

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

Чернай Валерій Федорович

УДК 621.314.214.3:621.316.728

**СТАБІЛІЗАТОРИ НАПРУГИ, СТРУМУ ТА ПОТУЖНОСТІ
ЗМІННОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА ОСНОВІ ІНДУКТИВНО-ЄМКІСНОЇ ЛАНКИ З
РЕГУЛЬОВАНОЮ ІНДУКТИВНІСТЮ**

Спеціальність 05.09.12 – напівпровідникові перетворювачі електроенергії

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2002

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному технічному університеті
“Харківський політехнічний інститут” Міністерства освіти і науки України, м Харків.

Науковий керівник – доктор технічних наук, професор,
Сокол Євген Іванович,
Національний технічний університет

“Харківський політехнічний інститут”,
завідувач кафедри
промислової і біомедичної електроніки

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор,
Сінчук Олег Миколайович,
Українська державна Академія
залізничного транспорту,
завідувач кафедри
систем електричної тяги

кандидат технічних наук
Бару Олександр Юрійович,
Науково-виробниче підприємство “ЕОС”,
технічний директор

Провідна установа – Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут”
Міністерства освіти і науки України,
кафедра теоретичних основ електротехніки, м. Київ

Захист відбудеться 24.10. 2002 р. о 13 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д
64.050.04 в Національному технічному університеті “Харківський політехнічний інститут” за
адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету
“Харківський політехнічний інститут”.

Автореферат розісланий 30.08. 2002 року.

В. о. вченого секретаря
спеціалізованої вченої ради

Гончаров Ю.П.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми Напівпровідниковий перетворювач електроенергії разом з іншими нелінійними елементами схеми викликає в первинній мережі електромагнітні перешкоди в широкому спектральному діапазоні, сформовані вищими гармоніками струмів та напруг. Внаслідок цього зростають втрати електроенергії, скорочується термін служби обладнання, зокрема конденсаторних пристроїв. Вказана проблема актуальна і може бути вирішена при використанні керованих індуктивно-ємкісних перетворювачів, в яких використовується явище резонансу в режимі стабілізації вихідного струму та відхід від резонансу в режимах стабілізації вихідної напруги або потужності.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Аналіз результатів і теоретичне узагальнення ряду НДР і ДКР, виконаних здобувачем в 1975-1998 рр. в декількох НДІ, СКБ і ПКІ, проведені в рамках науково-дослідної теми 04.08.02003 науково-дослідної програми 04.08 “Високоєфективні електротехнологічні та електротехнічні системи”, що входить до складу програми “Екологічно чиста енергетика та ресурсозберігаючі технології”, затвердженої наказом Міністерства науки України №102 від 23.04.1997 р.

Мета і задачі дослідження

Метою роботи є створення більш ефективної, порівняно з відомими, системи стабілізації струму, напруги і потужності для комбінованого електроживлення загальнопромислових споживачів потужністю від одиниць до десятків кіловат, дослідження режимів роботи та робочих характеристик.

Для досягнення цієї мети в дисертації ставляться та вирішуються наступні задачі:

1. Побудова системи електроживлення змінного навантаження із стабілізацією вихідних параметрів: струму, напруги, потужності.
2. Розробка математичного апарата для аналізу періодичних режимів в системі електроживлення та управління.
3. Створення інженерної методики розрахунку параметрів елементів і функціональних блоків систем стабілізації струму, напруги та потужності.
4. Технічна реалізація комбінованої системи стабілізації та визначення області її раціонального використання.
5. Створення алгоритму і програмного забезпечення для оцінки показників якості системи електроживлення.

Об'єктом дослідження є система електроживлення навантаження із змінними параметрами, що складається із силового модулятора, індуктивно-ємкісного перетворювача (ІЄП), узгоджувального трансформатора, випрямляча і системи управління із зворотним зв'язком по струму, напрузі та потужності, котра діє на силовий модулятор. Для стабілізації вихідних параметрів засобом зміни коефіцієнта передачі між джерелом живлення і змінним навантаженням застосовано регулювання числа робочих витків індуктивності в індуктивно-ємкій ланці перетворювача.

Предмет дослідження — визначення параметрів реакторів, узгоджувальних трансформаторів і фільтрокомпенсуючих пристроїв, що перетворюють електричну енергію, здійснюють фільтрацію вищих гармонік вхідного струму і випрямленої напруги, та забезпечують досягнення високих енергетичних показників.

