

Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет

БОМБИК ВАДИМ СЕРГІЙОВИЧ

УДК 621.314.572(043.3)

**СИСТЕМА КЕРУВАННЯ МЕРЕЖЕВИМ БАГАТОРІВНЕВИМ  
ІНВЕРТОРОМ НАПРУГИ**

Спеціальність 05.09.03 – Електротехнічні комплекси та системи

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Вінниця – 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Вінницькому національному технічному університеті,  
Міністерство освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор  
**Гرابко Володимир Віталійович,**  
Вінницький національний технічний університет,  
ректор.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Розен Віктор Петрович,**  
Національний технічний університет України «Київський  
політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,  
завідувач кафедри автоматизації управління  
електротехнічними комплексами;

доктор технічних наук, професор  
**Садовой Олександр Валентинович,**  
Дніпровський державний технічний університет,  
професор кафедри електротехніки та електромеханіки.

Захист відбудеться “30” березня 2018 р. о 10.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 05.052.05 у Вінницькому національному технічному університеті за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ГНК, ауд. 210.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Вінницького національного технічного університету за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95.

Автореферат розісланий “ 28 ” лютого 2018 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради

О. Б. Бурикін

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** За останні роки використання відновлюваних джерел електроенергії значно зросло, зокрема все більшу популярність здобувають сонячні електростанції. Як наслідок, зросло виробництво тонкоплівкових сонячних модулів. Для формування вихідної змінної напруги в якості узгоджувальних пристроїв значного розвитку набули багаторівневі мережеві інвертори напруги, що виготовляються серійно. Основною перевагою багаторівневих інверторів перед однорівневими є покращена форма вихідної напруги, менші втрати в силовій частині та покращена електромагнітна сумісність. Але є також певні недоліки: збільшення кількості силових ключів, ускладнена система керування комутацією та необхідність адаптації до вимог існуючої електроенергетичної системи при використанні їх в межах сонячних електростанцій.

Багаторівневі інвертори напруги при роботі в сонячних електростанціях мають дві основні функції: формування синусоїдального струму та напруги на своєму виході для віддачі в мережу, зменшення рівня гармонік.

На сьогоднішній день існує багато різних систем керування мережевими багаторівневими інверторами напруги. Зокрема, при роботі з сонячним модулем використовуються системи керування із застосуванням алгоритму пошуку точки відбору максимальної потужності сонячним модулем. Для ефективного керування мережовим багаторівневим інвертором напруги дані системи враховують такі параметри сонячного модуля: вихідну напругу, струм, рівень сонячної освітленості, температуру навколишнього середовища та самого модуля. Однак такі системи не забезпечують синхронізацію роботи інвертора з мережею та не враховують параметри мережі (напругу, струм).

Вказані проблеми обумовлюють актуальність наукової задачі, спрямованої на підвищення ефективності роботи системи керування мережовим багаторівневим інвертором напруги при роботі з сонячним модулем та мережею шляхом розробки нових законів керування.

Дослідженню та створенню засобів керування багаторівневим інвертором напруги присвячена велика кількість робіт, авторами яких є: Г. Г. Жемеров, Н. В. Донской, С. Б. Крильцов, А. В. Гейст, Е. Н. Гречко, Д. В. Рожков, К. І. Єрмаков, М. А. Таранов, А. А. Шавьолкін, Т. Б. Гайтова, Г. С. Зінов'єв, К. Corzine, Т. О. Терещенко та багато інших.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Основний зміст роботи складають результати досліджень, що проводились на кафедрі електромеханічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті Вінницького національного технічного університету протягом 2013-2016 років. Науково-дослідна робота проводилась відповідно до наукового напрямку у ролі виконавця за держбюджетними темами «Розробка методів і засобів діагностування силового електрообладнання та керування режимами електричних мереж за реактивною потужністю і якістю електроенергії» (номер державної реєстрації № 0112U001369) та «Інтелектуалізація електроенергетичних систем з відновлювальними джерелами енергії на основі

принципу Гамільтона-Остроградського» (номер державної реєстрації № 0115u001120).

**Мета і задачі дослідження.** Метою дослідження є покращення якості електроенергії та підвищення енергоефективності мережевого багаторівневого інвертора напруги при роботі з сонячним модулем за рахунок вдосконалення системи керування.

Відповідно до вказаної мети необхідно розв'язати такі основні задачі:

- провести аналіз існуючих систем керування мережевим багаторівневим інвертором напруги;

- на основі аналізу систем керування мережевим багаторівневим інвертором напруги розробити закони керування, які дозволяють утримувати режим роботи сонячного модуля в області точки відбору максимальної потужності та враховують значення поточної та заданої напруг мережі й сонячного модуля, задане значення активної потужності з вузла мережі та задане значення поперечної складової струму, а також значення рівня освітленості, температури сонячного модуля та обмеження струму намагнічування трансформатора;

- за запропонованими законами розробити схеми систем керування мережевим багаторівневим інвертором напруги;

- шляхом комп'ютерного моделювання дослідити функціонування розроблених систем керування;

- розробити алгоритми та структуру мікропроцесорного пристрою для реалізації функцій регуляторів системи керування мережевим багаторівневим інвертором напруги;

- оцінити похибки роботи розробленого мікропроцесорного засобу системи керування мережевим багаторівневим інвертором напруги та знайти середній ризик.

**Об'єктом дослідження** в дисертаційній роботі є процеси керування мережевим багаторівневим інвертором напруги при роботі з сонячним модулем та мережею.

**Предмет дослідження** є система керування мережевим багаторівневим інвертором напруги з сонячним модулем.

**Методи дослідження.** Для розв'язання поставлених задач й аналізу прийнятих схемотехнічних та алгоритмічних рішень використані методи: теорії загальної електротехніки для опису процесів, які відбуваються в системі керування мережевим багаторівневим інвертором напруги, теорії автоматичного керування, для розробки законів регулювання поздовжньої та поперечної складових струму мережевого багаторівневого інвертора напруги, теорії схемотехніки та фотоелектроніки для створення електричних та структурних схем системи керування, методи комп'ютерного моделювання для дослідження перехідних процесів, що протікають в досліджуваній системі керування та для підтвердження адекватності розроблених математичних моделей, теорії ймовірностей для знаходження помилок першого і другого роду, аналітичні можливості комп'ютерної алгебри для здійснення розрахунків математичних моделей.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає в тому, що:

- вперше розроблено закон регулювання повздовжньої складової струму мережевого багаторівневого інвертора, який враховує поточну та задану напругу мережі й напругу сонячного модуля, що дозволяє оптимізувати роботу інвертора як зі сторони сонячного модуля, так і з боку мережі за напругою.

- вперше розроблено закон регулювання поперечної складової струму мережевого багаторівневого інвертора, який враховує задане значення активної потужності з вузла мережі та задане значення поперечної складової струму, яка необхідна для роботи інвертора в області точки відбору максимальної потужності, що дозволяє оптимізувати роботу інвертора за частотою;

- вдосконалено математичну модель системи керування мережевим багаторівневим інвертором напруги, що дозволяє враховувати температуру, струм і напругу сонячного модуля, параметри мережі та струм намагнічування трансформатора.

**Практичне значення одержаних результатів:**

- розроблено структурні схеми регуляторів системи керування мережевим багаторівневим інвертором напруги;

- створено комп'ютерні моделі розроблених систем керування мережевим багаторівневим інвертором напруги при роботі з сонячним модулем та мережею у середовищі Matlab Simulink, які дають змогу швидко визначити коефіцієнти для налагодження регуляторів.

- здійснена структурна реалізація схеми системи керування мережевим багаторівневим інвертором напруги в мікропроцесорному виконанні для реалізації функцій регуляторів повздовжньої та поперечної складових струму інвертора, що дозволяє підвищити гнучкість та спростити налагодження запропонованої системи.

Використання одержаних результатів дало можливість розробити та впровадити функціональні схеми систем керування мережевим багаторівневим інвертором напруги, які дозволяють реалізовувати розроблені закони керування, а також алгоритм роботи та структуру мікропроцесорного засобу для реалізації функції регуляторів системи керування мережевим багаторівневим інвертором напруги. Результати, отримані в дисертаційній роботі, впроваджено в ТОВ «Енергоінвест» (акт впровадження від 15.06.2017 р.) та в навчальний процес Вінницького національного технічного університету (акт впровадження від 27.06.2017 р.).

**Особистий внесок здобувача.** Усі результати, які складають основний зміст дисертаційної роботи, отримані автором самостійно. У роботах, опублікованих у співавторстві, автору належать: [1] – розроблено математичну модель автоматичних регуляторів повздовжньої та поперечної складових струму інвертора системи керування мережевим багаторівневим інвертором напруги; [2] – удосконалено математичну модель системи керування мережевим багаторівневим інвертором напруги з врахуванням температури сонячного модуля; [7] – розроблено комп'ютерну модель автоматичних регуляторів повздовжньої та поперечної складових струму інвертора для перевірки адекватності їх роботи; [8] – розроблено алгоритм функціонування

системи керування мережевим багаторівневим інвертором напруги; [9] – вдосконалено систему керування мережевим багаторівневим інвертором напруги з врахуванням обмеження намагнічувального струму трансформатора;

Результати теоретичних досліджень, що викладені у [1] – [9], були отримані у Вінницькому національному технічному університеті.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення роботи та її результати доповідались, обговорювались та були схвалені на таких науково-технічних конференціях: XIII Міжнародній конференції «Контроль і управління в складних системах» (м. Вінниця, 2016 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Техника и технология. Современные тенденции в науке и образовании / Inżynieria i technologia. Współczesne tendencje w nauce i edukacji» (м. Краков, 2016 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Екологічна безпека та відновлювальні джерела енергії» (м. Вінниця, 2016 р.); IV Міжнародній науково-технічній конференції «Оптимальне керування електроустановками» (м. Вінниця, 2017 р.); щорічних науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу, співробітників та студентів університету з участю працівників науково-дослідних організацій та інженерно-технічних працівників підприємств м. Вінниці та області на базі ВНТУ в 2013-2017 роках.

