

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОДІЇ СИЛОВИХ ТРАНЗИСТОРНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ З ДУГОВИМИ, ПЛАЗМОВИМИ ТА ПРОМЕНЕВИМИ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ НАВАНТАЖЕННЯМИ

Наведено основні результати, отримані при виконанні науково-дослідної роботи "Фінал".

Розробка нових технологій, що базуються на можливості ефективного використання дії електромагнітної енергії, провадиться інтенсивно в різних країнах, зокрема, у США, Німеччині, Росії, Латвії, Україні. Результати попередніх досліджень, проведених в Інституті електродинаміки НАН України, показують, що режими технологічних процесів залежать як від конструктивних особливостей технологічних систем, так і від показників електричних параметрів електроживлення та їх стабільності. Тому дослідження процесів перетворення параметрів електричної енергії та визначення оптимальних режимів електроживлення, що максимально враховують особливості технологічного обладнання та потреби технологічних процесів, є актуальною науково-технічною проблемою. Особлива потреба існує в дослідженні процесів у потужних системах електроживлення для технологічного обладнання через відсутність широковідомих результатів у застосуванні напівпровідникових перетворювальних засобів у таких галузях техніки.

Основною метою досліджень завершеної в 2009 р. науково-дослідної роботи "Фінал" було підвищення ефективності технологічних процесів завдяки вивченню процесів взаємодії технологічних навантажень з транзисторними перетворювачами та пошук нових структур перетворювачів, що враховують особливості процесів у навантаженні. Головний висновок проведених досліджень полягає в тому, що використання спеціалізованих джерел живлення, які максимально враховують особливості процесів у технологічному навантаженні, наприклад, таких, як електронно-променеві гармати, дугові повітряні плазмотрони, вакуумно-дугові випаровувачі, є ефективним напрямком покращення показників технологічного обладнання.

У процесі виконання НДР розглянуто особливості процесів електроживлення електронно-променевих гармат та потужних газових плазмотронів. На базі досліджень розроблені експериментальні зразки джерел живлення. Отримано результати їх експериментальних досліджень. Наведено відомості про впровадження розробок у дослідно-промислову експлуатацію. Основні результати теоретичних та практичних досліджень за темою та рекомендацією, що впливають з цих досліджень, полягають у наступному.

У ході виконання НДР показано [2], що для суттєвого покращення електромагнітної сумісності потужного технологічного устаткування з джерелами живлення на основі транзисторних перетворювачів доцільне застосування окремого спеціалізованого мережевого трансформатора, розрахованого на мережі середніх напруг 6...10 кВ та виконаного із вторинними обмотками, що з'єднані в трикутник та зірку.

Одними зі спеціальних вимог, які пред'являються до джерел електроживлення розглянутих технологічних установок, є незмінність струму при динамічних збурюваннях у навантаженні та зменшення до мінімуму запасу енергії у вихідних ланцюгах при мінімальному рівні пульсацій вихідної напруги (струму). Проведені дослідження дали змогу обґрунтувати кілька принципів побудови високовольтних джерел електроживлення для електронно-променевих технологічних установок [7, 8, 9], які максимально задовольняють перерахованим вище вимогам. Структурно-функціональні схеми таких джерел із широтно-імпульсним регулюванням і східчастим регулюванням вихідної напруги наведені на рис. 1 та 2.