Методи дослідження. Для урахування параметрів процесів, що відбуваються в замкнених нелінійних системах регулювання, застосовані аналітичні та чисельні методи розрахунків. Вони використані для складання і рішення систем трансцендентних рівнянь, а для оцінки достатньої точності проведені досліди на експериментальних зразках перетворювачів.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

1. Розроблено наближений метод аналізу періодичних режимів в перетворювачах електроенергії на основі LC - ланки з регульованою індуктивністю.
2. Визначені умови знаходження максимуму вихідного параметра системи електроживлення змінного навантаження при стабілізації напруги, струму, потужності.
3. На основі наближеного методу аналізу оригінальних схем електроживлення змінного навантаження виконаний параметричний синтез, що дозволяє оцінити ефективність пристроїв аналогічного призначення.

Практичне значення одержаних результатів полягає в такому:

1. Досліджені характеристики оригінальних систем стабілізації струму, напруги, потужності і виконана їхня технічна реалізація.

2. Проведений порівняльний аналіз найбільш типових схемних рішень джерел електроживлення змінного навантаження і визначені області їх раціонального використання.
3. Розроблена інженерна методика проектування систем, що забезпечують комбіноване електроживлення змінного навантаження, і реалізована в дослідно-промислових зразках, впроваджених на НВО “Карбонат” (м. Харків).

Особистий внесок здобувача. Роботи [2, 7, 10-12] написані автором самостійно. У статтях [1, 3, 4, 8, 9] автору належить розробка методик аналізу періодичних режимів в напівпровідникових перетворювачах електроенергії з використанням умов знаходження максимуму вихідного параметра при регулюванні напруги, струму та потужності в замкненій системі автоматичного регулювання (САР). Результати робіт [5, 6] належать авторам рівною мірою, на основі наближеного методу аналізу оригінальних схем управління змінного навантаження виконаний параметричний синтез, а висновки підтверджені експлуатацією дослідно-промислових зразків, коректністю математичних моделей та результатами експериментів. У винесених на захист наукових положеннях не містяться результати, що належать співавторам.

Апробація результатів дисертації. Основні результати досліджень викладені та обговорені на таких науково-технічних конференціях і семінарах: “Оптимизация полупроводниковых устройств преобразовательной техники” - Київ, 1976 р.; “Проблемы преобразовательной техники” - Київ, 1983 р.; “Проблемы нелинейной электротехники” - Львів, 1984 р.; “Применение преобразовательной техники в электроэнергетике, технологических установках и электроприводе” - Тольятті, 1984 р.; “Проблемы электромагнитной совместимости силовых полупроводниковых преобразователей” - Таллінн, 1986 р.; “Управление эффективностью энергоиспользования” - Одеса, 1995 р.; “Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика” - Харків, 1995 р.; “Силовая электроника в решении проблем ресурсо- и энергосбережения” - Алушта, 1996 р.; “Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика” - Харків, 1997 р.; “Нетрадиционные электромеханические и электрические системы” - Харків, 1997 р.; “Системы и средства передачи и обработки информации” - Одеса, 2000 р.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 12 наукових праць, з них 5 – самостійних: 1 стаття в науковому журналі, 6 – в збірниках наукових праць, 3 – в матеріалах конференцій, 2 авторських свідчення.

Структура та обсяг дисертації Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків і додатка. Повний обсяг дисертації становить 161 сторінок, з них 23 ілюстрації по тексту, 11 ілюстрацій на 9 сторінках; 3 таблиці по тексту, 4 таблиці на 5 сторінках; 2 додатка на 2 сторінках; список використаних літературних джерел із 130 найменувань на 14 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ роботи

У вступі обґрунтована актуальність теми, показана наукова новизна роботи, сформульовані мета і основні задачі дослідження, викладені наукові і практичні результати роботи.

В першому розділі розглянуті способи корекції вихідних характеристик джерела живлення при змінному навантаженні. Викладені спосіб корекції та аналіз характеристик навантаження перетворювача постійної напруги в змінну на основі LC-ланки з регульованою індуктивністю.

До споживачів електричної енергії, що вимагають стабілізації вихідного струму і потужності, відносяться пристрої для електролізу і гальваніки, стаціонарні джерела

електроживлення для електрообладнання літаків. Стабілізація вихідної напруги і потужності здійснюється в пристроях електроерозійної обробки металів та перевірки ізоляції кабелю.

Відомі способи корекції характеристик навантаження, наприклад в індуктивно-ємкісних трансформуючих пристроях, що управляються згідно методу В.А. Кулініча, використовують регулювання струму в індуктивності для корекції форми вихідного струму перетворювача. Однак в них не реалізовані комбіновані режими електроживлення: стабілізація струму і потужності, стабілізація напруги і потужності. Тому вони мають обмежений діапазон стабілізації параметрів навантаження.

