

ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ КОМПЛЕКСИ ТА СИСТЕМИ

УДК 621.313

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2024.69.083>

АСИНХРОННІ ГЕНЕРАТОРИ В АВТОНОМНИХ ДЖЕРЕЛАХ ЖИВЛЕННЯ ЗВАРЮВАЛЬНОЇ ДУГИ. СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ

Л.І. Мазуренко, докт. техн. наук, О.В. Джура, канд. техн. наук, М.О. Шихненко, канд. техн. наук, О.А. Білик

Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Берестейській, 56. Київ, 03057, Україна
e-mail: mlins@ied.org.ua

Стаття спрямована на узагальнення результатів дослідження асинхронних генераторів (АГ) автономних джерел живлення зварювальної дуги (ДЖЗД), отриманих у відділі електромеханічних систем Інституту електродинаміки НАНУ. Розглянуто запропоновану класифікацію АГ автономних зварювальних систем, розроблені математичні моделі, результати розрахункових та експериментальних досліджень таких систем із АГ із конденсаторним збудженням і некерованим випрямлячем, у коло постійного струму якого підключено високочастотні інвертори, широтно-імпульсні регулятори або напівмостові інвертори, а також генератори з вентильним і вентильно-конденсаторним збудженням. Розглянуто особливості проектування, експериментальні зразки джерел живлення зварювальної дуги з АГ. Визначено напрямки подальших досліджень. Бібл. 42, рис. 5.

Ключові слова: джерело живлення зварювальної дуги; асинхронний генератор; конденсаторне, вентильне, вентильно-конденсаторне збудження; напівмостовий і високочастотний інвертори; широтно-імпульсний регулятор; математична модель; розрахункові та експериментальні дослідження.

Вступ. Під час виконання зварювальних робіт на таких віддалених від електромереж об'єктах, як нафто- і газопроводи, водопроводи тощо висуваються підвищені вимоги до характеристик і можливостей автономних зварювальних агрегатів. Автономні зварювальні агрегати (мультисистеми) повинні мати єдине джерело електроенергії і забезпечувати різні види зварювання (ручне дугове, в захисному газі тощо). Крім цього, часто виникає необхідність в багатопостовому зварюванні. Для цього широко застосовуються багатопостові зварювальні агрегати, що пов'язано з особливостями виконання робіт на об'єктах, де на невеликих площах необхідно розмістити певну кількість (до 8 одиниць) зварювальних постів. Серед вимог до мостових зварювальних агрегатів основним є незалежність роботи постів зварювання за її одночасної роботи, що пов'язано з забезпеченням якості зварних з'єднань. Крім того, у разі застосування багатопостових зварювальних агрегатів одночасно відбувається значна економія палива, оскільки генераторний агрегат, який живить кілька постів зварювання, практично не працює в режимі холостого ходу.

В автономних джерелах живлення зварювальної дуги (ДЖЗД), що забезпечують різні зовнішні характеристики, використовують синхронні генератори, вентильні генератори індукторного типу та меншою мірою колекторні генератори постійного струму [1–5]. Вони є основою однопостових і багатопостових структур. Однак індукторні генератори мають порівняно з іншими електричними машинами більшу масу, менший ККД і низькі динамічні показники, що збільшує тривалість відновлення напруги після короткого замикання, чим ускладнює збудження дуги. Недоліком генераторів постійного струму є наявність колектора, а син-



хронних – складна конструкція. Тому існує науково-технічна проблема створення енергоефективних ДЖЗД, які могли б забезпечити різні зовнішні характеристики та ефективно працювати в багатопостових структурах. Радикальний шлях удосконалення автономних зварювальних систем – їхнє створення на основі асинхронних генераторів (АГ), які позбавлені недоліків індукторних генераторів і генераторів постійного струму. Тому доцільно їх використовувати як генератори зварювальних установок. Наукові дослідження в цьому науковому напрямку проводяться у відділі електромеханічних систем Інституту електродинаміки НАН України.

Мета статті. Метою статті є узагальнення результатів дослідження АГ із блоками формування зварювальних характеристик автономних ДЖЗД, отриманих у відділі електромеханічних систем Інституту електродинаміки НАНУ, та визначення напрямків їхнього подальшого розвитку.

Класифікація АГ автономних зварювальних систем. Запропоновано класифікацію АГ автономних зварювальних систем, яка базується на способах їхнього збудження, принципах формування зовнішньої характеристики та кількості зварювальних постів.

Залежно від способу збудження й отримання реактивної потужності (РП) автономні АГ із збудженням із боку статора поділяються на три основні групи: АГ з конденсаторним збудженням (КЗ) [6–13]; АГ з вентильним збудженням (ВЗ) [14–17]; АГ з вентильно-конденсаторним збудженням (ВКЗ) [18–21]. У генераторах із конденсаторним збудженням РП для роботи в режимі самозбудження поставляється конденсаторною батареєю, що під'єднана до обмоток статора. У генераторах зі ВЗ ця потужність забезпечується напівпровідниковим перетворювачем. Коли одна частина РП надходить від конденсаторних батарей у колах статора, а друга – від напівпровідникового перетворювача, то такі генератори відносяться до третьої групи.

У випадку використання в автономних зварювальних установках АГ із КЗ можливо здійснити як параметричне формування зварювальної вольт-амперної характеристики (ВАХ), так і формування з використанням зворотних зв'язків. У першому випадку використовуються виключно некеровані (пасивні) елементи з лінійними і нелінійними ВАХ, такі як дроселі, трансформатори, некеровані випрямлячі, а вимірювальні елементи у вихідних колах відсутні, що сприяє підвищенню надійності ДЖЗД. У ДЖЗД із замкненими за струмом і напругою дуги системами формування зовнішніх характеристик (ЗСФЗХ) передбачена наявність вимірювальних і регулюючих елементів у вихідних колах, які працюють частіше в імпульсному режимі. На відміну від джерел із параметричними системами формування зварювальних характеристик (ПСФЗХ) вони можуть бути адаптовані для багатопостового електрозварювання і для створення зварювальних мультисистем та аналогічно ДЖЗД із ПСФЗХ можуть виконуватись на основі АГ із однією і більше статорних обмоток. Асинхронні генератори з ВЗ і ВКЗ виконуються з ЗСФЗХ і можуть бути однопостовими і багатопостовими.

Розроблено схемотехнічні рішення автономних зварювальних АГ із КЗ із некерованим випрямлячем, у коло постійного струму якого підключені високочастотні інвертори (рис. 1) або широтно-імпульсні регулятори (ШІР) (рис. 2), або напівмостові інвертори (рис. 3), а також АГ із ВЗ і ВКЗ (відповідно рис. 4 і 5). У випадку АГ із ВКЗ на клеми постійного струму підключаються зварювальні інвертори [22–29].