**Публікації.** Основний зміст роботи опублікований в 9 друкованих працях, в тому числі 5 фахових статей у наукових журналах, що входять до переліку ДАК України з яких 1 стаття входить до бібліографічної і реферативної бази даних SCOPUS, а також 3 статті в наукових періодичних журналах України та 1 тези доповіді.

**Структура й обсяг роботи.** Дисертаційна робота складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел (122 найменувань) і 7 додатків. Основний зміст викладений на 109 сторінках друкованого тексту, містить 54 рисунка, 4 таблиці. Загальний обсяг роботи – 153 сторінок.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано мету і задачі. Наведено наукову новизну і практичну цінність отриманих результатів, а також подано відомості щодо апробації роботи, особистого внеску здобувача та публікацій. Зазначено зв'язок роботи з науковими програмами та темами.

У **першому розділі** проведено аналіз систем керування мережевим багаторівневим інвертором напруги при роботі з сонячним модулем та мережею. Обґрунтовано необхідність пошуку нових рішень в цій області. Уточнено задачі наукового дослідження.

На сьогоднішній день існує велике різноманіття систем керування мережевими багаторівневими інверторами напруги, зокрема: системи керування в системах електроприводу; системи керування із застосування алгоритму визначення точки відбору максимальної потужності сонячним модулем та системи керування в фотоелектричних установках.

В системах керування інвертором в системах електроприводу одним із

способів керування інвертором напруги є гістерезисне керування, яке формує на виході інвертора імпульсну напругу із забезпеченням слідкування як за вихідним струмом так і за вихідною напругою. Однак він є менш ефективним порівняно із застосуванням широтно-імпульсної модуляції. Також відомі математичні моделі багаторівневих інверторів, які застосовуються в якості перетворювальних агрегатів регульованих асинхронних електроприводів. Як правило, такі системи керування досліджені для двигунного режиму електроприводу з традиційною для багаторівневих інверторів векторною системою керування, однак в них відсутній аналіз роботи інверторів в генераторному режимі роботи електроприводу, аналіз паралельної роботи на електричну мережу, що підтверджує необхідність проведення досліджень в напрямку розробки систем керування багаторівневими інверторами, орієнтованими на застосування в сонячних електростанціях.

Розглянуто системи керування багаторівневими інверторами напруги із застосування алгоритму визначення точки відбору максимальної потужності сонячним модулем. Вказані системи об'єднує те, що вони використовуються лише для автономних систем, але їх можна налаштувати і для керування мережевими багаторівневими інверторами напруги в фотоелектричних системах.

Системи керування мережевими багаторівневими інверторами напруги в складі фотоелектричної системи відрізняються від усіх інших тим, що вони мають складнішу конструкцію та розширену функціональність. Вони дозволяють здійснювати синхронізацію з мережею та враховувати параметри сонячного модуля. Однак існуючі системи потребують вдосконалення оскільки вони не враховують ряд факторів: температуру сонячного модуля та навколишнього середовища, значення струму намагнічення трансформатора.

У **другому розділі** розроблено закони керування мережевим багаторівневим інвертором напруги, що дозволяє оптимізувати роботу інвертора з сонячним модулем та мережею, враховуючи їх параметри, а також підтримувати роботу сонячного модуля в точці відбору максимальної потужності.

Враховуючи матеріал, викладений в розділі 1, розроблено узагальнену структурну схему системи керування мережевим багаторівневим інвертором напруги (рис. 1).

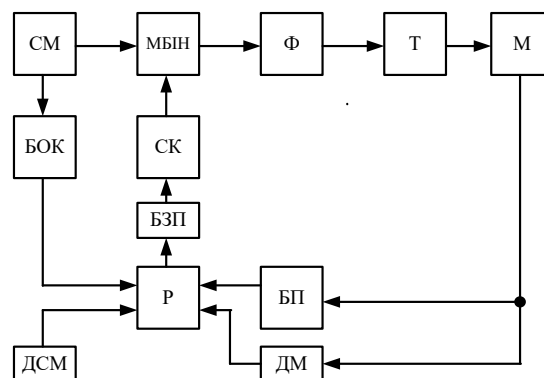


Рисунок 1 – Узагальнена структурна схема системи керування мережевим багаторівневим інвертором напруги

В системах векторного керування інверторами використовується приведення трифазної системи струмів інвертора до ортогональної d-q-системи координат. При цьому вихідна напруга на виході інвертора відповідно встановлюється пропорційною до поздовжньої складової струму  $I_d$ , а вихідна потужність забезпечується відповідним значенням поперечної складової  $I_q$ . При узгодженні роботи багаторівневого інвертора з мережею для відслідковування точки квазіекстремуму вольт-амперної характеристики сонячного модуля поздовжня та поперечна складові струму багаторівневого інвертора будуть забезпечувати напругу та потужність, яка зі сторони входу інвертора зніматиметься з сонячного модуля, а зі сторони виходу буде віддаватись в мережу.

Для забезпечення режиму утримання сонячного модуля в точці максимальної потужності автоматичні регулятори напруги (поздовжньої складової струму інвертора  $I_d$ ) та потужності (поперечної складової струму інвертора  $I_q$ ) будуть функціонувати відповідно до ПІД-закону регулювання та описуються системою рівнянь:

$$\begin{cases} I_{q,\text{зад}} = k_p \cdot k_{\text{в.осв}} \cdot P_{\text{осв}} + k_p \cdot P_{\text{зад}} + k_u \cdot U_{\text{DC}} - k_i \cdot I_{\text{DC}}; \\ U_{\text{rq}} = k_{\text{pq}} \cdot \left( k_{\text{rq.під}} \cdot (I_{q,\text{зад}} - I_q) + \frac{1}{T_{\text{iq}}} \cdot \int_0^t (I_{q,\text{зад}} - I_q) dt + T_{\text{dq}} \cdot \frac{d(I_{q,\text{зад}} - I_q)}{dt} \right); \\ I_{d,\text{зад}} = k_{\text{п.і}} \cdot (U_{\text{зад}} + U_{\text{DC}} \cdot k_{\text{DC.під}} - U_s \cdot k_{\text{s.під}}); \\ U_{\text{rd}} = k_{\text{pd}} \cdot \left( k_{\text{rd.під}} \cdot (I_{d,\text{зад}} - I_d) + \frac{1}{T_{\text{id}}} \cdot \int_0^t (I_{d,\text{зад}} - I_d) dt + T_{\text{dd}} \cdot \frac{d(I_{d,\text{зад}} - I_d)}{dt} \right), \end{cases} \quad (1)$$

де  $k_{\text{pd}}$  та  $k_{\text{pq}}$  – коефіцієнти підсилення регуляторів поздовжньої та поперечної складових струму інвертора відповідно, в.о. (оскільки струм навантаження і напруги задання регуляторів поздовжньої та поперечної складових струму інвертора відносяться до різних електричних кіл, то коефіцієнти встановлюють взаємозв'язок між ними, однак не є еквівалентом електричного опору, а є величиною математичною);  $T_{\text{id}}$  та  $T_{\text{iq}}$  – постійні часу інтегрування регуляторів, с;  $T_{\text{dd}}$  – стала часу диференціювання каналу регулювання  $I_d$ , с;  $U_{\text{rd}}$  та  $U_{\text{rq}}$  – вихідні сигнали регуляторів поздовжньої та поперечної складових струму інвертора, В;  $k_p$  – коефіцієнт з розмірністю провідності для приведення потужності до відповідного значення струму, См;  $k_{\text{в.осв}}$  – ваговий коефіцієнт підсилення значення потужності, що поступає на датчик освітлення, в.о.;  $P_{\text{зад}}$  – задане значення потужності сонячного модуля, Вт;  $k_u$  – коефіцієнт із розмірністю провідності для приведення напруги в каналі завдання регулятора до відповідного значення струму на вході вимірювального органу регулятора, См;  $U_{\text{DC}}$  – напруга на виході датчика напруги сонячного модуля, В;  $k_i$  – коефіцієнт нахилу регулювальної характеристики, в.о.;  $I_{\text{DC}}$  – значення струму яке поступає на БОК з виходу датчика струму, А;  $k_{\text{rq.під}}$  – коефіцієнт підсилення П-складової вихідної напруги  $U_{\text{rq}}$ , в.о.;  $k_{\text{п.і}}$  – коефіцієнт приведення сигналу напруги до струму, См;  $U_{\text{зад}}$  – задане



значення напруги, яке повинен підтримувати сонячний модуль, В;  $U_{DC}$  – значення напруги на виході датчика напруги, В;  $k_{DC,під}$  – коефіцієнт підсилення напруги з виходу датчика напруги, в.о.;  $U_s$  – середнє значення напруги мережі, В;  $k_{s,під}$  – коефіцієнт підсилення значення напруги мережі, в.о.;  $k_{rd,під}$  – коефіцієнт підсилення П-складової напруги  $U_{rd}$ , в.о.

