

Міністерство освіти і науки України
Донбаська державна машинобудівна академія

Лемещенко Руслан Сергійович

УДК 621.314.26

**РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ
АВТОНОМНОГО ІНВЕРТОРА НАПРУГИ, ЯКА ВРАХОВУЄ
ДИСКРЕТНИЙ ХАРАКТЕР ЗМІНЕННЯ КООРДИНАТ ВЕКТОРА
ВИХІДНОЇ НАПРУГИ У ВІДПОВІДНОСТІ ДО АЛГОРИТМУ
МОДУЛЯЦІЇ**

Спеціальність 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Автореферат магістерської роботи

Краматорськ 2019

Робота виконана на кафедрі електромеханічних систем автоматизації Донбаської державної машинобудівної академії Міністерства освіти і науки України, м. Краматорськ.

Науковий керівник:

кандидат технічних наук, доцент
Клімченкова Наталія Валеріївна,
Донбаська державна машинобудівна
академія, доцент кафедри
«Електромеханічні системи
автоматизації».

Рецензент:

Захист відбудеться «__» грудня 2019 р. о ____ годині на засіданні державної екзаменаційної комісії за спеціальністю 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» в Донбаській державній машинобудівній академії на кафедрі ЕСА за адресою: 84313, м. Краматорськ, бульвар Машинобудівників, 39, 2-й корпус, ауд. 2133.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми.

Регульований електропривод на базі асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором (АД) в силу своїх техніко-економічних показників є в даний час одним з найбільш перспективних для застосування в умовах сучасного промислового виробництва. Сучасні системи управління, побудовані на цифрових мікроконтролерах, дозволяють ефективно управляти як роз'єднаними асинхронними електроприводами (АЕП), призначеними для загальнопромислового застосування, так і замкнутими АЕП спеціального застосування, що характеризуються високими точністю і швидкістю. Поява високопродуктивних мікропроцесорних засобів дало можливість ефективно реалізувати складні закони управління АД, які раніше вважалися нераціональними.

В останні роки спостерігалася помітна зміна пріоритетів, яким віддавали перевагу розробники АЕП при вирішенні завдань управління. На перший план було висунуто питання поліпшення споживчих властивостей електроприводу. Вирішувалися завдання створення зручності для користувача, автоматичного пристосування до нових умов застосування АЕП, реалізації поглиблених контролю, діагностики та захисту. Пророблялися питання реалізації автоматичного самонастроювання і оптимізації параметрів, уніфікованого введення-виведення даних та команд, групового управління, індикації. Іншими словами, визначальне значення мало забезпечення сервісних функцій і введення в АЕП елементів «інтелекту». Сама постановка цих питань раніше, при «старих» технічних засобах, була практично безперспективною.

Тема магістерської роботи є актуальною, оскільки вона направлена на вдосконалення алгоритмів функціонування трифазних силових перетворювачів.

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

Вибір напрямку досліджень здійснено у відповідності до Закону України від 11.07.2001 р. № 2623-III «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки» та змінам до цього закону від 09.09.2010 р. № 2519-VI (2519-17), а також постанови Президії Національної Академії Наук України від 22.10.2010 р. № 294 «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки на період до 2020 року».

Робота виконана в рамках держбюджетної теми кафедри «Електромеханічні системи автоматизації» ДДМА, «Розробка та дослідження електронних та електромеханічних систем перетворення електричної енергії з використанням сучасних цифрових засобів автоматизації».

Мета і задачі дослідження.

Метою роботи є розробка та дослідження математичної моделі автономного інвертора напруги, яка враховує дискретний характер змінення координат вектора вихідної напруги у відповідності до алгоритму модуляції.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішувалися наступні задачі:

– здійснена розробка математичної моделі автономного інвертора напруги, яка враховує дискретний характер змінення координат вектора вихідної напруги;

– розглянуто основні підходи щодо моделювання асинхронних двигунів;

– здійснено обґрунтування запропонованої спрощеної моделі електромагнітного перетворення (ЕМП) у вигляді системи магнітопов'язаних витків;

– побудована модель системи «АІН-ЕМП-механічна частина АЕП» в циліндричних координатах.

Об'єктом дослідження силові напівпровідникові перетворювачі, зокрема автономні інвертори напруги.

Предметом є характер змінення координат вектора вихідної напруги автономного інвертору напруги у відповідності до алгоритму модуляції.

