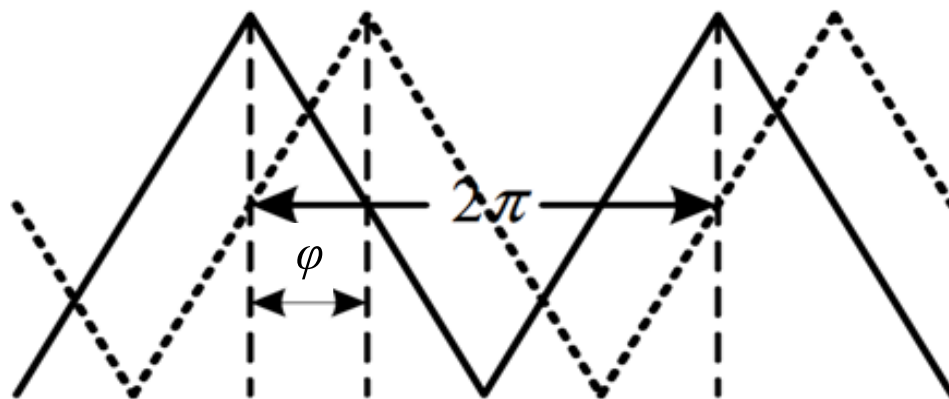


Рисунок 2.22 – Принцип синхронізації за взаємного фазового зсуву опорних ШІМ в каналах керування окремих узгоджуючих перетворювачів ФЕС

При цьому кількість DC/DC перетворювачів в структурі сонячної електростанції може бути різною. Для досягнення отримання оптимального ефекту компенсації, має бути відповідним до кількості паралельно з'єднаних перетворювачів. В ході досліджень було визначено, що оптимальний кут зсуву опорних сигналів ШІМ залежить від числа DC/DC перетворювачів і визначається як:

$$\phi = \frac{360}{n}, \quad (2.32)$$

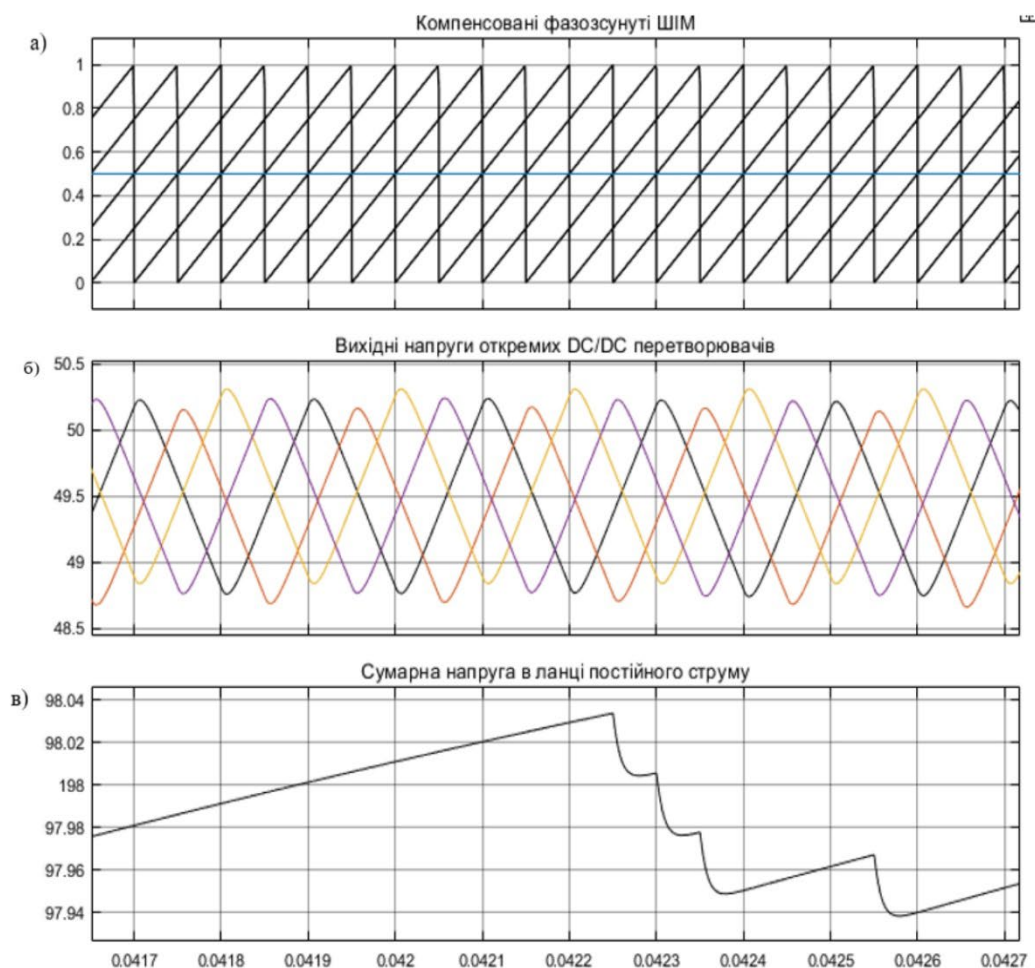
де n – число DC/DC перетворювачів в складі ФЕС.

У випадку коли зсув по фазі опорних сигналів апаратно реалізується шляхом завдання часу затримки таймером, час затримки, що відповідає значенню компенсаційного кута t_{comp} буде

$$t_{comp} = \frac{T_{pwm}}{n} \quad (2.33)$$

де T_{pwm} – період ШІМ модуляції в системі керування.

Принцип реалізації компенсації пульсації напруги в ланці постійного струму ФЕС шляхом синхронізації опорних ШІМ сигналів і завдання компенсаційного кута опорних сигналів ШІМ представлено на рисунку 2.23.



Рисунку 2.23 – Принцип реалізації компенсаційного методу керування узгоджувачими перетворювачами ФЕС: а) синхронізовані канали ШІМ; б) вихідні напруги окремих понижуючих *DC/DC* перетворювачів; в) вихідна напруга в ланці постійного струму

Як показано на рисунку 2.23, синхронізація каналів керування та реалізація фазового зсуву дозволяє суттєво знизити пульсації в ланці постійного струму. А саме, амплітуда пульсацій вихідної напруги кожного перетворювача складає 1,4В, а амплітуда пульсацій сумарної вихідної напруги складає 0,08В.

При цьому варто зазначити, що ступінь ефекту компенсації буде залежати від рівності пульсацій вихідних напруги окремих узгоджуючих перетворювачів [68].

Висновки до розділу 2

1. Динамічний пошук екстремуму потужності, що генерується сонячною панеллю, необхідний для ефективного використання сонячних панелей і генерації максимальної потужності.

2. Запропоновано метод непрямого визначення точки максимальної потужності сонячних панелей ФЕС, що визначається з одержуваної енергії узгоджуючого перетворювача. Даний метод не потребує встановлення датчика вихідного струму сонячної панелі, що спрощує систему датчиків. При використанні переривчастого режиму вхідного струму узгоджувального перетворювача (інвертуючого ШПП) непрямий вимір потужності може бути реалізовано на основі обчислення тактових значень енергії, запасеної в реактивних елементах схеми. При послідовному з'єднанні сонячних панелей існує можливість управління узгоджувальними перетворювачами вихідних напруг для досягнення точки максимальної потужності.

3. Проаналізовано вплив пульсацій вхідної напруги узгоджувального перетворювача на положення робочої точки сонячної панелі. Отримано формули для розрахунку миттєвого та середнього відхилень від точки максимальної потужності сонячної панелі при лінійній апроксимації.

4. Запропоновано компенсаційний метод керування узгоджувальними DC/DC перетворювачами в складі ФЕС, що реалізується шляхом синхронізації каналів керування окремих перетворювачів та забезпечення фазового зсуву опорних сигналів на компенсаційний кут φ . Запропонований метод дозволяє суттєво знизити пульсації в ланці постійного струму ФЕС, чим досягається можливість зменшення фільтруючих пристроїв та покращення якості електроенергії, що генерується мережевими інверторами до електричної мережі.

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ НА БАЗІ
МЕРЕЖЕВИХ ІНВЕРТОРА СТРУМУ ТА ІНВЕРТОРА НАПРУГИ**3.1 Система керування мережевим інвертором струму сонячної електростанції**

Підключення та передача електроенергії від ФЕС до трифазної електричної мережі, забезпечується застосуванням трифазного мережевого інвертора напруги чи струму [69]. Для трифазного мережевого інвертора струму (МІС) входним колом є ланка постійного струму з індуктивностями $L1$, $L2$ та ємністю C у ланці постійного струму, вихідним колом є мережеві конденсатори $C1-C3$, а також мережеві індуктивності $Labc$ (рис. 3.1). В якості ключових приладів, інвертор струму, як підвищуючий перетворювач, вимагає використання двоквADRантних ключів зі знакозмінною напругою $VT1-VT6$.

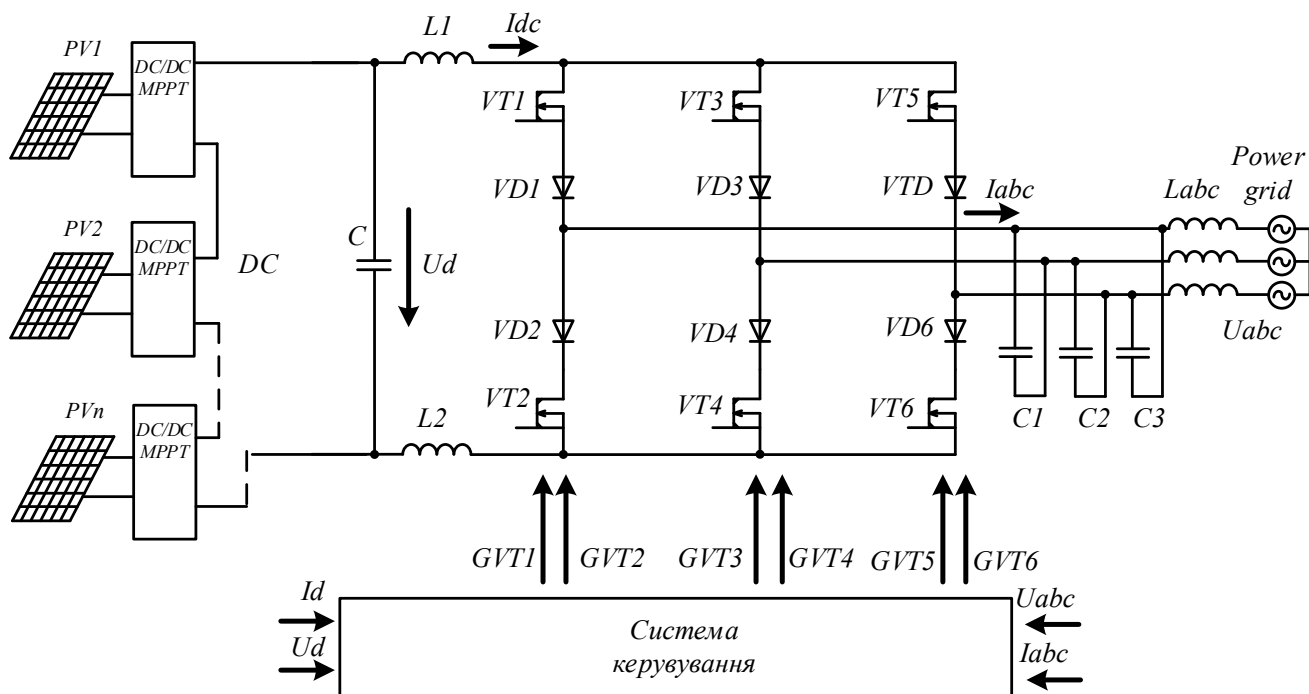


Рисунок 3.1 – Мережевий інвертор струму сонячної електростанції

Інвертор струму забезпечує передачу електричної енергії до трифазної електричної мережі з коефіцієнтом потужності близьким до одиниці та формою генерованих струмів наближеною до синусоїдальної.

3.1.1 Алгоритм керування силовими транзисторами мережевого інвертора струму сонячної електростанції

Система управління МІС заснована на використанні синусоїдальної ШІМ, але вона має свої особливості [70]. Відповідно до нулів мережевої напруги період можна розділити на шість рівних частин таким чином, що дві фазні напруги будуть мати протилежний знак по відношенню до третього (рис. 3.2).

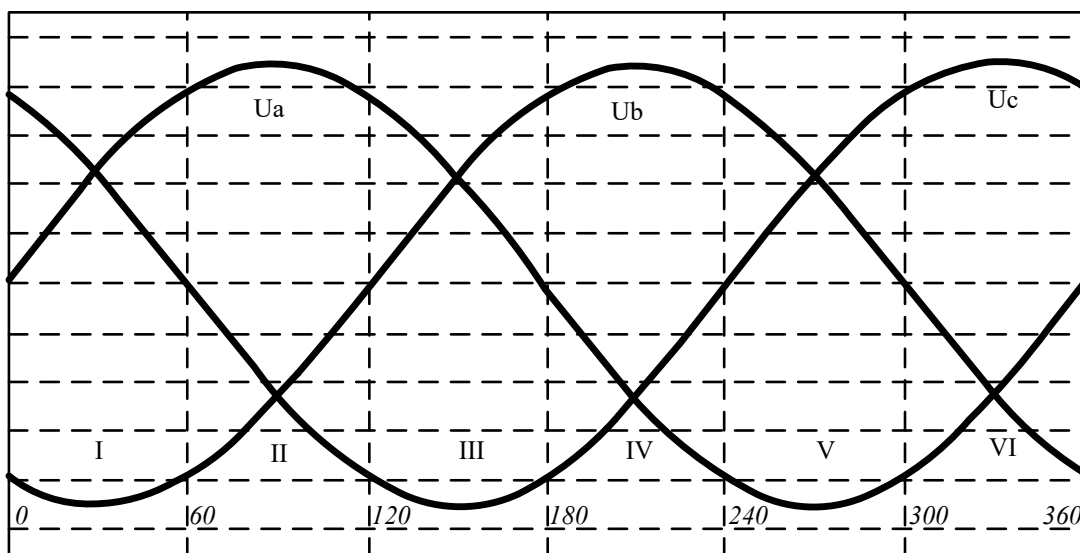


Рисунок 3.2 – Розподіл періоду напруги на шість зон управління

Наприклад, у зоні I ($0^\circ - 60^\circ$) $U_a > 0$, $U_c > 0$ і $U_b < 0$, причому амплітудні значення лінійної напруги мережі будуть рівні:

$$U_{ab} \geq \frac{\sqrt{6}}{2} U_{rms}, \quad U_{cb} \geq \frac{\sqrt{6}}{2} U_{rms}, \quad (3.1)$$

де U_{rms} - діюче значення фазної напруги мережі.

Так як подібні співвідношення справедливі у всіх шести зонах, то напруга на вході підвищуючого перетворювача (інвертора струму), повинна задовольняти умові:

$$U_d \leq \frac{\sqrt{6}}{2} U_{rms}, \quad (3.2)$$

В будь-який момент часу один верхній ключ $VT1$, $VT3$, $VT5$, і один нижній ключ $VT2$, $VT4$, $VT6$ повинні знаходитися в провідному стані для підтримки безперервного струму через дросель ланки постійного струму (3.3).

$$\begin{cases} H_1 + H_2 + H_3 = 1 \\ H_4 + H_5 + H_6 = 1 \end{cases} \quad (3.3)$$

де $H_1 - H_6$ комутаційні функції шести ключів інвертора.

Таким чином, амплітуди фазних струмів з урахуванням комутаційних функцій визначаються з рівнянь (3.4).

$$\begin{cases} l_a = l_{dc} \cdot (H_1 - H_4) \\ l_b = l_{dc} \cdot (H_2 - H_5) \\ l_c = l_{dc} \cdot (H_3 - H_6) \end{cases} \quad (3.4)$$

де I_{dc} - струм у ланці постійного струму інвертора.

Алгоритм модуляції силових транзисторів інвертора струму може бути отримано шляхом синтезу аналогової чи цифрової широтно-імпульсної модуляції [71-73].

Запропоновано алгоритм аналогової синусоїдальної широтно-імпульсної модуляції для чотириквadrантного перетворювача струму, побудованого на логічних елементах, яку можна реалізувати на ПЛІС, представлена на рисунку 3.3.

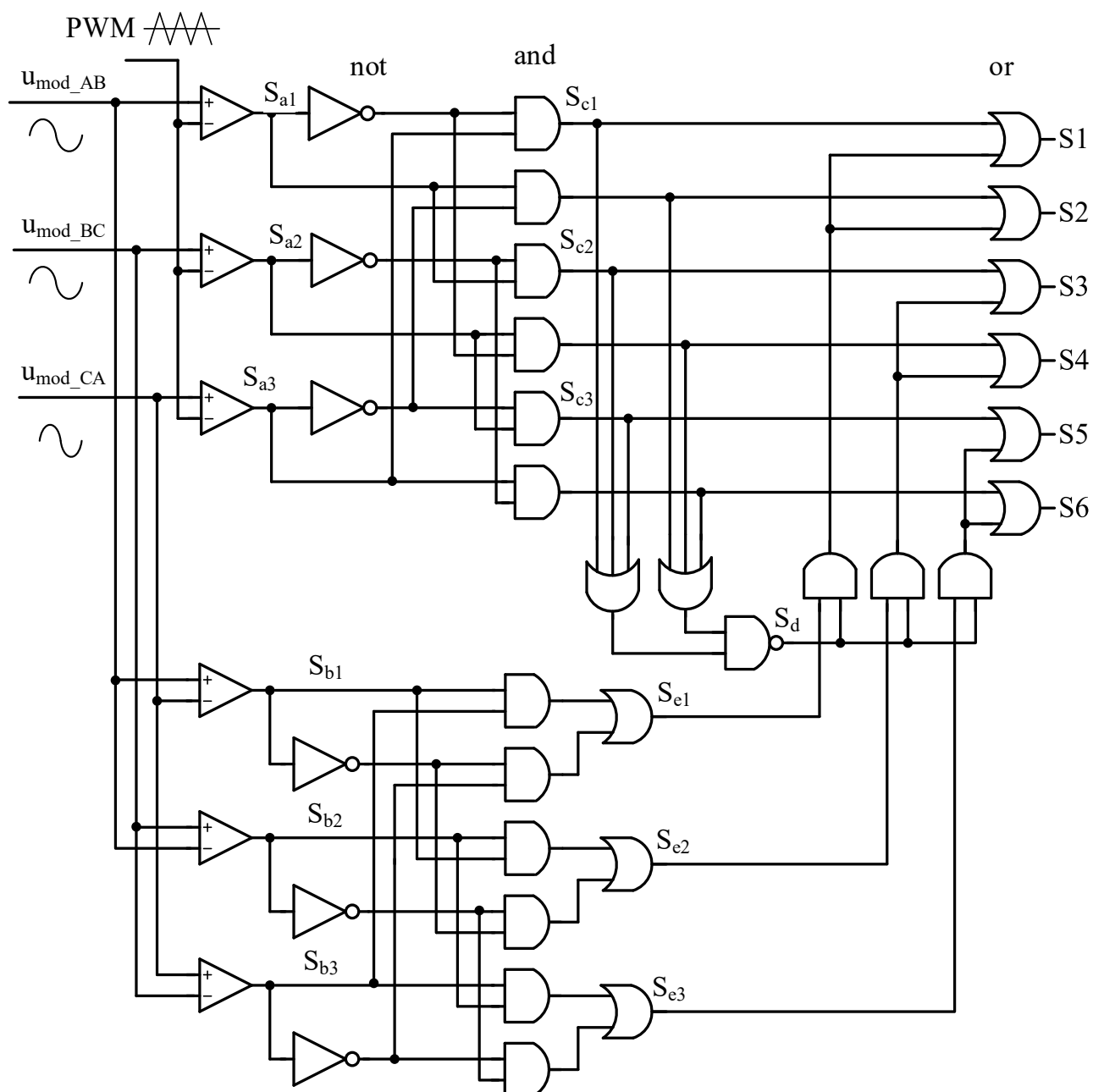


Рисунок 3.3. – Схема аналогової синусоїдальної широтно-імпульсної модуляції для трифазного випрямляча джерела струму

Проміжні сигнали в алгоритмі модуляції S_a , S_b , S_c , S_e , S_d , S_l , які представлені на рисунку 3.4 і відповідають таким на рисунку 3.5.

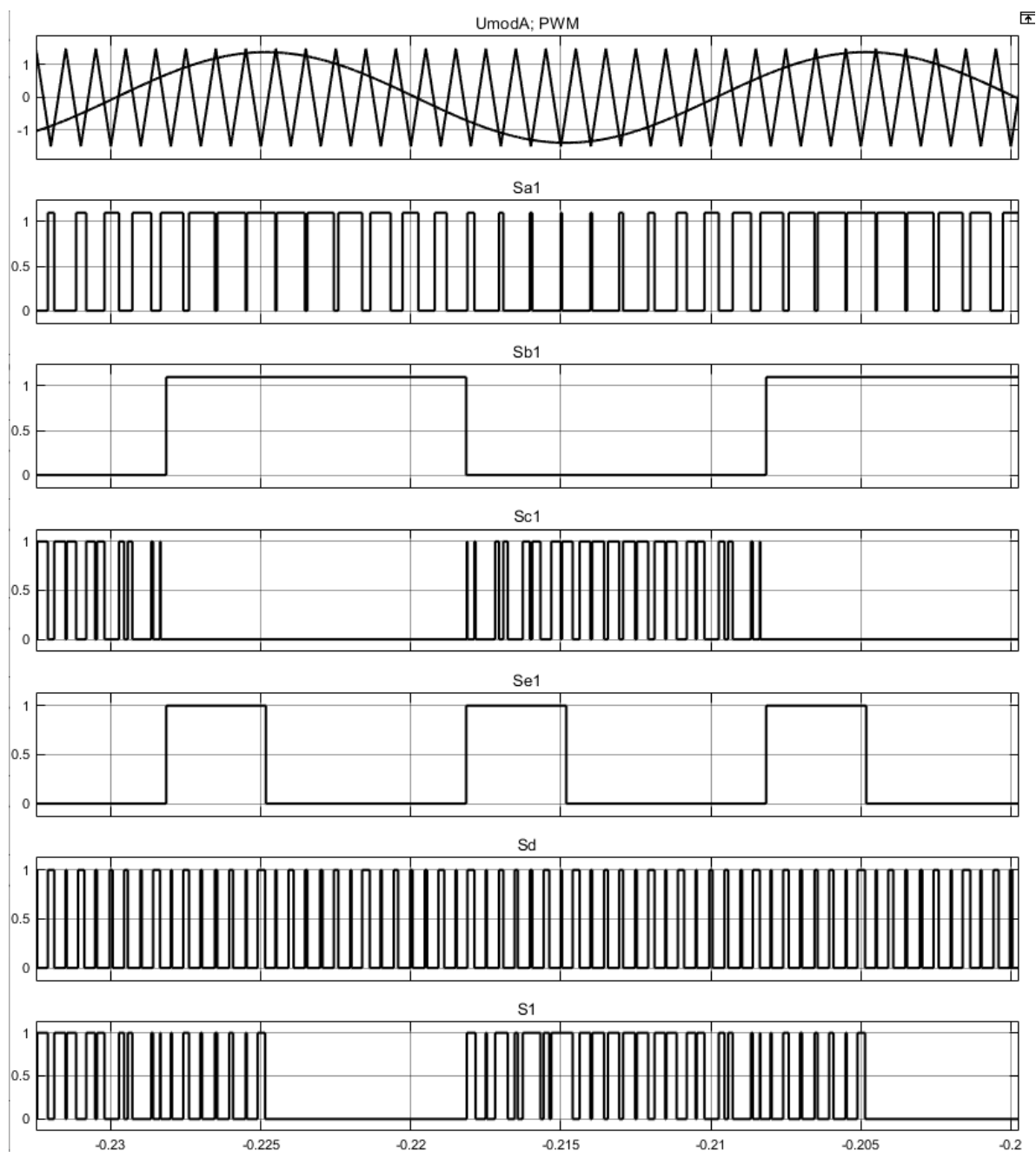


Рисунок 3.4 – Сигнали, що протікають в системі запропонованої широтно-імпульсної модуляції активного чотирьохквadrантного перетворювача струму

Перевагою запропонованого алгоритму модуляції є відповідність першої гармоніки модульованого сигналу першій гармоніці модульованого струму на вході моста силових транзисторів.

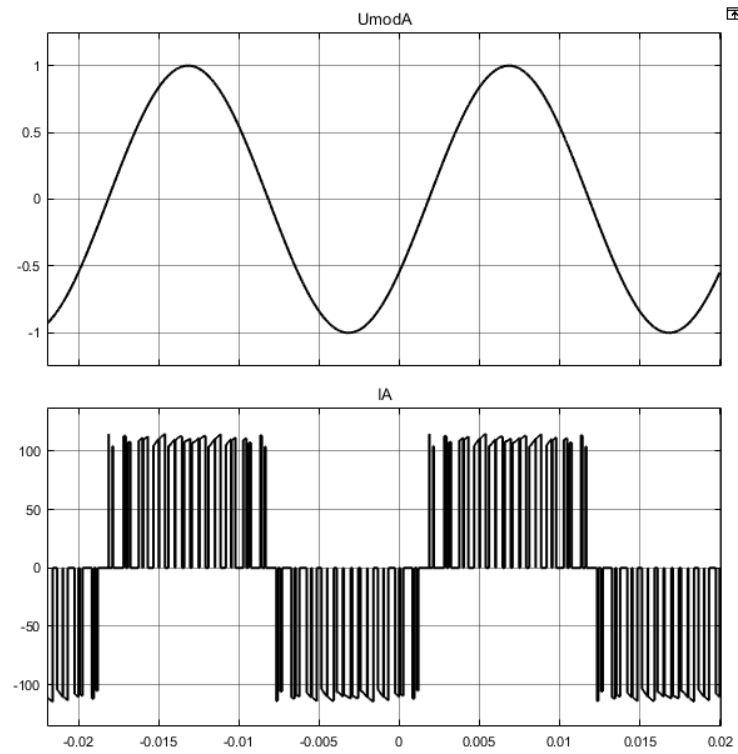


Рисунок 3.5 – Відповідність модулюючого сигналу миттєвому значенню вхідного струму моста перетворювача

При цьому, мережні струми описуються системою рівнянь, яка включає комутаційні функції системи управління інвертора струму:

$$\begin{cases} i_a(t) = I_a \cdot Da(t) \cdot \sin \omega t; \\ i_b(t) = I_b \cdot Db(t) \cdot (\sin \omega t + \frac{2\pi}{3}); \\ i_c(t) = I_c \cdot Dc(t) \cdot (\sin \omega t - \frac{2\pi}{3}); \end{cases} \quad (3.5)$$

де $i_a(t)$, $i_b(t)$, $i_c(t)$ – фазні струми мережі; I_a , I_b , I_c – амплітуди фазних струмів; $Da(t)$, $Db(t)$, $Dc(t)$ – комутаційні функції системи керування інвертора.

