

АНАЛІЗ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ У ПЕРЕТВОРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМАХ ДЛЯ ЖИВЛЕННЯ ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

Наведено основні результати, отримані при виконанні науково-дослідних робіт по дослідженню процесів у напівпровідниково-трансформаторних перетворювачах для живлення електротехнологічного обладнання.

Приведены основные результаты, полученные при выполнении научно-исследовательских работ по исследованию процессов в полупроводниково-трансформаторных преобразователях для питания электротехнологического оборудования.

Режими електротехнологічних процесів залежать як від конструктивних особливостей технологічних систем, так і від показників електричних параметрів електроживлення та їх стабільності. Протягом звітного періоду тривали дослідження особливості процесів електроживлення, перетворення параметрів електричної енергії та визначення оптимальних режимів електроживлення, що максимально враховують особливості технологічного обладнання та потреби технологічних процесів. Особлива потреба існує в дослідженні процесів у потужних системах електроживлення електронно-променевого, плазмового, індукційного технологічного обладнання через відсутність широковідомих результатів у застосуванні напівпровідникових перетворювальних засобів у таких галузях техніки.

До джерел електроживлення розглянутих технологічних установок пред'являються деякі спеціальні вимоги, наприклад, незмінність струму при динамічних збурюваннях у навантаженні та зменшення до мінімуму запасу енергії у вихідних ланцюгах при мінімальному рівні пульсацій вихідної напруги (струму). При цьому джерело електроживлення має бути високодинамічним, забезпечувати ефективну роботу установки від режиму холостого ходу до короткого замикання. Створення таких джерел з простою і надійною системою регулювання дасть змогу забезпечити необхідні характеристики електротехнологічних установок у цілому. Проведені дослідження дали змогу обґрунтувати кілька структурно-функціональних схем таких джерел із широтно-імпульсним та східчастим регулюванням вихідної напруги [1].

Досліджено процеси у вихідних колах джерел живлення при виникненні пробоїв у навантаженні [8]. Встановлено, що причиною сплесків струму, що виникають у вихідному контурі джерела живлення при пробі в електронно-променевій гарматі, є накопичення енергії в ємностях лінії з'єднання, вихідної ємності джерела та міжобмотувальних ємностях силового трансформатора при малій поздовжній індуктивності цього контура. При традиційному підключенні джерела до гармати за допомогою кабеля із заземленою зовнішньою жилою струми досягають значень, здатних призвести до відмови вихідного ланцюга джерела живлення.

У деяких випадках для обмеження зворотної хвилі струму при пробоях у навантаженні високовольтного джерела живлення потрібно вводити високовольтний дросель, зашунтований зворотним діодом або просто резистором, між виходом високовольтного випрямляча і технологічною установкою. Цей засіб захисту може бути ефективним і при короточасних пробоях, що самовідновлюються, коли електричний розряд нестійкий та час його деіонізації не перевищує декількох мікросекунд. Величина індуктивності високовольтного дроселя напряму залежить від приведеної ємності до вихідних клем джерела живлення й допустимої величини амплітуди зворотної хвилі струму, яку можуть пропустити діоди випрямляча високовольтного джерела живлення.

Встановлено, що для зменшення стрибків струму через випрямляючі діоди високовольтного випрямляча (зворотна хвиля струму), при пробоях у гарматі електронно-променевої плавильної установки, з'єднання виходу джерела з анодом і катодом гармати має здійснюва-

тися двопровідною лінією. Визначено умови вибору високовольтного дроселя для запобігання коливальному розряду в лінії з'єднання. Показано, що перенапруги на вихідних ланцюгах інвертора не перевищують гранично-припустимих значень напруг перемикаючих транзисторів інвертора, коли обмежується амплітуда короточасних імпульсів струму через паразитні прохідні ємності високовольтного трансформатора та вихідного ланцюга інвертора.

Встановлено, що при аналізі перехідних процесів у системі джерело живлення – лінія з'єднання – навантаження, для отримання більш достовірних результатів, особливо по перехідних процесах при пробоях у навантаженні високовольтного джерела живлення, необхідно враховувати вольт-амперні характеристики навантаження та реальні параметри діодів випрямляча.