Методи досліджень – методи математичного моделювання; чисельні методи обчислень, методи теорії автоматичного керування, методи математичної статистики.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що:

1. Розроблено алгоритм роботи моделі автономного інвертора напруги при деякій його модифікації може бути використаний в якості основи при програмній реалізації модулятора на базі мікропроцесора, що працює в реальному часі.

2. Виконані аналітичні розрахунки, які дозволяють підвищити адекватність математичної моделі автономного інвертора напруги, яка враховує дискретний характер змінення координат вектора вихідної напруги у відповідності до алгоритму модуляції.

Практичне значення отриманих результатів. Розроблений алгоритм роботи моделі АІН при деякій його модифікації може бути

використаний в якості основи при програмній реалізації модулятора на базі мікропроцесора, що працює в реальному часі. Відмінність від відомих підходів полягає в тому, що поточний час буде відмірятись програмованим таймером-лічильником з досить дрібним кроком від нуля не в межах періоду розгляду процесів T , а в межах кожного періоду модуляції $T_{\text{ц}}$ (зміна його вмісту матиме місце на кожному такті роботи цифрового модулятора). У разі перевищення вмістом таймера-лічильника величини $T_{\text{ц}}$ здійснюється його скидання і запускається наступний цикл модуляції. Цикл може повторюватися необмежену кількість разів, вихід з нього здійснюється тільки з приходом зовнішнього сигналу заборони модуляції (наприклад, при виключенні живлення електроприводу або спрацьовуванні будь-якого із захистів).

Особистий внесок здобувача полягає у розробці та дослідженні математичної моделі автономного інвертора напруги, яка враховує дискретний характер змінення координат вектора вихідної напруги у відповідності до алгоритму модуляції.

Апробація результатів магістерської роботи. Результати досліджень обговорювались на щорічній науковій конференції студентів ДДМА, м. Краматорськ, 2019 р.

Публікація результатів наукових досліджень.

Матеріали магістерської роботи опубліковано в науковій статті у фаховому виданні «Вісник Донбаської державної машинобудівної академії» (перереєстровано – Наказ МОН України № 326 від 04.04.2018).

Структура і обсяг магістерської роботи. Магістерська робота складається із вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел. Загальний обсяг магістерської роботи складається із 107 сторінок (90 сторінок основної частини), 20 рисунків, 17 таблиць, 1 додатка. Список використаних джерел містить 30 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Вступ містить обґрунтування актуальності теми дослідження, її основну мету, наукову новизну і практичну цінність отриманих результатів.

У **першому розділі** здійснено побудову моделі автономного інвертору напруги у полярних координатах.

При проведенні імітаційних експериментів в ряді випадків важливе врахування впливу дискретності формування напруги статора за допомогою автономного інвертора напруги (АІН) на процес електромеханічного перетворення енергії в АЕП. Поставимо за мету розробити такий алгоритм функціонування імітаційної моделі АІН, який можна було б використовувати в якості основи при програмній реалізації цифрового модулятора, керуючого ключовими елементами силового перетворювача в реальному масштабі часу.

На керуючі входи АІН подаються сигнали завдання полярних координат усередненого вектора напруги статора. На виході АІН формується трифазна система дискретно змінюваних напруг статора АД. Стандартний підхід до побудови імітаційної моделі АІН передбачає аналогічну організацію за своїми інформаційними входами-виходами – модель повинна передавати на свої інформаційні виходи значення дискретно змінюваних трифазних напруг, розрахованих за певним алгоритмом на основі вхідної інформації про значення полярних координат заданого еквівалентного вектора напруги. Однак такий підхід призводить до досить громіздкої структури моделі системи «АІН-АД», оскільки потрібно або введення додаткових блоків фазних перетворень для переходу до двофазної системи напруг статора, або ускладнення структури моделі двигуна при її поданні в природних трифазних координатах (збільшення числа диференціальних рівнянь, гармонійні коефіцієнти в рівняннях).

Розроблений автором алгоритм роботи моделі АІН при деякій його модифікації може бути використаний в якості основи при програмній реалізації модулятора на базі мікропроцесора, що працює в реальному часі. Відмінність полягає в тому, що поточний час буде відмірятись програмованим таймером-лічильником з досить дрібним кроком від нуля не в межах періоду розгляду процесів T , а в межах кожного періоду модуляції $T_{\text{ц}}$ (зміна його вмісту матиме місце на кожному такті роботи цифрового модулятора). У разі перевищення вмістом таймера-лічильника величини $T_{\text{ц}}$ здійснюється його скидання і запускається наступний цикл модуляції. Цикл може повторюватися необмежену кількість разів, вихід з нього здійснюється тільки з приходом зовнішнього сигналу заборони модуляції (наприклад, при виключенні живлення електроприводу або спрацьовуванні будь-якого із захистів).