Розроблено функціональну схему системи керування мережевим інвертором з внутрішніми контурами регулювання струмів  $I_d$  та  $I_q$ . Оскільки гармоніки нижчого порядку сильно впливають на роботу інвертора, то є сенс встановити L-фільтр між виходом інвертора напруги та мережею. Враховуючи вище описане, структура внутрішнього контуру системи керування багаторівневим інвертором та його силова частина матиме вигляд, наведений на рис. 2 (на прикладі трирівневого інвертора).

На рис. 2: ДО – датчик освітленості; ДН – датчик вихідної напруги сонячного модуля; ДС – датчик струму сонячного модуля; БОК – блок обчислення квазіекстремуму; VT1-VT12 – IGBT-транзистори багаторівневого мережевого інвертора напруги; Т – трансформатор.

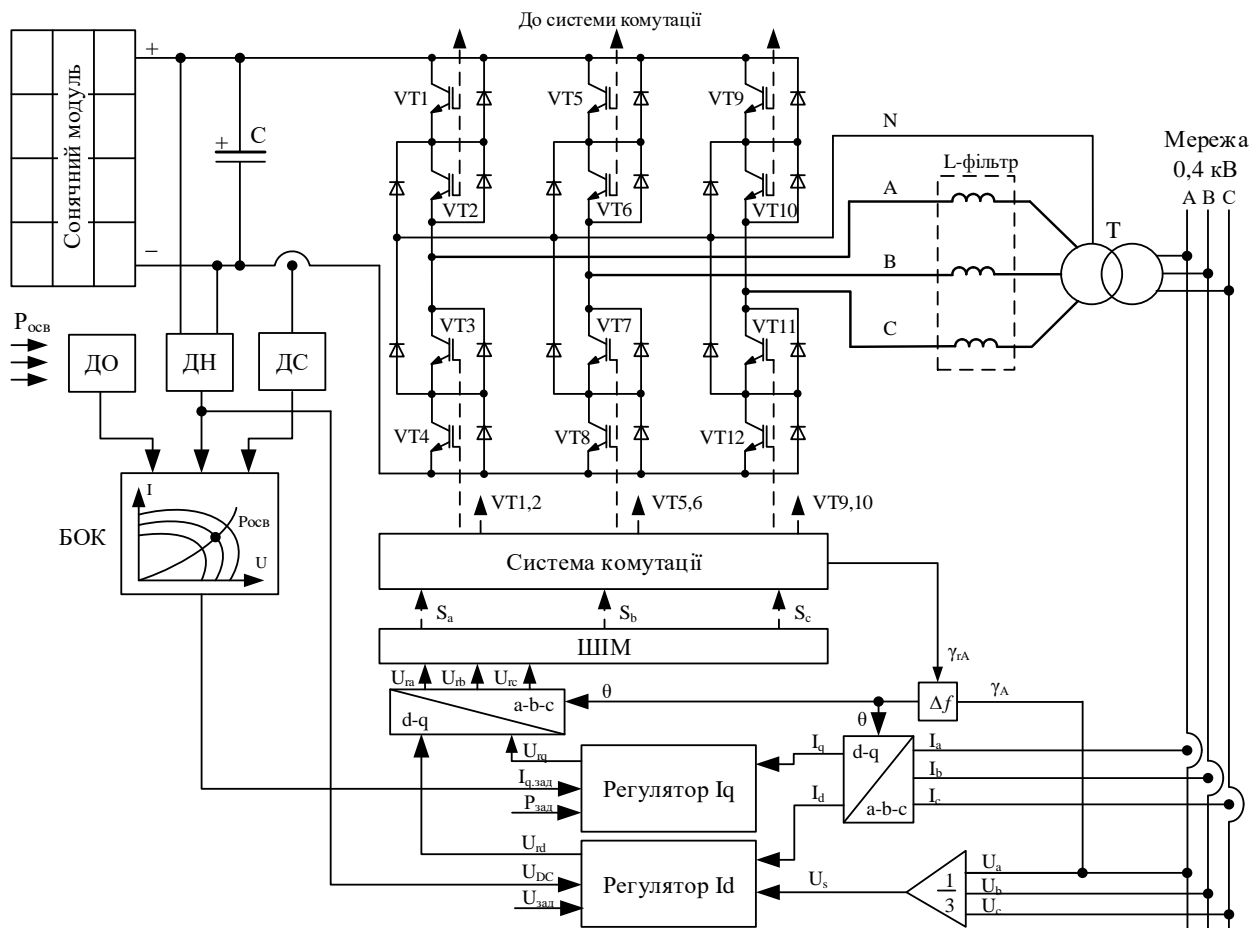


Рисунок 2 – Функціональна схема трирівневого мережевого інвертора з внутрішніми контурами регулювання струмів  $I_d$  та  $I_q$

Датчик освітленості безперервно вимірює значення сонячної іррадіації та формує на своєму виході відповідний сигнал напруги.

Блок обчислення квазіекстремуму (БОК) обчислює координати області точки відбору максимальної потужності та формує сигнал завдання за струмом  $I_{q, \text{зад}}$  для регулятора поперечної складової  $I_q$  струму інвертора. Датчик вихідної напруги сонячного модуля формує сигнал завдання за напругою  $U_{DC}$  для регулятора повздовжньої складової  $I_d$  струму інвертора.

Зворотні зв'язки вказаних регуляторів реалізуються шляхом перетворення із ортогональної системи "d-q" в трифазну систему "a-b-c" (прямого перетворення Кларка) та відповідно до кута електромагнітного навантаження інвертора  $\theta$ .

Трансформатор застосовується для гальванічної розв'язки між мережевим багаторівневим інвертором напруги та мережею.

Зворотнє перетворення із ортогональної системи "d-q" в трифазну систему "a-b-c" здійснюється відповідно зворотного перетворення Кларка.

Регулятори системи керування працюють у відповідності до системи (1).

Для роботи інвертора використовується векторна просторова ШІМ.

Температура сонячного модуля є також важливим параметром, який необхідно враховувати. Залежність потужності, яку може видати сонячний модуль на мережевий інвертор при роботі із фактичною вихідною напругою при різних значеннях температури сонячного модуля показана на рис. 3.

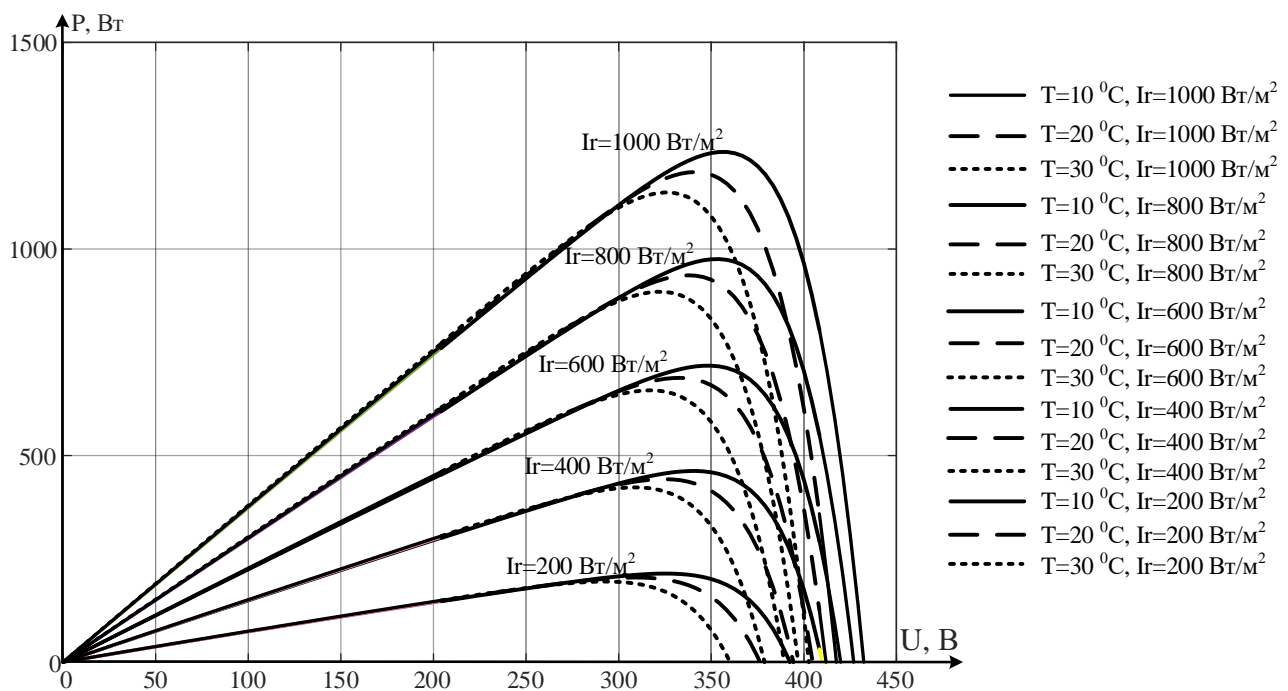


Рисунок 3 – Залежність потужності, яку може видати сонячний модуль на мережевий інвертор при роботі із фактичною вихідною напругою при різних значеннях температури сонячного модуля

З огляду на це, математична модель, яка описана системою рівнянь (1), потребує уточнення:

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{q,зад} = k_p \cdot k_{в.осв} \cdot P_{осв} + k_p \cdot P_{зад} + k_u \cdot U_{DC} - k_i \cdot I_{DC}; \\ U_{rq} = k_{pq} \cdot \left( k_{rq,під} \cdot (I_{q,зад} - I_q) + \frac{1}{T_{iq}} \cdot \int_0^t (I_{q,зад} - I_q) dt + T_{dq} \cdot \frac{d(I_{q,зад} - I_q)}{dt} \right); \\ I_{d,зад} = k_{п.і} \cdot \left( U_{зад} + U_{DC} \cdot k_{DC,під} - U_s \cdot k_{s,під} + k_t \cdot \left( \frac{T}{T_{різ}} \right)^2 \right); \\ U_{rd} = k_{pd} \cdot \left( k_{rd,під} \cdot (I_{d,зад} - I_d) + \frac{1}{T_{id}} \cdot \int_0^t (I_{d,зад} - I_d) dt + T_{dd} \cdot \frac{d(I_{d,зад} - I_d)}{dt} \right); \end{array} \right. \quad (2)$$

де  $k_t$  – коефіцієнт підсилення значення температури з виходу датчика температури, В;  $T$  – значення температури сонячної батареї,  $C^0$ ;  $T_{різ}$  – різниця температур між сонячною батареєю та навколишнім середовищем,  $C^0$ .