Для зниження впливу несиметрій напруги, які можуть викликати нестабільну роботу узгоджувальних перетворювачів по вихідним напругам, тобто, до порушення умови (2.21) або (2.22) необхідно виконувати пофазну корекцію

мережних струмів інвертора шляхом зміни завдання струму для кожної фази так, щоб воно відповідало постійній величині потужності у ланці постійного струму.

$$\begin{cases} P(t) = u_a(t)i_a(t) + u_b(t)i_b(t) + u_c(t)i_c(t) = \text{const} \\ i_{aref}(t) = k_i a_i(t); \\ Pa = \int_t^{t+T} u_a(t)i_a(t)dt; Pb = \int_t^{t+T} u_b(t)i_b(t)dt; \\ k_i = \frac{Pb}{Pa}; \end{cases} \quad (3.6)$$

де $u_a(t)$, $u_b(t)$, $u_c(t)$, $i_a(t)$, $i_b(t)$, $i_c(t)$ – фазні напруги та струми трифазної мережі; $i_{aref}(t)$ – завдання фазного струму, яке використовується для формування імпульсів управління, що відповідає зниженій фазній напрузі мережі живлення; Pa , Pb – потужності фаз А і В за період повторюваності мережі живлення; k_i – коефіцієнт зміни завдання струму фази А мережі живлення.

Послідовність розрахунку коефіцієнта корекції завдання фазних струмів полягає у використанні сталості миттєвої потужності трифазної мережі. При цьому, коефіцієнт корекції розраховується, як співвідношення потужностей фаз за період повторюваності напруги мережі живлення (2.31).

3.2 Аналітична умова реалізації коефіцієнту потужності активного випрямляча струму рівного одиниці

Для аналізу критерія можливості реалізації значення коефіцієнту потужності рівного одиниці розглянемо схему заміщення вхідного мережевого інвертора струму, яка наведена на рисунку 3.6 [78].

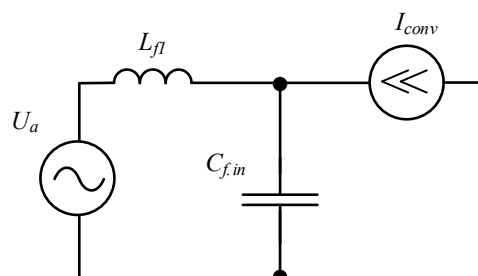


Рисунок 3.6 – Схема заміщення однієї фази вхідного кола мережевого інвертора струму сонячної електростанції

Оскільки вихідний струм силового моста в фазі дорівнюється струму дроселя ланки постійног струму (3.4), модульований струм інвертора (рис.3.5) в схемі заміщення може бути замінений на джерело струму в схемі заміщення [79].

Фазна напруга мережі визначається як

$$u_{ga}(t) = U_{ga} \cdot \sin(\omega t) \quad (3.7)$$

Система керування мережевого інвертора струму формує модульований синусоїдальний сигнал струму в протифазі напруги електричної мережі

$$i_{conv.a}(t) = I_{conv.a} \cdot \sin(\omega t - \pi) \quad (3.8)$$

де $I_{conv.a}$ – амплітуда першої гармоніки генерованого струму

Частота зрізу вхідного LC фільтра визначає полосу пропускання формованого струму і визначається за виразом

$$f_{zp} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{ex} \cdot C_{ex}}} \quad (3.9)$$

В режимі генерації електричної енергії до трифазної електричної мережі полоса пропускання вхідного LC фільтра має бути вищою за 50 Гц і суттєво нижчою за значення частоти комутації ШІМ.

Умовою формування коефіцієнта потужності, рівного одиниці, нульовий зсув по фазі спожитого чи генерованого струму мережі.

Струм, що генерується до електричної мережі, відповідно є струм вхідного дроселя L_{ex} , який може бути визначено як

$$i_{ex}(t) = i_L(t) = \frac{1}{L_{ex}} \int [u_{ga}(t) + u_c(t)] \cdot dt \quad (3.10)$$

де L_{ex} – індуктивність вхідного фільтра; u_{ga} – миттєве значення фазної напруги мережі; u_c – миттєве значення напруги на вхідному конденсаторі вхідного фільтра.

За схемою заміщення на рисунку 3.6, струм, генерований до електричної мережі може бути визначено методом двох складових зумовлених: під дією напруги мережі та від модульованого струму перетворювача, що може бути записано в виді миттєвих значень або як сума векторів (чи у комплексній формі)

$$i_{ex}(t) = i_L(t) = i_{L.g}(t) + i_{L.conv}(t) \quad (3.11)$$

де $i_{L.grid}(t)$ – миттєве значення вхідного струму дроселя зумовленого дією напруги живлення мережі; $i_{L.conv}(t)$ – миттєве значення вхідного струму дроселя зумовленого дією модульованого сигналу струму [80]

Векторне значення вхідного струму індуктивності зумовлене дією напруги мережі може бути визначено як

$$\overline{i_{L.grid}} = \frac{\overline{u_{a.grid}}}{R_{grid} + (j\omega L - j\frac{1}{\omega C})} \quad (3.12)$$

Вхідний струм визначений дією модульованого джерела струму може бути визначено як

$$i_{L.conv} = i_{conv} \frac{|X_c|}{|R_g + X_L - X_c|} \quad (3.13)$$

де I_{conv} – амплітудне значення модульованого струму

Таким чином, при умові $X \gg R_g$ складова вхідного струму буде мати виключно індуктивний характер [81].

Представимо складові вхідного струму на комплексній площині у векторній формі

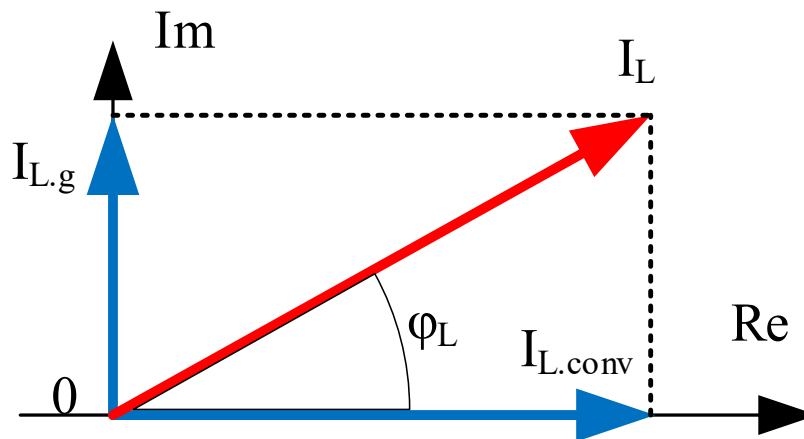


Рисунок 3.7 – Векторні складові вхідного струму мережевого інвертора струму сонячної електростанції

Таким чином при завданні модульованого фазного струму з фазою рівною фазі напруги мережі, у мережевому струмі виникає зсув фази φ_L .

Відповідно до векторної діаграми на рисунку 3.7, струм фазного дроселя, зумовлений напругою мережі, залежить від напруги мережі і параметрів вхідного LC фільтра, амплітуда якого є умовно постійною, за умовою сталості діючого значення напруги мережі. В одночас частина діючого значення струму, що зумовлена інвертором струму $I_{L.conv}$ є змінною і відповідає потужності генерованої сонячними панелями, що змінюється в функції освітлення. Отже при зниженні рівня генерованої потужності відбувається збільшення зсуву фази мережевого струму та збільшення реактивної потужності, генерованою ФЕС до електричної мережі.

Таким чином, для формування коефіцієнту потужності рівного одиниці модульованих сигнал струму має містити зсув фази протилежний φ_L .

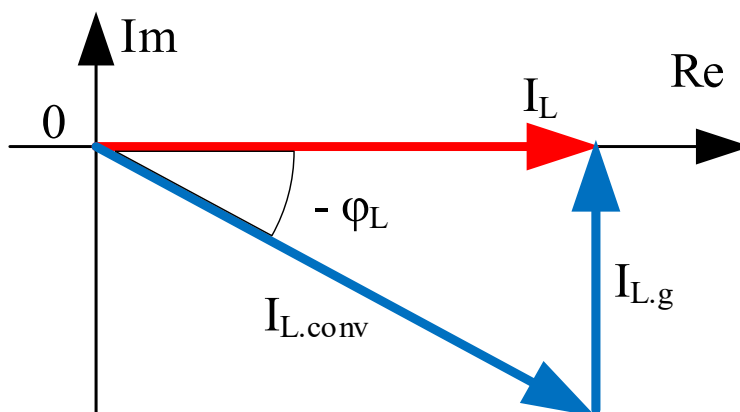


Рисунок 3.8 – Векторні складові вхідного струму в режимі коефіцієнта потужності рівного одиниці

Значення компенсаційного кута φ_{comp} необхідного для формування коефіцієнту потужності близького до одиниці може бути визначено як

$$\varphi_{comp} = \arcsin \left[\frac{I_{Lg}}{I_{L.conv}} \right] \quad (3.14)$$

де I_{Lg} – амплітудне значення струму вхідного дроселя зумовлене дією напруги мережі; $I_{L.conv}$ – амплітудне значення першої гармоніки модульованого струму перетворювача [86].

Аналогічно в режимі генерації енергії в електричну мережу зсув фази струму має складовити 180° з тим самим кутом компенсації мінус φ_L , що представлено на векторній діаграмі на рисунку 3.9.

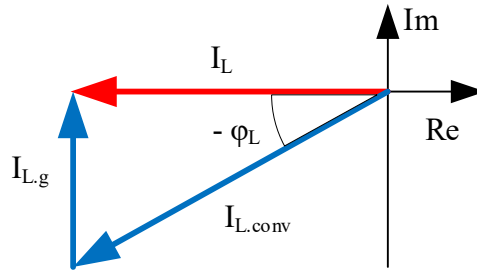
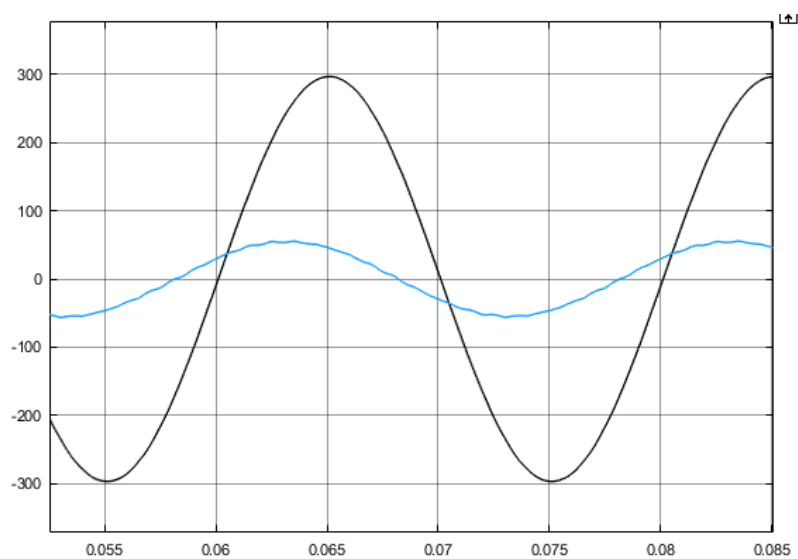


Рисунок 3.9 – Векторні складові вхідного струму в режимі коефіцієнта потужності рівного мінус одиниці 0?

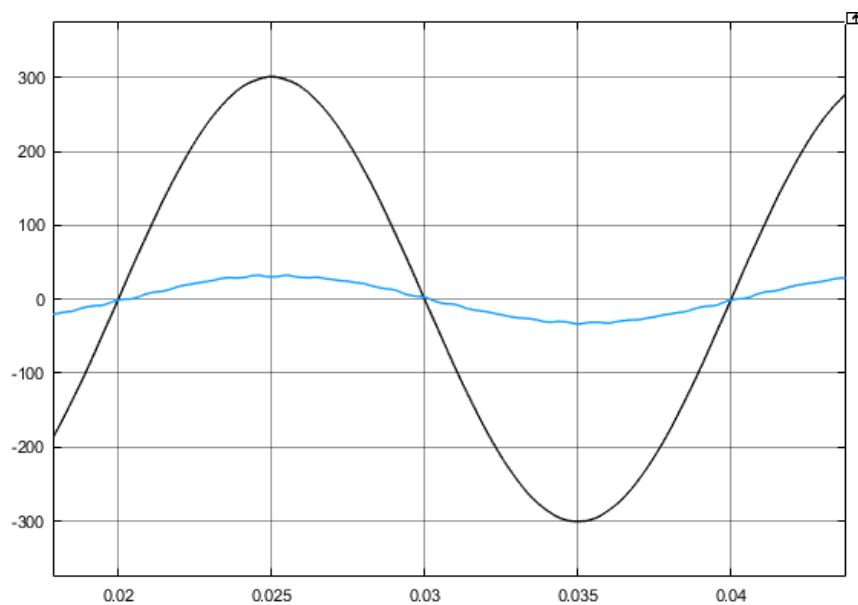
Таким чином для забезпечення компенсації реактивної потужності генерованої сонячною електростанцією з інвертором струму сигнал завдання має бути зсунутий на компенсаційний кут $-\varphi_L$, а вхідний струм буде приймати значення

$$i_{conv.a}(t) = I_{conv.a} \cdot \sin(\omega t - \varphi_L). \quad (3.15)$$

Результати моделювання роботи інвертора струму при доданні алгоритму компенсації реактивної потужності при низькому рівні генерації потужності представлено на рисунку 3.10 [89, 90].



a)



б)

Рисунок 3.10 – Напруга електричної мережі та струм генерований сонячною електростанцією з інвертом струму: а) без застосування алгоритму компенсації реактивної потужності електричної мережі в якому коефіцієнт потужності складає 0,82; б) з застосуванням алгоритму компенсації реактивної потужності

3.3 Алгоритм модуляції сигналів керування силових транзисторів інвертора напруги сонячної електростанції

Трифазний мережевий інвертор напруги сонячної електростанції працює в режимі аналогічному, що використовується в силових активних фільтрах та активних випрямлячах з корекцією коефіцієнта потужності, в яких перетворювач формує задану форму струму [91].

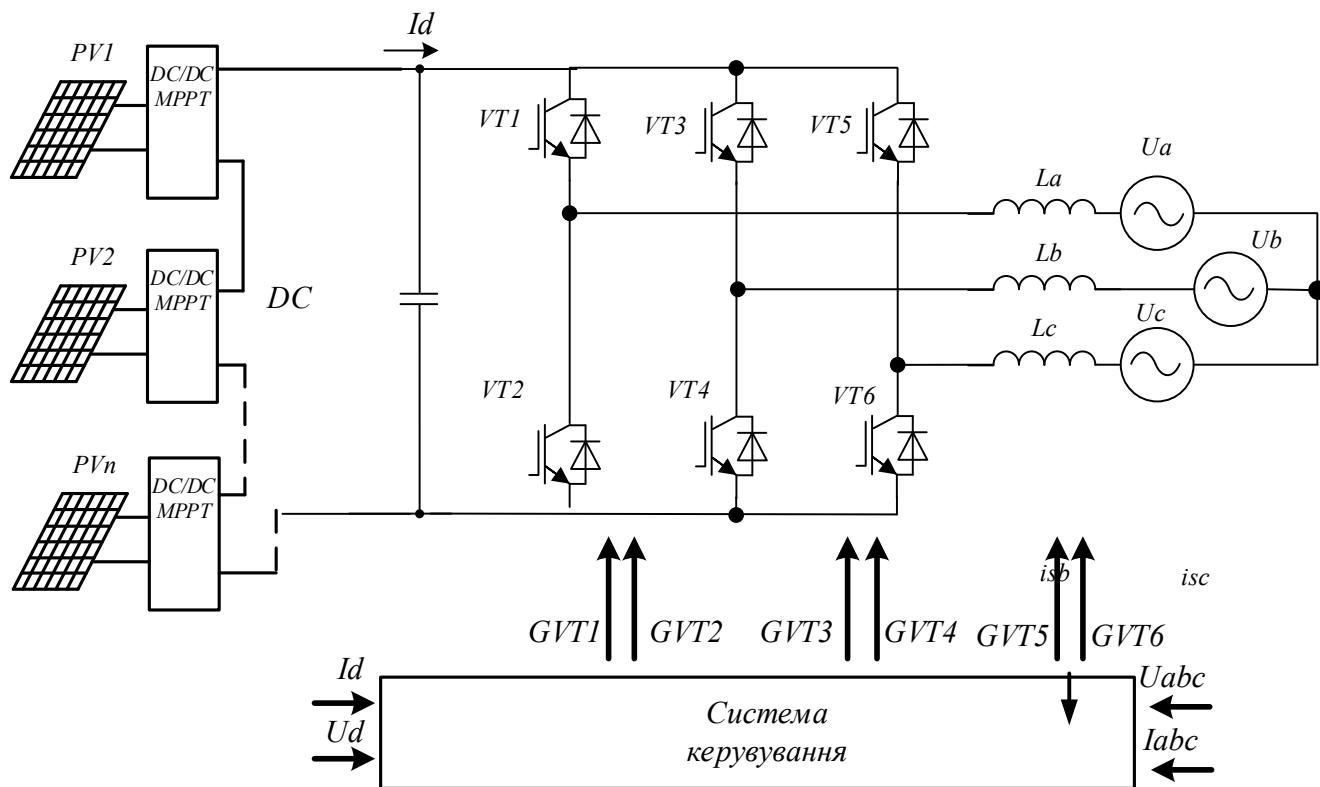


Рисунок 3.11 – Сонячна електростанція на базі мережевого інвертора напруги

Система керування дворівневого мережевого інвертора напруги може бути побудована як із гістерезисною модуляцією [92, 93], так і з ШІМ [100, 101]

Подібно до дворівневого АВН, система керування трирівневого АВН складається з ШІМ-модулятора, регулятора вихідної напруги, аперіодичної ланки першого порядку і розподільника імпульсів. Сам ШІМ-модулятор матиме складнішу структуру, оскільки буде містити два несучих сигнали ШІМ [94].

Запропоновану систему керування мережевого інвертора напруги наведено на рисунку 3.12.

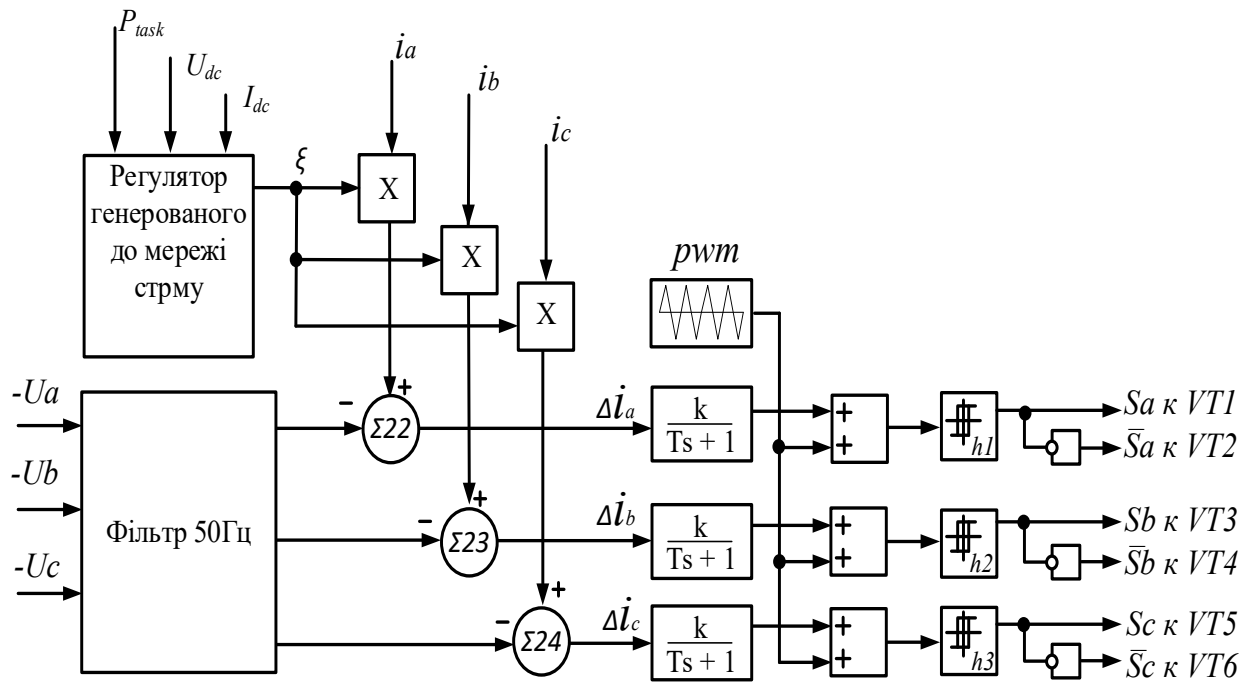


Рисунок 3.12 – Система керування мережевого інвертора напруги

Розроблена система керування мережевого інвертора напруги реалізує форму струму, який передається в електричну мережу, що в протифазі повторює форму напруги мережі, з необхідною амплітудою, яку можна виразити через регульовальний коефіцієнт наступним чином

$$I_{\text{вх}} = U_{\text{вх}} \cdot \xi, \quad (3.16)$$

де $U_{\text{вх}}$ - фазна напруга мережі; $I_{\text{вх}}$ – струм генерований до електричної мережі .

Регульовальна характеристика мережевого інвертора ФЕС отримана виходячи з рівнянь балансу потужностей у перетворювачі. Регулювання генерованого струму реалізується масштабування, тобто завданням необхідної амплітуди мережевого струму відносно амплітуди мережевої напруги [96].

Баланс миттєвих потужностей у перетворювачі описується наступним рівнянням

$$3 \cdot U_{\text{BX}} \cdot I_{\text{BX}} = U_{dc} \cdot I_{dc} \cdot \eta, \quad (3.17)$$

де η – коефіцієнт корисної дії мережевого інвертора напруги; U_{dc} – напруга в ланці постійного струму; I_{dc} – струм в ланці постійного струму.

Рівняння балансу потужності (3.17) виконано при умові, що коефіцієнт потужності генерованого струму близький до мінус одиниці.

При умові, що сигналом завдання є потужність P_{task} , що має бути передана до електричної мережі, яка відповідає точці максимальної потужності сонячних панелей, для забезпечення передачі максимальної потужності сонячною електростанцією значення регулювального коефіцієнту ξ має бути

$$3 \cdot U_{\text{BX}} \cdot I_{\text{BX}} = P_{task} \cdot \eta. \quad (3.18)$$

Підставивши в (3.18) вираз (3.16) отримаємо значення регулювального коефіцієнта, що відповідає режиму передачі в електричну мережу максимальної потужності сонячних панелей [99]:

$$3 \cdot U_{\text{BX}} \cdot U_{\text{BX}} \cdot \xi = P_{task} \cdot \eta, \quad (3.19)$$

$$\xi = \frac{P_{task} \cdot \eta}{3U_{\text{BX}}^2}. \quad (3.20)$$

Отримане рівняння визначає сигнал завдання генерованого в мережу струму в системі керування мережевого інвертора напруги, що визначає генерацію мережевим інвертором потужності, яка відповідає точці максимальної потужності блоку сонячних панелей сонячної електростанції.

Висновки до розділу 3

Розроблено систему керування трифазного мережевого інвертора струму, що

забезпечує передачу електричної енергії від ФЕС до промислової електричної мережі змінного струму.

Визначено, що при зниженні генерованої потужності мережеві інвертори струму збільшують долю генерованої реактивної потужності, що знижує енергетичну ефективність електричної мережі та зумовлює додаткові втрати потужності в ній.

Визначено аналітичну умову реалізації коефіцієнту потужності мережевого інвертора струму ФЕС близького до одиниці та запропоновано метод, що керування мережевим інвертором, який задовольняє вказану умову в режимі зниженої генерації потужності.

Розроблено систему керування мережевим інвертором напруги сонячної електростанції, що забезпечує передачу електричної енергії до трифазної електричної мережі з коефіцієнтом потужності близьким до одиниці.

РОЗДІЛ 4

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ НА БАЗІ ІНВЕРТОРА СТРУМУ В СИСТЕМІ MATLAB

У розділі створині моделі, які якісно оцінюють параметри якості електричної енергії генерованої сонячними електростанціями з інверторами струму до електричної мережі, а також визначені параметри, що впливають на параметри якості генерованої електричної енергії.

В програмі Matlab/Simulink розроблено комп'ютерну модель сонячної електростанції потужністю 170 кВт при рівні сонячної радіації 1000 Вт/м^2 , що генерує електричну енергію до електричної мережі.

В розділі визначено, що при застосуванні інвертора струму в якості мережевого інвертора, погіршуються параметри якості генерованого струму, визначені причини цього явища та визначено методику покращення якості генерованого струму сонячною електростанцією при зниженні рівня сонячної радіації.

4.1 Структура комп'ютерної моделі сонячної електростанції на базі інвертора струму

Структура розробленої моделі сонячної електростанції представлена на рисунку 4.1.