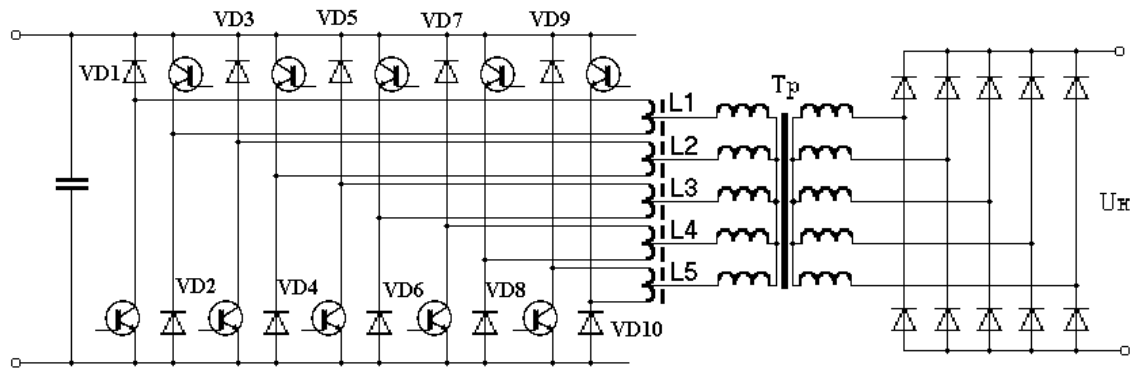


Рис. 1

Джерела живлення з широтно-імпульсним регулюванням на основі багатозазних перетворювачів при відносно невисокій частоті комутації в кожному каналі дають змогу істотно підвищити еквівалентну частоту пульсацій у вихідній напрузі. Еквівалентна частота пульсацій пропорційна числу фаз перетворювача. Чим більше фаз у перетворювачі, тим вища частота і менша амплітуда пульсацій вихідної напруги, тим менше вимог до параметрів вихідного фільтра і для багатьох задач його можна взагалі виключити. Інша особливість багатозазних систем полягає в тому, що потужність навантаження можна рівномірно розподілити між фазами перетворювача.

У результаті проведених досліджень встановлено [4], що основним чинником, який впливає на розподіл струмів у фазах спеціалізованого багатозазного інвертора (рис. 1) та на амплітуду пульсацій випрямленої вихідної напруги високовольтного джерела живлення, є індуктивність розсіювання між напівобмотками дроселів і первинною та вторинною обмотками трансформатора силового інвертора. Аналіз виразів, що описують зміни фазних струмів п'ятифазного інвертора з п'ятифазним випрямлячем, показав, що струми у фазах рівні. При $7 < \frac{T}{\tau} < \infty$ форма струму у фазах має східчасту форму. Тривалість ступенів дорівнює $\frac{T}{10}$, при

чому амплітуда ступенів на півперіоді фазного струму при $\frac{T}{\tau} \rightarrow \infty$ дорівнює таким значенням: $0,068 \cdot I_m$; $0,367 \cdot I_m$; $0,333 \cdot I_m$; $0,632 \cdot I_m$; $0,598 \cdot I_m$, де $I_m = \frac{E}{R_n}$; E – напруга живлення ін-

вертора; R_n – опір навантаження інвертора;

$f = \frac{1}{T}$ – частота

п'ятифазної вихідної напруги інвертора. Встановлено, що якщо постійна часу вихідних кіл інвертора підпорядковується виразу $\tau = \frac{L_s}{R_n} < \frac{T}{37}$, то

пульсації при випрямленні сформованої інвертором напруги не перевищують 24,8 %, без додаткових заходів по фі-