На вказаних рисунках використані такі позначення: В, В1, В2 – випрямлячі; ВІ – високочастотний інвертор; Т – трансформатор; БК – батарея конденсаторів; Р1 ... РN – широтно-імпульсні регулятори; ЗІ1, ЗІ2 – зварювальні інвертори; R_o – опір для збереження області вентильного самозбудження; R_d – змінний опір дуги; ВП – вентильний перетворювач. Інші позначення елементів схем на рисунках – загальноприйняті [22–26].

Розвиток теорії. Математичне моделювання ДЖЗД на основі АГ. Одним із режимів роботи автономних асинхронних генераторів у ДЖЗД є режим роботи на випрямляч із РС-навантаженням, практично аналогічний режиму роботи АГ із випрямлячем на ВІ або ШІР. Математичну модель (ММ) АГ із КЗ із одною статорною обмоткою, що працює на випрямляч з RL – навантаженням, наведено в [30].

Була розроблена нова математична модель АГ з двома статорними обмотками з КЗ для різних варіантів їхнього з'єднання з випрямлячем і РС-навантаженням. Запропонована модель АГ базується на моделі електричної машини в неперетвореній системі координат із урахуванням насичення по першій гармоніці поля за робочим потоком взаємодукції. Рівняння, з яких складається модель, умовно можна розділити на рівняння кіл обмотки збудження (ОЗ), робочої обмотки (РО), обмотки ротора, рівняння врахування насичення і рівняння навантаження випрямляча. Усі параметри ротора, РО зведені до ОЗ. За допомогою ідеальних трансформаторів зведені струми і напруги РО перетворені до реальних [31].

Адекватність цієї ММ перевірена шляхом порівняння результатів чисельного і фізичного експерименту. На основі запропонованої моделі АГ із двома обмотками статора з КЗ і випрямлячем розроблено модель, в якій у коло постійного струму останнього підключено один або кілька зварювальних постів на основі ШПР [32].

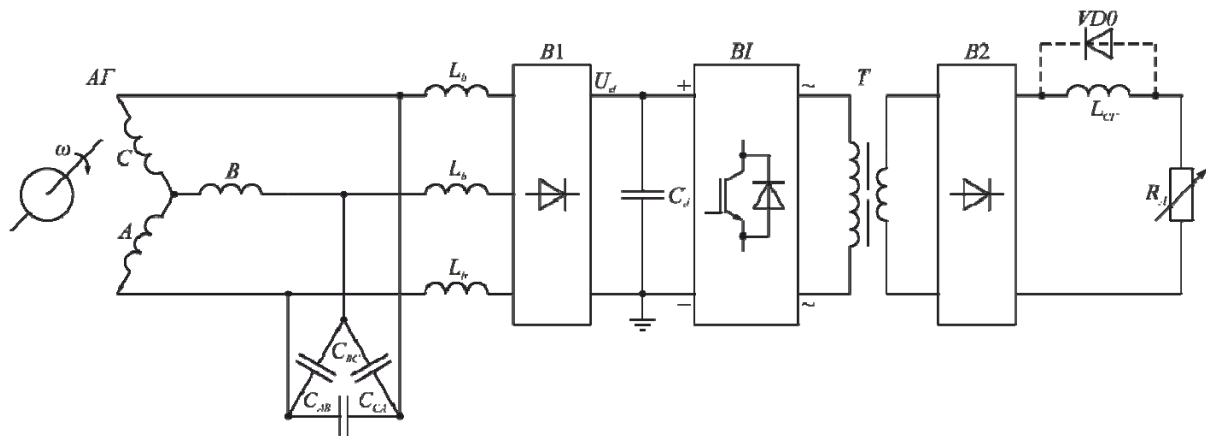


Рис. 1. Асинхронний генератор з високочастотним інвертором для ДЖЗД

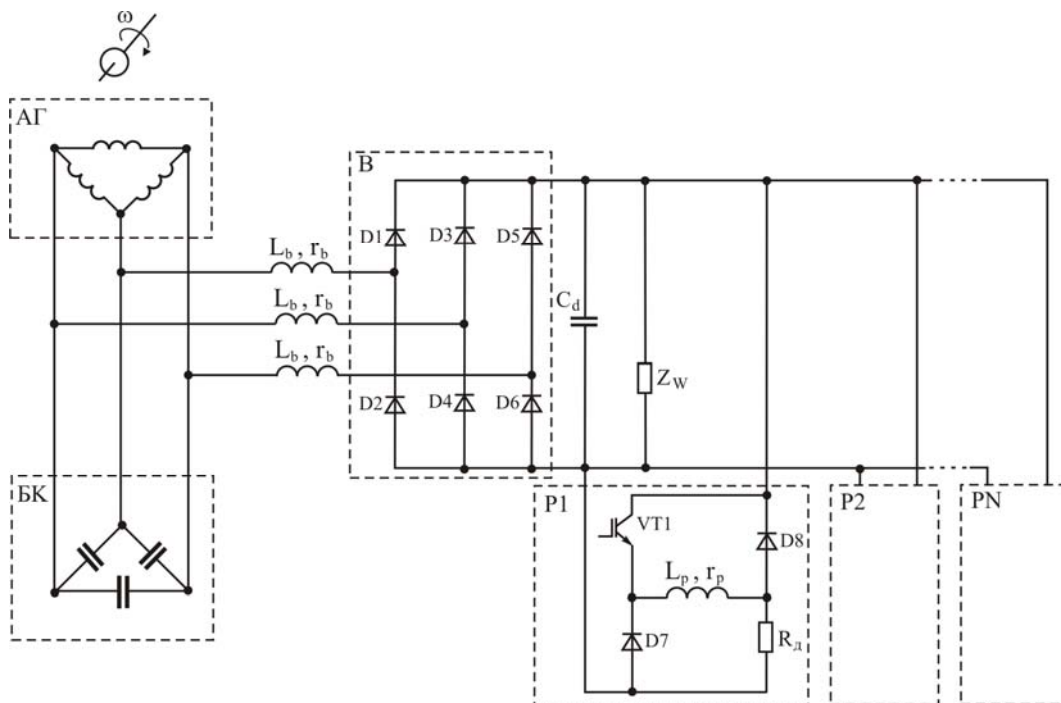


Рис. 2. Асинхронний генератор з ШПР для ДЖЗД

Розроблено ММ зварювального комплексу, основними структурними елементами якого є АГ з однією обмоткою статора, батарея конденсаторів збудження, випрямляч і декілька ШПР залежно від кількості зварювальних постів. Математична модель машини представлена в нерухомій щодо статора фазній системі координат А, В, С. Під час моделювання ви-

прямляча була використана методика, згідно з якою реальний діод замінюється активно-індуктивним елементом, опір якого залежно від напрямку струму, що протікає через діод, приймає два дискретних значення, які відповідають провідному і невідному його станам. Запропоновано принципи керування ШІР [22].