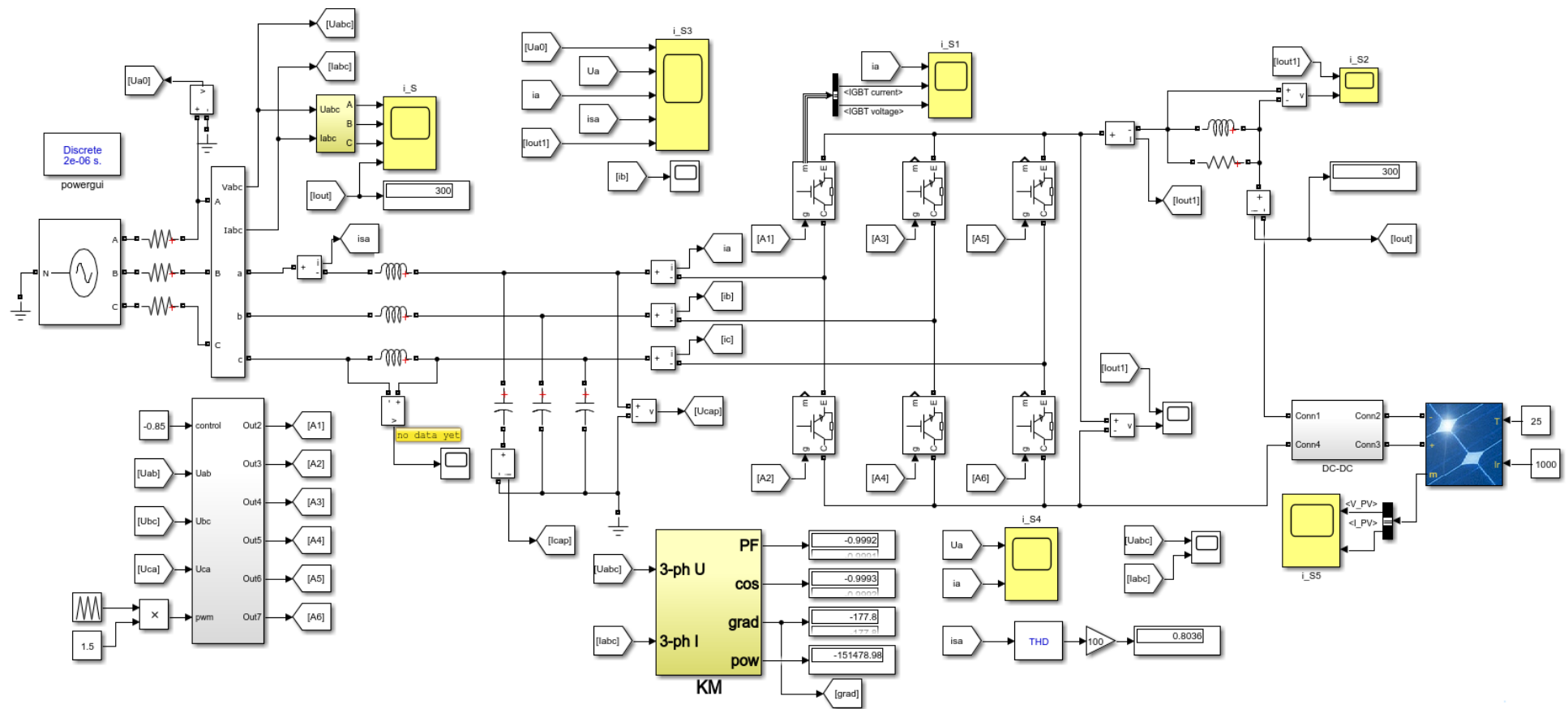


Рисунок 4.1 – Комп'ютерна модель сонячної електростанції на базі інвертора струму

Таблиця 4.1 – Параметри комп'ютерної моделі

Параметр	Значення
Напруга електричної мережі, В	3*230
Опір електричної мережі, Ом	0,3
Індуктивність вхідних дроселів, мГн	2
Ємність вхідного конденсатора, мкФ	100
Індуктивність вихідного дроселі, мГн	10
Сумарна потужність сонячних панелей, кВт *при рівні сонячної радіації 1000 Вт/м ²	170,4
Частота ШІМ модуляції, кГц	4

В складі сонячної електростанції застосовані сонячні панелі типу *Soltech ISTH-215-P*. Вольт-амперні та ват-вольтні характеристики однієї сонячної панелі при рівні сонячної радіації 1000Вт/м², 750 Вт/м², 500 Вт/м², 250 Вт/м², 100 Вт/м² представлені на рисунку 4.2 [22].

Параметри однієї сонячної панелі *Soltech ISTH-215-P* в режимах холостого ходу, короткого замикання та точки генерації максимальної потужності представлені в таблиці 4.2.

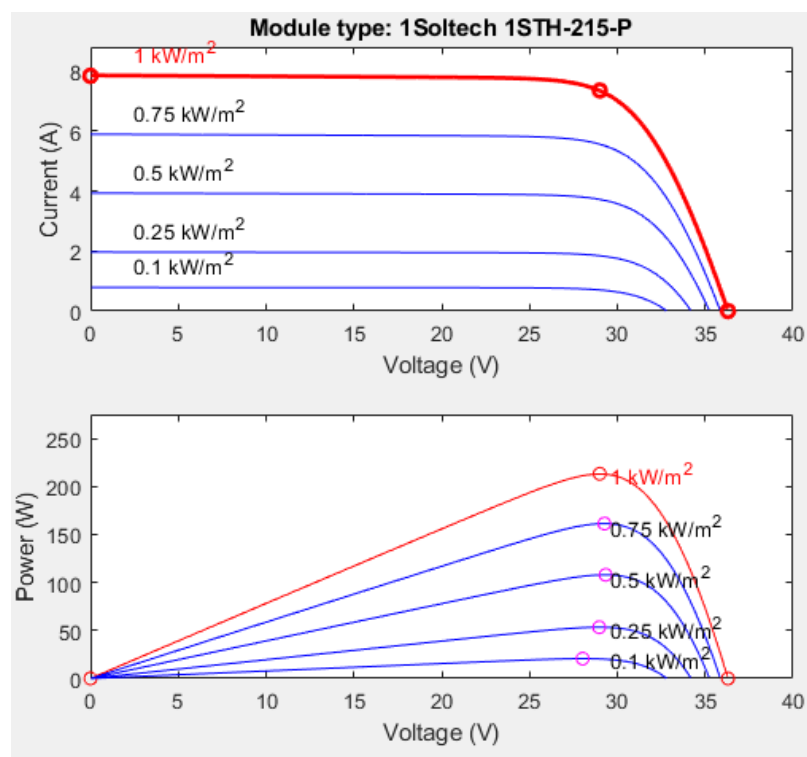


Рисунок 4.2 – Вольт-амперні та ват-вольтні характеристики однієї сонячної панелі *1Soltech 1STH-215-P* при рівні сонячної радіації 1000Вт/м², 750 Вт/м², 500 Вт/м², 250 Вт/м², 100 Вт/м²,

Таблиця 4.2 – Параметри однієї сонячної панелі Soltech 1STH-215-P

Параметр	Значення
Напруга холостого ходу, В	36,3
Напруга в точці максимальної потужності, Вт при рівні сонячної радіації 1000Вт/м ²	213,5
Струм короткого замикання, А	7,35
Струм в точці генерації максимальної потужності при рівні сонячної радіації 1000 Вт/м ²	7,35

В моделі виконано моделювання набору сонячних панелей, що складається з 40 паралельних гілок, кожна з яких містить 20 послідовних комірок. Таким чином, модель імітує генерацію 800 сонячних панелей сумарною потужністю 170,4 кВт.

Вольт-амперні та ват-вольтні характеристики блоку сонячних панелей (20 послідовних модулів, 40 паралельних модулів) при рівні сонячної радіації 1000 Вт/м^2 , 750 Вт/м^2 , 500 Вт/м^2 , 250 Вт/м^2 , 100 Вт/м^2 представлені на рисунку 4.3.

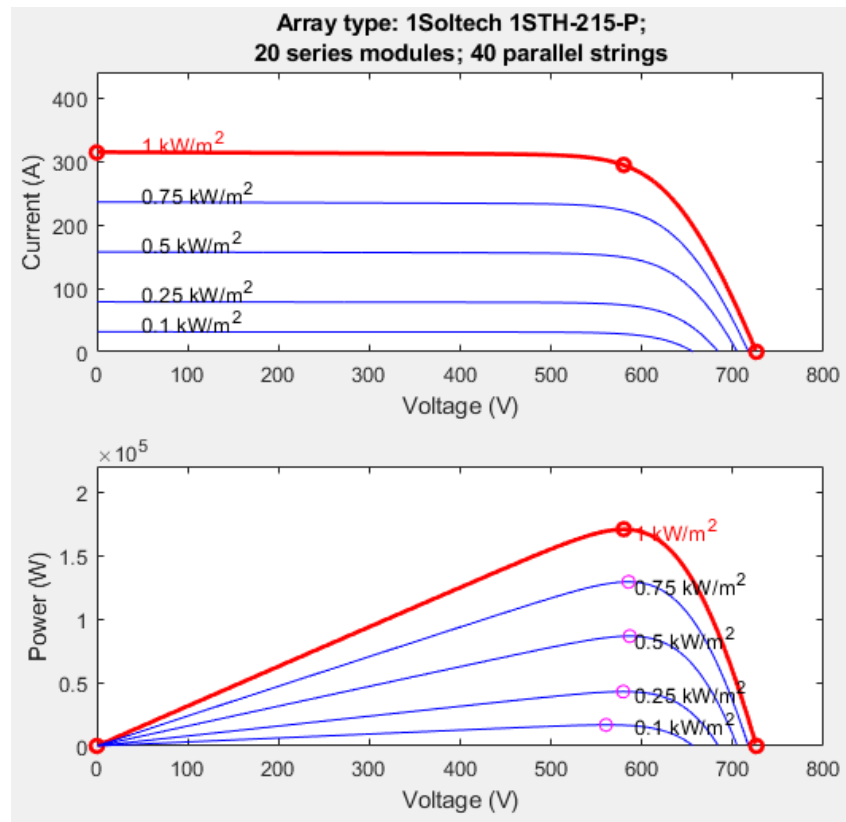


Рисунок 4.3 – Вольт-амперні та ват-вольтні характеристики блоку сонячних панелей (20 послідовних модулів, 40 паралельних модулів) при рівні сонячної радіації 1000 Вт/м^2 , 750 Вт/м^2 , 500 Вт/м^2 , 250 Вт/м^2 , 100 Вт/м^2 ,

Математичні вирази, що описують генерацію електричного струму сонячної панелі описано в попередньому розділі в рівняннях (2.4 – 2.12). Вона представляє собою дворезистивну модель джерела струму з паралельним діодом. Субмодель сонячної панелі представлено на рисунку 4.4. [102]

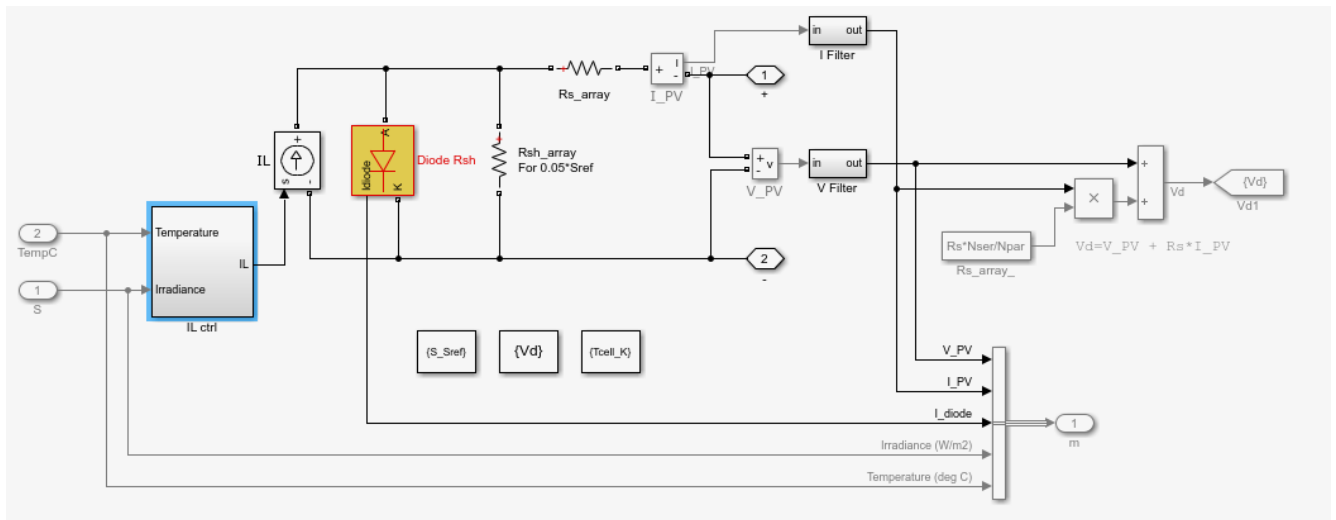


Рисунок 4.4 – Схема заміщення блоку сонячних панелей

Субмодель, що визначає залежність генерованого струму від температури, рівня сонячної радіації та напруги на сонячній панелі представлено на рис.4.5 [103].

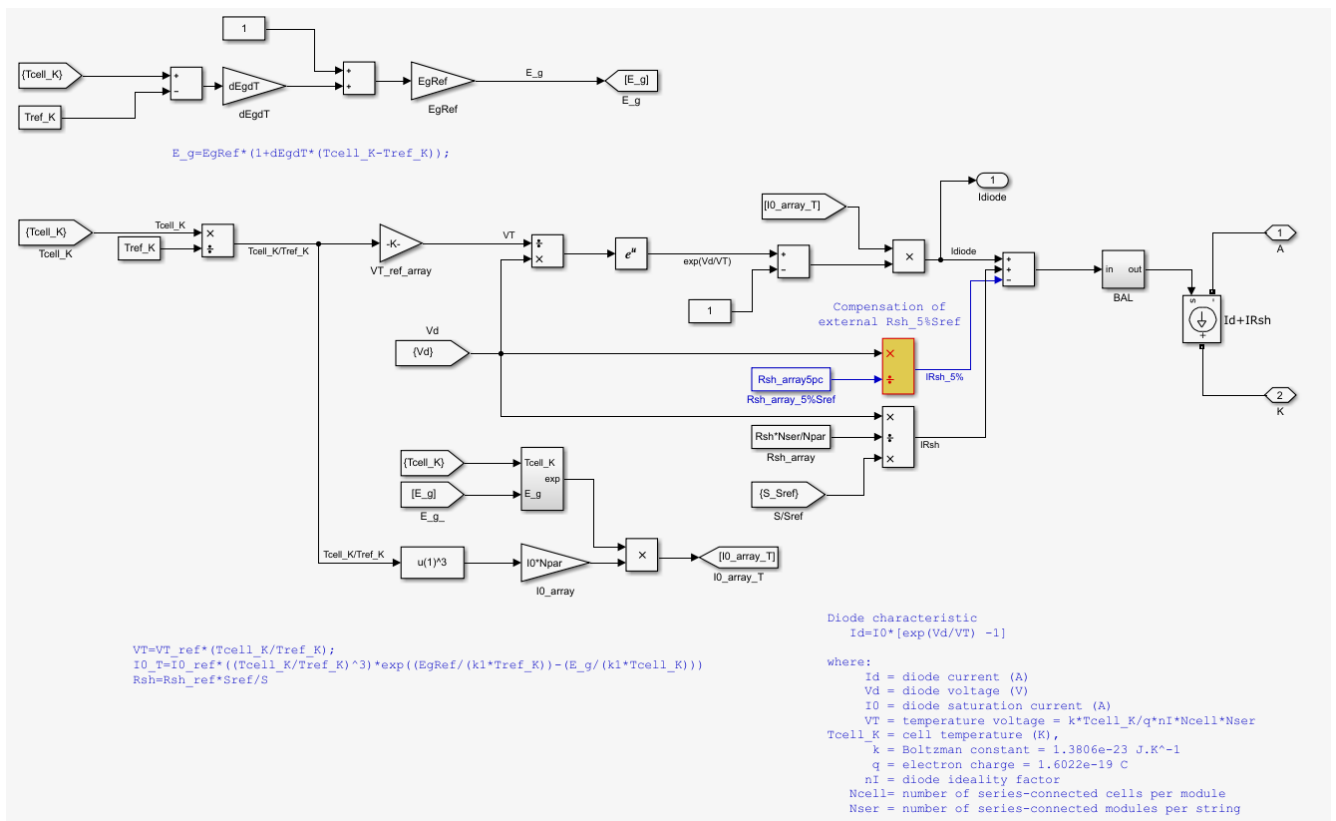


Рисунок 4.5 – Субмодель, що визначає залежність генерованого струму від температури, рівня сонячної радіації та напруги на сонячній панелі

В цілому модель забезпечує досить точне відтворення вольт-амперних характеристик представлених на сонячну панель.

Субмодель системи ШІМ керування інвертора струму представлено на рисунку 4.6 [103, 104].

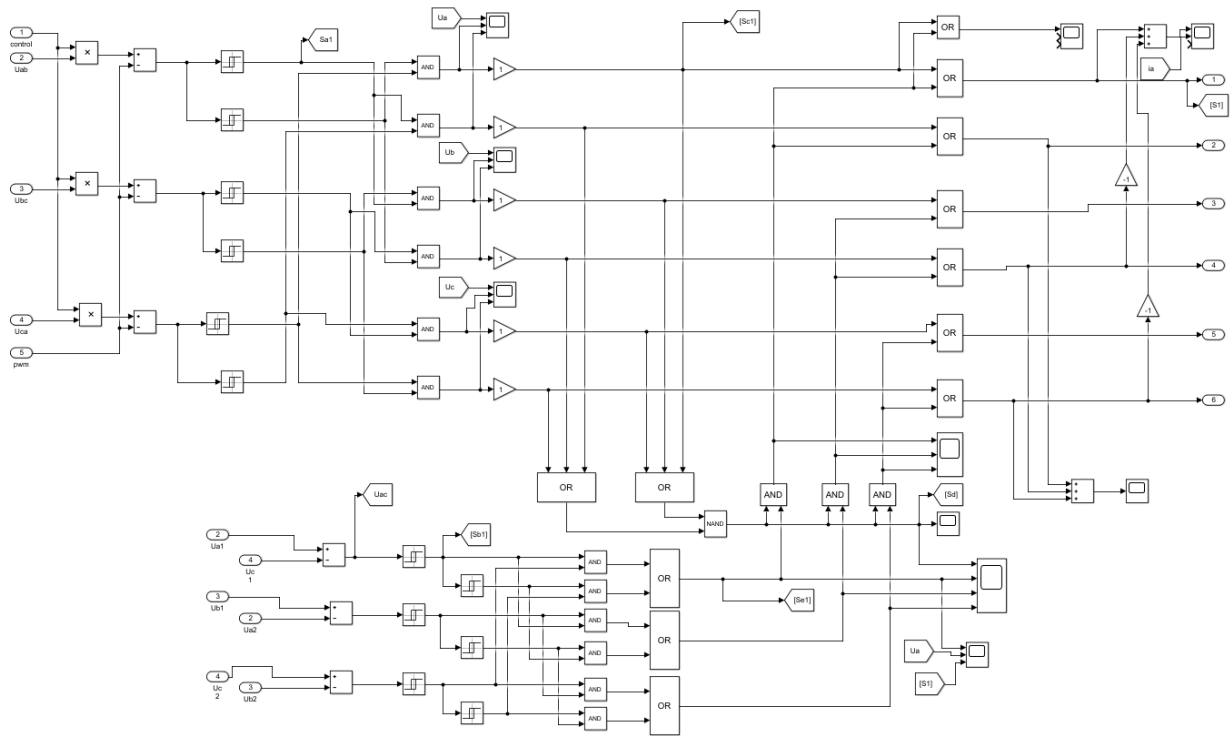


Рисунок 4.6 – Субмодель системи керування мережевого інвертора струму

В ході моделювання було виконано оцінку коефіцієнту гармонійних спотворень фазного струму THD_I генерованого сонячною електростанцією, та коефіцієнту потужності P_f .

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2} I_n^2}}{I_1} \quad (4.1)$$

Значення коефіцієнту потужності визначається за виразом

$$Pf = \frac{P_1}{S} = \frac{I_1}{I} \cdot \frac{U_1}{U} \cdot \cos(\varphi) \quad (4.2)$$

Субмодель, що визначає розрахунковий коефіцієнт потужності представлено на рисунку 4.7 [102, 105].

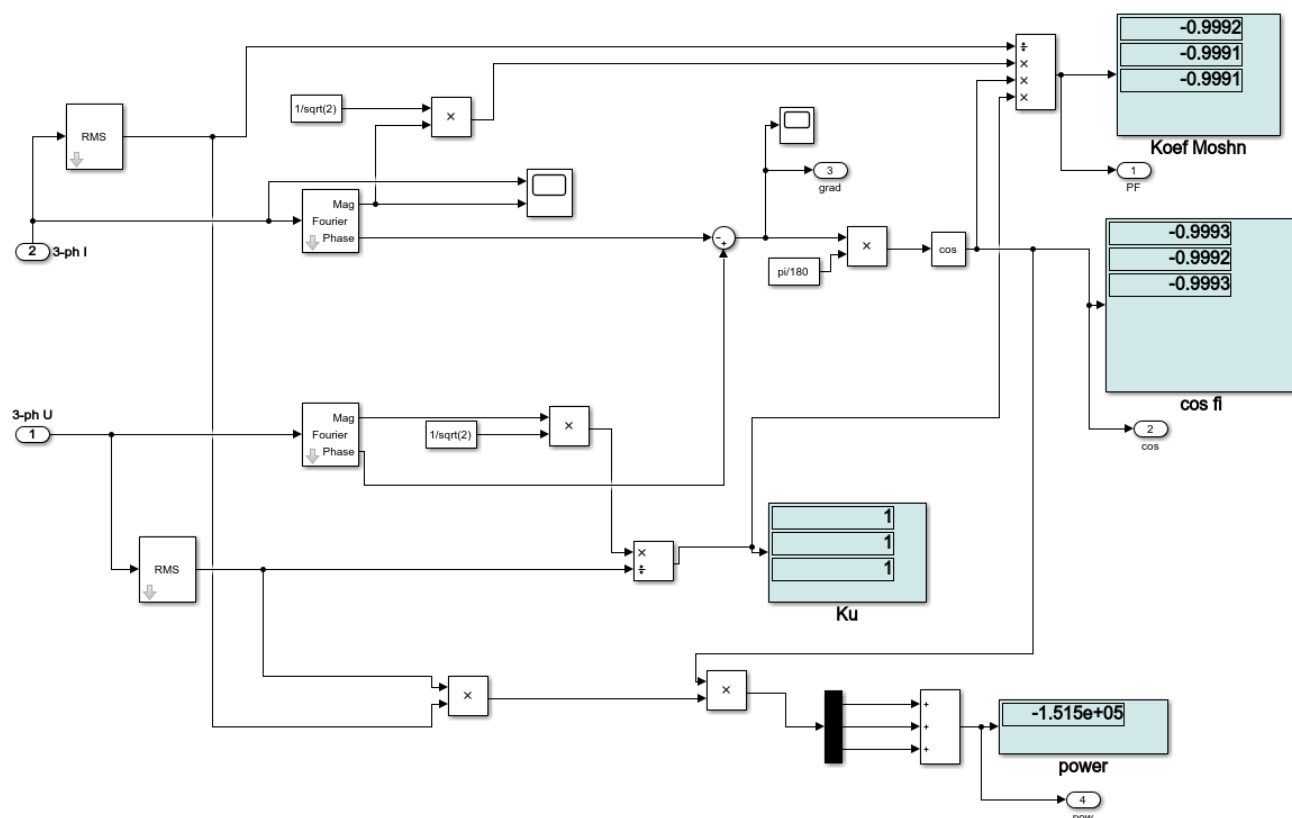


Рисунок 4.7 – Субмодель блоку визначення коефіцієнту потужності енергії генерованої до електричної мережі

4.2 Результати моделювання струму генерованого сонячною електростанцією в електричну мережу

В ході моделювання виконано аналіз параметрів якості електричної енергії при різних рівнях сонячної радіації. В ході дослідження визначено, що при зниженні рівня сонячної радіації і зниження генерованої потужності інвертор струму збільшує вміст реактивної потужності генерованої до електричної мережі.

Осцилограми перехідних процесів генерації струму сонячною електростанцією до електричної мережі при рівні сонячної радіації 1000 Вт/м^2 представлено на рисунку 4.8 [106].