У **другому розділі** проведено дослідження основних підходів щодо моделювання асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором при частотному керуванні.

Розробка алгоритмів управління АЕП і рішення задач ідентифікації його змінних безпосереднім чином пов'язані з необхідністю інтерпретації процесів, що протікають в електромеханічному перетворювачі енергії (ЕМП), за допомогою його спрощених моделей, прикладами яких можуть служити, зокрема, різного роду схеми заміщення АД. Ця необхідність продиктована перш за все початковою складністю АД як об'єкта автоматичного регулювання в плані його математичного опису.

Дана обставина виправдовує перехід від аналізу динамічних процесів в реальну багатофазну машину до аналізу процесів в еквівалентному двохфазному ЕМП, який отримав назву узагальненої електричної машини. Саме такий підхід знаходить найширше застосування в теорії АЕП в даний

час. Спрощена модель АД у вигляді узагальненої електричної машини вважається еквівалентною реальному двигуну з урахуванням зазначених припущень.

У **третьому розділі** створюється модель електромеханічного перетворення енергії в циліндричних координатах.

Вихідні змінні моделі АІН в полярних координатах можуть передаватися безпосередньо на вхід моделі системи «ЕМП – механічна частина АЕП» в циліндричних координатах. При цьому вектор напруги статора не потрібно піддавати яким би то не було фазним і координатним перетворенням. В цьому плані інтеграція цих двох моделей в єдину модель системи «АІН – ЕМП – механічна частина АЕП» в циліндричних координатах представляється зручною і органічною.

Розроблена в роботі модель системи «АІН – ЕМП – механічна частина АЕП» в циліндричних координатах може використовуватися як елемент для побудови моделей замкнутих і розімкнутих систем електроприводу з частотним керуванням, результати імітаційних експериментів з якими будуть враховувати дискретний характер формування напруги на статорі електричної машини.

Розроблена модель АІН відрізняється тим, що на її виході безпосередньо формуються дискретно змінювані полярні координати результуючого вектора вихідної напруги відповідно до алгоритму просторово-векторної модуляції. Показана можливість застосування розробленого алгоритму функціонування моделі для програмної реалізації цифрового модулятора, що працює в реальному масштабі часу.

У **четвертому розділі** здійснено техніко-економічне обґрунтування виконаних досліджень. Розраховано оціночні результати вкладу магістра у наукові дослідження по магістерському проекту.

У **п'ятому розділі** наведено результати аналізу з охорони праці, а саме аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів, заходи щодо забезпечення безпечних умов праці і дії при надзвичайних ситуаціях.

ВИСНОВКИ

Розроблено модель АІН, яка відрізняється тим, що на її виході безпосередньо формуються дискретно змінювані полярні координати результуючого вектора вихідної напруги відповідно до алгоритму просторово-векторної модуляції. Показана можливість застосування розробленого алгоритму функціонування моделі для програмної реалізації цифрового модулятора, що працює в реальному масштабі часу.

Обґрунтовано підхід, що полягає в заміні двохфазної узагальненої моделі ЕМП еквівалентним їй елементарним аналогом, що представляє собою систему двох магнітопов'язаних витків.

В результаті перетворення тензорних рівнянь системи «ЕМП – механічна частина АЕП» отримана її математична модель в циліндричних координатах. Вхідні в її склад рівняння математичної моделі ЕМП в полярних координатах описують процеси в обґрунтованій спрощеній моделі у вигляді системи двох витків.

За рахунок вибору в якості основи системи відліку кутових координат, плавно обертового вектора основної гармоніки напруги статора всі змінні моделі ЕМП в полярних координатах виявляються неперіодичними сигналами. Модель призначена для розробки алгоритмів ідентифікації та керування АД, призначених для мікропроцесорної реалізації.

Розроблені моделі силового перетворювача в полярних координатах і системи «ЕМП – механічна частина АЕП» в циліндричних координатах органічно інтегровані в єдину модель системи «АІН – ЕМП – механічна частина АЕП» в циліндричних координатах, призначену для проведення імітаційних експериментів з урахуванням дискретного характеру формування напруги на статорних обмотках двигуна.