Проводились дослідження динаміки роботи системи керування розробленого та виготовленого багатофазного з широтно-імпульсним керуванням джерела живлення «ДЖЕН 30-15» у режимах високовольтних пробів. Дослідження виконувалися за схемою, наведеною на рис. 1, за допомогою допоміжного пристрою – еквівалента розрядного навантаження, призначеного для імітації високовольтного пробую.

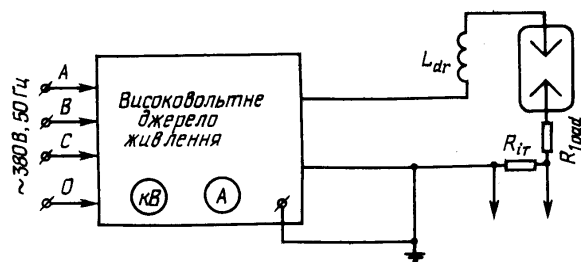


Рис. 1

Він являє собою послідовне з'єднання повітряного розрядника з конфігурацією електродів типу голка-площина та регульованою відстанню між ними в межах 5...35 мм і резистора навантаження R_{load} із встановлюваним опором у діапазоні 0...120 Ом. Для вимірювання струму пробую послідовно з еквівалентом розрядного навантаження включений резистор $R_{im} = 0,1$ Ом. Вихід високовольтного блока приєднаний високовольтним кабелем типу КВЕЛ-60 до високопотенціального електрода розрядника через високовольтний дросель із індуктивністю L_{dr} .

Методика вимірювань полягала в наступному. Встановлюючи відстань між електродами розрядника, при якому напруга пробую трохи менша вихідної напруги «ДЖЕН 30-15», за допомогою запам'ятовувального осцилографа вимірялися струм та напруга у навантаженні та деякі сигнали в системі керування рис. 2 (зліва – включення джерела живлення на розрядник, справа – стабілізація струму в дуговому проміжку під час пробую та вихід на безструмову паузу).

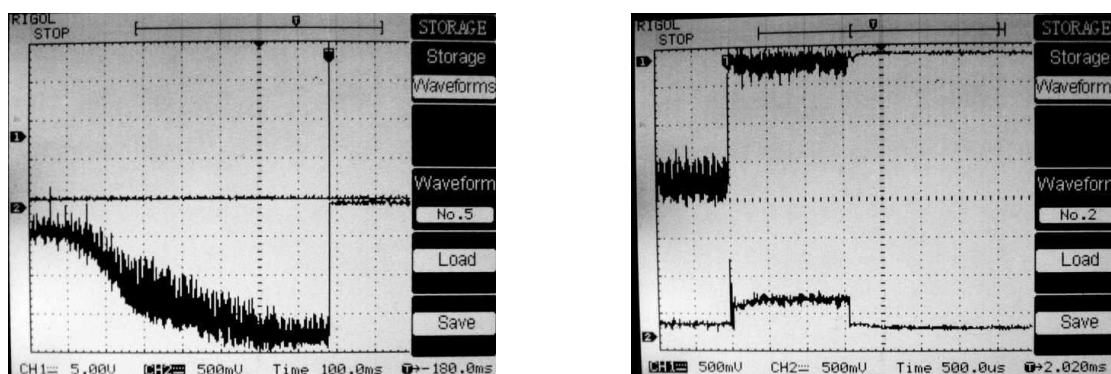


Рис. 2

Проведені випробування показали, що система керування разом з багатофазним інвертором забезпечує стабільну високу напругу 15...30 кВ з досить плавним виходом на сталі значення.

При пробоях у навантаженні система керування «ДЖЕН 30-15» переходить у режим автоматичного повторного включення (АПВ), при якому примусово обмежується вихідна потужність інвертора шляхом обмеження амплітуди струму колектора силових транзисторів, тобто підтримується обмежене значення струму пробую на заданий інтервал часу. Після цьо-

го система керування виключає джерело живлення, утримує тимчасову паузу встановленої тривалості (200 мкс...150 мс) до повного загасання розряду, після чого виконується автоматичне повторного включення джерела живлення. Такий режим повторюється циклічно.