Також необхідно зауважити, що за великих збурень мережі за напругою (просідання, провали тощо) регулятор поздовжнього струму намагатиметься компенсувати його, збільшуючи уставку інвертора по поздовжній складовій струму, що може стати причиною насичення магнітної системи трансформатора та різкого збільшення намагнічуючого струму трансформатора, який до того ж має несинусоїдну форму. З огляду на це математична модель, яка описана системою рівнянь (2), з врахуванням уточнення, може бути представлена у вигляді:

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{q,зад} = k_p \cdot k_{в.осв} \cdot P_{осв} + k_p \cdot P_{зад} + k_u \cdot U_{DC} - k_i \cdot I_{DC}; \\ U_{rq} = k_{pq} \cdot \left( k_{rq,під} \cdot (I_{q,зад} - I_q) + \frac{1}{T_{iq}} \cdot \int_0^t (I_{q,зад} - I_q) dt + T_{dq} \cdot \frac{d(I_{q,зад} - I_q)}{dt} + k_t \cdot \frac{T}{T_{різ}} \right); \\ I_{d,зад} = k_{п.і} \cdot \left( U_{зад} + U_{DC} \cdot k_{DC,під} - U_s \cdot k_{s,під} + k_t \cdot \left( \frac{T}{T_{різ}} \right)^2 - U_{\Phi} \right); \\ U_{rd} = k_{pd} \cdot \left( k_{rd,під} \cdot (I_{d,зад} - I_d) + \frac{1}{T_{id}} \cdot \int_0^t (I_{d,зад} - I_d) dt + T_{dd} \cdot \frac{d(I_{d,зад} - I_d)}{dt} \right); \end{array} \right. \quad (3)$$

де  $k_t$  – коефіцієнт підсилення значення температури з виходу датчика температури, В;  $T$  – значення температури сонячної батареї,  $C^0$ ;  $T_{різ}$  – різниця температур між сонячною батареєю та навколишнім середовищем,  $C^0$ ;  $U_{\Phi}$  – вихідна напруга датчика магнітного потоку трансформатора:

$$U_{\Phi} = k_{\Phi} \cdot \Phi, \quad (4)$$

де  $k_{\Phi}$  – коефіцієнт приведення магнітного потоку до напруги;  $\Phi$  – магнітний потік.

Враховуючи вище описане та структуру системи керування, яка показана на рис. 2, структура внутрішнього контуру системи керування багаторівневим інвертором та його силова частина матиме вигляд, наведений на рис. 4.

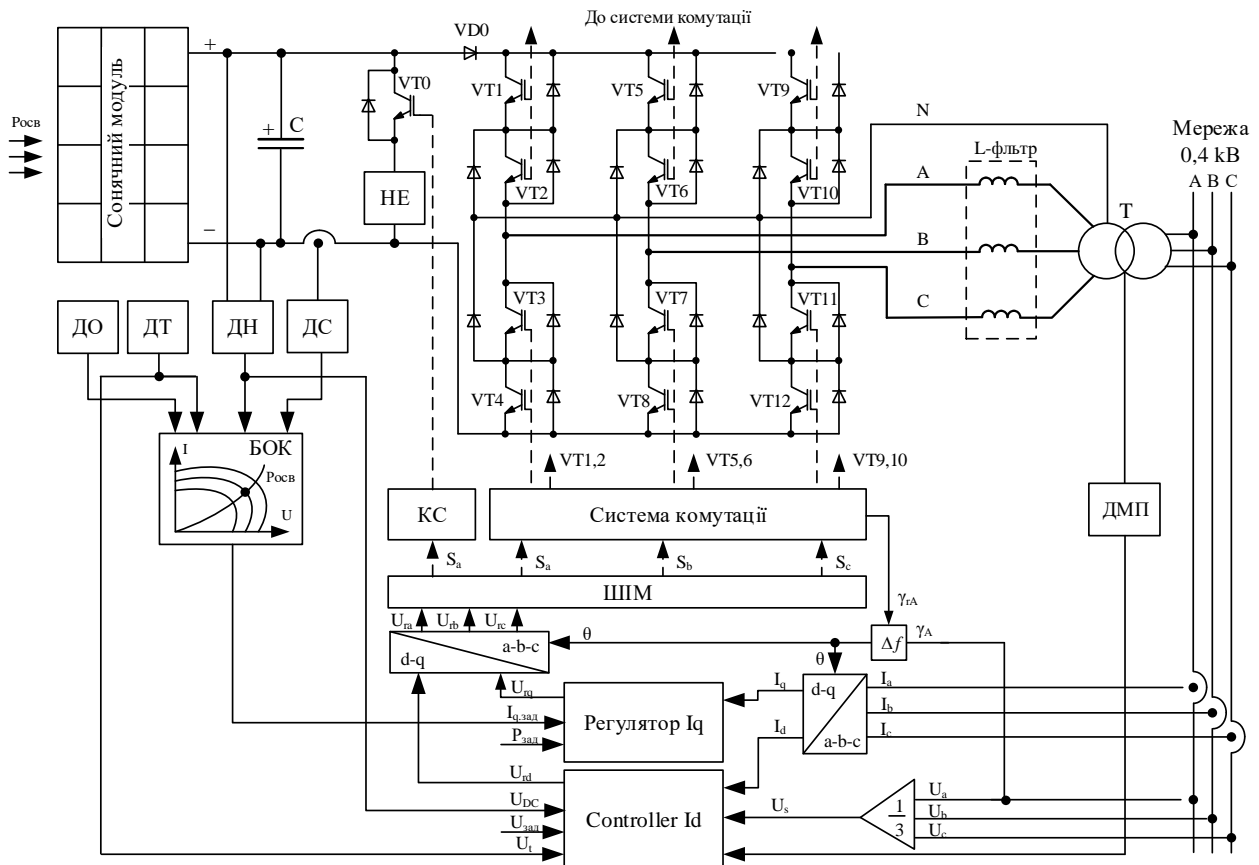


Рисунок 4 – Функціональна схема системи керування мережевим інвертором з врахуванням обмеження намагнічувального струму

На рис. 4: НЕ – накопичувач енергії; КС – контролер скиду; ДМП – датчик магнітного потоку трансформатора.

Датчик магнітного потоку трансформатора ДМП на своєму виході видає сигнал напруги, пропорційний рівню намагнічення активної частини трансформатора.

Контролер скиду КС (див. рис. 4) активується вихідним сигналом  $S_0$  модуля широтно-імпульсної модуляції ШІМ з відповідною шпаруватістю у тому випадку, коли сонячний модуль генерує надлишкову потужність, а його слід утримувати в точці відбору максимуму потужності без відхилення вхідної напруги від області допустимих значень. Надлишкова потужність накопичується в накопичувачі енергії НЕ, при чому він може бути різного типу: електромашинний, тепловий, гідроакумуючий тощо.

У **третьому розділі** розроблено комп'ютерні моделі системи керування мережевим багаторівневим інвертором напруги, досліджено роботу системи, визначено оптимальні налаштування автоматичних регуляторів повздожньої та поперечної складових струму інвертора.

Результати моделювання для ПІД регуляторів повздожньої та поперечної складових струму інвертора, задане та фактичне значення рівня освітленості, вихідний струм та напруга сонячної батареї, а також значення температури навколишнього середовища представлені на рис. 5.