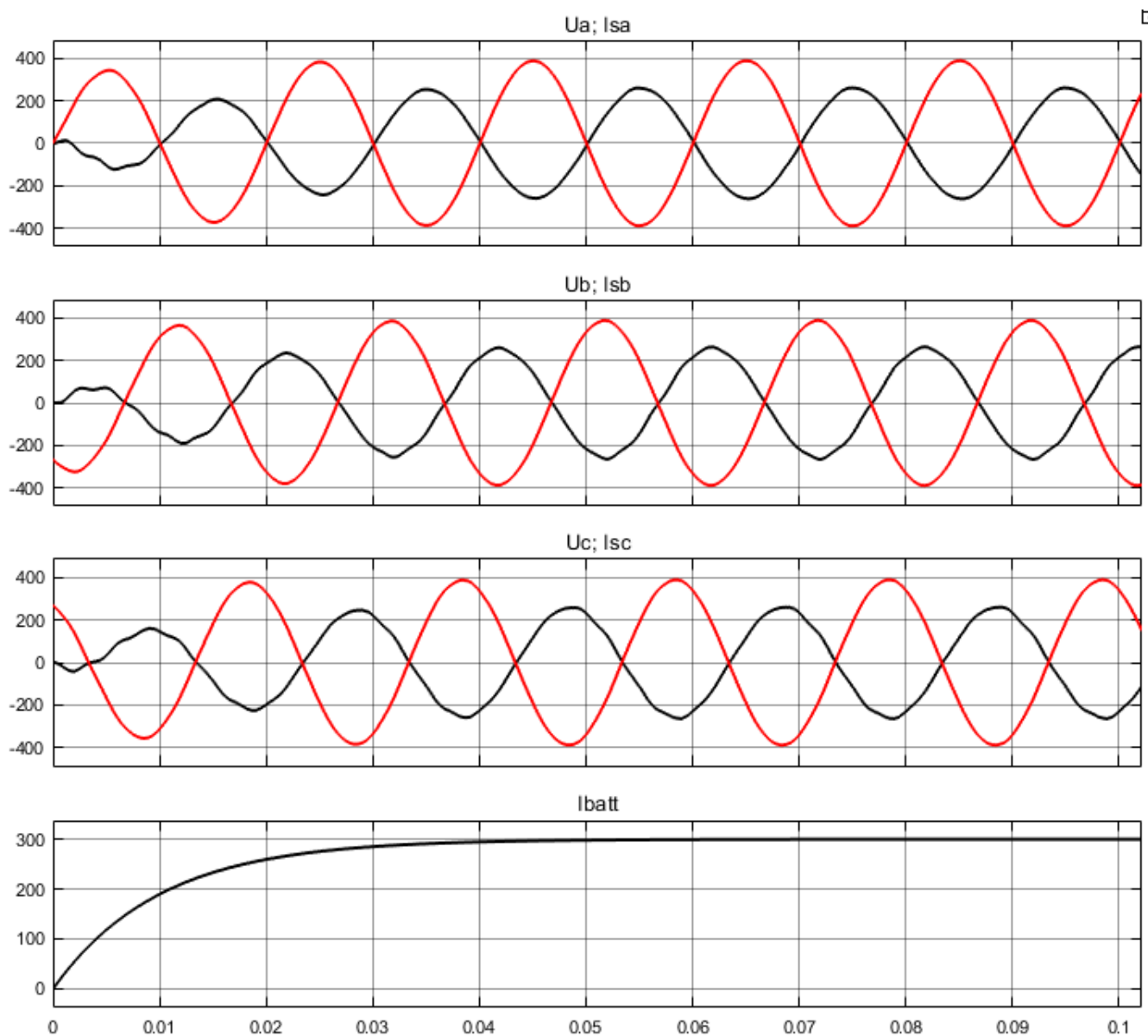


Рисунок 4.8 - Осцилограми перехідних процесів генерації струму до електричної мережі від сонячного інвертора струму

Як видно з рисунку 4.8, струм генерований до електричної мережі має практично синусоїдальну форму з незначними спотвореннями. Гармонійний аналіз струму, який генерується до електричної мережі представлено на рисунку 4.9 [107].

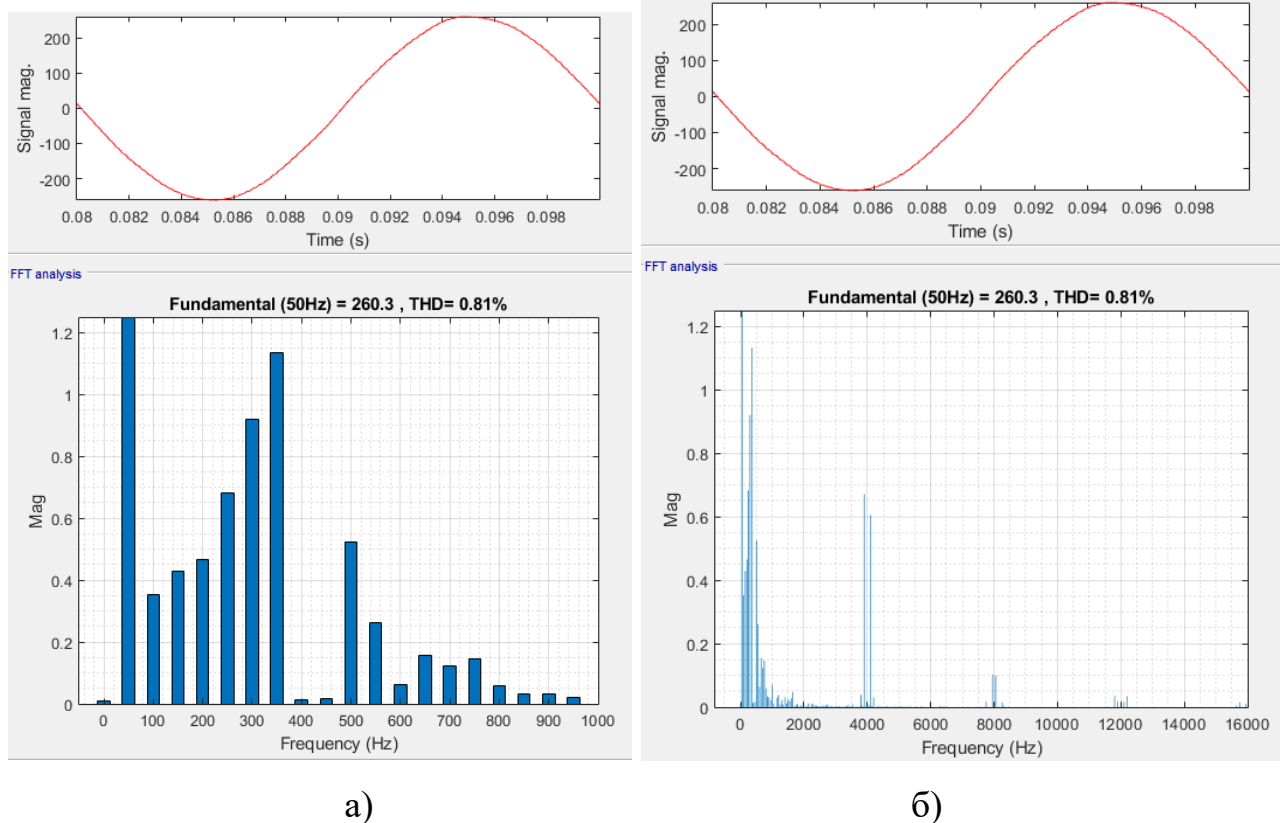


Рисунок 4.9 - Гармонійний аналіз спектру струму генерованого сонячним інвертором: а) в низькочастотному спектрі; б) в високочастотному спектрі.

Як видно з результатів гармонійного аналізу спектр фазного струму генерованого до електричної мережі містить гармоніки кратні частоті ШІМ модуляції, а також низько-частотні гармонійні складові з частотами 100, 150, 200, 250, 300, 350 Гц. При цьому, коефіцієнт гармонійних спотворень складає 0,81%, що відповідає вимогам стандартів параметрів якості електричної енергії.

Результати моделювання параметрів якості електричної енергії при зниженні рівня сонячної радіації представлено в таблиці 4.3.

Як видно з результатів моделювання при зниженні рівня генерованого струму сонячними панелями коефіцієнт гармонійних спотворень залишається в допустимому значенні, проте суттєво збільшується рівень генерації реактивної потужності.

Таблиця 4.3 – Параметри якості електричної енергії генерованої сонячною електростанцією при зниженні рівня сонячної радіації

Струм сонячної панелі, I_{dc} , А	Потужність генерована сонячними панелями, кВт	Коефіцієнт гармонійних спотворень, %	$\cos(\varphi)$	Кут між фазною напругою та генерованим струмом, φ°
300	120,5	0,81	0,999	-1,2
200	80,6	3,2	0,997	-3
100	40	0,96	0,99	-6
50	20,18	1,034	0,975	-12,8
23,5	8,96	2,015	0,887	-27,46

Порівняльний аналіз параметрів якості електричної енергії генерованої сонячною електростанцією з застосуванням компенсаційного алгоритму та без нього представлено в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Порівняльний аналіз параметрів якості електричної енергії генерованої сонячною електростанцією з застосуванням компенсаційного алгоритму та без нього

Параметр	Без застосування компенсаційного кута	При застосуванні компенсаційного кута
Коефіцієнт потужності	0,82	0,998
Коефіцієнт гармонійних спотворень	2,9	2,8

Моделювання застосування алгоритму компенсації реактивної потужності генерованої електричної енергії сонячною електростанцією підтвердили його

ефективність. Без застосування запропонованого алгоритму коефіцієнт потужності складає 0,82, а при його застосування 0,987.

4.3 Структура комп'ютерної моделі сонячної електростанції на базі інвертора напруги

Для визначення параметрів інтенсивності потужності електричної енергії, яка генерується в сонячній панелі, а також реалізації режиму відбору максимальної напруги розроблено комп'ютерну імітаційну модель, що показано на рисунку 4.10 [58, 102].

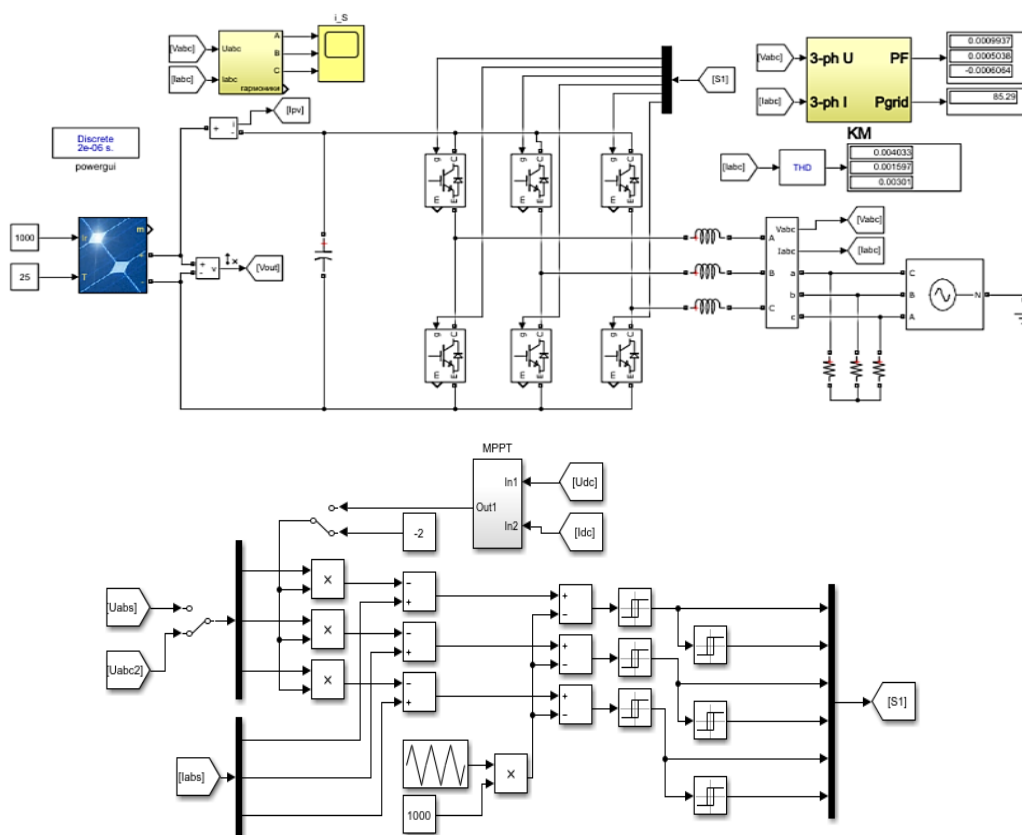


Рисунок 4.10 – Модель мережевого інвертора напруги сонячної електростанції та її системи керування в режимі передачі електричної енергії до мережі

Параметри силової частини моделі представлено в таблиці 4.5

Таблиця 4.5 – Параметри комп'ютерної моделі сонячної електростанції

Параметр	Значення
Напруга мережі, В	220/380
Активний опір навантаження мережі, Ом	5
Індуктивність мережі, мГн	0.1
Індуктивність дроселя сонячного інвертора, мГн	1.5
Ємність конденсатора гібридного інвертора, мФ	2
Частота ШІМ, кГц	2
Максимальна потужність сонячних панелей, кВт	384

В моделі проведено дослідження генерації електроенергії до трифазної електричної мережі від 500 сонячних панелей типу *Soltech ISTD-215-P*, які з'єднано по послідовно-паралельне з'єднання (в гілці 50 послідовних панелей та паралельно з'єднано 36 таких гілок, тобто з'єднання 50x36). Сімейство вольт-амперних та ватт-вольтних характеристик блоку сонячних панелей при рівнях радіації 100 Вт/м², 250 Вт/м², 500 Вт/м², представлені на рисунку 4.11 [59].

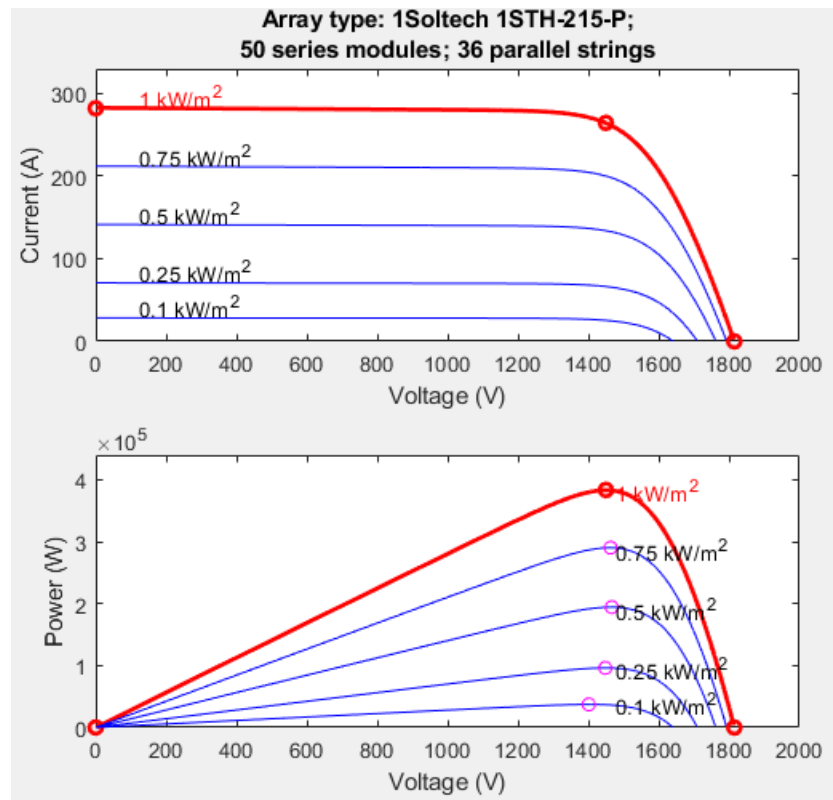


Рисунок 4.11 – Сімейство вольт-амперних та ватт-вольтних характеристик блоку сонячних панелей *Soltech 1STH-215-P* (36*50) при рівнях радіації 100 Вт/м², 250 Вт/м², 500 Вт/м², 750 Вт/м², 1000 Вт/м²

При температурі 25С°, максимальна генерована потужність сонячними панелями *Soltech 1STH-215-P* конфігурації 36х50 при рівні радіації 1000Вт/м² складає 384 кВт.

Проте величина цієї потужності залежить від багатьох чинників, основними з яких є рівень сонячної радіації та температура оточуючого середовища.

Перехідні процеси при запуску сонячної електростанції, а саме напруга генерована сонячними панелями; струм сонячних панелей та потужність блоку сонячних панелей представлено на рис.4.12 [56].

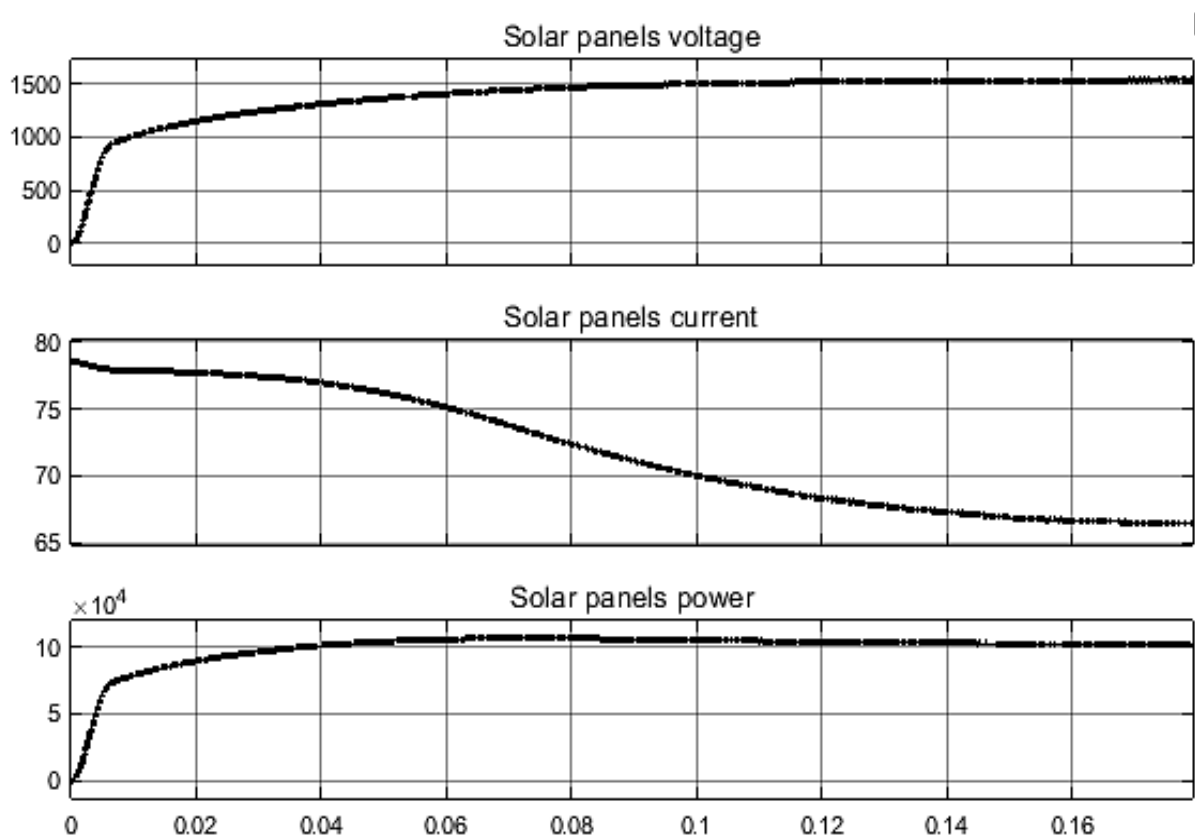


Рисунок 4.12 – Перехідні процеси при запуску сонячної електростанції: а) напруга генерована сонячними панелями; б) струм сонячних панелей; в) потужність блоку сонячних панелей

Результати моделювання струму та напруги, генерованої сонячною електростанцією до електричної мережі при рівні сонячної радіації 1000 Вт/м² представлено на рисунку 4.13 [69].

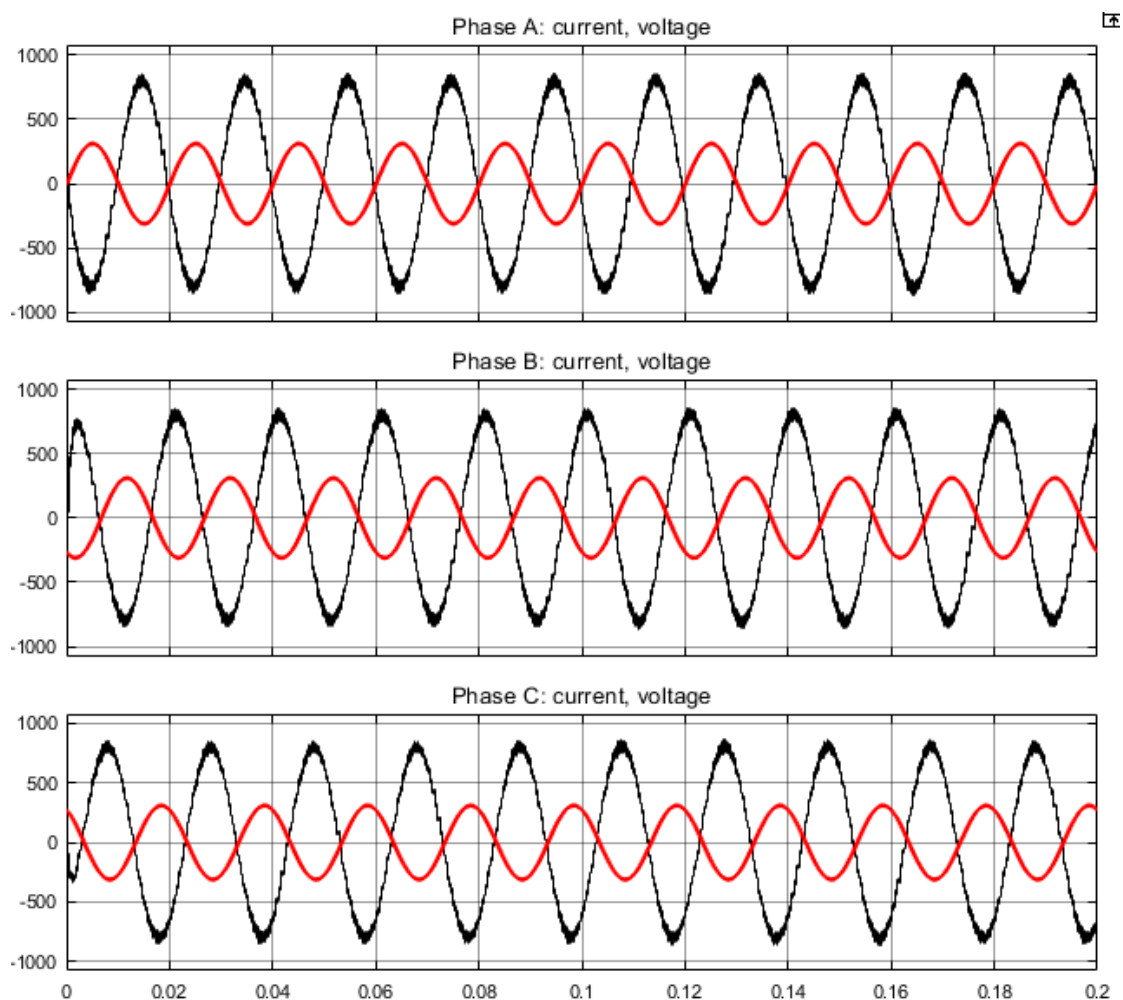


Рисунок 4.13 – Струми та напруги в трьох фазах в режимі генерації
максимальної потужності (генерація в мережу 373 кВт)

Результати гармонійного аналізу фазного струму в режимі генерації
максимальної потужності представлено на рисунку 4.14 [97].

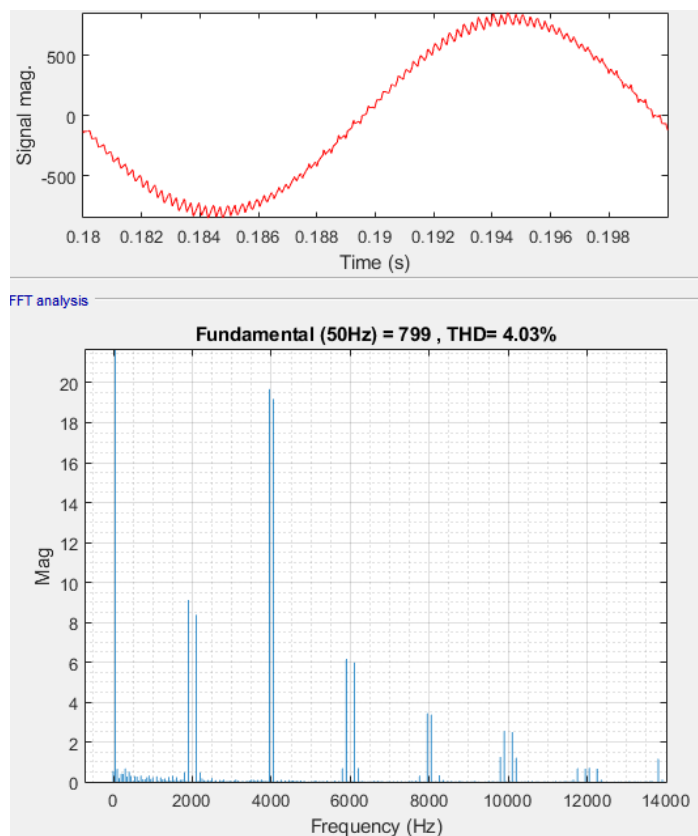


Рисунок 4.14 – Гармонійний склад фазного струму в режимі генерації повної потужності 373кВт

Як видно з рисунку 4.15, при генерації номінальної потужності сонячними панелями струм має практично синусоїдальну форму та його коефіцієнт гармонійних спотворень складає 4,03%, що відповідає вимозі $THD_1 < 5\%$. Діюче значення першої гармоніки складає 565А, що далі буде відповідати номінальному значенню струму інвертора.

При зниженні рівня сонячної радіації до 500 Вт/м² максимальна генерована потужність блоку сонячних панелей складає 194,4 кВт, що відповідає режиму генерації струму в мережу 294 А.