Експериментально підтверджено, що спільне застосування методів високочастотного перетворення енергії, обмеження вихідного струму інвертора і обмеження вихідного струму високої напруги, які реалізовані в джерелі живлення «ДЖЕН 30-9» при незначній індуктивності струмообмежуючого дроселя та малій його енергоємності, малих габаритах, забезпечує ефективний захист інвертора, випрямляючих діодів високовольтного випрямляча та високовольтною ізоляції блока, підвищує надійність роботи високовольтного джерела живлення.

Опрацьовано технічні рішення щодо побудови джерела живлення для індукційного нагрівання в устаткуванні з виробництва кремнію. На відміну від традиційного резистивного нагрівання у цих системах індукційне нагрівання має переваги, пов'язані як з суто електроенергетичними чинниками (питома потужність резистивного нагрівання обмежена перерізом провідників, що безпосередньо виділяють тепло, проблемами контактного переходу, струми тощо), так і можливими технологічними чинниками (перемішування рідкого кремнію для вилучення небажаних домішок).

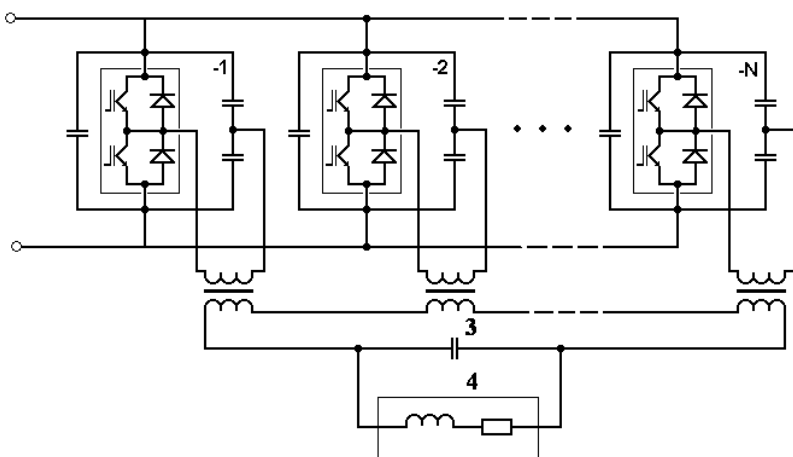
Основними елементами установки індукційного нагрівання є індуктор з предметом, що нагрівається, і інвертор (перетворювач частоти). Саме завдяки цим пристроям відбуваються всі термічні та електромагнітні процеси. Для аналізу електромагнітних процесів розроблена схема заміщення вихідної частини інвертора та індуктора установки.

Узгодження індуктора із джерелом електроживлення здійснюється різними способами. Однак у більшості установок індуктор використовується як елемент послідовного або паралельного коливального контура, що забезпечує роботу індуктора в гармонійному режимі. Вибір послідовного або паралельного резонансного контура має свої недоліки і позитивні властивості. Так, при послідовному контурі зростають напруги на індукторі та конденсаторі контура, а при паралельному контурі – струми через ці елементи. Ці розходження особливо важливі у вакуумних установках, коли підключення конденсатора, розташованого поза вакуумною камерою, до індуктора має здійснюватися через герметичний струмопровід.

Потужність установок індукційного нагрівання для промислового одержання злитків монокристалічного кремнію становить 200...400 кВт при частоті роботи індуктора 2...20 кГц, причому у ході технологічного процесу необхідно змінювати потужність у широких межах. Ефективність технологічного процесу багато в чому визначають властивості джерела електроживлення.

Через те, що електроживлення енергоємного електротехнологічного устаткування має свою специфіку, в основу побудови потужних джерел електроживлення були покладені наступні принципи:

1. Перехід на мережу середньої напруги 10 кВ із використанням виділеного розподільного трансформатора і 12-пульсного некерованого випрямляча. Це забезпечує зниження пульсацій випрямленої напруги, дає свободу у виборі робочої напруги інвертора і, що найважливіше, забезпечує значне зниження гармонік вхідного струму, що призводить до підвищення коефіцієнта потужності на вході джерела.