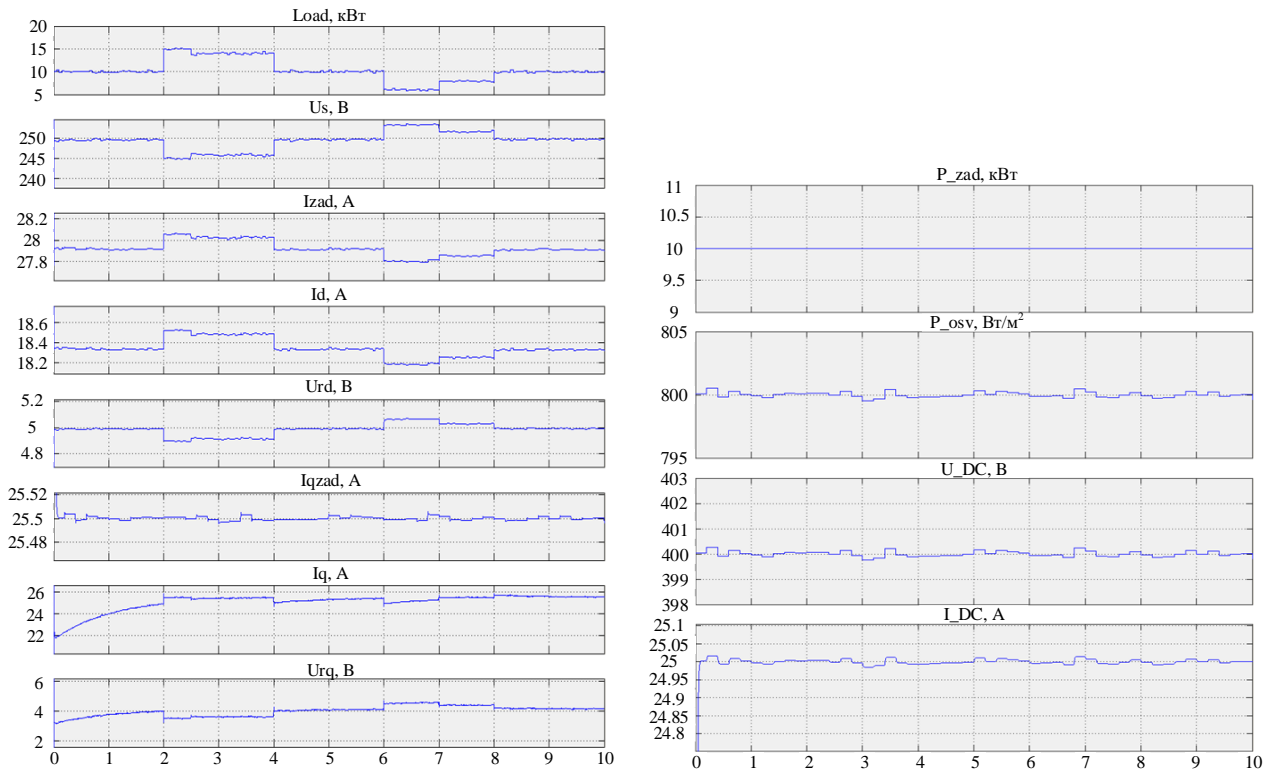


Рисунок 5 – Результати моделювання для ПІ регуляторів поєздовжньої та поперечної складових струму інвертора

Провівши моделювання системи керування багаторівневим мережевим інвертором напруги при роботі з сонячним модулем та мережею отримано графіки перехідних процесів вихідної напруги мережевого багаторівневого інвертора напруги, графіки перехідних процесів струму та напруги на виході трансформатора, активної та реактивної потужностей для різних режимів роботи, які представлено на рис. 6 – 8.

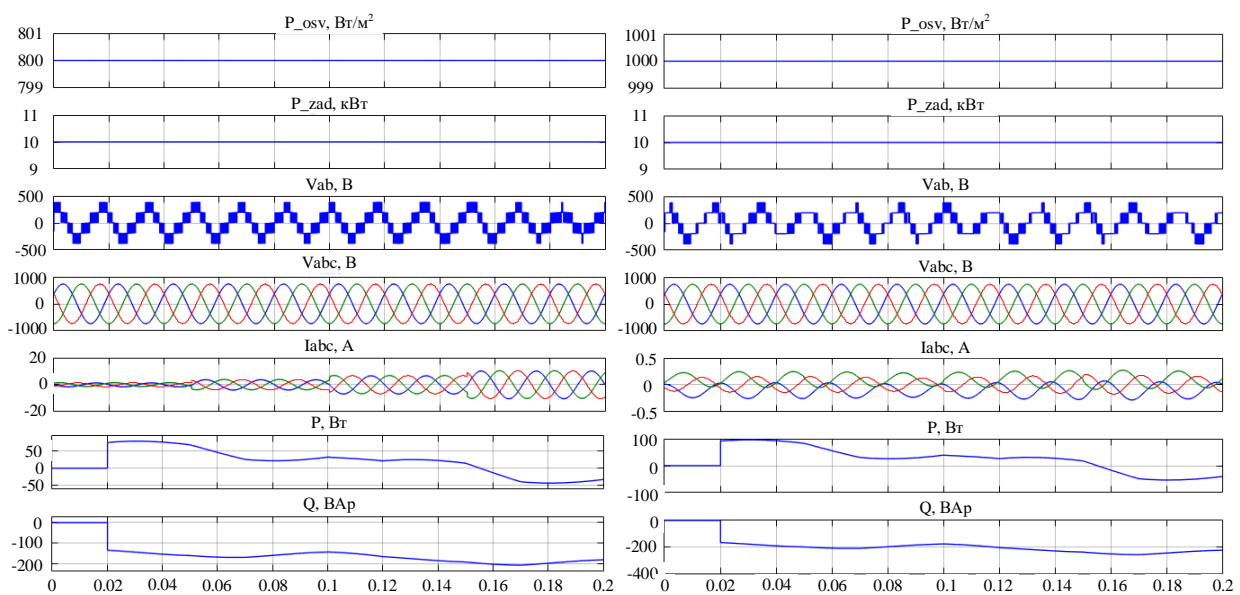


Рисунок 6 – Графіки перехідних процесів системи керування багаторівневим мережевим інвертором напруги при різних рівнях освітленості

Проаналізувавши графіки представлені на рис. 6, можна зробити висновок, що рівень сонячної освітленості впливає на вихідну потужність, яку може видати сонячний модуль. Однак миттєві значення струмів на виході інвертора відрізняються за амплітудою та несиметричні, що пояснюється відсутністю фільтра на виході інвертора.

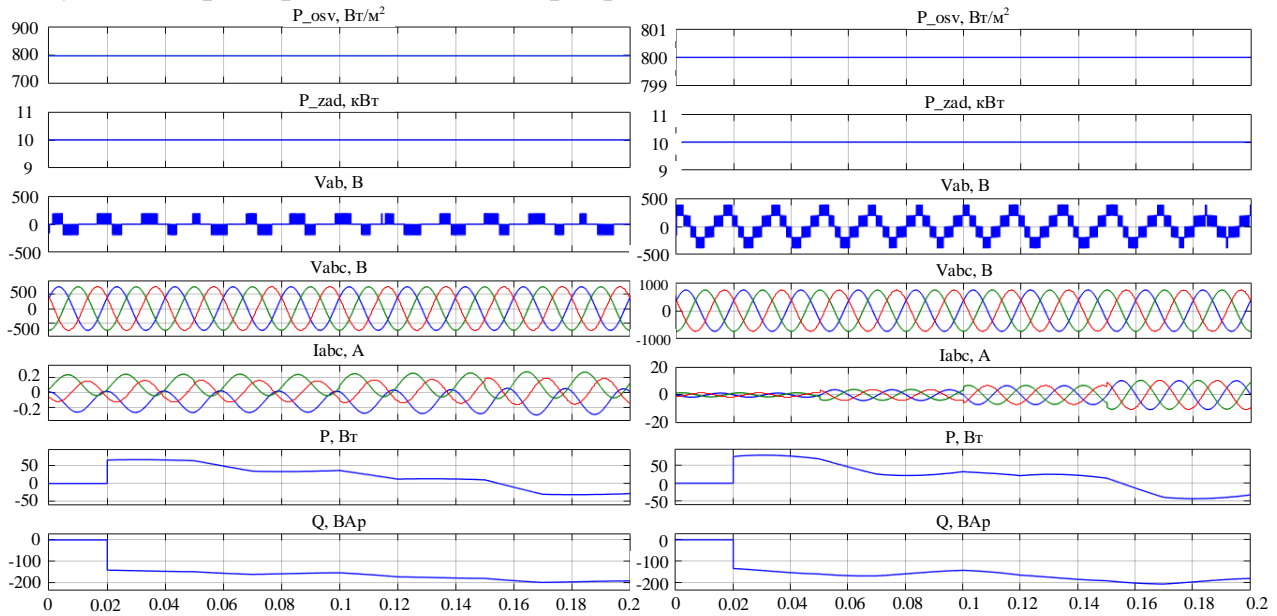


Рисунок 7 – Графіки перехідних процесів системи керування багаторівневим мережевим інвертором напруги при різних налаштуваннях регуляторів

Різні налаштування регуляторів також впливають на роботу системи керування мережевим багаторівневим інвертором напруги. Як видно з рис. 7, неправильне налаштування регуляторів призводить до того, що IGBT транзистори неправильно комутуються і напруга на виході інвертора виходить дворівнева, а також струми на виході інвертора несиметричні.