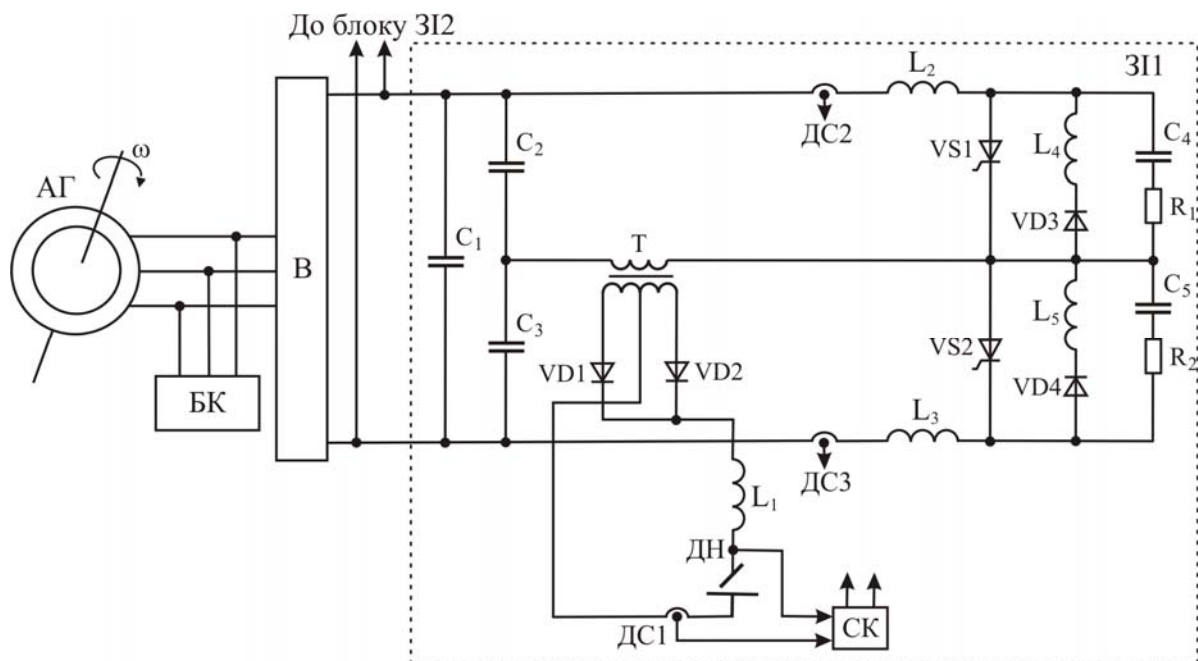


Рис. 3. Асинхронний генератор з напівмостовим інвертором ДЖЗД

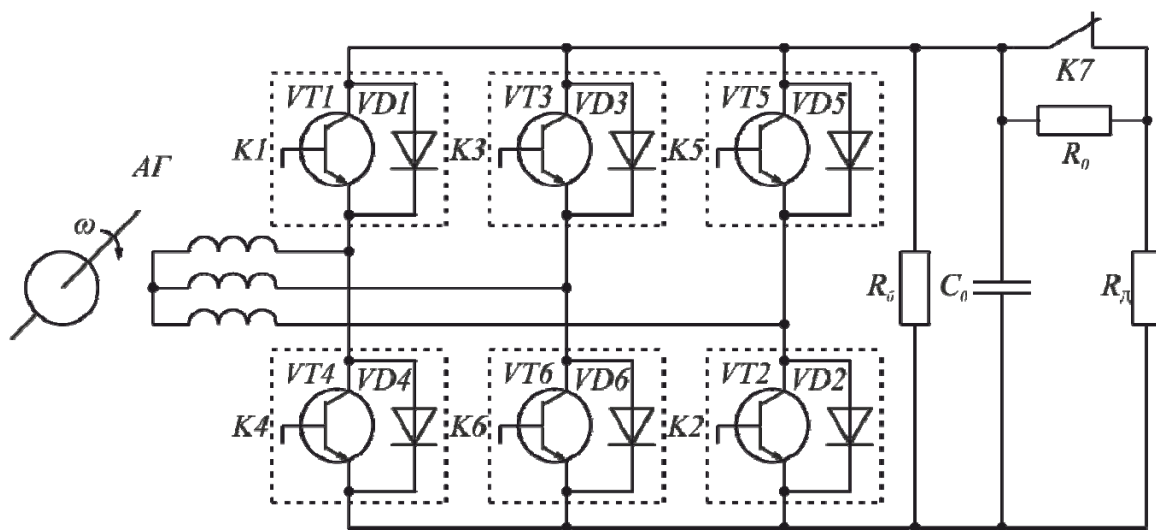


Рис. 4. Асинхронний генератор з вентильним збудженням ДЖЗД

Розроблено ММ зварювального комплексу на основі АГ з однією статорною обмоткою і збудженням від конденсаторів та височастотним постовим перетворювачем інвертного типу. Модель отримана на основі моделей таких структурних елементів комплексу: АГ із конденсаторною системою збудження; трифазний мостовий випрямляч, інвертор, трансформатор, вихідний випрямляч із навантаженням. Генератор представлено в нерухомій щодо статора фазній системі координат А, В, С. Моделі трифазного мостового випрямляча і вихідного випрямляча з навантаженням отримані за умови заміни діодів активно-індуктивними опорами. Рівняння інвертора враховують заміну транзисторно-діодних ключів ідеальними ключами. Для об'єднання моделей трансформатора та інших структурних елементів модель повинна оперувати з неприведеними величинами струмів і напруг. Для цього використано

перехід до схеми заміщення трансформатора, в якій параметри вторинної обмотки приведені до первинної обмотки, підключено ідеальний трансформатор [25, 33].

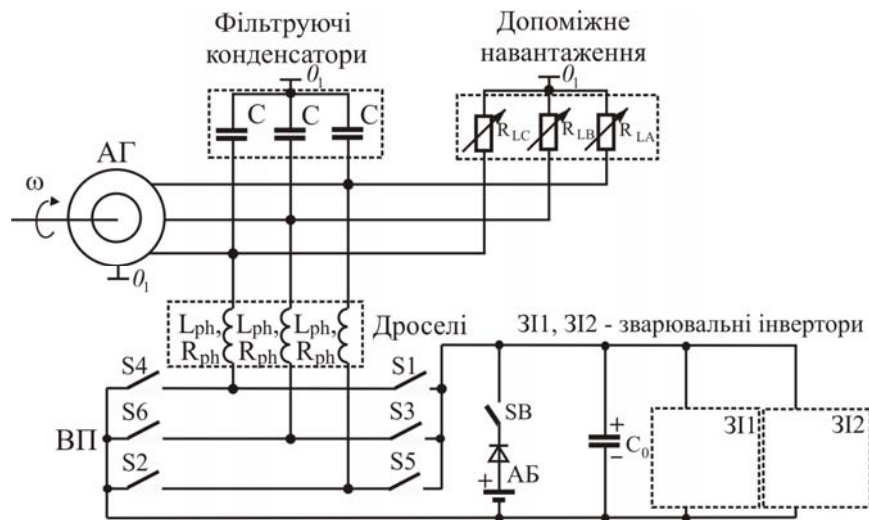


Рис. 5. Асинхронний генератор з вентильно-конденсаторним збудженням ДЖЗД

Розроблено SIMULINK – моделі напівмостового інвертора та його системи керування, що є структурними елементами однопостових і багатопостових ДЖЗД на основі АГ із КЗ. Розроблено також SIMULINK – модель дуги, яка може бути використана для моделювання статичних характеристик ДЖЗД у режимах короткого замикання та робочому [34].