2. Виконання секціонованої силової частини джерела, що забезпечує

Рис. 3

розподіл тепловиділяючих елементів по конструкції, спрощує відведення тепла та знижує вплив індуктивності монтажу на процеси перемикачів.

З урахуванням наведених принципів побудови схема потужного джерела електроживлення індуктора без вхідного трансформатора та випрямляча показана на рис. 3, де 1,2...N – секціонований інвертор, 3 – погоджувачий конденсатор, 4 – індуктор.

Роль погоджувачого дроселя між виходом джерела та паралельним резонансним контуром виконують у розглянутій схемі індуктивності розсіювання трансформаторів, включених на виході секцій інвертора. Всі секції інвертора управляються загальним сигналом керування, а послідовне з'єднання вторинних обмоток вхідних трансформаторів комірок забезпечує вирівнювання навантажень на секції. Регулювання вихідної потужності забезпечується широтно-імпульсною модуляцією сигналів керування.

Проектування джерела живлення показало, що побудова джерел електроживлення великої потужності (300 кВт) при роботі від мережі середньої напруги (10 кВ) і використанні секціонованого інвертора може розглядатися як шлях підвищення техніко-економічних показників устаткування індукційного нагрівання.

Протягом звітного періоду продовжувались також роботи у напрямку розвитку теорії регулювання, дослідження та оптимізації процесів у перетворювачах напруги змінного струму, орієнтованих на застосування в електротехнологічному та електромеханічному обладнанні. Об'єктом дослідження були топологічно різноманітні трансформаторно-ключові виконавчі структури (ТКВС) високоефективних дискретних стабілізаторів напруги (ДС), що відрізняються високим рівнем електромагнітної сумісності зі споживачем та мережею живлення.

Узагальнено основні результати дослідження перспективних двотрансформаторних ТКВС з винесенням ключових напівпровідникових елементів з кіл силового струму [1].

Грунтовно ці питання висвітлені в дисертаційній роботі Можаровського А.Г. "Дискретні стабілізатори напруги змінного струму з двотрансформаторними виконавчими структурами" [6]. Робота присвячена розвитку теорії ТКВС дискретних стабілізаторів напруги змінного струму з поділом потужностей на регульовану й нерегульовану, розробці методу їх розрахунку, орієнтованого на модернізацію схемотехнічних рішень, і створенню на цій основі стабілізаторів з поліпшеними техніко-економічними показниками.

На підставі аналізу різних способів регулювання напруги обґрунтована актуальність і ефективність використання як виконавчих органів дискретних стабілізаторів змінної напруги ТКВС, що містять вольтододатковий трансформатор та автотрансформатор, які працюють на частоті напруги, та винесені з кола силового струму силові ключі, які комутуються з частотою, нижчою, ніж у мережі. В них характеристика вхід-вихід реалізується з кінцевої множини коефіцієнтів передачі по напрузі. Встановлено, що вибір величин коефіцієнтів передачі цієї характеристики відповідно до закону геометричної прогресії забезпечує задану точність вихідної напруги з постійною відносною, а запропонована його модифікація – абсолютною шириною петель гістерезису цієї характеристики.

Досліджено основні типові схеми структур даного класу, які можна розділити за місцем розміщення вторинної обмотки вольтододаткового трансформатора відносно автотрансформатора. З використанням розроблених для них математичних моделей для випадку формування гранично можливої характеристики вхід-вихід отримано вирази для визначення втткових співвідношень секцій обмоток електромагнітних елементів та напруг на них, що дає змогу синтезувати топологію структур. Також запропоновано критерії їх вибору для практичного застосування.

На підставі аналізу значень струмів у структурах, що досліджувались, методом індукції отримано залежності для визначення їх нормованих величин у загальному вигляді. Визначено встановлені потужності електромагнітних елементів, величини яких нормовані по їхніх номінальних значеннях, і досліджено їх залежність від параметрів поля стабілізації. Розроблено й реалізовано у вигляді програм методики для розрахунку основних характеристик виконавчого органу.