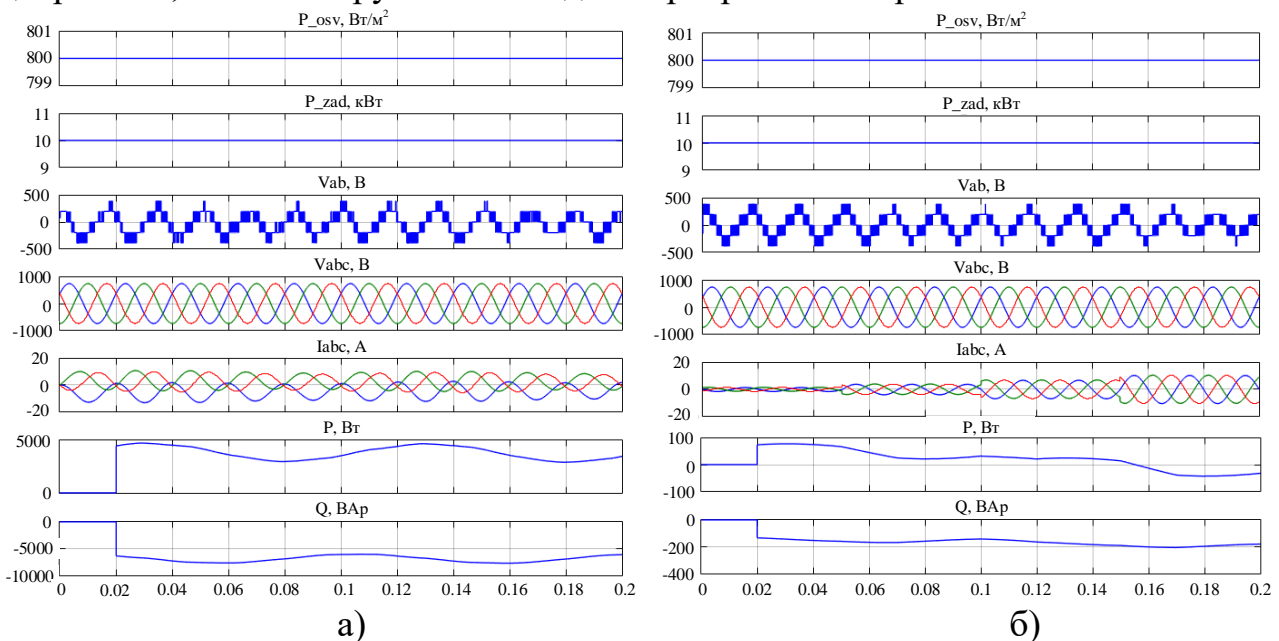


Рисунок 8 – Графіки перехідних процесів системи керування багаторівневим мережевим інвертором напруги з некомпенсованим фільтром (а) та фільтром з автоматичною компенсацією (б)

З рис. 8 видно, що без застосування фільтра миттєві значення струмів на виході інвертора відрізняються за амплітудою та несиметричні, а самі найкращі графіки перехідних процесів системи виходять при оптимальних налаштуваннях регуляторів та із застосуванням фільтра з автоматичною компенсацією.

Також здійснено комп'ютерне моделювання систем керування мережевим багаторівневим інвертором напруги, які працюють відповідно до розроблених математичних моделей.

У **четвертому розділі** запропоновано мікропроцесорну реалізацію запропонованої системи керування мережевим багаторівневим інвертором напруги, розроблено алгоритми функціонування, а також програмне забезпечення запропонованої мікропроцесорної системи керування. Здійснено оцінку помилок першого і другого роду каналу вимірювання температури та знайдено значення мінімального ризику.

Здійснено реалізацію мікропроцесорного пристрою системи керування мережевим багаторівневим інвертором напруги, структурна схема якого наведена на рис. 9.

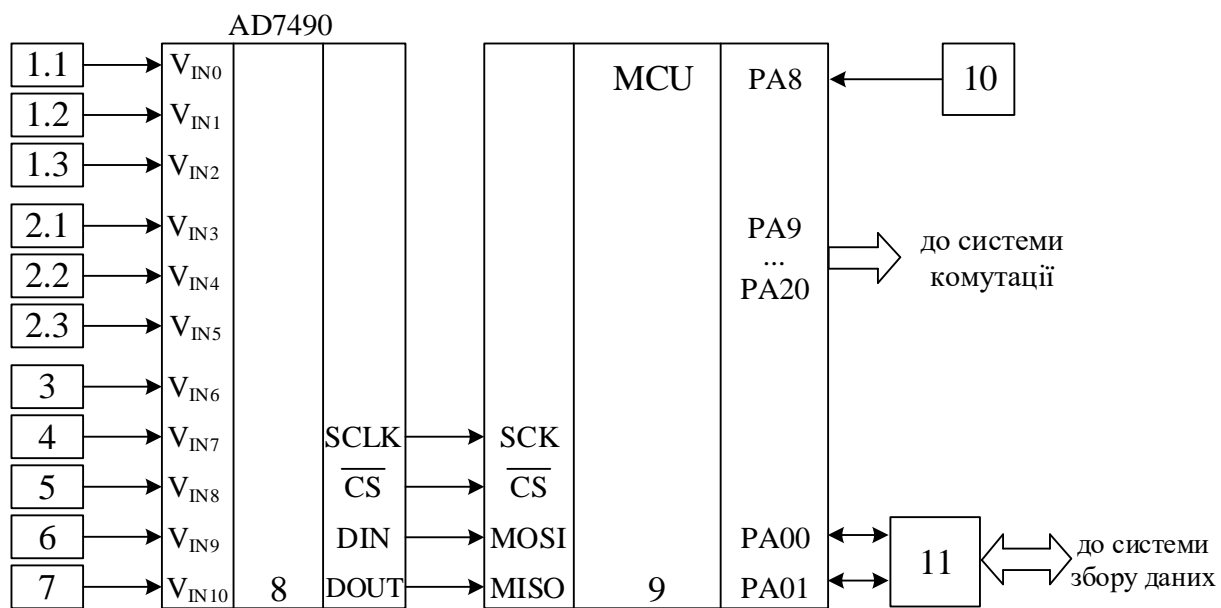


Рисунок 9 – Структурна схема мікропроцесорного пристрою системи керування мережевим багаторівневим інвертором напруги

На рис. 9: 1.1-1.3 – датчики для вимірювання струмів в трифазній мережі; 2.1-2.3 – датчики для вимірювання напруг в трифазній мережі; 3 – датчик рівня освітленості; 4 – датчик струму сонячного модуля; 5 – датчик напруги сонячного модуля; 6 – датчик температури; 7 – датчик магнітного потоку трансформатора; 8 – зовнішній аналого-цифровий перетворювач; 9 – цифровий сигнальний процесор; 10 – блок вибору режиму роботи мікропроцесорного пристрою; 11 – перетворювач сигналу.

Для реалізації запропонованої системи керування мережевим багаторівневим інвертором сонячного модуля використаємо, наприклад, 32-

розрядний цифровий сигнальний процесор AT32UC3L032, який для вирішення поставленої задачі має в своєму складі 48 програмованих каналів портів вводу/виводу та іншу периферію. Процесор має оптимізовану структуру команд. Для перетворення вихідних сигналів з усіх датчиків застосуємо високошвидкісний аналого-цифровий перетворювач AD7490.

Блок вибору режиму роботи 10 дозволяє вибрати один з п'яти можливих режимів роботи мікропроцесорного пристрою, а саме:

- 1) без зворотніх зв'язків від сонячного модуля та мережі;
- 2) з врахуванням параметрів сонячного модуля (напруги, струму, рівня освітленості);
- 3) з врахуванням параметрів мережі;
- 4) з врахуванням параметрів сонячного модуля та мережі;
- 5) з врахуванням обмеження струму намагнічування трансформатора.

Перетворювач сигналу 11 призначений для перетворення сигналу для передачі даних з мікропроцесорного пристрою до персонального комп'ютера диспетчерського пункту керування.

Узагальнений алгоритм роботи мікропроцесорного пристрою наведений на рис. 10.