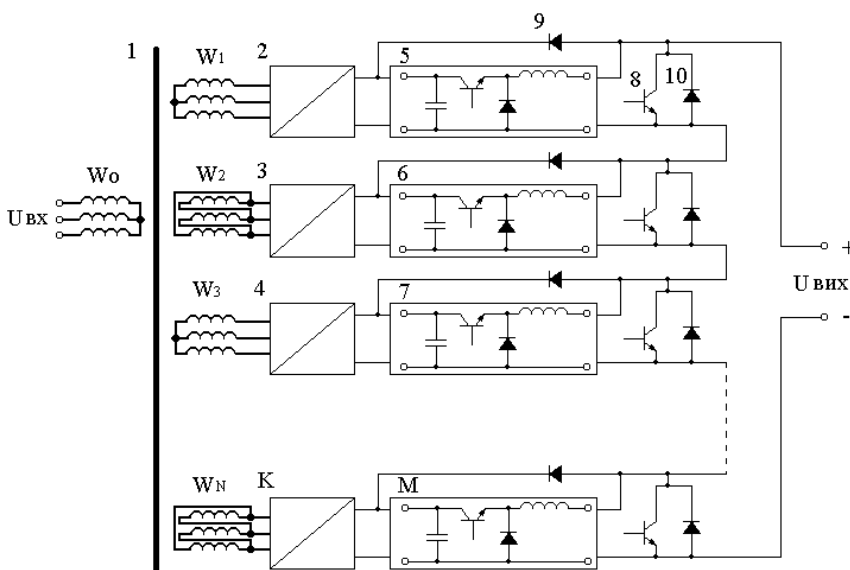


Рис. 2

льтрації вихідної (випрямленої) напруги.

Якщо постійна часу системи дорівнює $\frac{T}{7}$, пульсації у випрямленій напрузі не перевищують 1,8 %. Доведено, що у випрямленій напрузі багатофазного інвертора відсутні пульсації, і струми у фазах мають прямокутну форму тільки у тому випадку, коли відсутня індуктивність розсіювання між напівобмотками дроселів і первинною та вторинною обмотками силового трансформатора.

Визначено середні та діючі значення фазного струму в п'ятифазному інверторі з урахуванням індуктивності розсіювання. Діюче значення фазного струму, як випливає з проведеного аналізу, при $\frac{T}{\tau} > 37$ відповідає значенню $0,4 \cdot I_m$.

У п'ятифазному інверторі вихідна потужність при рівних значеннях амплітуд струмів у фазах може бути збільшена майже на 40 % у порівнянні з трифазним інвертором, у якому використовуються такі ж принципи побудови. Це підтверджується результатами моделювання і експериментальними дослідженнями спеціалізованого багатофазного інвертора.

Джерела живлення на основі секціонованих структур дають змогу дискретно, по кроках, змінювати вихідну напругу, що дає можливість регулювати вихідну напругу в заданих межах, а також підтримувати стабільність напруги на навантаженні при зміні струму навантаження і вхідної напруги [5]. Розмір сфери стабілізації при цьому становить величину, рівну напрузі на виході однієї секції. У разі пробою у навантаженні, секціоновані джерела живлення дозволяють формувати задану крутість фронту наростання вихідної напруги після пробоїв і одночасно за характером наростання вихідної напруги діагностувати працездатність кожної секції джерела.

Крім того, секціонована структура джерела дає змогу рівномірно розподілити потужність навантаження між секціями перетворювача, зменшивши тим самим рівень перетворюваної потужності і робочої напруги в кожній секції.

Всебічний аналіз електромагнітних процесів показав, що в даному джерелі живлення форма лінійних (фазних) струмів первинної обмотки силового трансформатора визначається тільки 11- і 13-ю вищими гармоніками, амплітуди яких у 10 разів менші амплітуди основної гармоніки. Це визначає практично синусоїдальний характер вхідних струмів джерела живлення. Розрахований коефіцієнт гармонік набуває значення у межах 0,05...0,12 у діапазоні номінальних струмів навантаження, а коефіцієнт потужності – не гірше 0,96...0,97.

Комплексний внутрішній опір, що визначає нестабільність вихідної напруги, для даного класу джерел живлення змінюється у межах 10...20 ВА і збільшується в міру зростання активних втрат та індуктивності розсіювання у силовому трансформаторі джерела живлення.

Відмінність значень коефіцієнта гармонік вхідного струму і коефіцієнта пульсацій вихідної напруги при номінальних робочих значеннях і при парній і непарній кількості працюючих секцій незначна, і нею можна знехтувати.

Внутрішні параметри трансформатора неоднозначно впливають на показники якості енергії на вході й виході джерела живлення через те, що зі збільшенням індуктивності розсіювання трансформатора зростає нестабільність вихідної напруги, але зменшується коефіцієнт гармонік вхідного струму. Тому при проектуванні подібних систем живлення необхідно шукати компромісні рішення.