Показано, що окрема секція обмотки автотрансформатора максимально завантажена по струму тільки в якомусь одному зі станів (крім випадків, коли в певних режимах вони збігаються), при цьому не існує стану, коли завантаження всіх секцій обмоток максимальне. Визначено, що при такій нерівномірності струмового завантаження секцій обмоток автотрансформатора під час роботи його фактична розрахункова встановлена потужність менша обчисленої за максимально можливими струмами та напругами секцій обмоток. Зменшуються в цьому випадку й теплові втрати в ньому. Врахування цих факторів при виборі конструктивних параметрів автотрансформатора дає змогу поліпшити його масогабаритні показники.

Встановлено, що за певних умов у автотрансформаторі може виникнути так звана "негативна обмотка", фізична сутність якої полягає в тому, що її фазування протилежне обмотці, прийнятій за позитивну. Запропоновано конструктивну реалізацію цієї обмотки не як окремої, а як частини суміжної секції обмотки, що також призводить до зменшення загальної встановленої потужності автотрансформатора.

Встановлено, що в структурах, які досліджувались, у порівнянні з однострумковими з ключами у колі силового струму, величини струмів у ключах суттєво менші. Це дозволяє значно знизити вимоги до ключів і тим самим зменшити їх вартість, а також зменшити вартість та габарити радіаторів охолодження і перетворювача в цілому.

Розроблено інженерну методику розрахунку електромагнітних та ключових елементів виконавчих структур, що досліджувались. Визначено особливості побудови системи керування дискретного стабілізатора змінної напруги, заходи й засоби для його ефективної роботи. Отримано алгоритми керування, що забезпечують прийнятну електромагнітну сумісність стабілізатора з мережею живлення.

У результаті проведеного моделювання роботи стабілізатора встановлено, що застосування пристроїв даного типу розширює межі гарантованого функціонування навантаження. Крім того, моделювання підтвердило коректність і доцільність обраних методів і підходів при практичній реалізації вузлів дискретних стабілізаторів напруги (електромагнітних елементів, силових ключів, вузлів системи керування).

Вперше розглянуто дискретні системи стабілізації напруги за допомогою ТКВС, у яких регульовальні секції розміщувались на вторинному боці силового електромагнітного елемента. Запропоновано метод побудови розрахункової характеристики вхід-вихід стабілізаторів цього класу [4]. Доведено, що при однакових регульовальних секціях вона має вигляд, дуальний варіанту розміщення регульовальних секцій на первинному боці електромагнітного елемента: обов'язкові для штатної комутації ключових елементів петлі гістерезису характеристики збільшуються при зменшенні, а не при зростанні вхідної напруги, тобто найвужча (визначальна) петля гістерезису припадає на зону з найбільшою напругою переключення [3]. Привести характеристику вхід-вихід до прийнятного вигляду можна лише при регульовальних вихідних секціях, кількість витків яких змінюється за законом геометричної прогресії [2].

Визначено аналітичні залежності розрахункової встановленої потужності трансформуючого елемента дискретного стабілізатора напруги від глибини діапазону зміни вхідної напруги $G=U_{1\max}/U_{1\min}$ для обох випадків – розміщення регульовальних секцій на первинному та вторинному боці трансформатора. Доведено, що у другому варіанті цей показник буде у \sqrt{G} разів більший, тобто відповідно більшими будуть його маса та габарити [5].

Проаналізовано особливості регулювання напруги для формування вольт-амперних характеристик джерел живлення установок електродугового зварювання [8].

Виходячи з того, що системи управління цих джерел живлення мають давати змогу змінювати алгоритм роботи в залежності від особливостей технологічного процесу, було доведено доцільність використання в них програмуємих логічних інтегральних схем (ПЛІС).