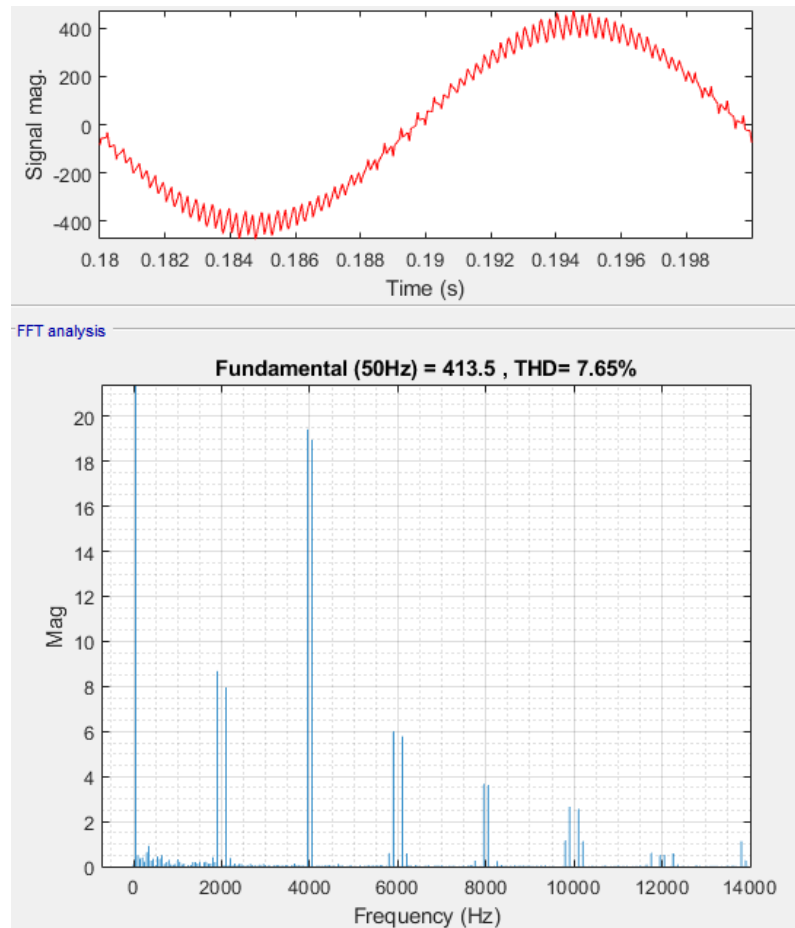


Рисунок 4.15 – Генерація в мережу струму 294А RMS (потужність трьох фаз 192 кВт)

Як видно з рисунка 4.15, при зниженні потужності, що генерується сонячним інвертором у мережу до 194 кВт, відбувається суттєве зниження якості електроенергії. THD_1 перевищує допустиме значення і становить 7,65%. При зниженні потужності генерованої сонячними панелями до 96,1 кВт (рівень сонячної радіації 250 Вт/м^2) коефіцієнт гармонійних спотворень підвищується до 15,62% [63].

Причиною даного явища є те, що в ході широтно-імпульсного регулювання амплітуди вищих кратних гармонік частоті широтно-імпульсної модуляції залишається практично тією ж, а регулюється величина першої гармоніки генерованого струму.

Отже в процесі регулювання при зниженні потужності, що генерується сонячними панелями, знижується величина I_L , величина вищих гармонік практично не змінюється, що призводить до погіршення форми та збільшення коефіцієнта гармонічних спотворень струмів.

4.4 Підвищення якості електроенергії мережевого інвертора напруги при роботі з неповною потужністю

Формування синусоїдального струму, що генерується мережевим інвертором напруги до трифазної електричної мережі пов'язано з величиною індуктивності вхідних дроселів та роботою широтно-імпульсної модуляції.

Напруга, що прикладена до вхідних дроселів сонячного інвертора дорівнюється

$$U_L(t) = U_g(t) - U_{SP} \cdot S(t) \quad (4.3)$$

де $S(t)$ – комутаційна функція керування силових транзисторів інвертора, що формується системою керування; U_{SP} – напруга сонячних панелей; $U_g(t)$ – фазна напруга мережі, що прикладена до відповідних вхідних дроселів кожної фази.

Струм, що формується на індуктивності описується формулою.

$$I_L(t) = \frac{1}{L} \int U_L(t) \cdot dt \quad (4.4)$$

Миттєве значення напруги та струму вхідного дроселя сонячного інвертора представлено на рисунку 4.16 [64].

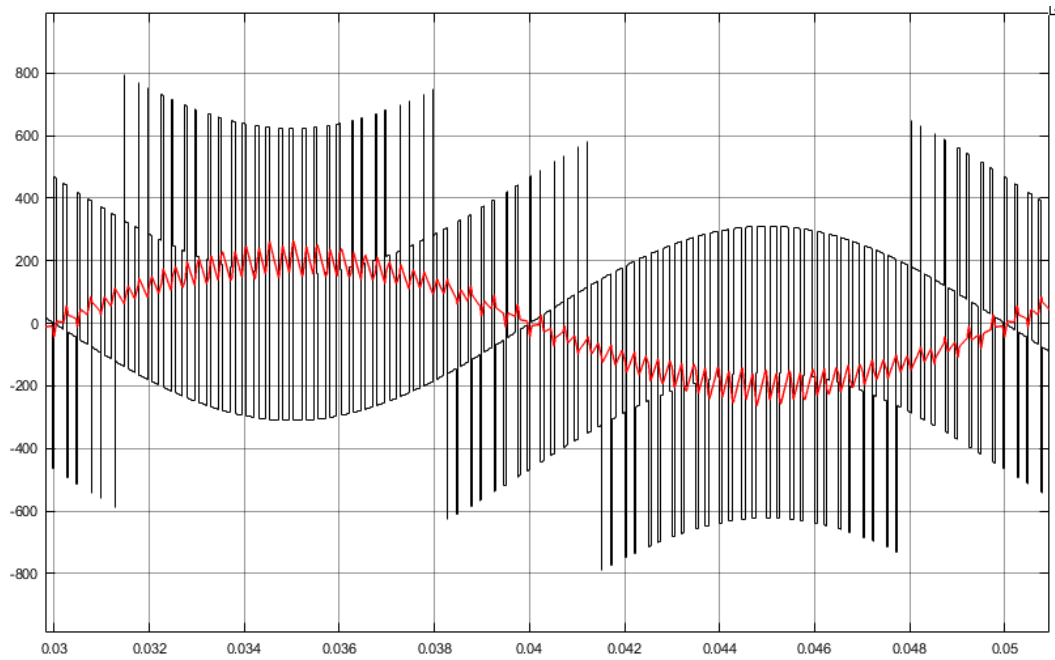


Рисунок 4.16 – Миттєве значення напруги та струму вхідного дроселя сонячного інвертора

Таким чином, напруга, що прикладена до вхідних дроселів складається з першої гармоніки 50Гц напруги мережі та пульсаційної складової, що зумовлена широтно-імпульсною модуляцією сонячного мережевого інвертора. Величина шагу модуляції напруги на вхідному дроселі $\Delta U_L = \pm 0.33 \cdot U_{SP}$ [65]

Розглянемо миттєве значення модульованого струму, його першу гармоніку та миттєве значення суми вищих гармонік.

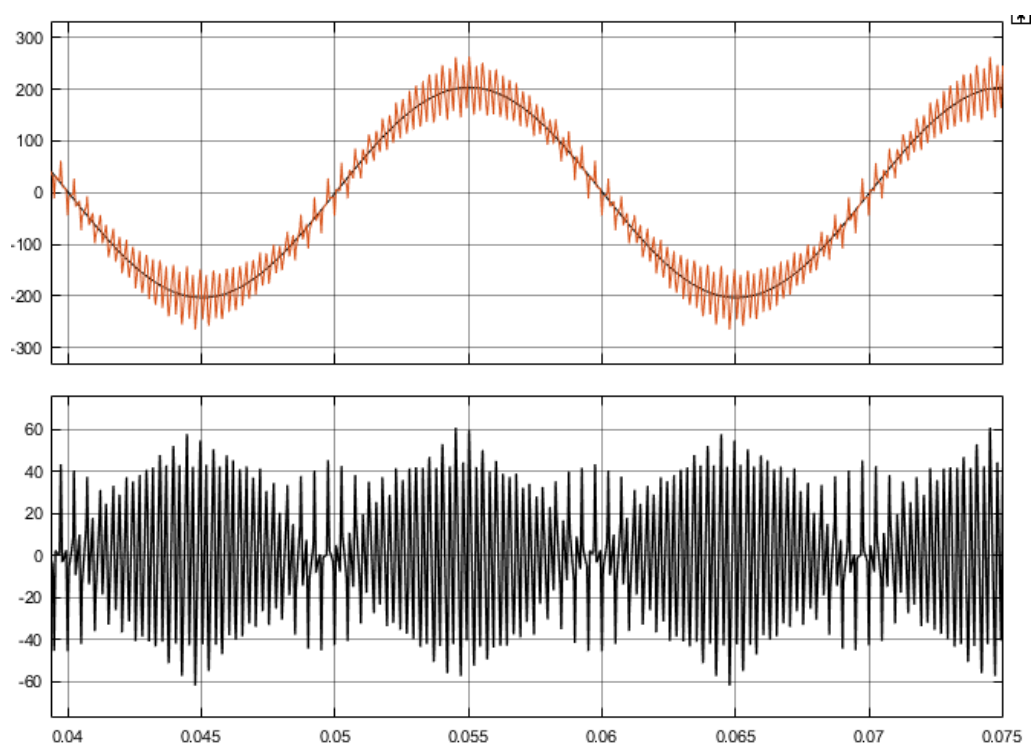


Рисунок 4.17 – Миттєве значення повного струму інвертора, його першої гармоніки та миттєвого значення сумми вищих гармонік фазного струму інвертора

На рисунку 4.17 максимальне амплітудне значення пульсаційної складової фазного струму $\Delta I_{L.max}=120$ А, амплітудне значення першої гармоніки 202,5 А, $THD_I = 16,57\%$.

Для забезпечення умови параметра синусоїдальності струму $THD_I < 5\%$, пульсаційна складова струму має відповідати відношенню [97]

$$\Delta I_{L.max} < 0.185 \cdot I_1 \quad (4.5)$$

де I_1 – амплітудне значення першої гармоніки.

Максимальне амплітудне значення пульсаційної складової фазного струму обумовлено процесом зростання струму на індуктивності під час дії широтно-імпульсної модуляції напруги інвертора і може бути розраховано як [107]

$$\Delta I_{L.\max} = \frac{\Delta U_L \cdot t_{\text{pulse.max}}}{L} = \frac{(U_{SP} \cdot 0.33) \cdot t_{\text{pulse.max}}}{L} \quad (4.6)$$

де $T_{\text{pulse.max}}$ – максимальна тривалість імпульсу зростання струму (час коли комутаційні стани транзисторів не змінюються)

Таким чином, забезпечення необхідного рівня синусоїдальності форми струму сонячного інвертора при зменшенні генерованої потужності може бути отримано, шляхом зниження пульсаційної складової струму до заданого рівня, або шляхом регулювання величини вхідної індуктивності, або шляхом зменшення максимального часу зростання струму на індуктивності, тобто шляхом збільшення частоти комутації силових транзисторів [106].

Для трифазної синусоїдальної широтно-імпульсної модуляції максимальне значення тривалості імпульсу напруги на дроселі складає близько 33% від періоду модуляції.

Таким чином, зробивши перетворення попередніх рівнянь отримуємо головне співвідношення роботи сонячного інвертора, що визначає співвідношення забезпечення необхідних параметра синусоїдальності фазного струму $\text{THD}_I < 5\%$,

$$\frac{(0.55 \cdot U_{sp})}{f_{pwm} \cdot L} < I_1 \quad (4.7)$$

Отриманий вираз може бути використаний для розрахунку частоти комутації силових транзисторів та величини індуктивності вхідного дроселя сонячного інвертора при заданих значеннях його потужності.

Таким чином, для забезпечення заданої якості фазного струму сонячного інвертора при зниженні потужності, що генерується сонячними панелями необхідно пропорційно зниженню величини струму підвищувати частоту комутацій силових транзисторів (або пропорційне збільшення індуктивності дроселів) [69].

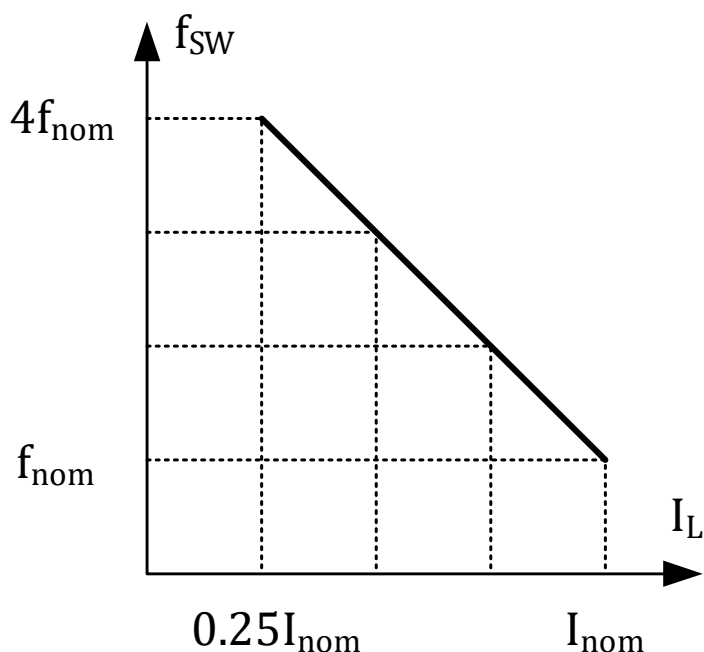


Рисунок 4.18 – Залежність пропорційного збільшення частоти комутації силових транзисторів при зменшенні генерованого струму

Таким чином, для генерації в мережу струму 143А, що складає $0,25 \cdot I_{nom}$ (за номінальний струм прийнято струм при максимальній потужності сонячних панелей тобто струм 565А), для забезпечення необхідної синусоїдальності необхідне пропорційне збільшення частоти комутації з 2кГц до 8кГц.

Результати гармонійного аналізу струму інвертора при генерації 143А та частоті 8кГц представлено на рисунку 4.19 [99].

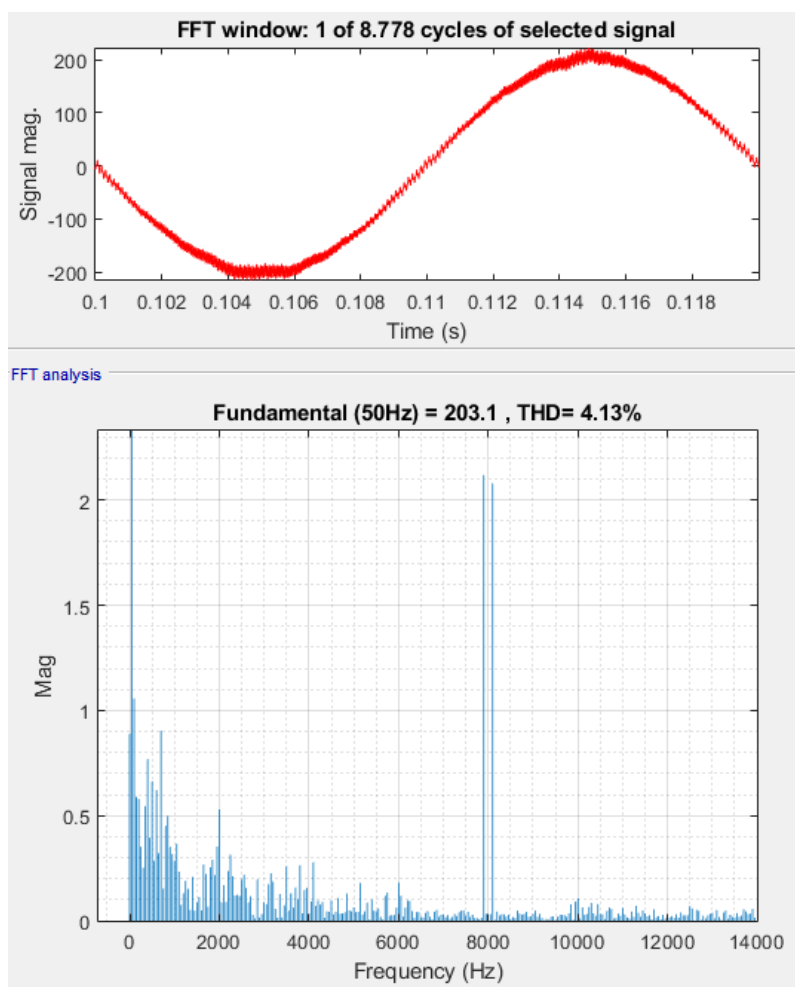


Рисунок 4.19 – Гармонійний спектр струму при генерації струму величиною 33А в фазі при частоті ШІМ 8кГц

Як видно з представленого малюнка метод підвищення якості електроенергії, що реферується сонячними електростанціями шляхом забезпечення, регульованого величини частоти комутації є досить ефективною в плані якості електроенергії. У той же момент це приведено до збільшення частки динамічних втрат потужності в перетворювачі та зниження ККД перетворювача [94].

Параметри якості генерованого струму з частотно-адаптивною частотою ШІМ представлено в таблиці 4.6.

Таблиця 4.6 – Параметри якості генерованого струму з частотно-адаптивною частотою ШІМ

Величина фазного струму, А	THD _I без частотної компенсації F _{sw} =2kHz	THD _I з частотною компенсацією
565 А (I _{nom})	4.03%	не потрібна
294 А (0,5 I _{nom})	7,65%	3,12% (F _{sw} =4 kHz)
143 А (0,25 I _{nom})	16.57%	4,13% (F _{sw} =8 kHz)

Як видно з таблиці 4.6, при застосуванні застосуванні частотно-адаптивного алгоритму модуляції при зниженні потужності генерованою сонячною електростанцією якість генерованого в мережу струму є задовільною за критерієм коефіцієнту гармонійних спотворень струму <5%.

Висновки до розділу 4

В розділі виконано розробку комп'ютерної моделі сонячної електростанції з використанням мережевого інвертора струму в ШІМ режимі.

Встановлено, що при зниженні генерованої потужності відбувається збільшення вмісту реактивної потужності генерованої в електричну мережу. Визначено, що даний вміст залежить від параметрів вхідного LC фільтру перетворювача та величини генерованого струму.

Запропоновано метод компенсації реактивної потужності генерованої в електричну мережу, шляхом додання компенсаційного кута зсуву сигналу завдання та визначено його аналітичну залежність в функції генерованого струму.

Проведене моделювання підтвердило ефективність запропонованого алгоритму та практично повну компенсацію вмісту реактивної потужності генерованої до електричної мережі.

РОЗДІЛ 5

ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ СОНЯЧНИХ ІНВЕРТОРІВ В РЕЖИМІ АВТОНОМНОГО ДЖЕРЕЛА ЖИВЛЕННЯ

5.1 Багаторівневі інвертори сонячних електростанцій

В режимі автономного джерела живлення мережеві інвертори напруги ФЕС мають працювати в режимі джерела напруги та задовольняти вимоги українських та міжнародних стандартів електромагнітної сумісності в частині вимог синусоїдальності напруги в електричних мережах.

Значення коефіцієнта гармонічних спотворень форми вихідної напруги дворівневого інвертора напруги становить 65...70 %, що не відповідає вимогам якості напруги відповідно до міжнародного стандарту IEEE–519, а також українського стандарту ДСТУ EN 50160:2014 «Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності». Тому для забезпечення високої якості вихідної напруги інверторів використовуються спеціальні технічні рішення.

Одним з таких технічних рішень є застосування схем багаторівневих інверторів напруги. Для цього можуть застосовуватись каскадні багаторівневі інвертори, модульні багаторівневі інвертори, багаторівневі інвертори з фіксуючими діодами, багаторівневі інвертори з плаваючими конденсаторами та інші схеми. При цьому слід зазначити, що існують проблеми щодо забезпечення електромагнітної сумісності в режимі генерації електроенергії в загальнопромислову мережу і в режимі створення автономного джерела електропостачання [88].

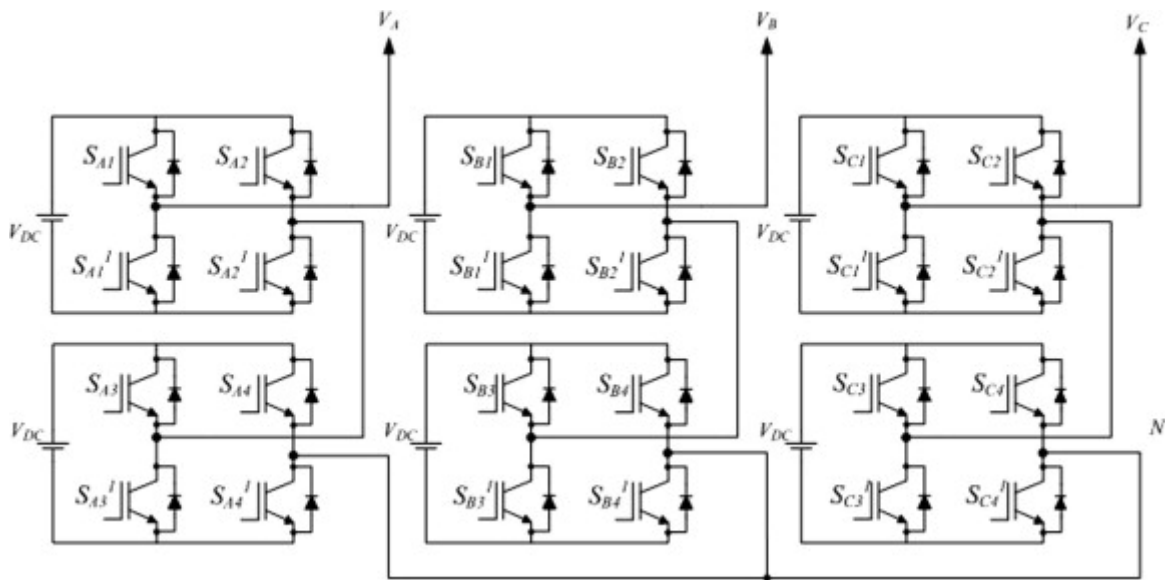


Рисунок 5.1 – Модульні багаторівневі інвертори

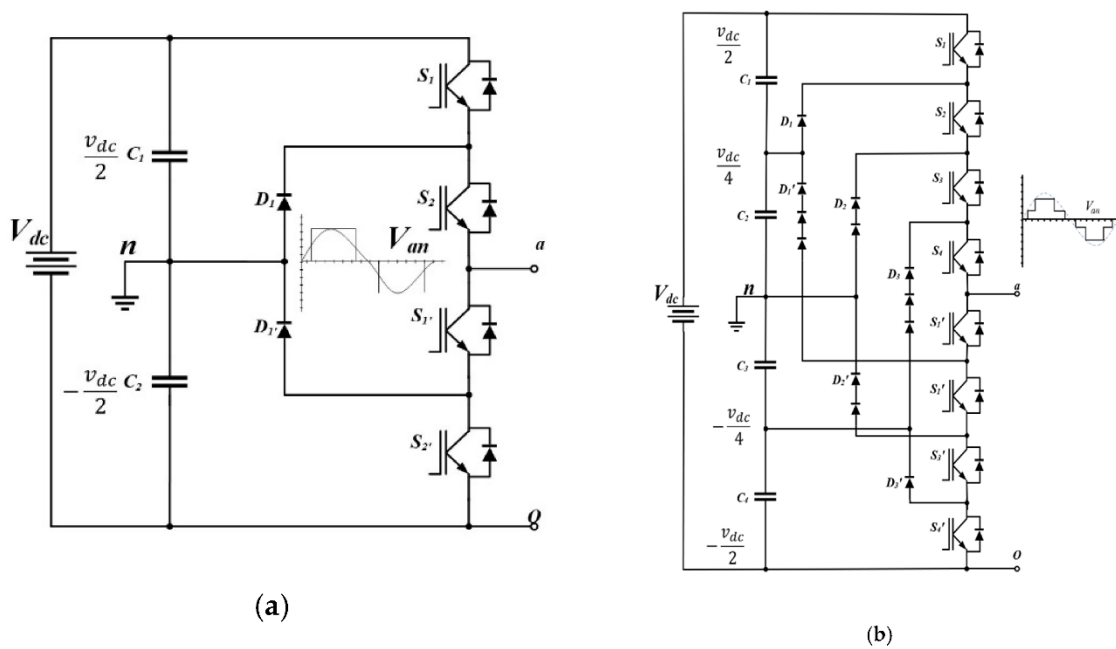


Рисунок 5.2 – Багаторівневі інвертори на фіксуючих діодах: а) – трирівневий інвертор; б) – п'ятирівневий інвертор

Типова форма вихідної напруги багаторівневих інверторів різних типів є спільною (рис. 5.3). При цьому, кількість рівнів у вихідній напрузі і, відповідно, синусоїдальність форми залежать від кількості рівнів у силовій схемі багаторівневих інверторів напруги і кількості силових елементів схеми [74].

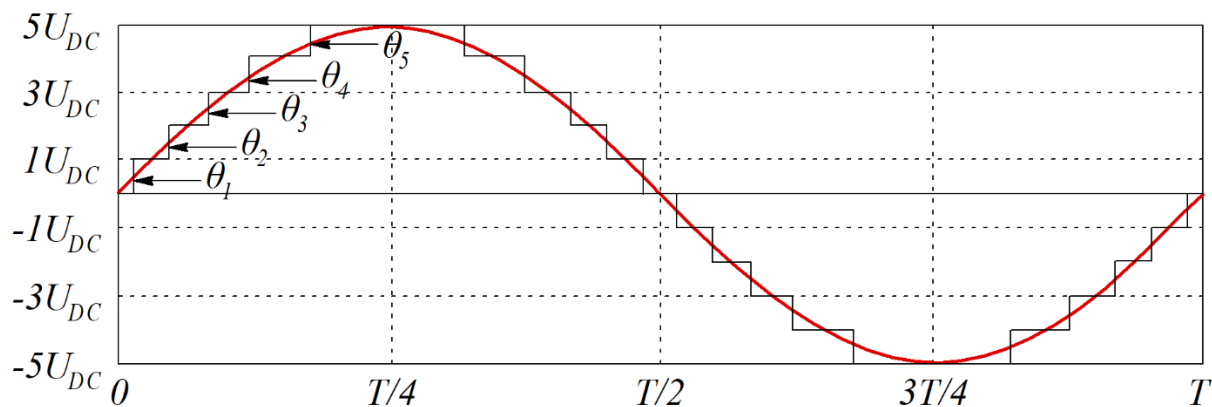


Рисунок 5.3 – Типова форма вихідної напруги багаторівневого інвертора в режимі однократної модуляції

Залежність коефіцієнта гармонічних спотворень THD_U багаторівневих інверторів від числа рівнів N_p , отриману під час проведення дослідження, наведено на рисунку 5.4.