Запропоновано математичну модель АГ із ВЗ, розроблену з використанням методу припасування, за допомогою якої можливо розраховувати електромагнітні процеси в генераторі в разі навантаження у вигляді зварювальної дуги та зовнішні характеристики, розбіжність яких з експериментальними не перевищує 2...6 % залежно від струму зварювання [3]. Метод припасування розроблено відносно асинхронних машин із напівпровідниковим перетворювачем у колах статора. Водночас ММ на основі цього методу базується на миттєвих схемах заміщення АГ із ВЗ і не потребує інформації про стан напівпровідникових елементів на кожному кроці розв'язку диференціальних рівнянь [35].

Запропоновано наукові підходи до розрахунку характеристик автономних зварювальних АГ із ВЗ із використанням схем заміщення [36–38], а також отримано передавальну функцію, яка використана для дослідження таких генераторів [39].

Для дослідження електромеханічних процесів ДЖЗД на основі генератора з вентильно-конденсаторною системою збудження і зварювальними інверторами, що підключені на клема постійного струму генератора, розроблено динамічну імітаційну модель, яка реалізує два алгоритми векторного керування: перший базується на гістерезисному управлінні струмом, а другий – на алгоритмі широтно-імпульсної модуляції просторового вектора [26].

Під час розробки моделей ДЖЗД із АГ розвинуто блочно-системний метод моделювання складних машино-вентильних систем з асинхронними машинами в області об'єднання структурних елементів, що вперше забезпечило створення математичних моделей АГ із КЗ із однією і двома статорними обмотками з різними схемами їхнього з'єднання з блоками формування зовнішніх зварювальних характеристик на основі випрямлячів і напівмостового інвертора, ШІР, височастотного інвертора, а також АГ із ВЗ і ВКЗ. На клема постійного струму АГ із ВКЗ, як було вказано раніше, підключаються зварювальні інвертори.

Розрахункові та експериментальні дослідження ДЖЗД на основі АГ. Комплекс досліджень режимів роботи ДЖЗД із АГ, проведений за допомогою розроблених математичних моделей та фізичного моделювання, дав змогу отримати ряд нових наукових і практичних результатів [32, 34].

Обґрунтовано перспективність застосування ДЖЗД на основі АГ із замкненими за струмом і напругою системами формування зовнішніх характеристик для побудови автономних зварювальних мультисистем.

За допомогою створеного комплексу комп'ютерних програм досліджено електромагнітні процеси та встановлено робочі характеристики ДЖЗД на основі АГ з однією та двома обмотками статора з некерованим випрямлячем і ШІР, високочастотним інвертором за крутоспадних і жорстких зовнішніх характеристик в однопостовому і багатопостовому виконанні.

Розроблено деталізовані алгоритми керування, схемотехнічні рішення та керувальні програми мікропроцесорних систем керування АГ із некерованим випрямлячем і ШІР та АГ із багатофункціональним вентильним перетворювачем, що одночасно формує зварювальні характеристики, забезпечує генератор РП та регулює його ковзання.

Для використання серійних асинхронних двигунів як АГ ці рекомендації щодо вибору типорозміру машини для такого технічного рішення ДЖЗД за заданої величини номінального зварювального струму. Для АГ із ВІ розроблено алгоритм фазового керування, що дає змогу мінімізувати постійну складову струму первинної обмотки високочастотного трансформатора для запобігання його намагнічування.

Проведено аналіз схемних рішень автономних ДЖЗД та визначено оптимальну структуру багатопостового зварювального агрегату, побудованого на основі АГ із КЗ та постових напівмостових інверторних перетворювачів. Трифазна напруга АГ випрямляється випрямлячем і подається на постові інвертори напруги, в яких вона перетворюється на напругу високої частоти за допомогою керованих інверторів напруги, трансформується і після випрямлення подається на пост зварювання.

Однією з основних умов забезпечення сталого процесу ручного дугового зварювання є забезпечення відповідної зовнішньої характеристики джерела живлення дуги, а саме нахил зовнішньої характеристики в зоні номінального струму. Розглянуто енергетичні процеси дугового проміжку та сформульовано вимоги до ВАХ постових напівмостових інверторів напруги з метою забезпечення стійкості процесу зварювання [40].

Розроблено новий алгоритм управління зовнішньою характеристикою постових напівмостових інверторів, що відрізняється швидкодією, забезпечує стійкість процесу зварювання та усуває взаємний вплив постів зварювання. Відповідно до цього принципу струм зварювання, як найбільш інерційна компонента, приймається як незалежна змінна, а параметром регулювання є напруга на дуговому проміжку, яка визначається системою управління й автоматично підтримується. Для цього в системі управління використовується не тільки зворотний зв'язок за струмом, як це зроблено в сучасних системах управління, а також і за напругою дуги. Така система управління (зі зв'язками за струмом та напругою) забезпечує стабільність зовнішніх характеристик джерела в разі коливання параметрів навантаження (коливання довжини дуги) і, що особливо важливо, коливання напруги генератора. Останнє має важливе значення для незалежної роботи постів у багатопостових структурах.

Розроблені математичні моделі АГ із урахуванням насичення магнітних ланцюгів та наявності напівпровідникових елементів у ланцюгах статора дали змогу визначити зовнішні характеристики АГ під час роботи на напівмостові інвертори.

Розроблена математична модель постового напівмостового інвертора (постового джерела живлення) дала змогу дослідити електромагнітні процеси в силових елементах постового інвертора напруги за різних законів управління. За допомогою моделі відпрацьовано закони управління постовим інвертором у різних режимах роботи.

Вперше науково обґрунтовано принципи керування автономним машино-вентильним комплексом на основі АГ із ВЗ, в якому напівпровідниковий перетворювач забезпечує генератор реактивною потужністю, змінює його ковзання залежно від навантаження, виконує функції випрямляча та формує крутоспадні і жорсткі зварювальні характеристики.

Установлено зв'язок між опором дуги і ковзанням АГ із ВЗ, що дає змогу визначити як робочий діапазон ковзання, так і мінімальний опір у колі постійного струму для забезпечення роботи генератора в області самозбудження. Це дало змогу розробити методику розрахунку робочих характеристик зварювального АГ із ВЗ, яка базується на його схемі заміщення.