У наших розробках, як правило, віддавалася перевага тим виробам, які дозволяють перепрограмування в системі (тобто без вилучення їх готового пристрою), і простим програмуємим пристроям, наприклад, як STK, ByteBlaster. Тобто основна перевага при застосуванні ПЛІС та мікроконтролерів – це можливість оперативної модифікації схеми управління без

її фізичної переробки. Це важливо як на етапах наукового дослідження та початкових етапах проектування і макетування пристрою, так і кінцевому етапі доведення пристрою до необхідної функціональності. В цілому це дає змогу без значних фінансових витрат освоїти досить складні зразки сучасної техніки.

З всієї номенклатури ПЛІС було надано перевагу виробам відомої фірми ALTERA. Це пов'язано з безоплатним програмним пакетом фірми ALTERA – MAX+PLUS II, робота над яким була освоєна без наявності перекладів чи якоїсь доступної літератури на цю тему. З всієї різноманітності мікроконтролерів використовуються компоненти компанії ATMEL. Налаштування їх мікропрограм проводиться за допомогою також безоплатного програмного пакета AVR-Studio, доступного на відповідному сайті компанії, та пакета візуального моделювання VMLAB.

Розробники перетворювальної техніки не завжди можуть бути задоволеними в цілому позитивними тенденціями у розвитку елементної бази. Наприклад, нарощування максимальної частоти роботи ПЛІС спричиняє зменшення стійкості пристроїв до наявності у колах електро- та радіошуму (вони в пристроях перетворювальної техніки часто мають максимальні рівні), а також пов'язаний з цим відносно великий струм споживання. Він складає приблизно 0,5...1,5 мА на один мікроелемент, що, звичайно, мало у порівнянні з компонентами стандартної серії ТТЛ-логіки, проте не йде в ніяке порівняння зі струмом споживання мікроконтролерів.

Характерною особливістю перетворювальної техніки є необхідність надійної ізоляції елементів управління від вихідної напруги силового виконавчого блока, власне куди і підключаються ланки зворотних зв'язків системи. У цьому плані раціональним є використання оптичних ізолюючих підсилювачів HCPL-7840. Саме завдяки їх застосуванню була значно спрощена система управління серійного універсального зварювального випрямляча ВДУ-505, здешевлене його виготовлення.

Таким чином, можна стверджувати, що результати досліджень за звітний період є певним кроком в отриманні нових теоретичних та практичних знань у сфері цілеспрямованого перетворення параметрів електроенергії та побудови відповідних енергоефективних перетворювачів.

1. *Липківський К.О., Мартинов В.В., Руденко Ю.В., Халіков В.А., Лебедєв Б.Б., Можаровський А.Г.* Дослідження та розробка напівпровідниково-трансформаторних перетворювачів для живлення електротехнологічного обладнання // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ. – 2009. – Вип. 23. – С. 72–82.
2. *Липковський К.А., Руденко Ю.В.* Особенности внешней характеристики секционированного стабилизированного источника электропитания // Техн. електродинаміка. – 2009. – № 4. – С. 7–11.
3. *Липковський К.А., Руденко Ю.В.* Пути повышения точности стабилизации выходного напряжения секционированных источников вторичного электропитания // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ. – 2009. – Вип. 22. – С. 49–52.
4. *Липковський К.А., Руденко Ю.В.* Стабилизация выходного напряжения высоковольтных источников электропитания // Техн. електродинаміка. – 2009. – № 2. – С. 36–41.
5. *Липковський К.А., Руденко Ю.В.* Установленная мощность трансформаторов в дискретных стабилизаторах напряжения переменного тока // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ. – 2009. – Вип. 24. – С. 55–59.
6. *Можаровський А.Г.* Дискретні стабілізатори напруги змінного струму з двотрансформаторними виконавчими структурами: Автореф. дис. ... канд. техн. наук / Ін-т електродинаміки НАН України. – Київ, 2009. – 19 с.
7. *Халіков В.А., Липківський К.О., Шатан О.Ф.* Шляхи та засоби вдосконалення установок електродугового зварювання // Техн. електродинаміка. – 2009. – № 1. – С. 77–80.
8. *Шидловская Н.А., Мартынов В.В.* Согласование высоковольтного источника питания с электронно-лучевой установкой // Техн. електродинаміка. – 2010. – № 1. – С. 73–79.