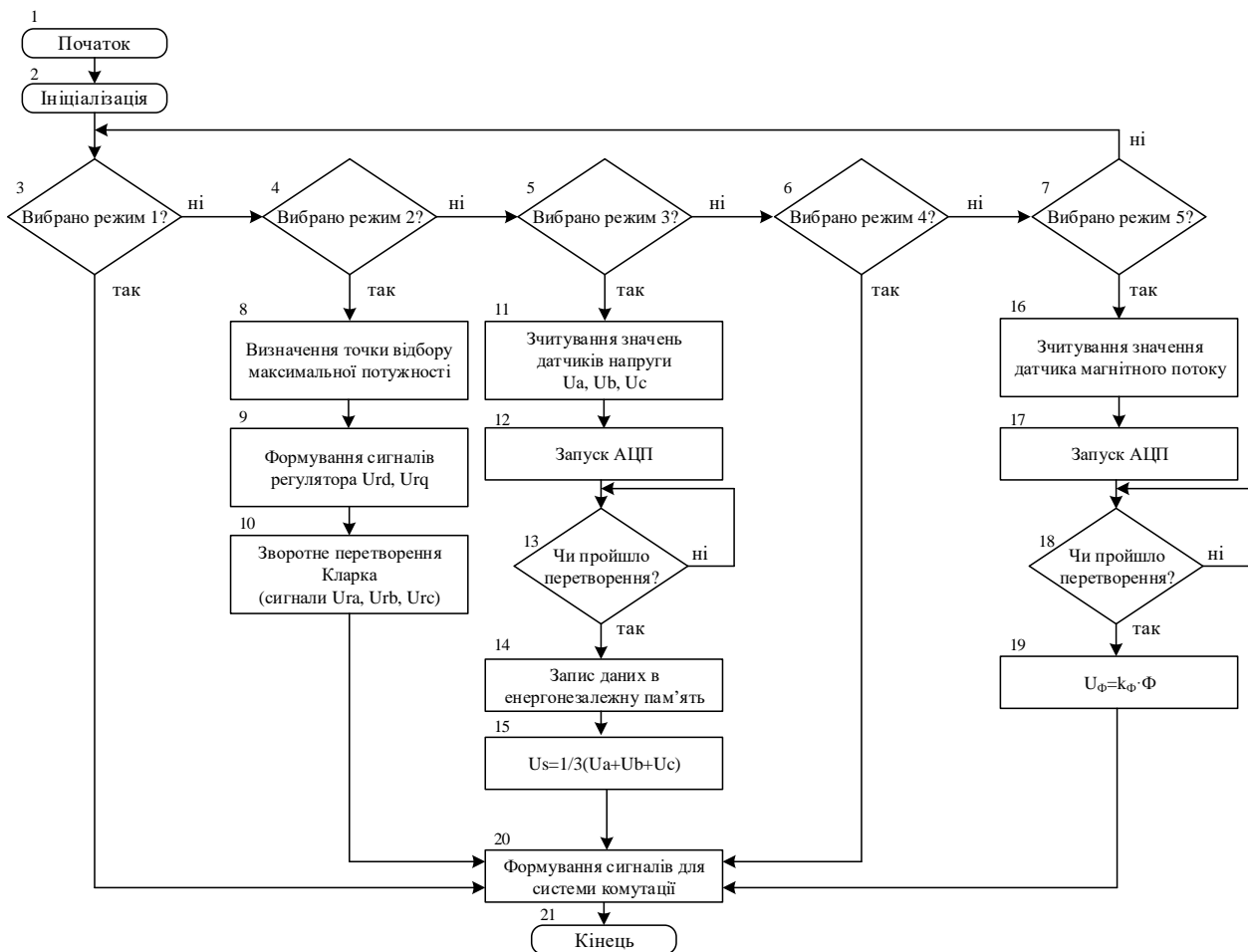


Рисунок 10 – Узагальнений алгоритм роботи мікропроцесорного пристрою

Алгоритм роботи пристрою містить такі складові:



- в блоках 3 – 7 реалізована перевірка, який режим роботи пристрою обрано;
- в блоці 8 реалізований алгоритм визначення точки відбору максимальної потужності сонячним модулем;
- в блоках 9 – 10 відбувається формування вихідних сигналів регуляторів поперечної та повздовжньої складових струму інвертора та сигналів, які необхідні для проведення векторної ШІМ;
- в блоці 11 відбувається зчитування значень датчиків напруги трифазної мережі;
- в блоках 12 – 14 відбувається перетворення аналогових сигналів в цифрову форму, здійснюється перевірка чи відбулось перетворення та запис даних в енергонезалежну пам'ять;
- в блоці 15 визначається середнє значення напруги мережі;
- в блоці 16 відбувається зчитування датчика магнітного потоку трансформатора;
- в блоках 17-18 відбувається перетворення аналогових сигналів в цифрову форму та відбувається перевірка чи пройшло перетворення;
- в блоці 19 відбувається приведення виміряного значення магнітного потоку трансформатора до відповідного вихідного значення напруги датчика магнітного потоку трансформатора;
- в 20 блоці реалізований алгоритм формування сигналів для системи комутації.

Графічні залежності помилок першого і другого роду від величини середньоквадратичного відхилення приведено на рис. 11.

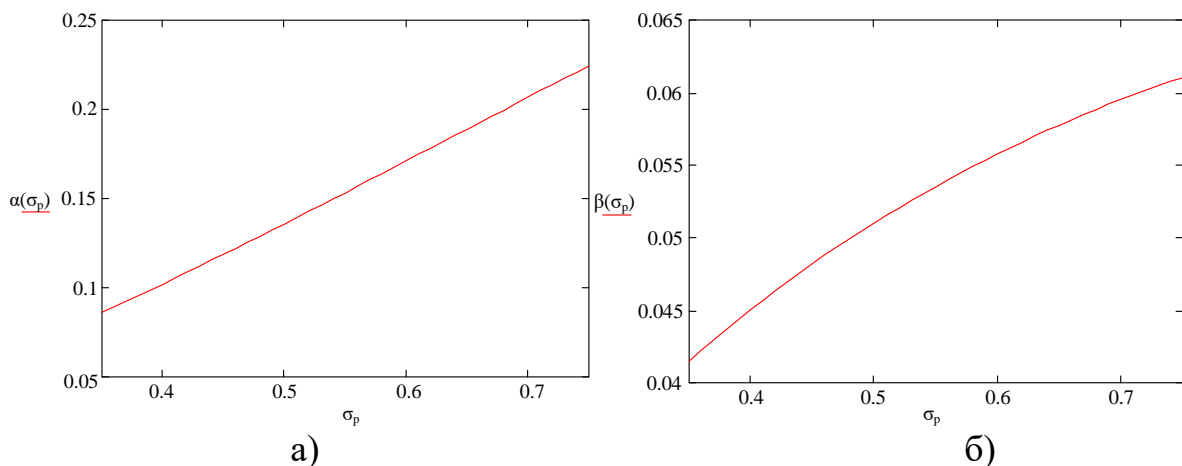


Рисунок 11 – Номограми визначення помилок:

а) першого роду; б) другого роду

В роботі визначено величини ризиків, визначених за критеріями мінімального ризику, методу мінімальної кількості помилкових рішень та за методом мінімакса. Приклад розв'язання задачі за критеріями мінімального ризику, методу мінімальної кількості помилкових рішень та за методом мінімакса наведений в додатках дисертаційної роботи.

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі наведено теоретичне узагальнення та нове вирішення наукової задачі розробки системи керування мережевим багаторівневим інвертором напруги, що відрізняється від відомих законом керування, який враховує температуру, рівень освітленості, струм та напругу сонячного модуля, а також фазні струми та напруги мережі, що дозволяє створити умови для покращення якості електроенергії та підвищення енергоефективності мережевого багаторівневого інвертора напруги.

Основні наукові та практичні результати дисертаційної роботи є такими:

*У галузі теоретичних та експериментальних досліджень:*

1. Проаналізовано існуючі системи керування інверторами напруги в складі різних електротехнічних комплексів, зокрема: в складі електроприводу, із застосуванням алгоритму визначення точки відбору максимальної потужності та при роботі з фотоелектричними установками. Визначено, що вони спрямовані окремо на керування інвертором в складі відповідного електротехнічного комплексу та не вирішують задачу керування інвертором при роботі з сонячним модулем з врахуванням його параметрів та мережі.

2. Розроблено закони керування системи керування мережевим багаторівневим інвертором напруги з врахуванням параметрів сонячного модуля та мережі.

3. Вдосконалено математичні моделі автоматичних регуляторів напруги (повздовжньої складової струму інвертора  $I_d$ ) та потужності (поперечної складової струму інвертора  $I_q$ ) для забезпечення режиму утримання сонячного модуля в точці максимальної потужності шляхом врахування температури сонячного модуля, струму намагнічування.

4. Здійснено оцінку похибок помилок першого і другого роду при визначенні температури сонячного модуля, а також розраховано значення середнього ризику.

*У галузі практичного використання:*

1. За розробленими законами керування системи керування мережевим багаторівневим інвертором напруги розроблено структурні схеми системи керування з використанням промислової елементної бази, що дозволяє розширити їх функціональність.

2. Побудовані комп'ютерні моделі розроблених систем керування мережевим багаторівневим інвертором напруги при роботі з сонячним модулем та мережею у середовищі Matlab Simulink, які дозволяють швидко визначити оптимальні параметри для налаштування регуляторів та роботу систем в цілому.

3. Здійснено структурну реалізацію схеми в мікропроцесорному виконанні для реалізації функцій регуляторів повздовжньої та поперечної складових струму інвертора системи керування мережевим багаторівневим інвертором напруги, що дозволяє підвищити гнучкість та спростити налагодження запропонованої системи.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

- [1] С. М. Левицький, та В. С. Бомбик, “Система керування мережевим багаторівневим інвертором напруги”, *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*, № 1 (33), с. 75 – 81, 2016.
- [2] V. Grabko, S. Levitskiy, V. Bombyk, W. Wojcik, O. Notra, and B. Imanbek, “Mathematical control system of grid-tied multilevel voltage inverter”, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 93 NR 3, pp. 133-139, 2017.
- [3] В. С. Бомбик, “Комп’ютерне моделювання системи керування мережевим багаторівневим інвертором напруги”, *Наукові праці Вінницького національного технічного університету*, 2016. [Електронний ресурс] Доступно: <http://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/478/477>
- [4] В. С. Бомбик, «Система керування мережевим багаторівневим інвертором напруги з обмеженням намагнічувального струму трансформатора», *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*, №3, с. 61-69, 2017.
- [5] В. С. Бомбик, «Мікропроцесорний пристрій системи керування мережевим багаторівневим інвертором напруги з урахуванням обмеження струму намагнічування трансформатора», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 5, с. 108-114, 2017.
- [6] В. С. Бомбик, “Аналітична модель МРРТ-функції системи керування інвертором напруги сонячної електростанції”, *Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету (технічні науки)*, № 2 (29), с. 35-46, 2016.
- [7] В. В. Грабко, С. М. Левицький, та В. С. Бомбик, “Комп’ютерна модель системи керування мережевим багаторівневим інвертором напруги”, *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, № 2, с. 230-237, 2016.
- [8] С. М. Левицький, та В. С. Бомбик, “Мікропроцесорний пристрій системи керування мережевим багаторівневим інвертором напруги”, *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, № 3 (56), с. 70-76, 2016.
- [9] В. В. Грабко, С. М. Левицький, та В. С. Бомбик, “Система керування мережевим багаторівневим інвертором напруги сонячного модуля”, на *Міжнародній науково-технічній конференції «Екологічна безпека та відновлювальні джерела енергії»*, м. Вінниця, с. 41-45, 2017.

## АНОТАЦІЯ

**Бомбик В. С. Система керування мережевим багаторівневим інвертором напруги.** – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 «Електротехнічні комплекси та системи». – Вінницький національний технічний університет, Вінниця, 2017.