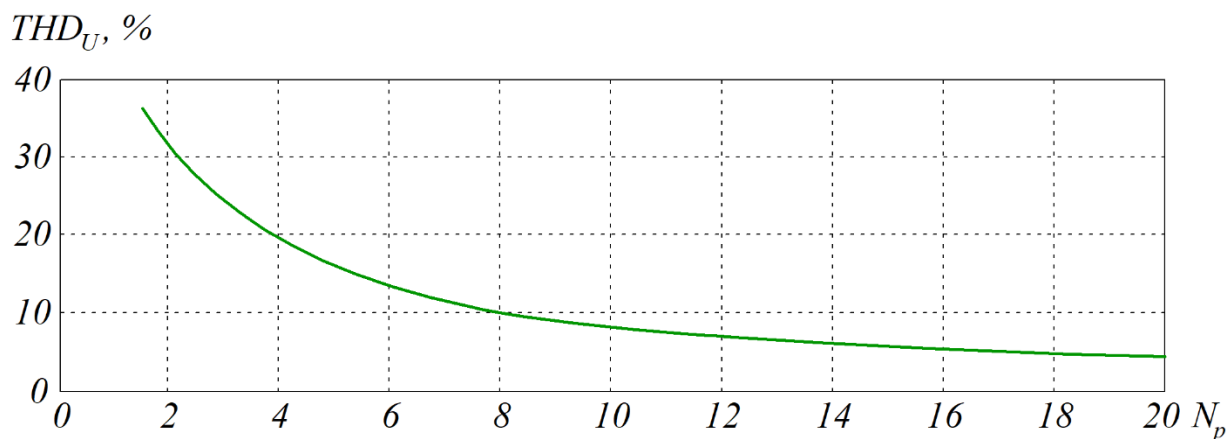


Рисунок 5.4 – Залежність коефіцієнта гармонічних спотворень від числа рівнів

Як випливає з рисунку 5.4, для забезпечення значення коефіцієнта гармонічних спотворень вихідної напруги багаторівневого інвертора нижче 5% число рівнів у багаторівневому інверторі має перевищувати 20 [75].

Недоліком каскадних інверторів напруги є необхідність наявності великої кількості гальванічно-розв'язаних джерел постійної напруги. Крім цього, реалізація цієї схеми потребує збільшеної кількості силових транзисторів, що веде до підвищення її вартості.

Недоліком модульних інверторів напруги є необхідність наявності досить складного алгоритму стабілізації напруги на конденсаторах комірок. Крім цього, реалізація даної схеми передбачає наявність збільшеної кількості силових транзисторів і високоемнісних конденсаторів, що також веде до підвищення вартості такої системи [76].

5.2 Покращення якості вихідної напруги дворівневих інверторів ФЕС в режимі автономного джерела живлення

Крім схемотехнічних рішень, пов'язаних з реалізацією високого числа рівнів вихідної напруги інверторів, існують алгоритмічні методи, що дають змогу покращити синусоїдальність вихідної напруги. Одним з таких методів є реалізація режиму перемодуляції і оптимуму форми. У роботі [77] досліджено методи покращення якості вихідної напруги у дворівневих автономних інверторах напруги в режимі перемодуляції. З результатів дослідження випливає, що режим перемодуляції для дворівневого інвертора дає змогу знизити коефіцієнт гармонічних спотворень вихідної напруги дворівневого інвертора з 68 % до 32 % (рис. 5.5). Перевагою цього рішення є досить значне покращення форми вихідної напруги в багаторівневих інверторах. Незважаючи на значне покращення синусоїдальності вихідної напруги АІН у режимі перемодуляції, його THD залишається таким, що не задовольняє вимоги міжнародного стандарту IEEE–519. Залежність коефіцієнта гармонічних спотворень THD_U дворівневого автономного інвертора напруги від коефіцієнта модуляції представлена на рис.5.5

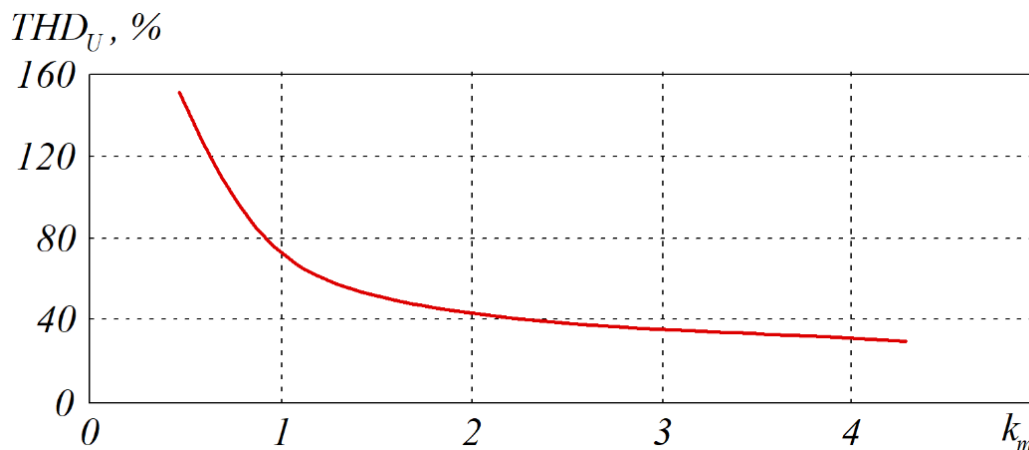


Рисунок 5.5 – Залежність коефіцієнта гармонічних спотворень THD_U дворівневого автономного інвертора напруги від коефіцієнта модуляції k_m

Проте отримане покращення коефіцієнту гармонійних спотворень вихідної напруги інвертора напруги є недостатньою та не відповідає вимогам стандартів якості електричної енергії [97].

Можливим є забезпечення високої якості вихідної напруги дворівневих інверторів шляхом використання вихідних синусних фільтрів. Перевагою даного рішення є можливість забезпечення високої якості вихідної напруги з мінімальними економічними витратами. Водночас недоліком цього рішення слід вважати режим пускових струмів синусних фільтрів, що може викликати «пробої» силових ключів інвертора або, за наявності апаратного захисту, введення його в режим захисту.

У дослідженні [86] розглянуто способи покращення форми вихідної напруги дворівневих інверторів напруги за допомогою вихідних синусних фільтрів. Проте в роботі немає дослідження показників синусоїдальності вихідної напруги інвертора із синусним фільтром, не визначено методики розрахунку компонентів з урахуванням вимог забезпечення коефіцієнта гармонічних спотворень 5 %. Крім того, не досліджено пускові струми синусного фільтра.

У роботі [87] подано методику проєктування LC-фільтрів трифазного перетворювача частоти. Недоліком роботи є відсутність дослідження показників

синусоїдальності вихідної напруги LC-фільтра. Крім того, бракує дослідження пускових струмів конденсаторів синусного фільтра [79].

Таким чином, з проведеного огляду можна зробити висновок, що питання створення методики розрахунку номіналів синусних фільтрів автономних інверторів напруги з урахуванням частоти широтно-імпульсної модуляції інвертора та вимоги обмеження пускового струму є невирішеним. При цьому слід забезпечити вимоги синусоїдальності напруги $THD_U < 5\%$ згідно з міжнародним стандартом IEEE-519.

5.3 Методика визначення параметрів синусного фільтра інвертора напруги, що забезпечує обмеження пускового струму

Для формування синусоїдальної напруги необхідне чітке розуміння величини і порядку гармонік, які необхідно знизити, а саме гармонік інвертора напруги. На рисунку 5.6 наведено схему дворівневого трифазного автономного інвертора напруги з синусним фільтром [80].

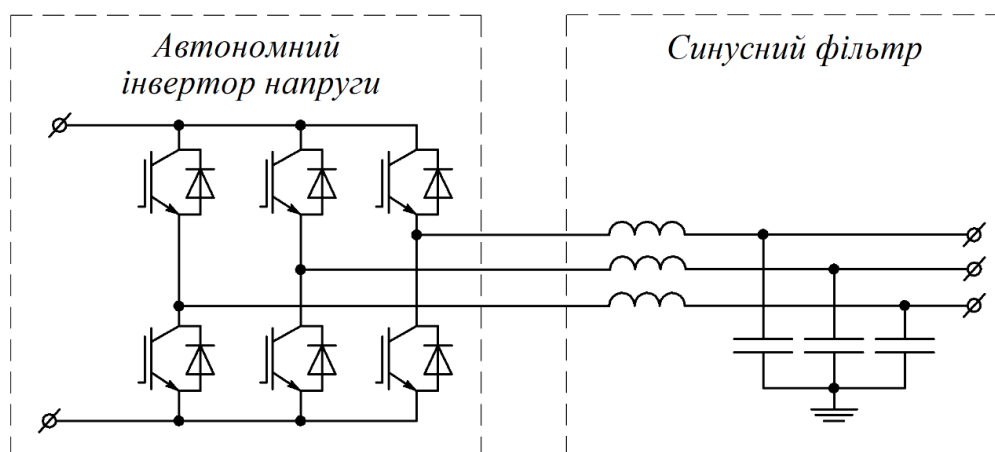


Рисунок 5.6– Схема дворівневого трифазного автономного інвертора напруги з синусним фільтром

Типову форму і гармонічний спектр вихідної фазної напруги трифазного інвертора напруги з ШІМ наведено на рисунку 5.7, на якому видно, що коефіцієнт гармонічних спотворень вихідної напруги дворівневого інвертора напруги складає

57,33 %. На рисунку 6.7 показано, що гармоніки вихідної напруги дворівневого інвертора мають частоти вищих гармонік, кратні частоті модуляції. При цьому, найбільшу амплітуду у формі вихідної напруги має гармоніка з частотою ШІМ, її амплітуда складає 32 % від амплітуди першої гармоніки вихідної напруги [81].

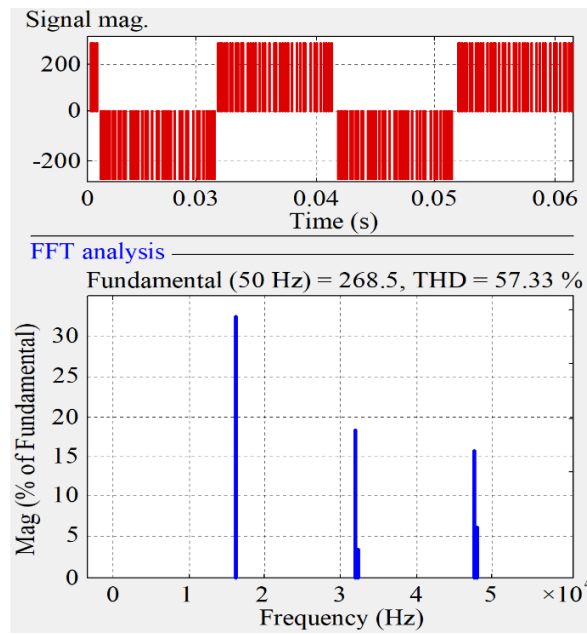


Рисунок 5.7 – Форма і гармонічний спектр вихідної напруги трифазного інвертора

Слід зазначити, що відносне значення амплітуд вищих гармонік відносно величини першої гармоніки не залежить від частоти модуляції інвертора. LC-фільтр є фільтром другого порядку, типову амплітудно-частотну характеристику якого наведено на рисунку 5.8. Резонансна частота LC-фільтра пов'язана з номіналами фільтра згідно з виразом [82]:

$$F_c = \frac{1}{\pi\sqrt{LC}}. \quad (5.1)$$

Для забезпечення вимог щодо коефіцієнта гармонічних спотворень форми вихідної напруги синусного фільтра менше 5 % амплітуди вищих гармонік від інвертора напруги необхідно заглушити.

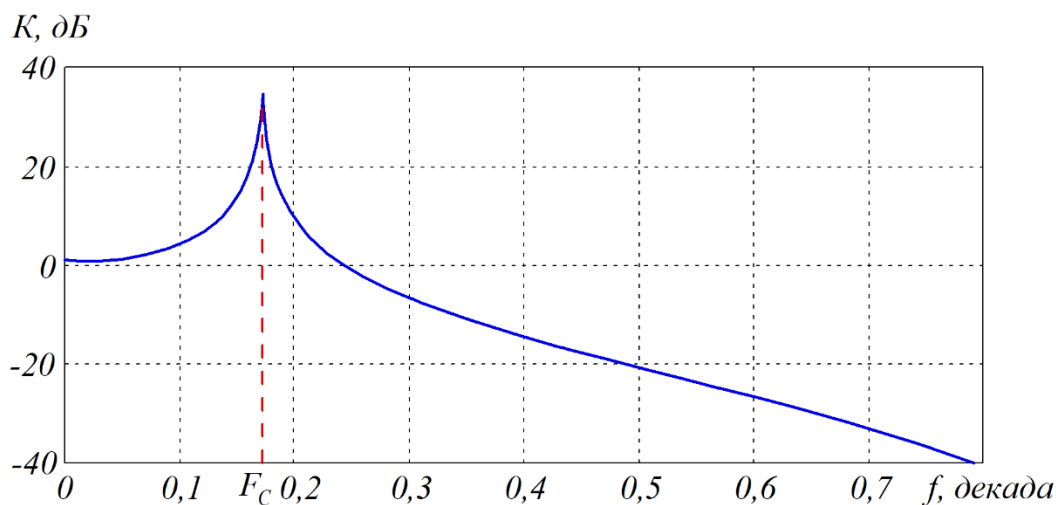


Рисунок 5.8 – Типова амплітудно-частотна характеристика LC-фільтра
(f_c – резонансна частота максимального піка)

Резонансну частоту фільтра необхідно пов'язати з частотою модуляції інвертора через два порядки:

$$f_c = \frac{F_{PWM}}{100}, \quad (5.2)$$

де f_c – частота зрізу LC-фільтра; F_{PWM} – частота ШІМ в автономному інверторі напруги.

У ході досліджень на комп'ютерній моделі було визначено, що в момент запуску автономного інвертора напруги з синусним фільтром, коли ємності фільтра є розрядженими, виникає перехідний процес. Під час цього процесу спостерігається значне збільшення амплітуди струму конденсаторів фільтра.

Визначення амплітуди пускового струму можливе через значення характеристичного опору фільтра, що визначається з виразу:

$$R_x = \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (5.3)$$

Амплітуду пускового струму конденсатора LC-фільтра з АІН може бути розраховано з виразу:

$$I_{\text{пуск}C} = \frac{U_{DC}}{2,7 \cdot R_x}. \quad (5.4)$$

Величина пускового струму конденсатора є суттєвим обмеженням системи, оскільки вона може призвести до виходу з ладу силових транзисторів інвертора. Тому при проектуванні синусного фільтра має бути враховано значення допустимого струму інвертора I_{max} і значення коефіцієнта запасу за струмом силових ключів K_1 . Коефіцієнт запасу пускового струму конденсатора фільтра відносно максимального струму інвертора визначається за виразом:

$$K_1 = \frac{I_{\text{max}}}{I_{\text{пуск}C}}. \quad (6.5)$$

Таким чином, з урахуванням частоти модуляції інвертора напруги, вимог обмеження допустимого значення пускового струму конденсатора фільтра та вимоги забезпечення коефіцієнта гармонічних спотворень відносно міжнародного стандарту IEEE–519 [83-84], індуктивність та ємність синусного фільтра можна визначити за виразами:

$$\frac{L}{C} = \left(\frac{U_{DC}}{2,7 \cdot I_{\text{max}} \cdot K_1} \right)^2; \quad (5.6)$$

$$LC = \frac{1}{(\pi \cdot F_{PWM})^2}. \quad (5.7)$$

Виразимо через рівняння (5.6, 5.7) величину індуктивності та ємності синусного фільтра:

$$C = \sqrt{\frac{\frac{1}{(\pi \cdot F_{PWM})^2}}{\left(\frac{U_{DC}}{2,7 \cdot I_{\max} \cdot K_1}\right)^2}}; \quad (5.8)$$

$$L = \sqrt{\frac{1}{(\pi \cdot F_{PWM})^2} \cdot \left(\frac{U_{DC}}{2,7 \cdot I_{\max} \cdot K_1}\right)^2}, \quad (5.9)$$

де U_{DC} – напруга в колі постійного струму інвертора; I_{\max} – максимальний допустимий струм інвертора; K_1 – встановлений коефіцієнт запасу за струмом.

5.4 Моделювання роботи інвертора напруги з синусним фільтром розрахованим за запропонованою методикою

Для підтвердження формування синусоїдальної форми вихідної напруги синусного фільтра зі значенням $THD_U < 5\%$ та обмеженням пускового струму конденсаторів фільтра в програмному середовищі Matlab/Simulink було розроблено імітаційну модель. Розроблену імітаційну модель досліджуваної системи наведено на рисунку 5.9 [85]. Параметри імітаційної моделі наведено в таблиці 5.1.

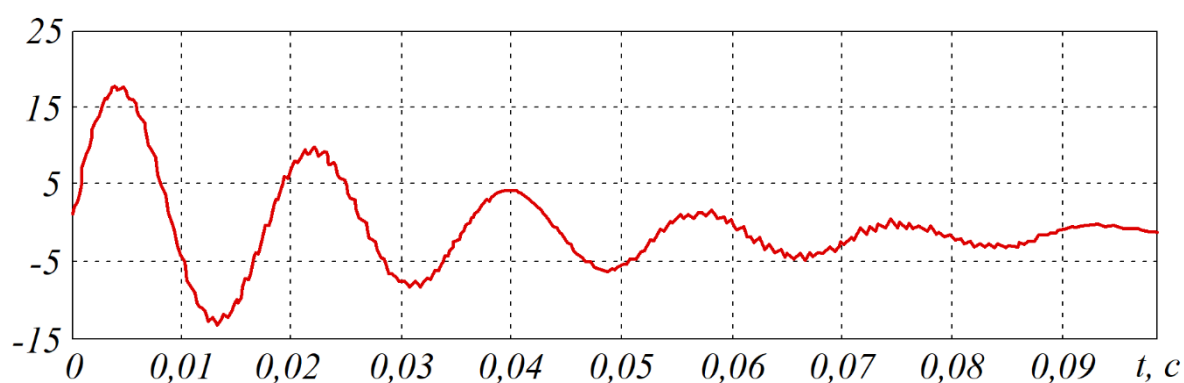


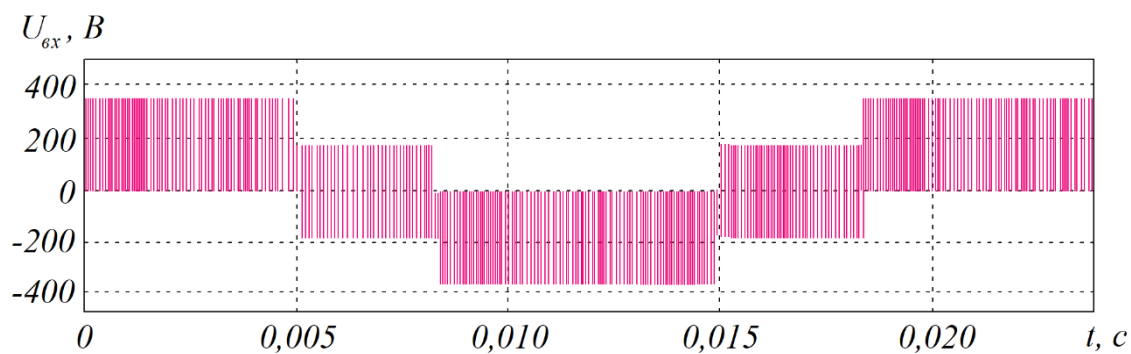
Рисунок 5.10– Форма пускового струму конденсатора синусного фільтра

У таблиці 5.2 наведено залежність пускового струму конденсатора при напрузі в колі постійного струму 310 В при різних параметрах фільтра.

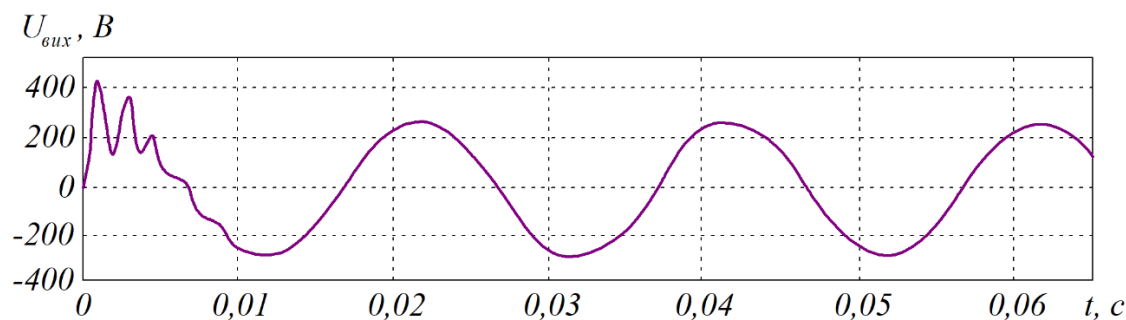
Таблиця 5.2 – Залежність пускового струму при різних параметрах фільтра

Характеристичний опір фільтра R_x , Ом	Індуктивність фільтра L , мГн	Ємність фільтра C , мкФ	Амплітуда піка пускового струму за результатами моделювання I_p , А
28,284	8	10	4
14,142	4	20	8
7,071	2	40	18
3,536	1	80	38

На рисунку 5.11 наведено результати імітаційного моделювання перетворювача частоти з розробленим синусним фільтром. Бачимо, що форма вихідної напруги синусного фільтра після закінчення перехідного процесу є майже синусоїдальною [87].



а



б

Рисунок 5.11 – Результати імітаційного моделювання: а) форма вихідної фазної напруги синусного фільтра; б) форма вихідної фазної напруги синусного фільтра

В ході імітаційного моделювання в Matlab використовувався метод розв’язання звичайних диференціальних рівнянь ode23tb – неявного методу Рунге–Кутта, в якому використовуються формули зворотного диференціювання другого порядку [88].

Результати гармонічного аналізу форми вихідної напруги синусного фільтра подано на рисунку 5.12. Форма вихідної напруги синусного фільтра майже синусоїдальна, а значення коефіцієнта гармонічних спотворень складає 1,88 %, що забезпечує вимоги до якості цієї форми [89].

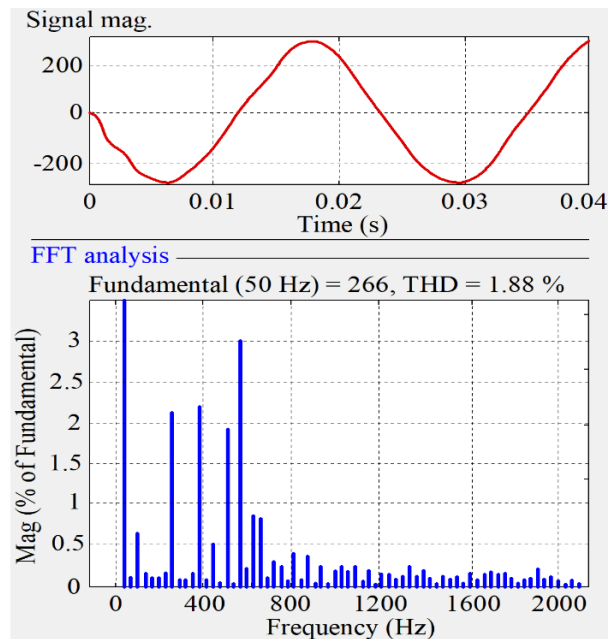


Рисунок 5.12 – Результати гармонічного аналізу вихідної напруги фільтра

При моделюванні було використано змінний крок розрахунку – максимальний крок дискретизації 1 мкс і мінімальний крок дискретизації в часі – 1 нс. Налаштоване значення максимальної допустимої відносної похибки моделювання склало 0,1 %. З метою підтвердження формування синусоїдальної форми вихідної напруги синусного фільтра, що фільтрує гармоніки автономного інвертора напруги, було розроблено фізичний стенд, який повторює схему, що було досліджено на імітаційній моделі в програмному середовищі Matlab / Simulink.

5.5 Фізичні дослідження інвертора з синусним фільтром

Для визначення параметрів якості напруги, генерованої мережевим інвертором, що працює в режимі автономного джерела живлення були проведені фізичні дослідження.

Схему розробленого стенда наведено на рисунку 5.13.

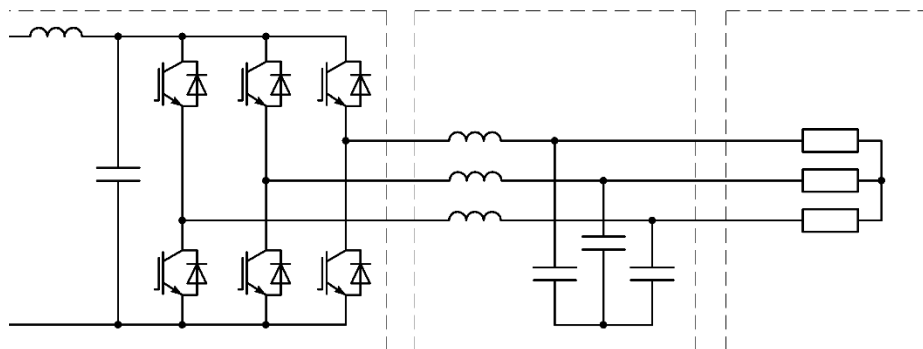
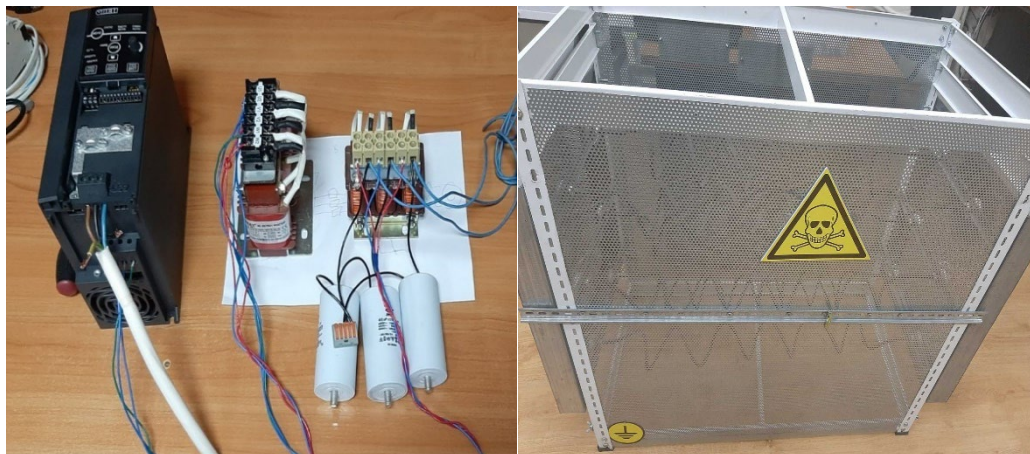


Рисунок 5.13 – Силова схема розробленого стенда

У розробленому стенді (рис. 5.14) було використано перетворювач частоти типу ПЧВ203-5К5-В з номінальною потужністю 5,5 кВт виробництва компанії «ВО ОВЕН», який містить трифазний діодний випрямляч, ланку постійної напруги з LC-фільтром і трифазний автономний інвертор напруги. Перетворювач частоти налаштовано на частоту ШІМ-модуляції 16 кГц.