Досліджено електромагнітні процеси зварювального АГ із ВЗ при формуванні крутоспадних і жорстких характеристик, що дало змогу встановити показники якості перехідних процесів під час роботи контура стабілізації напруги або струму. Показано, що для забезпечення роботи АГ із ВЗ в області існування квазісталих режимів вентильного збудження за значень опору дуги близьких до нуля необхідно в колі постійного струму вмикати додатковий опір (для експериментального зразка від 0,2 до 0,4 Ом), який не впливає на енергетичні показники генератора, оскільки в робочих режимах шунтується.

Проектування ДЖЗД на основі АГ. Визначено особливості проектування ДЖЗД на основі АГ для зварювальних мультисистем і розроблено підходи до розрахунку та рекомендації з проектування окремих функціональних блоків: електричної машини та систем збудження; випрямлячів; широтно-імпульсного регулятора струму, напівмостового інвертора; систем керування.

Запропоновано математичну модель і методику розрахунку ШПР та методику розрахунку параметрів трифазного випрямляча. Модель дає змогу нехтувати пульсаціями вхідної напруги, досліджувати процеси в регуляторі з урахуванням зовнішньої характеристики АГ. Методика розрахунку ШПР базується на запропонованому законі регулювання напруги ШПР [22], а методика розрахунку випрямляча враховує обмін енергією між дроселем ШПР і конденсатором на його виході в разі обриву зварювальної дуги і вимикання транзисторного ключа.

Рекомендовано використовувати в ДЖЗД на основі АГ мікропроцесорні системи керування, що пов'язано зі складними алгоритмами керування. Розглянуто приклади практичної реалізації таких систем керування в ДЖЗД на основі АГ із КЗ і ШПР, а також АГ із ВЗ.

Експериментальні зразки ДЖЗД на основі АГ. Розроблено, виготовлено та досліджено експериментальні зразки двопостових ДЖЗД на основі АГ із КЗ із постовими напівмостовими інверторами та ШПР, а також зразок однопостового ДЖЗД із АГ із ВЗ. У зразку з постовими напівмостовими інверторами запропонований новий алгоритм частотного керування інверторами, який забезпечує їхню стійку роботу в динамічних режимах за різних змін режимів роботи поста зварювання (коротке замикання, режим зварювання, холостий хід). Проведено дослідження електромагнітних процесів та робочих характеристик ДЖЗД на основі АГ. Результати експериментальних досліджень підтвердили правильність викладених положень теорії, принципів побудови і керування, математичних моделей, методик і методів розрахунку АГ із блоками формування зварювальних характеристик.

Напрямки подальших досліджень. У раніше розроблених математичних моделях АГ із двома статорними обмотками осі фаз обмоток співпадали у просторі [30]. Розроблена ММ асинхронного генератора з двома статорними обмотками, осі фаз яких зсунуті у просторі на довільний кут [41]. Тому необхідно дослідити характеристики таких генераторів, що працюють у складі ДЖЗД.

Розроблено динамічну імітаційну модель ДЖЗД на основі генератора з ВКЗ і зварювальними інверторами, що підключені до клем постійного струму генератора [26]. Надалі слід спрямувати зусилля на розробку більш детальної моделі та широкомасштабні дослідження ДЖЗД із таким АГ.

Розглянуто можливість використання у складі ДЖЗД вентильно-індукторних генераторів [42]. Доцільно виконати порівняння їхніх зварювальних характеристик із такими характеристиками АГ у складі ДЖЗД, розглянути раціональність використання в багатопостових зварювальних системах.

Висновки. Таким чином, у відділі електромеханічних схем Інституту електродинаміки НАН України розвинуто теорію, розроблено принципи побудови й керування, математичні моделі, схемотехнічні рішення й рекомендації із проєктування, проведено комплексні дослідження та визначено напрямки подальших досліджень АГ із блоками формування зварювальної дуги автономних зварювальних мультисистем, що забезпечило створення умов для їхньої розробки та впровадження.

У роботі використано результати досліджень, отримані при виконанні держбюджетних тем «АСИНГЕН» № ГР 0102U007350 і «АСИНГЕН-2» № ДР 0107U002515, а також за підтримки Національного фонду досліджень України (Проєкт «Електромеханічні системи підвищеної енергоефективності для енергетики, технологій і транспорту» № 2023.04/0075).

1. Голошубов В.І. Зварювальні джерела живлення: навчальний посібник. К.: Арістей. 2005. 446 с.
2. Welders/Generators for engine-driven welders with SMAW welding process. URL: <https://www.sogaenergyteam.com/wp-content/uploads/2015/12/WELDERS-RANGE-SINCRO.pdf> (accessed 11.11.2024)
3. Boussiala Boubakr & Nezli L. & Mahmoudi Mohand & Deboucha, i Abdelhakim. Novel welding machine based on small PMSG wind turbine. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*. 2018. DOI: <https://doi.org/10.053304.10.1063/1.5042609> (accessed 11.11.2024)
4. Richard Beeson, Stephen Li, Alan Smith. Engine driven welding power supply with inverter auxiliary power. US Patent US6469401B2, 2002.
5. Welding machine with Honda engine petrol-driven Powerflex Brand. URL: <https://jashsupplies.com/product/welding-machine-with-honda-engine-petrol-driven-powerflex-brand/> (accessed 11.11.2024)
6. R. K. Kumawat, S. Chourasiya, S. Agrawal and D. K. Paliwal. Self Excited Induction Generator: A Review. *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology (IARJSET)*. 2015. Vol. 2. No. 1. Pp. 37–42.
7. Varshney L, Vardhan AS, Vardhan AS, Kumar S, Saket RK, Sanjeevikumar P. Performance characteristics and reliability assessment of self-excited induction generator for wind power generation. *IET Renew. Power Gener.* 2021. 15. 1927–1942. <https://doi.org/10.1049/rpg2.12116>
8. B. M. Krishna V. and V. Sandeep, Experimental Study on Different Modes of Self Excited Induction Generator Operation. *2nd PhD Colloquium on Ethically Driven Innovation and Technology for Society (PhD EDITS)*, Bangalore, India, 2020. Pp. 1–2, DOI: <https://doi.org/10.1109/PhDEDITS51180.2020.9315310>
9. P. Nakorn, P. Machot, V. Kinnaree and C. Manop. Study of Three-phase Self-excited Induction Generator Operating as Single-phase Induction Generator Supplying Non-linear Load. *18th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, Chiang Mai, Thailand, 2021. Pp. 806–809. DOI: <https://doi.org/10.1109/ECTI-CON51831.2021.9454845>
10. S. P. Burud, T. B. Patil, U. S. Mirje, S. S. More, G. S. Mane and S. S. Mulik. Requirement of Minimum Capacitor to Build-Up and Maintain the Voltage in Self Excited Induction Generator. *International Conference On Advances in Communication and Computing Technology (ICACCT)*, Sangamner, India, 2018. Pp. 627–632. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICACCT.2018.8529428>
11. A. A. Al-Manfi, W. A. Mohamed and E. F. Elsalhin. Voltage Control of Stand-alone Single Phase Self Excited Induction Generator for Variable Speed Wind Turbine Using Bang Bang-PWM Controller. *IEEE 2nd International Maghreb Meeting of the Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (MI-STA)*, Sabratha, Libya, 2022. Pp. 749–754. DOI: <https://doi.org/10.1109/MI-STA54861.2022.9837503>
12. D. Elshaibani *et al.* Simulation and practical implementation of a SEIG used in wind energy systems with rectified output voltage. *4th IEEE International Conference on Engineering Technologies and Applied Sciences (ICETAS)*, Salmabad, Bahrain, 2017. Pp. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICETAS.2017.8277880>
13. W. E. Vanço, F. B. Silva, C. M. R. De Oliveira, J. R. B. A. Monteiro and J. M. M. De Oliveira. A Proposal of Expansion and Implementation in Isolated Generation Systems Using Self-Excited Induction Generator With Synchronous Generator. *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. Pp. 117188–117195. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2937229>
14. Noriyuki Kimura, Toshimitsu Morizane, Katsunori Taniguchi and Tomoyuki Hamada. Inverter excited induction machine for high performance wind power generation system. *European Conference on Power Electronics and Applications*, Aalborg, Denmark, 2007. Pp. 1–9. DOI: <https://doi.org/10.1109/EPE.2007.4417481>
15. M. Rezkallah, A. Chandra, B. Singh and M. El Kahel. Vector control of squirrel-cage induction generator for stand-alone wind power generation. *IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, Montreal, QC, Canada, 2012. Pp. 1166–1171. DOI: <https://doi.org/10.1109/IECON.2012.6388607>