У ході виконання НДР були досліджені процеси у вихідних колах джерел живлення при виникненні пробоїв у навантаженні [3]. Причиною сплесків струму, що виникають у вихідному контурі джерела живлення при пробі в електронно-променевої 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 кабелю із заземленою зовнішньою жилою струми досягають значень, здатних призвести до відмови вихідного ланцюга джерела живлення.

Встановлено, що при аналізі перехідних процесів у системі джерело живлення – лінія з'єднання – навантаження, необхідно враховувати вольт-амперну характеристику навантаження та реальні параметри діодів випрямляча.

Найпростішим засобом обмеження зворотної хвилі струму при пробоях у навантаженні високовольтного джерела живлення є введення високовольтного дроселя (зашунтованого зворотним діодом або просто резистором) між виходом високовольтного випрямляча і технологічною установкою [6]. Цей засіб захисту може бути ефективним і при короткочасних пробоях, що самовідновлюються, коли електричний розряд нестійкий та час його деіонізації не перевищує декількох мікросекунд. Величина індуктивності високовольтного дроселя безпосередньо залежить від наведеної 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 здійснюватися двопровідною лінією. Визначені 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 короткочасних імпульсів струму через паразитні прохідні ємності високовольтного трансформатора та вихідного ланцюга інвертора.

Зменшення амплітуди і тривалості сплесків струму у вихідних колах багатосекційного джерела живлення [7] при пробоях у навантаженні може бути досягнуте завдяки включенню додаткового резистора у вихідних ланцюгах джерела живлення [3].

У ході виконання НДР досліджено взаємозв'язок електромагнітних і теплових показників силових трансформаторів з геометричними величинами їх магнітопроводів. Дослідження ґрунтуються на загальних положеннях теорії подібності і закономірностях геометрії електромагнітних систем. Виведені рівняння взаємозв'язку геометрії стержньового магнітопровода з електромагнітними і тепловими величинами трансформатора дають змогу за змінами геометрії магнітопровода розрахувати зміни параметрів високочастотного силового трансформатора.

Встановлено, що у стержньового трансформатора незмінної потужності наслідком зменшення в певному діапазоні відношення висота–товщина магнітопроводу є: збільшення площі перетину стержня магнітопроводу, що несе на собі обмотки; зменшення числа витків обмоток; зменшення додаткових втрат потужності; зменшення індуктивності розсіювання; збільшення відношення обсягів магнітопровід–котушка; збільшення відношення поверхонь охолодження магнітопровід–котушка.

Встановлено, що низьке перегрівання котушки стержньового трансформатора з підвищеними значеннями коефіцієнта відношення втрат потужності в складовому магнітопроводі і котушці досягне у природних умовах охолодження лише в конструкції складового магнітопроводу з охолоджуючими зазорами між його частинами.

Визначено, що у стержньового трансформатора на основі розщепленого магнітопроводу (складеного з сердечників одного типорозміру з охолоджуючими зазорами між ними) при незмінних потужності, частоті і умовах охолодження зменшення в певному діапазоні відношення висота–товщина магнітопроводу призводить до зменшення перегрівань магнітопроводу і котушки.

У ході виконання НДР встановлено, що у потужних багатофазних некерованих випрямлячах [1], навантажених на стабілізатори напруги, струму або потужності, при зниженні ємності вихідного фільтра можуть виникати коливання вихідної напруги. Одним із заходів по усуненню коливань може бути введення RLC ланцюга паралельно ємності вихідного фільтра.

Опрацьовані технічні рішення [10] щодо побудови джерела електроживлення плазмотрона постійного струму (рис. 3) потужністю 0,5 МВт підтверджують перспективність запропонованої структури джерела електроживлення.