АНОТАЦІЯ

Лемещенко Р.С. Розробка та дослідження математичної моделі автономного інвертора напруги, яка враховує дискретний характер змінення координат вектора вихідної напруги у відповідності до алгоритму модуляції.

Магістерська робота за спеціальністю 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», Донбаська державна машинобудівна академія, Краматорськ, 2019.

Магістерська робота складається із вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел. Загальний обсяг магістерської роботи складається із 107 сторінок (90 сторінок основної частини), 20 рисунків, 17 таблиць, 1 додатка. Список використаних джерел містить 30 найменувань.

Метою роботи є розробка та дослідження математичної моделі автономного інвертора напруги, яка враховує дискретний характер змінення координат вектора вихідної напруги у відповідності до алгоритму модуляції

Основні наукові результати магістерської роботи:

Розроблений алгоритм роботи моделі автономного інвертора напруги при деякій його модифікації може бути використаний в якості основи при програмній реалізації модулятора на базі мікропроцесора, що працює в реальному часі. Відмінність від відомих підходів полягає в тому, що поточний час буде відмірятись програмованим таймером-лічильником з досить дрібним кроком від нуля не в межах періоду розгляду процесів T , а в межах кожного періоду модуляції $T_{\text{ц}}$ (зміна його вмісту матиме місце на кожному такті роботи цифрового модулятора). У разі перевищення вмістом таймера-лічильника величини $T_{\text{ц}}$ здійснюється його скидання і запускається наступний цикл модуляції. Цикл може повторюватися необмежену кількість разів, вихід з нього здійснюється тільки з приходом зовнішнього сигналу заборони модуляції (наприклад, при виключенні живлення електроприводу або спрацьовуванні будь-якого із захистів).

Ключові слова: АВТОНОМНИЙ ІНВЕРТОР НАПРУГИ, МОДУЛЯЦІЯ, ТАЙМЕР-ЛІЧИЛЬНИК, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ

ANNOTATION

Lemeschenko R.S. Development and research of a mathematical model of a standalone voltage inverter that takes into account the discrete nature of changing the coordinates of the output voltage vector in accordance with the modulation algorithm.

Master's work in specialty 141 – "Power engineering, electrical engineering and electromechanics", Donbas State Engineering Academy, Kramatorsk, 2019.

The master's thesis consists of an introduction, five sections, general conclusions, a list of used sources. The total volume of the master's thesis consists of 107 pages (90 pages of the main part), 20 figures, 17 tables, 1 appendix. The list of sources used contains 30 items.

The purpose of this work is to develop and study a mathematical model of a standalone voltage inverter, which takes into account the discrete nature of changing the coordinates of the vector of the output voltage in accordance with the modulation algorithm

The main scientific results of the master's work:

The developed algorithm of the autonomous voltage inverter model with some modification can be used as a basis for program implementation of the modulator based on a microprocessor, which works in real time. The difference from the known approaches is that the current time will be measured by a programmable timer with a sufficiently small step from zero, not within the period of consideration of processes T , but within each period of modulation T_c (change of its content will take place at each clock cycle of the digital modulator). In case of exceeding the contents of the timer-counter of the value of T_c , it is reset and the next modulation cycle is started. The cycle can be repeated for an unlimited number of times, the output of it is carried out only with the arrival of an external signal of the modulation prohibition (for example, when the power supply of the actuator is switched off or any of the protection activates).

Keywords: INDEPENDENT VOLTAGE INVERTER, MODULATION, TIMER-COUNTER, MATHEMATICAL MODEL

Лемещенко Руслан Сергійович

**РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ
АВТОНОМНОГО ІНВЕРТОРА НАПРУГИ, ЯКА ВРАХОВУЄ
ДИСКРЕТНИЙ ХАРАКТЕР ЗМІНЕННЯ КООРДИНАТ ВЕКТОРА
ВИХІДНОЇ НАПРУГИ У ВІДПОВІДНОСТІ ДО АЛГОРИТМУ
МОДУЛЯЦІЇ**

Підп. до друку

Формат 60×90/16

Офсетний друк

Умов. друк. арк. – 0,58

Тираж 1 прим.

Замовлення №

ДДМА, 84313, м. Краматорськ, вул. Академічна, 72