16. S. Lee and M. Sim. A study on induction generator control methods for commercial vehicle based on slip- and vector control. *20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, Sydney, NSW, Australia, 2017. Pp. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICEMS.2017.8056248>
17. S. Peresada, S. Kovbasa, M. Zhelinskyi and A. Duchenko. Speed sensorless direct field oriented control of induction generator. *IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, Kyiv, Ukraine, 2017. Pp. 548–553. DOI: <https://doi.org/10.1109/UKRCON.2017.8100304>
18. S. Yukhalang, T. Sopapirm and V. Kinnares. Three-phase Self-Excited Induction Generator Operating as Single-phase Induction Generator using Static VAR Compensator. *20th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, Nakhon Phanom, Thailand, 2023. Pp. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.1109/ECTI-CON58255.2023.10153314>
19. N. Singla and V. Pahwa. Dynamic performance of three phase self excited induction generator using STATCOM for improved voltage regulation. *2nd International Conference on Recent Advances in Engineering & Computational Sciences (RAECS)*, Chandigarh, India, 2015. Pp. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/RAECS.2015.7453418>
20. Satpathy A.S., Kastha D. and Kishore K. Control of a STATCOM-assisted self-excited induction generator-based WECS feeding non-linear three-phase and single-phase loads. *IET Power Electronics*. 2019. No 12. Pp. 829–839. DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-pel.2018.5482>
21. Ion Catalin Petrea and Ioan Serban. Seamless Integration of an Autonomous Induction Generator System into an Inverter-Based Microgrid. *Energies* 12. 2019. No. 4. Pp. 638. DOI: <https://doi.org/10.3390/en12040638>
22. Мазуренко Л.І., Лісник В.Я., Диннік Л.М., Джура О.В. Математична модель і алгоритм керування асинхронного зварювального генератора. *Технічна електродинаміка*. 2008. № 2. С. 22–26.
23. Лищенко А.И., Лесник В.А., Мазуренко Л.И. Автономные источники питания сварочной дуги с асинхронными генераторами. *Технічна електродинаміка*. 1999. № 6. С. 51–55.
24. Мазуренко Л.І., Романенко В.І. Асинхронний генератор з вентильним збудженням як джерело живлення зварювальної дуги. *Технічна електродинаміка*. 2010. № 6. С. 35–39.
25. Мазуренко Л.И., Джура А.В., Дынник Л.Н., Соловьев В.В. Однопостовой автономный сварочный комплекс. Часть 1: Математическая модель силовой части. *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету*. 2009. Вип. 3(56). Ч. 1. С. 145–149.
26. L.I. Mazurenko, O.V. Dzhura, A.V. Kotsiuruba, M.O Shykhnenko. An induction generator based electrical generator set for dual DC ARC welding and AC electric power supply. *IEEE 6th International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*. Kremenichuk, Ukraine.2024. Pp. 18–21 .
27. Мазуренко Л.І., Романенко В.І. Асинхронний вентильний генератор в якості керованого джерела струму. *Вісник Національного технічного університету "ХПИ"*. Харків, Україна. 2010. № 28. С. 66–67.
28. Л.І Мазуренко, В.І. Романенко, Спосіб керування автономним асинхронним генератором з короткозамкненим ротором. Пат. на корисну модель UA № 51704, 2010.
29. Мазуренко Л.І., Джура О.В., Романенко В.І., Білик О.А. Розрахункове дослідження асинхронних генераторів з двома статорними обмотками в складі зварювальних комплексів з широтно-імпульсними регуляторами струму. *Технічна електродинаміка* . 2012. № 3. С. 83–84.
30. Мазуренко Л.И., Лищенко А.И. Асинхронные генераторы с вентильным и вентильно-емкостным возбуждением для автономных энергоустановок. К.: Наук. думка, 2011. 271 с.
31. Мазуренко Л.І., Джура О.В., Диннік Л.М., Соловйов В.В. Моделювання асинхронних генераторів з двома обмотками статора при роботі на випрямляч з РС-навантаженням. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2010. Вип. 25. С. 81–88.
32. Розробити основи теорії, принципи побудови та провести комплексне дослідження багатофункціональних енергоефективних асинхронних генераторів з вентильно-ємнісним збудженням і мікропроцесорним керуванням для автономних зварювальних мультисистем ("Асинген-2"). Заключний звіт про НДР. Ін-т електродинаміки НАН України. № ДР 0107U002515. 2010. 316 с.
33. Мазуренко Л.И., Джура А.В., Дынник Л.Н. Однопостовой автономный сварочный комплекс. Часть 2: Алгоритм управления, результаты моделирования. *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету*. 2009. Вип. 4 (57). Ч. 2. С. 128–132.
34. Провести исследования электромагнитных процессов и разработать принципы моделирования автономных источников питания сварочной дуги на основе асинхронных генераторов с вентильными преобразователями в цепях статора ("АСИНГЕН"). Заключительный отчет о НИР. Ін-т електродинаміки НАН України. № ГР 0102U007350. 2006.
35. Мазуренко Л.І., Романенко В.І. Математична модель асинхронного генератора з вентильним збудженням з використанням методу припасовування. *Технічна електродинаміка*. 2010. № 4. С. 19–24.
36. Лесник В.А., Мазуренко Л.И. Многопостовые источники питания сварочной дуги на основе асинхронных генераторов. *Технічна електродинаміка*. Тем. выпуск "Проблеми сучасної електромеханіки". 2000. Ч. 2. С. 76–81.