У синусному фільтрі застосовано фазозсувні конденсатори JYUR ємністю 40 мкФ та силові дроселі PMT-016-A з індуктивністю 2,3 мГн і PMT-004-A з індуктивністю 0,46 мГн виробництва компанії «ВО ОВЕН».



а)

б)

Рисунок 5.14 – Фото розробленого стенда перетворювача частоти і синусного фільтра: а) стенд знавантаженням трифазним асинхронним двигуном 2А480В6ПАУЗ потужністю 1,5 кВт виробництва ТОВ «Дніпроресурс»; б) частина навантаження стенду – три резистори 40 Ом з'єднані зіркою

У ході досліджень було перевірено два варіанти навантаження стенда:

- трифазний асинхронний двигун 2А480В6ПАУ3 потужністю 1,5 кВт виробництва ТОВ «Дніпроресурс» (Україна), який у режимі низького моменту опору зумовлює струм навантаження 0,7...0,8 А (рис. 5.14, а);
- три реостати, з'єднані зіркою, з опором 40 Ом кожний (рис. 5.14, б).

Форма і гармонічний склад форми вихідної лінійної напруги трифазного інвертора було досліджено за допомогою осцилографа SIGLENT SDS1104X-E виробництва КНР. Осцилограф дає можливість проводити гармонічний аналіз форми вихідної напруги, проте інтегрального значення коефіцієнта гармонічних спотворень не визначає. Базові параметри осцилографа наведено в таблиці 6.3.

Таблиця 5.3 – Базові параметри осцилографа SIGLENT SDS1104X-E

Параметр	Значення
Смуга пропускання	100 МГц
Частота дискретизації	1 ГГц
Швидкість захвату осцилограм	400,000 осц/с
Вертикальна допустима похибка вимірювання	500 мкВ/под

Амплітудно-частотну характеристику вимірювального каналу осцилографа наведено на рисунку 5.15. Відповідно до амплітудно-частотної характеристики вхідного каналу частота зрізу складає 18 МГц.

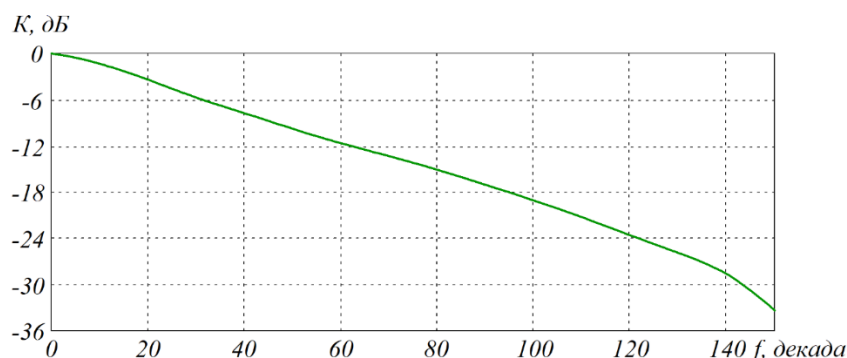


Рисунок 5.15 – Амплітудно-частотна характеристика смуги пропускання вимірювального каналу осцилографа SIGLENT SDS1104X-E

Осцилограми вихідної лінійної напруги перетворювача частоти без фільтрації і його спектральний аналіз – результати швидкого перетворення Фур'є – наведено на рисунку 5.16.



а)



б)

Рисунок 5.16 – Осцилограми вихідної лінійної напруги перетворювача частоти до фільтрації і його спектральний аналіз (швидке перетворення Фур'є): а) навантаженням є трифазний асинхронний двигун; б) навантаженням є три реостати, з'єднані зіркою

Відповідно до рисунку 5.16, спектр вихідної напруги містить гармоніки, кратні частоті ШІМ, тобто 16 кГц, 32 кГц, 48 кГц тощо.

Як показали дослідження, тип навантаження (резистивно-індуктивне або резистивне) суттєво не впливає на синусоїдальність форми вихідної напруги синусного фільтра. Форму вихідної напруги синусного фільтра і його спектральний аналіз (швидке перетворення Фур'є) наведено на рисунку 5.17.

індуктивністю 4,6 мГн та ємністю 40 мкФ ($R_x=10,7$ Ом, $I_{пуск}=10,7$ А), після чого пусковий струм не перевищував струму захисту ПЧВ203-K5-B величиною 20 А.

Порівняння результатів імітаційного моделювання та фізичного експерименту наведено в таблиці 5.4

Таблиця 5.4 – Порівняння результатів моделювання та експерименту

Параметр	Результати імітаційного моделювання	Результати фізичного експерименту
Частоти гармоніки у спектрі вихідної напруги автономного інвертора	16 кГц, 32 кГц, 48 кГц, ...	16 кГц, 32 кГц, 48 кГц, ...
Форма та THD вихідної напруги автономного інвертора напруги	Форма імпульсна, THD = 57,33 %	Форма імпульсна, THD = 59,72 %
Форма та THD вихідної напруги синусного фільтра	Форма синусоїдальна, THD = 1,88 %	Форма синусоїдальна, THD = 2,56 %
Перевірка обмеження пускового струму конденсатора синусного фільтра за виразами (5.1) – (5.9)	Виконано за критерієм отримання осцилограми пускового струму конденсатора	Виконано за критерієм увімкнення режиму захисту перетворювача частоти за максимальним струмом

За даними таблиці 5.4, результати імітаційного моделювання та фізичного експерименту в цілому збігаються, проте в ході фізичного експерименту було виявлено підвищене значення вищих гармонік, тому величини THD інвертора напруги та синусного фільтра мають дещо більші значення. Це може бути обґрунтовано тим, що в реальних умовах діють індуктивні наведення вимірювального каналу, гармоніки з боку мережі живлення та величина похибки

вимірювального каналу. Незважаючи на це, отримане значення THD вихідної напруги розробленого синусного фільтра із запасом не перевищує 5 % і задовольняє вимоги якості напруги згідно з вимогами міжнародного стандарту IEEE-519. Обмеження проведеного дослідження полягає у тому, що розроблена імітаційна модель адекватно працює лише у робочих режимах, а аварійні режими, в яких значення напруги і струму перевищують номінальні значення, модель відображатиме неадекватно. Недоліком запропонованого рішення забезпечення синусоїдальної напруги дворівневого інвертора напруги з LC-фільтром є значне падіння напруги на індуктивності фільтра, що зумовлює невикористання напруги ланки постійного струму. Можливим напрямом подальшого розвитку проведеного наукового дослідження є пошук і аналіз фільтрів інших топологій з метою зниження падіння напруги на фільтрі, а також створення інверторів з меншою кількістю транзисторів.

Висновки до розділу 5

1. Визначено вимоги, що пред'являються до параметрів напруги генерованої сонячної електростанції та проведено аналіз схемних рішень інверторів, що задовольняють вказані вимоги.

2. Визначено, що при реалізації в ФЕС автономного живлення дворівневого інвертора напруги та застосування LC фільтра можливим є виникнення значення пускового струму, зумовленого зарядом конденсатора фільтра, що може спричинити вихід з ладу силових транзисторів мережі.

3. Розроблена методики розрахунку LC фільтра, яка дозволяє визначити параметрів фільтра за критеріями обмеження пускового струму та забезпечення потрібної якості вихідної напруги.

4. Для підтвердження розробленої методики виконано комп'ютерне моделювання та проведені фізичні досліді, які підтвердили обмеження пускового струму та забезпечення якості вихідної напруги інвертора з $THD_U < 5\%$.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі на підставі теоретичних і експериментальних досліджень вирішується науково-технічна задача підвищення показників якості електричної енергії генерованої сонячною електростанцією до трифазних електричних мереж в режимі зниження генерованої потужності. Покращення показників якості електричної енергії досягається шляхом удосконалення систем керування напівпровідниковими перетворювачами сонячних електростанцій, а саме в застосування частотно-адаптивної широтно-імпульсної модуляції для мережеских інверторів напруги, яка дозволяє знизити пульсаційну складову струмів, що генеруються сонячними електростанціями до електричних мереж. Результати дисертаційної роботи впроваджено в навчальний процес НТУ ХПІ кафедри передачі електричної енергії, а також при розробці перетворювачів частоти, які проектуються та виробляються ТОВ «АКУТЕК».

В результаті досліджень отримані наступні результати:

1. Проведено аналіз конфігурацій сонячних електростанцій: залежностей генерованої потужності сонячних панелей від рівня сонячної радіації та температури, недоліки і переваги схем з'єднань сонячних панелей, схем напівпровідникових перетворювачів, що забезпечують відбір максимальної потужності блоків сонячних панелей, та схем мережеских інверторів, що забезпечують передачу електричної енергії до трифазних електричних мереж. Проаналізовано вимоги вітчизняних та міжнародних стандартів щодо параметрів якості електричної енергії, що генерується сонячними електростанціями трифазних електричних мереж. На підставі огляду міжнародних публікацій та власних досліджень визначено проблематику суттєвого зниження якості генерованої електричної енергії в режимі зниження генерованої потужності.

2 Запропоновано метод непрямого визначення точки максимальної потужності сонячних панелей ФЕС, що дозволяє визначити точку максимальної потужності СП при використанні одного датчика напруги. Метод засновано на базі аналітичного визначення енергії узгоджуючого перетворювача. При застосуванні

даного методу система не потребує встановлення датчика вихідного струму СП, що спрощує систему датчиків та знижує вартість системи. В режимі переривчастого режиму вхідного струму узгоджувального перетворювача (інвертуючого ШП) непрямий вимір потужності може бути реалізовано на основі обчислення тактових значень енергії, запасеної в реактивних елементах схеми. Проаналізовано вплив пульсацій вхідної напруги узгоджувального перетворювача на положення робочої точки сонячної панелі. Отримано аналітичні вирази для розрахунку миттєвих та середніх відхилень від точки максимальної потужності сонячної панелі при лінійній апроксимації характеристик. Запропоновано компенсаційний метод керування узгоджувачами DC/DC перетворювачами в складі ФЕС, що реалізується шляхом синхронізації каналів керування окремих перетворювачів та забезпечення фазового зсуву опорних сигналів на компенсаційний кут ϕ . Запропонований метод дозволяє суттєво знизити пульсації в ланці постійного струму ФЕС, чим досягається можливість зменшення фільтруючих пристроїв та покращення якості електроенергії, що генерується мережевими інверторами до електричної мережі.

3. Розроблено систему керування трифазного мережевого інвертора струму, що забезпечує передачу електричної енергії від ФЕС до промислової електричної мережі змінного струму. Визначено, що при зниженні генерованої потужності мережеві інвертори струму збільшують долю генерованої реактивної потужності, що знижує енергетичну ефективність електричної мережі та зумовлює додаткові втрати потужності в ній. Визначено аналітичну умову реалізації коефіцієнту потужності мережевого інвертора струму ФЕС близького до одиниці та запропоновано метод, що керування мережевим інвертором, який задовольняє вказану умову в режимі зниженої генерації потужності. Розроблено систему керування мережевим інвертором напруги сонячної електростанції, що забезпечує передачу електричної енергії до трифазної електричної мережі з коефіцієнтом потужності близьким до одиниці.

4. В розділі виконано розробку комп'ютерної моделі сонячної електростанції з використанням мережевого інвертора струму в ШІМ режимі. Встановлено, що при зниженні генерованої потужності відбувається збільшення вмісту реактивної

потужності генерованої в електричну мережу. Визначено, що даний вміст залежить від параметрів вхідного LC фільтру перетворювача та величини генерованого струму. Запропоновано метод компенсації реактивної потужності генерованої в електричну мережу, шляхом додання компенсаційного кута зсуву сигналу завдання та визначено його аналітичну залежність в функції генерованого струму. Проведене моделювання підтвердило ефективність запропонованого алгоритму та практично повну компенсацію вмісту реактивної потужності генерованої до електричної мережі.

5. Визначено вимоги, що пред'являються до параметрів напруги генерованої сонячної електростанції та проведено аналіз схемних рішень інверторів, що задовольняють вказані вимоги. Визначено, що при реалізації в ФЕС автономного живлення дворівневого інвертора напруги та застосування LC фільтра можливим є виникнення значення пускового струму, зумовленого зарядом конденсатора фільтра, що може спричинити вихід з ладу силових транзисторів мережі. Розроблена методики розрахунку LC фільтра, яка дозволяє визначити параметрів фільтра за критеріями обмеження пускового струму та забезпечення потрібної якості вихідної напруги. Для підтвердження розробленої методики виконано комп'ютерне моделювання та проведені фізичні досліді.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

(Бібліографічний опис списку використаних джерел оформлено згідно з IEEE Style, що входить до Додатку 3, Наказу МОН «Про затвердження вимог до оформлення дисертації» від 12 січня 2017 року № 40)

1. Галузь сонячної енергетики в Україні. Українська енергетична біржа. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.ueex.com.ua/presscenter/news/galuz-sonyachnoi-energetiki-v-ukraini>

2. Billinton R. Capacity expansion of small isolated power systems using PV and wind energy / R. Billinton, R. Karki // *IEEE Trans. Power Systems*. – 2001. – Vol. 16. – No. 4. – P. 892-897.

3. Zhemerov G. Energy Saving in Smart Grid Systems with Trunk Mode of Customer Connection / G. Zhemerov, D. Tugay // *2014 IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS-2014)*. June 02-06, Kyiv, Ukraine. – 2014. – P. 15-17.

4. EN 50160:2010 *Voltage Characteristics of electricity supplied by public distribution networks*.

5. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності: ДСТУ EN 50160:2014 (EN 50160:2010, IDT). - К.: Держстандарт України, 2014. – 27 с.

6. EN 50160:2010 *Voltage Characteristics of electricity supplied by public distribution networks*.

7. E. Koutroulis, K. Kalaitzakis, N.C. Voulgaris, “Development of a microcontroller-based, photovoltaic maximum power point tracking control system,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol 16, January 2001. pp.:46 – 54,

8. C.R. Sullivan, M.J. Powers, “A high-efficiency maximum power point tracker for photovoltaic arrays in a solar-powered race vehicle,” *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, June 1993, pp.: 574 – 580.

9. M. Veerachary, T. Senjyu, K. Uezato, "Maximum power point tracking of coupled inductor interleaved boost converter supplied PV system," *IEE Proceedings on Electric Power Applications*, Vol. 150, Issue 1, January 2003, pp.:71-80,
10. Енергетична стратегія України на період до 2030 р. / *Міністерство енергетики та вугільної промисловості України* [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/doccatalog/list? currDir=50358>
11. Дячук О. Перехід України на відновлювану енергетику до 2050 року / О. Дячук, М. Чепелєв, Р. Подолець та ін. // К: Вид-во ТОВ «АРТ КНИГА», 2017. – 88 с.
12. Лежнюк П. Д. Балансова надійність електричної мережі з фотоелектричними станціями: *монографія* / П. Д. Лежнюк, В. О. Комар, С. В. Кравчук та ін. – Вінниця: ВНТУ, 2018. – 136 с.
13. Готовність «Укренерго» до реалізації схем підтримки ВДЕ в умовах нового ринку [Електронний ресурс] // *НЕК "Укренерго"*. – 2017. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.slideshare.net/Ukrenergo/ss-80643103>.
14. Liu, Y., Abu-Rub, H., Ge, B., & Peng, F. Z. (2014). An effective control method for quasi-Z-source cascade multilevel three-phase grid-tie photovoltaic power system. *2014 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC 2014*. doi:10.1109/apec.2014.6803539
15. Павловський В.В. «Обмеження потужності відновлюваних джерел енергії за умови приєднання до електричної мережі» / В.В. Павловський та ін. // *Праці ІЕД НАНУ*. – 2016. – №. 43. – С. 18-23.
16. Ahsan, S. M., Khan, H. A., Hussain, A., Tariq, S., & Zaffar, N. A. (2021). Harmonic Analysis of Grid-Connected Solar PV Systems with Nonlinear Household Loads in Low-Voltage Distribution Networks. *Sustainability*, 13(7), 3709. doi:10.3390/su13073709
17. Dumitru Cernuşcă , Constantin Ungureanu , Radu-Dumitru Pentiu, Eugen Hopulele, Teodor Pop. Analysis of the operation of solar micro-inverters. *Emerg - Energy Environment Efficiency Resources Globalization*, Volume VIII, Issue 4/2022. P.93-102

18. Asma Aziz, Vinayagam Arangarajan, Swarna KSV, Alex Stojcevski. Power Quality Impacts in a Typical Microgrid. *International Conference on Sustainable Energy and Environmental Engineering (SEEE 2015)* Volume: Advances in Engineering Research. DOI: 10.2991/seee-15.2015.20

19. Huber M. Integration of wind and solar power in Europe: Assessment of flexibility requirements / M. Huber, D. Dimkova, T. Hamacher // *Energy*. № 69 (2014), p. 236-246.

20. Mochizuki, Y., & Yachi, T. (2018). Effective Series-Parallel Cell Configuration in Solar Panels for FPM Power Generation Forest. 2018 7th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA). doi:10.1109/icrera.2018.8566861

21. Farias, A. M., Oliveira, K. C., Cavalcanti, M. C., & Neves, F. A. S. (2011). Modulation for three-phase transformerless neutral point clamped inverter in photovoltaic systems. *XI Brazilian Power Electronics Conference*. doi:10.1109/cobep.2011.6085175

22. Saavedra Patino, J. A., & Lopez, Y. U. (2018). Analysis Power Quality of a Photovoltaic System Connected to the Grid-Tie. *2018 IEEE ANDESCON*. doi:10.1109/andescon.2018.856

23. Xinyu, X. (2018). Evaluating the Stability of Distribution Network by Modeling and Simulation of Distributed Photovoltaic Power. 2018 China International Conference on Electricity Distribution (CICED). doi:10.1109/ciced.2018.8592564.

24. Munteanu I. Optimal control of wind energy systems: Advances in Industrial Control/ I. Munteanu, A. I. Bratcu, N-A. Cutululis, E. Ceanga// *series ISSN 1430-9491–Springer-Verlag* London Limited, 2008. – p.284.

25. Giri, R., Kumar, A., Mishra, S., & Shah, N. (2018). Floating Solar Collector for Hybrid Hydro-Solar Power Plant. 2018 International Conference on Smart City and Emerging Technology (ICSCET). doi:10.1109/icscet.2018.8537271

26. Hansen M.H. Control design for a pitch-regulated, variable speed wind turbine/ M.H. Hansen, A. Hansen, T.J. Larsen, S. Oye, P. Sorensen, P. Fuglsang// *Technical Report RISO–R–1500*, RISO National Laboratory, Roskilde, Denmark, 2005.

27. Schuepbach, E., Muntwyler, U., Schott, T., Jost, M., Renken, C., & Lanz, M. (2015). Swiss Energy Strategy 2050: Research on photovoltaic electricity production. *2015 Tenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*. doi:10.1109/ever.2015.7112992

28 Wu, W., Zhang, C., Su, J., & Wang, H. (2015). The Design of New High Efficiency Photovoltaic Grid and Independent Power Supply Inverter. *2015 International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks (CICN)*. doi:10.1109/cicn.2015.300

29. Кириленко, О. В. Моделювання енергетичних процесів у системах енергопостачання при вирішенні завдань енергозбереження / О. В. Кириленко, С. П. Денисюк // *Електродинаміка: Зб. наук. пр.* – К.: ІЕД НАН України, 2001. – С. 87 – 91.

30. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия и совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения [Текст]. – К.: *Госстандарт Украины*, 1999. – 32 с.

31. Foureaux, N., Machado, A., Silva, E., Pires, I., Brito, J., & Braz Cardoso, F. (2015). Central inverter topology issues in large-scale photovoltaic power plants: Shading and system losses. *2015 IEEE 42nd Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*. doi:10.1109/pvsc.2015.7355828

32. Merah, M., Baghli, L., & Boumediene, A. (2019). Prototyping of photovoltaic grid-tie inverter with active and reactive power injection. *2019 International Conference on Advanced Electrical Engineering (ICAEE)*. doi:10.1109/icaee47123.2019.9014764

33. ABB Power electronics [Електрон. ресурс]. – Режим доступу: <http://new.abb.com/power-electronics>.

34. AES. We Are the Energy [Електрон. ресурс]. – Режим доступу: <http://www.aes.com>.

35. Eaton. Powering Business Worldwide [Електрон. ресурс]. – Режим доступу: <http://www.eaton.com>.

36. Mitsubishi electric. Changes for the Better [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: <http://www.mitsubishielectric.com>.

37. Patil, R. R., Patil, S. P., Patil, S. D., & Mulla, A. M. (2017). Designing Of Z-source inverter for photovoltaic system using MATLAB/SIMULINK. *2017 International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies (ICCPCT)*. doi:10.1109/iccpct.2017.8074331

38. Mochi, P. (2018). Primary Review on MPPT Method and Size of Grid Connected Solar Photovoltaic Inverter. *2018 8th IEEE India International Conference on Power Electronics (IICPE)*. doi:10.1109/iicpe.2018.8709583

39. Shah, N. (2018). Multilevel Inverter Based Single-Stage Grid Connected Photovoltaic System using Cascaded Two-Level Inverter. *2018 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*. doi:10.1109/pedes.2018.8707445

40. Mohammad Noor, S. Z., Omar, A. M., Radzi, M. A. M., & H, F. A. (2018). Artificial Intelligence based Fuzzy-MPPT Technique of H-Bridge Inverter for Grid-Connected Photovoltaic System. *2018 AEIT International Annual Conference*. doi:10.23919/aeit.2018.8577307

41. Nuotio, M., Ilic, M., Liu, Y., Bonanno, J., & Verlinden, P. J. (2014). Innovative AC photovoltaic module system using series connection and universal low-voltage micro inverters. *2014 IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*. doi:10.1109/pvsc.2014.6925172

42. Devaraj, D., Sakthivel, S., & Punitha, K. (2011). Modeling of photovoltaic array and simulation of adaptive hysteresis current controlled inverter for solar application. *2011 3rd International Conference on Electronics Computer Technology*. doi:10.1109/icectech.2011.5942103

43. Zheng Fei, Zhang Xiao Lin, Zhang Junjun, & Huang Jingsheng. (2014). Hardware-in-the-loop simulation, modeling and close-loop testing for three-level photovoltaic grid-connected inverter based on RT-LAB. *2014 International Conference on Power System Technology*. doi:10.1109/powercon.2014.6993770

44. Dousoky, G. M., & Shoyama, M. (2013). Current-sensorless power-angle-based MPPT for single-stage grid-connected photovoltaic voltage-source inverters. *2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*. doi:10.1109/ecce.2013.6647058
45. Shifeng, Z., Xiao, C., Yunlei, Y., Da, L., Lei, F., & Zhiguo, H. (2016). Study of the interaction between photovoltaic inverter and power quality harmonic and its suppression method. *2016 China International Conference on Electricity Distribution (CICED)*. doi:10.1109/ciced.2016.7576281
46. Yan, C., & Xu, D. (2018). Design Study of MW Photovoltaic Inverter. *2018 IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition (PEAC)*. doi:10.1109/peac.2018.8590642
47. Yousofi-Darmian, S., & Barakati, S. M. (2014). A new four-level transformer-less single-phase inverter for grid-connected photovoltaic systems. *2014 22nd Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)*. doi:10.1109/iraniancee.2014.6999648
48. Bier, A. (2016). Three-phase grid-tied current-source inverter sizing and control for photovoltaic application. *2016 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)*. doi:10.1109/speedam.2016.7525957
49. Caibo Deng, Zhan Shu, Yonghong Xia, Na Chen, Taoyun Wang, & Hongzhong Ma. (2014). Three-phase photovoltaic grid-connected inverter with LCL based on current deadbeat control and PI control. *2014 International Conference on Power System Technology*. doi:10.1109/powercon.2014.6993846
50. A cell selective charge equalizer using multi-output converter with auxiliary transformer / M. Y. Kim, C. H. Kim, S. Y. Cho, and oth. // *8th International Conference on Power Electronics - ECCE Asia*, Jeju, 2011. – P. 310-317.
51. Caibo Deng, Zhan Shu, Yonghong Xia, Na Chen, Taoyun Wang, & Hongzhong Ma. (2014). Three-phase photovoltaic grid-connected inverter with LCL based on current deadbeat control and PI control. *2014 International Conference on Power System Technology*. doi:10.1109/powercon.2014.6993846
52. Sezen, S., Aktas, A., Ucar, M., & Ozdemir, E. (2014). A three-phase three-level NPC inverter based grid-connected photovoltaic system with active power filtering. *2014*

16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition.
doi:10.1109/epepemc.2014.6980697

53. Gao, X., Wang, Y., Wang, Z., & Yang, Z. (2019). A Method of Solving Three-Phase Power Unbalance Problem with PV Inverters Connected to the Grid in Series. *2019 4th International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE).*
doi:10.1109/icpre48497.2019.9034865

54. Xu, X., Fang, L., Xu, X., & Lu, X. (2017). Control strategy of photovoltaic generation inverter grid-connected operating and harmonic elimination hybrid system. *2017 2nd International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE).*
doi:10.1109/icpre.2017.8390661

55. Hu, X., Meng, L., Zhang, Q., Li, T., Li, X., & Yi, H. (2020). *Two-stage Photovoltaic Power Supply Modeling and Simulation Based on Double Closed-loop Control.* *2020 4th International Conference on HVDC (HVDC).*
doi:10.1109/hvdc50696.2020.9292829

56. Keawthai, S., & Po-Ngam, S. (2015). Simplified active power and reactive power control with MPPT and islanding detection for three-phase grid-connected photovoltaic inverters. *2015 12th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON).* doi:10.1109/ecticon.2015.7207035

57. Abdur Razzak, M., Chowdhury, A. S. K., & Salam, K. M. A. (2014). Induction motor drive system using Push-Pull converter and three-phase SPWM inverter fed from solar photovoltaic panel. *2014 POWER AND ENERGY SYSTEMS: TOWARDS SUSTAINABLE ENERGY.* doi:10.1109/pestse.2014.6805301

58. Repak, M., Otcenasova, A., Regula, M., & Bodnar, R. (2016). Design of power converter for model of photovoltaic power plant. *2016 ELEKTRO.*
doi:10.1109/elektro.2016.7512097

59. Park J. H. Multi-output differential power processing system using boost-flyback converter for voltage balancing / J. H. Park, K. T. Kim // *International Conference on Recent Advances in Signal Processing, Telecommunications & Computing (SigTelCom)*, Da Nang, 2017. – P. 139-142.