Дисертаційна робота присвячена вдосконаленню системи керування мережевим багаторівневим інвертором напруги при роботі з сонячним модулем та мережею, що дозволяє покращити якість електроенергії та підвищити ефективність роботи інвертора.

З цією метою в роботі розроблені математичні моделі системи керування мережевим багаторівневим інвертором напруги при роботі з сонячним модулем та розроблені структурні схеми систем для їх реалізації, що поєднують задачі утримання режиму роботи сонячного модуля в точці відбору максимальної потужності, що дозволяє збільшити продуктивність сонячного модуля, привести у відповідність баланс згенерованої сонячним модулем та спожитої електричної потужності в режимі реального часу. Розроблені математичні моделі враховуються параметри сонячного модуля (струм, напруга, температура), параметри мережі (струм, напруга), температура навколишнього середовища, а також струм намагнічування трансформатора.

На основі розроблених математичних моделей побудовані комп'ютерні моделі для перевірки адекватності роботи регуляторів повздожньої та поперечної складових струму інвертора та здійснено моделювання, яким підтверджено адекватність розроблених математичних моделей. Також визначено оптимальні параметри для налаштування регуляторів системи керування багаторівневим мережевим інвертором напруги.

В дисертаційній роботі розроблено структуру мікропроцесорного пристрою системи керування мережевим багаторівневим інвертором напруги сонячного модуля, який дозволяє утримувати режим роботи сонячного модуля в області відбору максимальної потужності, з врахуванням температури сонячного модуля. Для даного пристрою розроблено алгоритм його роботи, який дозволяє реалізувати різні режими його функціонування. Здійснено оцінку похибок помилок першого і другого роду при визначенні температури сонячного модуля, яка за номограмами та з врахуванням вартості цін для відповідних помилок дозволяє визначити розмір середнього ризику.

Ключові слова: інвертор напруги, система керування, сонячний модуль, мережа, активна потужність, температура сонячного модуля, математична модель, аналітична залежність, алгоритм, мікроконтролер, комп'ютерна модель.

## ABSTRACT

**Bombyk V.S. The control system of grid-tied multilevel voltage inverter. – Manuscript.**

The dissertation on the receipt of scientific degree of candidate of engineering sciences in speciality 05.09.03 “Electrotechnical complexes and systems”. – Vinnitsya National Technical University, 2017.

The thesis is devoted to improving the control system grid-tied multilevel voltage inverter while working with solar module and the grid, which allow improving the quality of electricity and increasing the efficiency of the inverter.

The work presents the existing control systems of grid-tied multilevel voltage inverter. Such systems are particular analyzed: control systems of multilevel voltage

inverter in electric drive, control systems of multilevel voltage inverter with using of maximum power point tracking algorithm by solar module and control systems of grid-tied multilevel voltage inverter of photovoltaic module. Their advantages and disadvantages, the necessity of finding new solutions in this area are shown.

Control law for grid-tied multilevel inverter of solar module and modified structure for his realization is created in the thesis. It allows to hold the solar module operation in terms of maximum power point tracking, which increases productivity. An improved model of the longitudinal component of the current controller of the inverter is proposed, which considers current and desired voltage and voltage of the solar modules to optimize the inverter from both sides of the solar module and from the network by voltage. A model of the transverse component of the current controller of the inverter is proposed, which allows a given value of active power and network node set transverse component of the current, which is necessary for the inverter selection in terms of maximum power, allowing you to optimize work of inverter by frequency. A control law of grid-tied multilevel voltage inverter is improved, which takes into account the temperature of the solar module and the environment, and transformers magnetizing current. Based on developed mathematical models, computer models for testing the adequacy of regulators of longitudinal and transverse inverter components were built. Optimal parameters for regulators configuration of control system of grid-tied multilevel voltage inverter were identified.

The structure of microprocessor device for control system of grid-tied multilevel voltage inverter of solar module is developed in the thesis, that allows to hold the solar module operation in the selection of maximum power, taking into account the temperature of the solar module. An algorithm that allows to realize different operating modes was developed for this device.

Keywords: voltage inverter, control system, solar module, grid, active power, temperature of solar module, mathematical model, analytical dependence algorithm, microcontroller, computer model.

## АННОТАЦИЯ

**Бомбик В. С. Система управления сетевым многоуровневым инвертором напряжения.** – Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы». – Винницкий национальный технический университет, Винница, 2017.

Диссертационная работа посвящена совершенствованию системы управления сетевым многоуровневым инвертором напряжения при работе с солнечным модулем и сетью, позволяющей улучшить качество электроэнергии и повысить эффективность работы инвертора.

В работе проанализированы существующие системы управления многоуровневым инвертором напряжения. В частности сделан обзор: систем управления многоуровневым инвертором напряжения в системах электропривода, систем управления многоуровневыми инверторами

напряжения с применением алгоритма определения точки отбора максимальной мощности солнечным модулем и систем управления сетевым многоуровневым инвертором напряжения фотоэлектрической установки. Проведено сравнение всех преимуществ и недостатков рассмотренных систем. Установлено, что системы управления многоуровневыми инверторами напряжения, которые применяются в качестве преобразовательных агрегатов регулируемых асинхронных электроприводов исследованы для двигательного режима электропривода с традиционной для многоуровневых инверторов векторной системой управления, однако в них отсутствует анализ работы инверторов в генераторном режиме работы электропривода, анализ параллельной работы на электрическую сеть, что подтверждает необходимость проведения исследований в направлении разработки систем управления многоуровневыми инверторами, ориентированными на применение в солнечных электростанциях. При анализе систем управления многоуровневыми инверторами напряжения с применением алгоритма определения точки отбора максимальной мощности солнечным модулем установлено, что их объединяет то, что в них применяется метод определения точки отбора максимальной мощности солнечным модулем. Однако, он используется только для автономных систем, но это показывает, что можно использовать данный метод для управления сетевыми многоуровневыми инверторами напряжения фотоэлектрических систем. Проанализировав системы управления сетевыми многоуровневыми инверторами напряжения фотоэлектрических установок можно прийти к выводу, что такие системы рассматриваются только с синхронизацией с сетью, но без учета параметров солнечного модуля. Обоснована необходимость поиска новых решений в этой области.

На основе проведенного анализа систем управления многоуровневым инвертором напряжения, разработан закон управления многоуровневым сетевым инвертором солнечной электростанции и усовершенствована структурная схема системы для его реализации, сочетающая задачи удержания режима работы солнечного модуля в точке отбора максимальной мощности, что позволяет увеличить производительность солнечного модуля, привести в соответствие баланс сгенерированной солнечным модулем и потребленной электрической мощности в режиме реального времени. Также предложена усовершенствованная модель регулятора продольной составляющей тока инвертора, которая учитывает текущее и заданное напряжение сети и напряжение солнечного модуля, что позволяет оптимизировать работу инвертора как со стороны солнечного модуля, так и со стороны сети по напряжению. Предложена усовершенствованная модель регулятора поперечной составляющей тока инвертора, которая учитывает заданное значение активной мощности из узла сети и заданное значение поперечной составляющей тока, которая необходима для работы инвертора в области точки отбора максимальной мощности, что позволяет оптимизировать работу инвертора по частоте. Усовершенствован закон управления многоуровневым сетевым инвертором солнечной электростанции и усовершенствована структурная схема системы для его реализации, сочетающая задачи удержания режима работы

солнечного модуля в точке отбора максимальной мощности. Данный закон учитывает влияние температуры на солнечный модуль. На основе разработанных законов также усовершенствован закон управления многоуровневым сетевым инвертором и структурная схема для его реализации, учитывающий ток намагничивания трансформатора.

На основе разработанных математических моделей построены компьютерные модели для проверки адекватности работы регуляторов продольной и поперечной составляющих тока инвертора, которые учитывают текущее и заданное напряжение сети и напряжение солнечного модуля и осуществлено компьютерное моделирование системы управления сетевым многоуровневым инвертором напряжения при работе с солнечным модулем, которая решает задачи удержания режима работы солнечного модуля в точке отбора максимальной мощности, что позволяет увеличить производительность солнечного модуля, привести в соответствие баланс сгенерированной солнечным модулем и потребленной электрической мощности в режиме реального времени. Также определены оптимальные параметры для настройки регуляторов системы управления многоуровневым сетевым инвертором напряжения.

В диссертационной работе разработана структура микропроцессорного устройства системы управления сетевым многоуровневым инвертором напряжения солнечного модуля, который позволяет удерживать режим работы солнечного модуля в области отбора максимальной мощности, с учетом температуры солнечного модуля. Для данного устройства разработан алгоритм его работы, который позволяет реализовать различные режимы его работы. Также предложены алгоритмы поиска точки отбора максимальной мощности, в зависимости от температуры солнечного модуля. Осуществлена оценка погрешностей ошибок первого и второго рода при определении температуры солнечного модуля, которая по номограммам и с учетом стоимости цен для соответствующих ошибок позволяет определить размер среднего риска.

Ключевые слова: инвертор напряжения, система управления, солнечный модуль, сеть, активная мощность, температура солнечного модуля, математическая модель, аналитическая зависимость, алгоритм, микроконтроллер, компьютерная модель.

Підписано до друку 26.02.2018 р. Формат 29.7×42¼

Наклад 100 прим. Зам. № 2018-053.

Віддруковано в інформаційному редакційно – видавничому центрі

Вінницького національного технічного університету.

м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95. Тел.:65-18-06

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

серія ДК №3516 від 01.07.2009 р.