37. Мазуренко Л.І., Романенко В.І., Джура О.В. Дослідження статичних характеристик автономного асинхронного зварювального генератора з вентильним збудженням по Г-подібній схемі заміщення. *Технічна електродинаміка*. 2012. № 2. С. 75–76.
38. Мазуренко Л.І., Романенко В.І., Джура О.В. Розрахунок робочих характеристик автономного зварювального генератора з вентильним збудженням за схемою заміщення. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2011. Вип. 28. С. 64–70.
39. Мазуренко Л.І., Романенко В.І., Джура О.В. Передаточна функція автономного асинхронного генератора з вентильним збудженням. *Електромеханічні та енергозберігаючі системи*. Тем. випуск "Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика" науково-виробничого журналу. 2012. Вип. 3(19). С. 412–415.
40. Мазуренко Л.І., Лісник В.Я. Автономні джерела живлення зварювальної дуги на основі асинхронного генератора. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2006. № 2 (14). С. 174–176.
41. Мазуренко, Л.І., Василів К.М., Джура О.В. Вдосконалена математична модель триобмоткової асинхронної машини. *Технічна електродинаміка*. 2023. № 5. С. 28–36.
42. Шихненко М.О., Ярас Я. Автономні вентильно-індукторні зварювальні генератори. *International Scientific-Practical Conference of young scientists "Build-Master-Class-2024"*. September 2024. Kyiv. Ukraine.

ASYNCHRONOUS GENERATORS IN AUTONOMOUS POWER SOURCES FOR WELDING ARC. STATE AND PROSPECTS

L.I. Mazurenko, O.V. Dzhura, M.O. Shykhnenko, O.A. Bilyk

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,

Beresteyskiy Ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine

e-mail: mlins@ied.org.ua

The article is aimed at generalizing the results of the study of asynchronous generators (AG) of autonomous welding arc power sources (AWPS) obtained in the Department of Electromechanical Systems of the Institute of Electrodynamics of the NASU. The proposed classification of AG of autonomous welding systems is considered, mathematical models are developed, the results of computational and experimental studies of such systems with AG with capacitor excitation and an uncontrolled rectifier, in the DC circuit of which high-frequency inverters, pulse-width regulators or half-bridge inverters are connected, as well as generators with valve and valve-capacitor excitation. The design features and experimental samples of welding arc power sources with AG are considered. The directions of further research are determined. Ref. 42, fig. 5.

Keywords: welding arc power source; asynchronous generator; capacitor, valve, valve-capacitor excitation; half-bridge and high-frequency inverters; pulse width regulator; mathematical model; computational and experimental studies.

1. Holoshubov V.I. Welding power sources: tutorial. K.: Aristeus. 2005. 446 p. (Ukr)
2. Welders/Generators for engine-driven welders with SMAW welding process. URL: <https://www.sogaenergyteam.com/wp-content/uploads/2015/12/WELDERS-RANGE-SINCRO.pdf> (accessed 11.11.2024)
3. Boussiala, Boubakr & Nezli, L. & Mahmoudi, Mohand & Deboucha, Abdelhakim. Novel welding machine based on small PMSG wind turbine. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*. 2018. DOI: <https://doi.org/10.053304.10.1063/1.5042609>. (accessed 11.11.2024)
4. Richard Beeson, Stephen Li, Alan Smith. Engine driven welding power supply with inverter auxiliary power. US Patent US6469401B2, 2002.
5. Welding machine with Honda engine petrol-driven Powerflex Brand. URL: <https://jashsupplies.com/product/welding-machine-with-honda-engine-petrol-driven-powerflex-brand/> (accessed 11.11.2024)
6. R. K. Kumawat, S. Chourasiya, S. Agrawal and D. K. Paliwalia. Self Excited Induction Generator: A Review. *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology (IARJSET)*. 2015. Vol. 2. No. 1. Pp. 37–42.
7. Varshney L, Vardhan AS, Vardhan AS, Kumar S, Saket RK, Sanjeevikumar P. Performance characteristics and reliability assessment of self-excited induction generator for wind power generation. *IET Renew. Power Gener.* 2021. No 15. Pp. 1927–1942. <https://doi.org/10.1049/rpg2.12116>.
8. B. M. Krishna V. and V. Sandeep, Experimental Study on Different Modes of Self Excited Induction Generator Operation. *2nd PhD Colloquium on Ethically Driven Innovation and Technology for Society (PhD EDITS)*, Bangalore, India, 2020. Pp. 1–2. DOI: <https://doi.org/10.1109/PhDEDITS51180.2020.9315310>
9. P. Nakorn, P. Machot, V. Kinnares and C. Manop. Study of Three-phase Self-excited Induction Generator Operating as Single-phase Induction Generator Supplying Non-linear Load. *18th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, Chiang Mai, Thailand, 2021. Pp. 806–809. DOI: <https://doi.org/10.1109/ECTI-CON51831.2021.9454845>