60. Espitia, E., Lopez, H., Vazquez, N., & Hernandez, C. (2018). Leakage Current Reduction for Three-Phase Transformerless Photovoltaic Inverter. *2018 14th International Conference on Power Electronics (CIEP)*. doi:10.1109/ciep.2018.8573359
61. Simulation of a supercapacitor/Li-ion battery hybrid for pulsed applications. / D. Cericola, P. W. Ruch, R. Ktz and oth. // *Journal of Power Sources*. – 2010. – N9. – P. 2731-2736.
62. Hybrid electrical energy storage systems. / Pedram, Massoud, Naehyuck Chang and oth. // *In Low-Power Electronics and Design (ISLPED)*, 2010.
63. Optimizing LiFePO₄ Battery Energy Storage Systems for Frequency Response in the UK System / B. Lian, A. Sims, D. Yu and oth. // *In IEEE Transactions on Sustainable Energy*. – 2017. – V. 8. – N1. – P. 385-394.
64. Wang Z. Safety performance analysis of LiFePO₄ Li-ion batteries for electric vehicles. / Z. Wang, CH L. Yin // *Battery Industry*. – 2008. – V.13. – N3. – P.169-172.
65. Aydın İ. A basic battery management system design with IoT feature for LiFePO₄ batteries. / İ. Aydın, Ö. Üstün // *10th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*, Bursa, 2017. – P. 1309-1313.
66. A cooperative con-verter for managing low-voltage energy storage systems. / E. Romero-Cadaval, M. Á. Guerrero-Martínez, M. I. Milanés-Montero and oth. // *10th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG)*, Bydgoszcz, 2016. – P. 162-167.
67. Cooperative converter for improving the performance of grid-connected photovoltaic power plants. / V. Minambres-Marcos, E. Romero-Cadaval, M. Guerrero-Martinez and oth. // *In IET Renewable Power Generation*. – 2013. – V.7. – N2. – P. 110-117.
68. Romero-Cadaval E. Cooperative con-verters in power electronic systems. / E. Romero-Cadaval, M. I. Milanés-Montero // *12th Biennial Baltic Electronics Conference*, Tallinn, 2010. – P. 51-60
69. Rivera, P. R., McIntyre, M. L., Mohebbi, M., & Latham, J. (2017). Single — Stage three — Phase grid — Connected photovoltaic system with maximum power

tracking and active and reactive power control based on nonlinear control. *2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. doi:10.1109/ecce.2017.8095753

70. Перетворювальна техніка: підручник. В 2 ч. Ч. 2 / Ю.П. Гончаров, О.В. Будьонний, В.Г. Панасенко. – Харків : Фоліо, 2000. – 360 с.

71. Mohamadi, M., Roshandel, E., Gheasaryan, S. M., & Khoshkalamyan, P. (2016). Stability and power factor improvement in a power system with simultaneous generation of steam and solar power plant. *2016 6th Conference on Thermal Power Plants (CTPP)*. doi:10.1109/ctpp.2016.7483058

72. Votava J. Energy consumption measure-ments based on numerical integration / J. Votava, Kyncl, L. Straka // *19th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*, Brno, Czech Republic, 2018. – P. 1-4.

73. AEG Power Solutions [Електрон. ресурс]. – Режим доступу: <https://www.aegps.com/en>.

74. H. Kim, S. Lee, S. Sul, “Reference ware generation in dynamic voltage restorers by use of the pqr power theory,” *In Proc. IEEE Appl. Power Electron. Conf. Exp. (APEC 2004)*, vol. 3, pp. 1452–1457, 2004.

75. S. Lee, H. Kim, S. Sul, F. Blaabjerg, “A novel control algorithm for static series compensators by use of PQR instantaneous power theory,” *IEEE Trans. Power Electron*, vol. 19, no. 3, pp. 814–827, 2004.

76. F. Z. Peng, G. W. Ott, D. J. Adams, “Harmonic and reactive power compensation based on the generalized instantaneous reactive power theory for three-phase four-wire systems,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol.13, no.6, pp. 1174–1181, 1998.

77. M. Aredes, H. E. Watanabe, “New control algorithms for series and shunt three-phase four-wire active power filters,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 10, no. 3, pp. 1649-1656, 1995.

78. H. Akagi, S. Ogasawara, and H. Kim, “The theory of instantaneous power in three-phase four-wire systems: a comprehensive approach,” *In Conference Record of the 1999 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Forth IAS Annual Meeting (Cat. No. 99CH36370)*, vol. 1, pp. 431-439. IEEE, 1999.

79. M.Yu. Artemenko, L.M. Batrak, V.M. Mykhalskyi, S.Y. Polishchuk, “Analysis of possibility to increase the efficiency of three-phase four-wire power system by means of shunt active filter”, *Technical Electrodynamics*, no.6, pp. 12-18, 2015.

80. G. G. Zemerov, N. A. Ilyina, O. V. Ilyina, E. I. Sokol, D. V. Tugay, “Power active filter installation effect in three-phase four-wire distribution network,” *Int. Workshop and Tutorials on Electron Devices and Materials*, EDM, pp. 395–400, 2009.

81. O. Bialobrzheskyi, A. Gladyr, “Influence of distortion of load current on parameters of components of the parallel power active filter,” *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, no. 5, pp. 77–85, 2017.

82. O. Plakhtii, V. Nerubatskyi, I. Ryshchenko, O. Zinchenko, S. Tykhonravov, D. Hordiienko “Determining additional power losses in the electricity supply systems due to current's higher harmonics,” *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Vol. 1, No. 8 (97). pp. 6–13, 2019.

83. D. Casadei, G. Grandi, U. Reggiani and C. Rossi, "Control methods for active power filters with minimum measurement requirements," *APEC '99. Fourteenth Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition*. 1999 Conference Proceedings (Cat. No.99CH36285), Dallas, TX, USA, vol.2, pp. 1153-1158, 1999.

84. A. Tarkiainen, R. Pollanen, M. Niemela and J. Pyrhonen, "Identification of grid impedance for purposes of voltage feedback active filtering," in *IEEE Power Electronics Letters*, vol. 2, no. 1, pp. 6-10, March 2004.

85. G. Zhemerov, N. Ilina, D. Tugay, “The theorem of minimum energy losses in three-phase four-wire energy supply system”, *IEEE, In Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*, 2016 2nd International Conference on, pp. 1-3, 2016.

86. M. Y. Artemenko, L. M. Batrak, S. Y. Polishchuk, V. M. Mykhalskyi, I. A. Shapoval, “The effect of load power factor on the efficiency of three-phase four-wire power system with shunt active filter,” *2016 IEEE 36th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, IEEE, pp. 277–282, 2016.

87. D. Tugay, G. Zhemerov, S. Kotelevets, A. Shkurpela, “Parallel power active filter new control technique based on modified p-q-r power theory,” *Bulletin of NTU "KhPI"*. Series: New solutions in modern technologies, 45 (1321), 2019.

88. Жемеров Г. Г. Преобразователь с единичным коэффициентом мощности / Г. Г. Жемеров, Н. А. Ильина, Д. С. Крылов // *Технічна електродинаміка. Темат. вип. «Проблеми сучасної електротехніки»*. – 2000. – Ч. 4. – С. 70–75.
89. Fang Z. P. Special Issue on Distributed Power Generation / Z. P. Fang // *IEEE Trans. On Power Electronics*. – 2004. – Vol. 19. – No 5. – P. 1157–1158.
90. Xu, H., Wang, X., Huang, L., Qian, J., & Lou, J. (2019). Research on Two-Stage Three-Phase Photovoltaic Grid-Connected System with MPPT. *2019 4th International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE)*. doi:10.1109/icpre48497.2019.9034825
91. IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power System // *IEEE Std.* – 1992. – 519 p.
92. Limits for Harmonic Current Emission. – *IEC1000-3-2*. – 1995.
93. Cecati C. A Novel Three-Phase Single-Stage Distributed Power Inverter / C. Cecati, A. Dell'Aquila, M. Liserre // *IEEE Trans. On Power Electronics*. – 2004. – Vol. 19. – No 5. – P. 1226–1233.
94. Johan H. R. Interconnection of Distributed Power Inverters with the Distribution Network / H. R. Johan // *IEEE Power Society NEWSLETTER*. – 2003. – P. 7–9.
95. Wang J. Low Cost Fuel Cell Converter System for Residential Power Generation / J. Wang, Z. P. Fang, J. Anderson, A. Joseph, R. Buffenbarger // *IEEE Trans. On Power Electronics*. – 2004. – Vol. 19. – No 5. – P. 1315–1322.
96. Xue Y. Topologies of Single-Phase Inverters for Small Distributed Power Generators: An Overview / Y. Xue, L. Chang, J. Bordonau, T. Shimizu // *IEEE Trans. On Power Electronics*. – 2004. – Vol. 19. – No 5. – P. 1305–1313.
97. Dang, Pan, S., Pan, X., Gao, W., Ding, K., & Li, W. (2020). A Modular Three-Phase Photovoltaic Inverter with Elimination of Phase Unbalance and Reduction of Second Harmonic Voltage Ripple. *IECON 2020 The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. <https://doi.org/10.1109/iecon43393.2020.9254344>

98. Blaabjerg F. Power Electronics as Interface in Distributed Power Generation Systems / F. Blaabjerg, Z. Chen, S. Baekhoej Kjaer // *IEEE Trans. On Power Electronics*. – 2004. – Vol. 19. – No 5. – P. 1184–1194.

99. Haping X. Fuel Cell System and High Power DC-DC converter / X. Haping, K. Li, W. Xuhui // *IEEE Trans. On Power Electronics*. – 2004. – Vol. 19. – No 5. – P. 1250–1255.

100. Krein P. T. High-Frequency Link Inverter for Fuel Cells Based on Multiple-Carrier PWM / P. T. Krein, R. S. Balog, X. Geng // *IEEE Trans. On Power Electronics*. – 2004. – Vol. 19. – No 5. – P. 1279–1288.

101. Борюшкин А. А. Выбор силовой схемы двенадцатипульсного управляемого выпрямителя / А. А. Борюшкин, И. Ф. Домнин, Г. Г. Жемеров // *Вестник НТУ «ХПИ»*. – 2001. – Вып. 15. – С. 205–213.

102. Волков И. В. Улучшение качества электроэнергии в электросетях крупных административных зданий / И. В. Волков, М. Левин, И. В. Пентегов, С. В. Рымар // *Технічна електродинаміка. Темат. вип. «Проблеми сучасної електротехніки»*. – 2004. – Ч. 1. – С. 93–98.

103. Зиновьев Г. С. Энергоэффективные выпрямители трехфазного тока / Г. С. Зиновьев, Н. Н. Лопаткин // *Технічна електродинаміка. Темат. вип. «Силова електроніка та енергоефективність»*. – Ч. 1. – С. 21–26.

104. Bong-Hwan K. A Line-Voltage-Sensorless Synchronous Rectifier / K. Bong-Hwan, Y. Jang-Hyoun, L. Jee-Woo // *IEEE Trans. on Power Electronics*. – Sept., 1999. – Vol. 14. – P. 966–972.

105. Akagi H. Generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase circuits / H. Akagi, Y. Kanazawa, A. Nabae // *IPEC'83 – Int. Power Electronics Conf.* – Tokyo, Japan. – 1983. – P. 1375–1386.

106. Kim H. Instantaneous power compensation in three-phase systems using p-q-r theory / H. Kim, F. Blaabjerg, B. Bak-Jensen, I. Choi // *IEEE Trans. Power Electronics*. – 2002. – Vol. 17. – No 5. – P. 701–710.

107. Peng F. Z. Generalized instantenious reactive power theory for three-phase power systems / F. Z. Peng, J. S. Lai // *IEEE Trans. Instrum. Meas.* – 1996. – Vol. 45. – No. 1. – P. 293–297.

ДОДАТОК А
СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Shelest D. Modeling of thermal ventilation processes in printed circuit boards of power sources. *Smart Technologies in Urban Engineering: Book Chapter Lecture Notes in Networks and Systems* / O. Plakhtii, V. Nerubatskyi, D. Shelest, D. Hordiienko, I. Khomenko: Springer. 2023. Vol. 808. P. 294-304. (SCOPUS, Switzerland)
2. Шелест Д. Дослідження впливу скін-ефекту на втрати потужності в системах тягового електропостачання постійного струму / О. Плахтій, В. Нерубацький, Д. Шелест, В. Цибульник // *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. Харків, 2021. №4. С. 3-14. (Б)
3. Шелест Д. А. Дослідження системи керування пристроєм плавного пуску асинхронного двигуна / О.А. Плахтій, В.П. Нерубацький, Д.А. Гордієнко, Д.А. Шелест, А.В. Синявський // *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. Харків, 2022. №202. С. 62-77. (Б)
4. Шелест Д.А. Динаміка, концепції та перспективи розвитку вітрової енергетики / О.А. Плахтій, В.П. Нерубацький, Д.А. Гордієнко, Д.А. Шелест, А.В. Синявський // *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. Харків, 2022. № 4. С. 3-14. (Б)
5. Шелест Д.А. Огляд конфігурації і стратегії керування мікромережами на основі силової електроніки / В.П. Нерубацький, О.А. Плахтій, Д.А. Гордієнко, А.В. Синявський, Д.А. Шелест // *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. Харків, 2023. Вип. 204. С. 101-115. (Б)
6. Шелест Д. Дослідження передачі електроенергії сонячної електростанції в трифазну електричну мережу / О. Плахтій, І. Хоменко, Д. Шелест, А. Синявський // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика*. Харків, 2023. Вип. 2(10), С. 38-44. (Б)
7. Шелест Д.А. Аналіз режимів роботи електричних мереж з урахуванням

впливу зубцевих гармонік / І.В. Хоменко, О.А. Плахтій, Д.А. Шелест // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність*. Харків, 2023. Вип. 2(7). С. 77-84. (Б)

Наукові роботи, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

8. Шелест Д.А. Визначення дії скін-ефекту на додаткові втрати потужності від вищих гармонік в електричних мережах // В.П. Нерубацький, О.А. Плахтій, Д.А. Гордієнко, Д.А. Шелест // *Інтелектуальні транспортні технології : тези доповідей 2-ої Міжнародної науково-технічної конференції* (Харків, 27–29 квітня 2021 р.). Харків: УкрДУЗТ, 2021. С. 139–141.

9. Shelest D. Approximation of the dependence of the active resistance of the conductor on the frequency for the high frequency zone / Scherbak Y., Plakhtii O., Nerubatskyi V., Hordiienko D., Shelest D., Semenenko Y. // *IEEE 19th International Conference on Smart Technologies (EUROCON)* (м. Львів, 6-8 липня 2021 р.). Lviv, Lviv polytechnic National University, 2021. – P. 438-442.

10. Shelest D. Research of energy characteristics of three-phase voltage source inverters with modified pulse width modulation / Plakhtii O., Nerubatskyi V., Mykhalkiv S., Hordiienko D., Shelest D., Khomenko I. // *IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)* (м. Харків, 13–17 вересня 2021 р.). Kharkiv, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», 2021. – P. 422-427.

11. Shelest D. Thermal-Powerloss Approximation Method for Determination of Efficiency in Semiconductor Devices / O. Plakhtii, V. Nerubatskyi, D. Hordiienko, D. Sushko, A. Syniavskyi, D. Shelest // *IEEE 41st International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)* (м. Київ, 10-14 жовтня 2022 р.). Kyiv, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», 2022. – P. 456-461.

12. Шелест Д.А. Віброакустичні засоби діагностики стану силових трансформаторів / Хоменко І. В., Шелест Д. А. // *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я (MicroCAD) : тези доповідей XXX Міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2022* (м. Харків, 19–22

жовтня 2022 р.). – Харків: Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», 2022. – С. 88.

13. Шелест Д.А. Дослідження механізму вібрації та шумоутворення осердя трансформатора, викликаного магнітострикцією листа з електротехнічної сталі / І.В. Хоменко, Д.А. Шелест // *Енергоефективність та енергетична безпека електроенергетичних систем (EEES-2020)* : збірник наукових праць VI Міжнародної науково-технічної конференції (м. Харків, 20–23 грудня 2022 р.). – Харків: Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», 2022. – С. 75–78.

14. Shelest D. Research of Single-Phase Current Rectifier in the Rectification and Recuperation Modes / O. Plakhtii, N. Karpenko, K. Trubchaninova, M. Filipieva, D. Shelest, K. Ivakina // *IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES)* (м. Кременчук, 27-30 вересня 2023 р.). Kremenichuk, Kremenichuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, 2022. – P. 1-6.

15. Shelest D. Research and calculation of the levels of higher harmonics of rotary electric machines in active-adaptive networks / Khomenko I., Nerubatskyi V., Plakhtii O., Hordiienko D., Shelest D. // *IOP 4th international conference on sustainable futures: environmental, technological, social and economic matters (ICSF)* (м. Кривий Ріг, 22-26 травня). Kryvyi Rih, Kryvyi rih State Pedagogical University, 2024. Vol.1254. – P. 1-15.

Патент України на корисну модель:

16. Патент UA 151131, МПК H02J 3/26 (2021.12). Трифазний трирівневий силовий активний фільтр для трифазної трипровідної електричної мережі / О. А. Плахтій, В. П. Нерубацький, Д. А. Гордієнко, С. М. Тихонравов, С. Б. Кочук, К. Ф. Фомичов, Д. А. Шелест // Опубл. 08.06.2022, бюл. № 23. 12с.

ДОДАТОК Б

АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

ЗАТВЕРДЖУЮ



Ректор Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», чл.-кор. НАН України, д.т.н, проф. Євген СОКОЛ

«11» вересня 2023 р.

Акт

впровадження наукових результатів дисертаційної роботи
«Підвищення якості електричної енергії в мережі з сонячними електростанціями в режимі зниження генерованої потужності» на здобуття наукового ступеня доктора філософії здобувача кафедри передачі електричної енергії Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Шелеста Дмитра Андрійовича

Ми, що нижче підписалися, підтверджуємо впровадження результатів дисертаційної роботи «Підвищення якості електричної енергії в мережі з сонячними електростанціями в режимі зниження генерованої потужності» здобувача Шелеста Дмитра Андрійовича в навчальний процес на кафедрі передачі електричної енергії при навчанні здобувачів першого та другого рівнів вищої освіти за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» за освітньою-науковою програмою «Електроенергетика» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», в наступних освітніх компонентах:

1. «Електричні системи та мережі»

Запропоновані в дисертаційній роботі методи підвищення показників якості електричної енергії, яка генерується сонячними електростанціями, відображені в матеріалах лекційних і практичних занять дисципліни «Електричні системи та мережі» при викладанні теми №7 «Вплив режимів роботи електричних систем та мереж на показники якості електричної енергії» (лекція «Зв'язок балансів потуж-

ностей з показниками якості електричної енергії», практичне заняття «Формування схеми електричних з'єднань та обґрунтування режиму роботи електричної мережі відповідно показникам якості електричної енергії»).

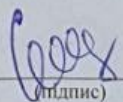
2. «Оптимізація режимів роботи електроенергетичних систем»

Виявлені здобувачем особливості впливу сонячних електростанцій в режимі зниження генерованої потужності на показники якості електричної енергії та баланс реактивної потужності в електричній мережі відображені в лекційних матеріалах дисципліни «Оптимізація режимів роботи електроенергетичних систем» при викладанні теми №14 (лекції «Заходи по зниженню втрат при несиметричних та несинусоїдальних режимах» та «Компенсація реактивної потужності»).

3. «Керування режимами електроенергетичних систем»

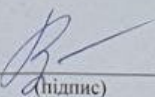
Виявлені здобувачем особливості роботи сонячних електростанцій в режимі зниження генерованої потужності, а саме підвищення рівня реактивної потужності та вищих гармонійних складових струму, відображені в лекційних матеріалах дисципліни «Керування режимами електроенергетичних систем» при викладанні теми №5 «Керування режимами роботи енергосистеми для забезпечення динамічної та статичної стійкості» (лекція №13 «Запобігання порушенням стійкості в енергооб'єднанні» та лекція №14 «Процедура розрахунку граничного режиму енергосистеми»).

Завідувач кафедри
передачі електричної енергії,
д.т.н., професор


(підпис)

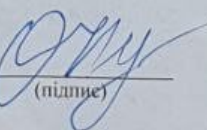
Сергій ШЕВЧЕНКО

д.т.н., професор кафедри
передачі електричної енергії


(підпис)

Вероніка ЧЕРКАШИНА

к.т.н., професор кафедри
передачі електричної енергії


(підпис)

Оксана ДОВГАЛЮК



ТОВ «АКУТЕК»
 IBAN: UA 483808050000000026000618809
 в АТ «Райффайзен Банк АВАЛЬ» МФО 380805
 Код ЄДРПОУ 35348663
 ІПН: 353486620345

ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ
 ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ «АКУТЕК»
 (ТОВ «АКУТЕК»)

вул. Гвардійців Широнінців, 3-А, м. Харків, 61153

тел. (057)720-91-19

Код ЄДРПОУ 35348663

15.04.2024

м. Харків

А К Т

впровадження результатів наукових досліджень дисертаційної роботи Шелеста Дмитра Андрійовича, що виконувалась в Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут».

ТОВ «АКУТЕК», повідомляє, що результати дисертаційної роботи «Підвищення якості електричної енергії в мережі з сонячними електростанціями в режимі зниження генерованої потужності» за авторством Шелеста Дмитра Андрійовича, що подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії, пройшли апробацію, а саме:

1. Методику керування мережевим інвертором напруги, що забезпечує підвищення показників якості електричної енергії в режимі зниження генерованої потужності;
2. Розроблені імітаційні комп'ютерні моделі сонячних електростанцій, що дозволяють проводити дослідження показників якості електричної енергії, проводити визначення втрат потужності в силових перетворювачах сонячних електростанцій, досліджувати та проводити аналіз роботи регуляторів та інші дослідження.

Результати роботи можуть бути впроваджені при розробці автономних інверторів напруги та перетворювачів частоти з покращеними показниками якості вихідної напруги.

Директор ТОВ «АКУТЕК»



Євгеній АНАКІН

61153, м. Харків, вул. Гв. Широнінців, 3А
 (057) 720-91-19

ДОДАТОК В
ВИТЯГ З УЧАСТІ В НАУКОВО-ДОСЛІДНІЙ РОБОТІ

УДК 621.31
УКІПІ
№ДР 0121U109440
Інв. №

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет залізничного транспорту (УкрДУЗТ)
61050, м. Харків, майдан Фейєрбаха, 7
тел. (057) 730-19-37; факс (057) 771-46-83

ЗАТВЕРДЖУЮ

Ректор УкрДУЗТ
докт. техн. наук, професор


Сергій ПАНЧЕНКО
31 грудня 2023 р.




ЗВІТ
ПРО НАУКОВО-ДОСЛІДНУ РОБОТУ

РОЗРОБКА НАУКОВИХ ОСНОВ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ
ЕФЕКТИВНОСТІ ТА ПОКРАЩЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В
ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ
(остаточний)

Декан механіко-енергетичного факультету
докт. техн. наук, професор


Олександр УСТЕНКО
31 грудня 2023 р.

Керівник НДР
доцент кафедри електроенергетики,
електротехніки та електромеханіки,
канд. техн. наук


Олександр ПЛАХТІЙ
31 грудня 2023 р.

Рукопис закінчено 31 грудня 2023 р.

Результати НДР розглянуто на засіданні науково-технічної ради УкрДУЗТ
14 грудня 2023 р., протокол № 7.

Харків – 2023 рік

СПИСОК АВТОРІВ

Керівник НДР

НС, к.т.н.



Олександр ПЛАХТІЙ

(реферат; розділи 1, 2, 3, 4, 5;
висновки; заг. ред.)**Відповідальний виконавець**

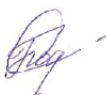
ПНС, к.т.н., доцент



Володимир НЕРУБАЦЬКИЙ

(реферат; вступ; розділи 1, 2, 3, 4, 5;
висновки; заг. ред.)**Виконавці:**

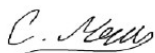
ПНС, д.т.н., доцент



Світлана ПОДНЕБЕННА

(розділи 1, 2)

НС, к.т.н.



Сергій МЯМЛІН

(розділи 3, 4)

НС, к.т.н.



Олександр ШКУРПЕЛА

(розділи 2, 3, 4)

МНС



Денис ГОРДІЄНКО

(розділи 1, 2, 3, 4, 5)

МНС



Артем МАШУРА

(розділи 1, 2)

МНС



Андрій СИНЯВСЬКИЙ

(розділи 1, 2, 3, 4)

МНС



Марина ФІЛІП'ЄВА

(розділи 1, 2, 3, 4)

МНС



Руслан ХАРІН

(розділи 2, 3, 4)

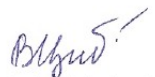
МНС



Григорій ХОРУЖЕВСЬКИЙ

(розділи 1, 2, 3)

МНС



Владислав ЦИБУЛЬНИК

(розділи 1, 2, 3)

МНС



Дмитро ШЕЛЕСТ

(розділи 1, 2, 3)