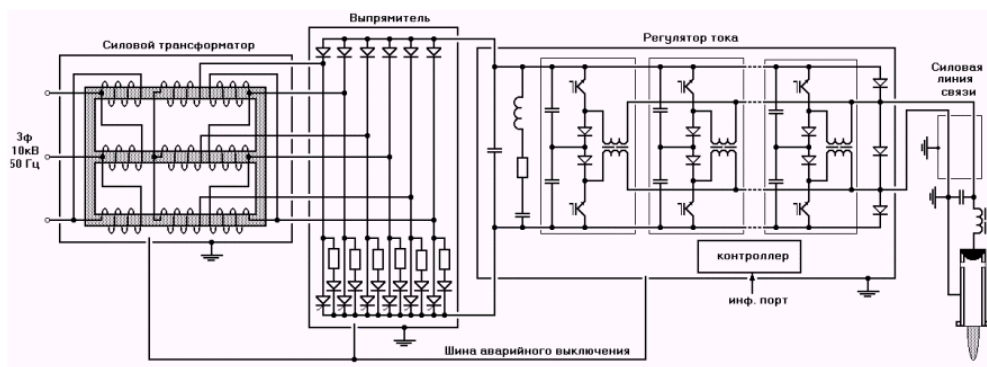


Рис. 3

Експериментально підтверджено, що багатофазні високовольтні джерела живлення з багатофазним випрямленням забезпечують отримання необхідної якості анодної напруги для електронно-променевої гармати без застосування фільтруючих ланцюгів після випрямлення. Це дає змогу істотно зменшити безструмові паузи приблизно на порядок і більше, зменшити кількість іскрових розрядів, які переходять у дугові, і тим самим підвищити тепловкладення в ході технологічного процесу.

Розроблено та виготовлено високовольтне джерело живлення для електронно-променевих гармат потужністю 450 кВт з вихідною напругою 30 кВ постійного струму. Проведена робота підтверджує ефективність використання для електронно-променевих гармат джерел живлення на основі багатофазних спеціалізованих інверторів.

Отримані результати можуть бути використані при створенні потужних джерел живлення для використання з електронно-променевим та плазмовим устаткуванням.

Приведены основные результаты, полученные при выполнении научно-исследовательской работы "Финал".

The results of science and research engineering "Final" are shown.

1. Комаров Н.С. О согласовании мощных импульсных стабилизаторов с питающей сетью / Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2006. – № 3(15). – С. 77–81.
2. Комаров Н.С., Мартынов В.В. Особенности электропитания энергоемкого электротехнологического оборудования // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2007. – №2(17). – С. 67–72.
3. Комаров Н.С., Руденко Ю.В. Процессы в выходной цепи источника электропитания электронно-лучевой пушки при пробоях // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2008. – Вип. 21. – С. 109–117.
4. Мартынов В.В. Распределение токов в фазах пятифазного инвертора // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2006. – № 2(14). – С. 104–105.
5. Руденко Ю.В. Регулировочные характеристики секционированного источника питания для электронно-лучевых технологий // Техн. електродинаміка. – 2009. – № 1. – С. 67–70.
6. А.с. 1433693 СССР. Источник питания для электронно-лучевой сварочной установки / Г.А. Лоскутов, Н.Н. Казимиров и др. – 1990. – БИ № 22.
7. Пат. 85316 Україна. Високовольтне джерело живлення для електронно-променевого обладнання / М.С. Комаров, Ю.В. Руденко. – 2009. – БВ № 1.
8. Пат. 29547 Україна. Пристрій електроживлення електронно-променевої установки / М.С. Комаров, В.В. Мартынов / Промислова власність. Опубл. 15.11.2000. – № 6.
9. Пат. 2349020 Россия. Высоковольтный источник питания для электронно-лучевого оборудования / Н.С. Комаров, Ю.В. Руденко. – 2009. – БВ № 7.
10. Gnedenko V.G., Ivanov A.A., Komarov N.S., Mongeran Ju.P., Pereslavl'tsev A.V., Titov V.V., Tresviatsky S.S. Direct current arc plasma torch facility for plasma treatment of wastes / V-International Conference Plasma Physics & Plasma Technology, September 18-22, 2006, Minsk, Belarus. – P. 715–718.