10. S. P. Burud, T. B. Patil, U. S. Mirje, S. S. More, G. S. Mane and S. S. Mulik. Requirement of Minimum Capacitor to Build-Up and Maintain the Voltage in Self Excited Induction Generator. *International Conference On Advances in Communication and Computing Technology (ICACCT)*, Sangamner, India, 2018. Pp. 627–632. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICACCT.2018.8529428>
11. A. A. Al-Manfi, W. A. Mohamed and E. F. Elsalhin. Voltage Control of Stand-alone Single Phase Self Excited Induction Generator for Variable Speed Wind Turbine Using Bang Bang-PWM Controller. *IEEE 2nd International Maghreb Meeting of the Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (MI-STA)*, Sabratha, Libya, 2022. Pp. 749–754. DOI: <https://doi.org/10.1109/MI-STA54861.2022.9837503>
12. D. Elshaibani *et al.* Simulation and practical implementation of a SEIG used in wind energy systems with rectified output voltage. *4th IEEE International Conference on Engineering Technologies and Applied Sciences (ICETAS)*, Salmabad, Bahrain, 2017. Pp. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICETAS.2017.8277880>
13. W. E. Vanço, F. B. Silva, C. M. R. De Oliveira, J. R. B. A. Monteiro and J. M. M. De Oliveira. A Proposal of Expansion and Implementation in Isolated Generation Systems Using Self-Excited Induction Generator With Synchronous Generator. *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. Pp. 117188–117195. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2937229>
14. Noriyuki Kimura, Toshimitsu Morizane, Katsunori Taniguchi and Tomoyuki Hamada. Inverter excited induction machine for high performance wind power generation system. *European Conference on Power Electronics and Applications*, Aalborg, Denmark, 2007. Pp. 1–9. DOI: <https://doi.org/10.1109/EPE.2007.4417481>
15. M. Rezkallah, A. Chandra, B. Singh and M. El Kahel. Vector control of squirrel-cage induction generator for stand-alone wind power generation. *IECON 2012. 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, Montreal, QC, Canada, 2012. Pp. 1166–1171. DOI: <https://doi.org/10.1109/IECON.2012.6388607>
16. S. Lee and M. Sim. A study on induction generator control methods for commercial vehicle based on slip- and vector control. *20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, Sydney, NSW, Australia, 2017. Pp. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICEMS.2017.8056248>
17. S. Peresada, S. Kovbasa, M. Zhelinskyi and A. Duchenko, Speed sensorless direct field oriented control of induction generator. *IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, Kyiv, Ukraine, 2017. Pp. 548–553. DOI: <https://doi.org/10.1109/UKRCON.2017.8100304>
18. S. Yukhalang, T. Sopapirm and V. Kinnaree. Three-phase Self-Excited Induction Generator Operating as Single-phase Induction Generator using Static VAR Compensator. *20th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, Nakhon Phanom, Thailand, 2023. Pp. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.1109/ECTI-CON58255.2023.10153314>
19. N. Singla and V. Pahwa. Dynamic performance of three phase self excited induction generator using STATCOM for improved voltage regulation. *2nd International Conference on Recent Advances in Engineering & Computational Sciences (RAECS)*, Chandigarh, India, 2015. Pp. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/RAECS.2015.7453418>
20. Satpathy, A.S., Kastha, D. and Kishore, K. Control of a STATCOM-assisted self-excited induction generator-based WECS feeding non-linear three-phase and single-phase loads. *IET Power Electronics*. 2019. No 12. Pp. 829–839. <https://doi.org/10.1049/iet-pel.2018.5482>
21. Ion Catalin Petrea, and Ioan Serban. Seamless Integration of an Autonomous Induction Generator System into an Inverter-Based Microgrid. *Energies* 12.. 2019. No. 4. P. 638. <https://doi.org/10.3390/en12040638>
22. Mazurenko L.I., Lisnyk V.Ya., Dynnik L.M., Dzhura O.V. Mathematical model and control algorithm of an asynchronous welding generator. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2008. No. 2. Pp. 22–26. (Ukr)
23. Lishchenko A.I., Lesnik V.A., Mazurenko L.I. Autonomous power sources for welding arc with asynchronous generators. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 1999. No. 6. Pp. 51–55. (Rus)
24. Mazurenko L.I., Romanenko V.I. An asynchronous generator with valve excitation as a source of life for the welding arc. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2010. No. 6. Pp. 35–39. (Ukr)
25. Mazurenko L.I., Dzhura A.V., Dynnik L.N., Soloviev V.V. Single-post autonomous welding complex. Part 1: Mathematical model of the power section. *News of Kremenchuk State Polytechnical University*. 2009. Issue 3(56). Part 1. Pp. 145–149. (Rus)
26. L.I. Mazurenko, O.V. Dzhura, A.V. Kotsiuruba, M.O Shykhnenko. An induction generator based electrical generator set for dual DC ARC welding and AC electric power supply. *IEEE 6th International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*. Kremenchuk, Ukraine. 18-21 September 2024.
27. Mazurenko L.I., Romanenko V.I. Asynchronous valve generator in the core of a cerated dzherel struma. *Newsletter of the National Technical University KhPI*. 2010. No. 28. Pp. 66–67. (Ukr)
28. L.I. Mazurenko, V.I. Romanenko, Method of controlling an autonomous asynchronous generator with a squirrel-cage rotor. Patent for utility model UA No. 51704, 2010. (Ukr)
29. Mazurenko L.I., Dzhura O.V., Romanenko V.I., Bilyk O.A. Computational study of asynchronous generators with two stator windings as part of welding complexes with pulse-width current regulators. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2012. No. 3. Pp. 83–84. (Ukr)
30. Mazurenko L.I., Lishchenko A.I. Asynchronous generators with valve and valve-capacitive excitation for autonomous power plants. K.: Nauk. dumka, 2011. 271 p. (Rus)

31. Mazurenko L.I., Dzhura O.V., Dynnik L.M., Solovyov V.V. Modeling of asynchronous generators with two stator windings when operating on a rectifier with RC-load. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky Nationalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2010. Issue 25. Pp. 81–88. (Ukr)
32. To develop the foundations of the theory, principles of construction and conduct a comprehensive study of multifunctional energy-efficient asynchronous generators with valve-capacitive excitation and microprocessor control for autonomous welding multisystems (ASINGEN-2). Final report on the research. Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine. No. DR 0107U002515. 2010. 316 p. (Ukr)
33. Mazurenko L.I., Dzhura A.V., Dynnik L.N. Single-station autonomous welding complex. Part 2: Control algorithm, simulation results. *Newsletter of the Kremenchuk State Polytechnic University*. 2009. No 4 (57). Part 2. Pp. 128–132. (Rus)
34. Conduct research into electromagnetic processes and develop principles for modeling autonomous power sources for a welding arc based on asynchronous generators with valve converters in stator circuits (ASINGEN). Final report on research. Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine. No. GR 0102U007350. 2006. (Rus)
35. Mazurenko L.I., Romanenko V.I. A mathematical model of an asynchronous generator with valve excitation and a vicoristan method of adaptation. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2010. No. 4. Pp. 19–24. (Ukr)
36. Lesnik V.A., Mazurenko L.I. Multi-station welding arc power sources based on asynchronous generators. *Tekhnichna Elektrodynamika*. Tem. issue of Problems of daily electrical mechanics. 2000. Part 2. Pp. 76–81. (Rus)
37. Mazurenko L.I., Romanenko V.I., Dzhura O.V. Investigation of static characteristics of an autonomous asynchronous welding generator with valve excitation using an L-shaped equivalent circuit. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2012. No. 2. Pp. 75–76. (Ukr)
38. Mazurenko L.I., Romanenko V.I., Dzhura O.V. Calculation of the operating characteristics of an autonomous welding generator with valve excitation using the equivalent circuit. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky Nationalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2011. Issue 28. Pp. 64–70. (Ukr)
39. Mazurenko L.I., Romanenko V.I., Dzhura O.V. Transfer function of an autonomous asynchronous generator with valve excitation. *Electromechanical and energy-saving systems*. Thematic issue Problems of automated electric drive. Theory and practice of the scientific and production journal. Kremenchuk. 2012. Issue 3(19). Pp. 412–415. (Ukr)
40. Mazurenko L.I., Lisnyk V.Ya. Autonomous power sources for welding arcs based on an asynchronous generator. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky Nationalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2006. No. 2 (14). Pp. 174–176. (Ukr)
41. Mazurenko, L.I., Vasylyv K.M., Dzhura O.V. Improved mathematical model of a three-winding induction machine. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2023. No. 5. Pp. 28–36. (Ukr)
42. Shykhnenko M.O., Yaras Y. Autonomous valve-inductor welding generators. *International Scientific-Practical Conference of young scientists Build-Master-Class-2024*. September 2024. Kyiv, Ukraine. (Ukr)

Надійшла: 13.11.2024

Прийнята: 21.11.2024

Submitted: 13.11.2024

Accepted: 21.11.2024