Досліджуване джерело електроживлення навантаження Z_1 із змінними параметрами (рис. 1) подане як перетворювач, у котрого на вході розміщений силовий модулятор (ключові елементи S_1, S_2, S_3, S_4), що управляється генератором G_1 симетрично способом імпульсно-фазової або широтно-імпульсної модуляції. До виходу модулятора підключений регулюючий елемент, що містить індуктивно-ємкісну ланку із змінюваним числом робочих витків первинної обмотки трансформатора T_1 для підстроювання індуктивності ланки в резонанс для режиму стабілізатора струму, або для виходу із резонансу при стабілізації вихідної напруги. Для стабілізації потужності в навантаженні Z_1 використовується зворотній зв'язок з блоку перемноження KXU . Для контролю максимуму вихідного параметра (струму, напруги або потужності) запропоновано змінювати співвідношення між внутрішнім імпедансом джерела з послідовною LC -ланкою и зовнішнім імпедансом електричного ланцюга шляхом впливання на коефіцієнт передачі ступінчато регульованої індуктивності. Для реалізації змінного коефіцієнта передачі сигнал, пропорційний вихідним струму, напрузі або потужності, перемикається логічними елементами, і через диференціатор D/DT , реверсивний лічильник CT та дешифратор DS подається на управління ключами S_5, S_6 та S_7 , що регулюють число робочих витків індуктивності LC -ланки перетворювача.

В схемі заміщення (рис. 2) прийнято: R'_S - опір навантаження, зведений до первинної

обмотки трансформатора T_1 з урахуванням коефіцієнта трансформації K_T .

Диференційне рівняння схеми вирішено із застосуванням прямого перетворення Фур'є. Для вихідної напруги та струму визначені умови максимумів.

На основі кореневого критерію якості перехідного процесу виявлено співвідношення параметрів, що забезпечують періодичний режим роботи. Відносне значення вихідної напруги перетворювача одержано у вигляді:

$$U = \frac{U_{sm}}{E} = f \left(K_T, \frac{\rho}{R'_S} \right), \quad (1)$$

де $\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}$ – хвильовий опір LC -ланки,
 U_{sm} – максимальне значення напруги на навантаженні.

Рис. 1. Стабілізоване джерело електроживлення з регульованою індуктивністю:
а) – функціональна схема індуктивно-ємкісного перетворювача;

- б) – зміна в часі коефіцієнта трансформації реактора LC-ланки;
- в) – залежність вихідного параметра від коефіцієнта трансформації;
- г) – траєкторія робочої точки комбінованого джерела електроживлення.

Рис. 2. Схема заміщення перетворювача постійної напруги в змінну

Після введення параметра схеми $b = \frac{\rho}{R_s}$ та застосування рівняння Пуассона:

$$\frac{\partial}{\partial U} \left[\frac{\partial}{\partial U} f(U, K_T, b) \right] + \frac{\partial}{\partial K_T} \left[\frac{\partial}{\partial K_T} f(U, K_T, b) \right] + \frac{\partial}{\partial b} \left[\frac{\partial}{\partial b} f(U, K_T, b) \right] = f(U, K_T, b), \quad (2)$$

визначена область допустимих значень параметрів U, K_T, b системи, що діє в періодичному режимі, і подана в роботі у вигляді трьохвимірної графіка.

У другому розділі проведено узагальнення запропонованого способу корекції вихідних характеристик для трьохфазних перетворювачів змінної напруги, і шляхом гармонічного аналізу виконана оцінка електромагнітної сумісності. Складені енергетичні співвідношення, і на основі визначення встановленої потужності реактивних елементів показана область раціонального застосування досліджуваного та аналогічних пристроїв. Для ряду схем випрямлення визначені умови стабілізації вихідних параметрів і наведено побудову системи авторегулювання.

В кожній із фаз системи електроживлення (рис. 3) робочі витки індуктивних елементів перемикаються для підстроювання в резонанс в режимі стабілізатора струму та для виходу із резонансу при стабілізації вихідної напруги.

Рис. 3. Трьохфазний індуктивно-ємнісний перетворювач:
а) – силова схема; б) – схема заміщення.

Однофазна схема заміщення для розрахунку струмів і напруг одержана з

припущенням про симетрію лінійних напруг, уведена ЕРС взаємоіндукції $\dot{E}_M$, що враховує коефіцієнт взаємоіндуктивного зв'язку дроселів $M = |K_C| \cdot L$. Система рівнянь схеми має вигляд:

$$\begin{cases} \dot{E}_L = j\omega L(1 + |K_C|)I_L + U_C \\ U = I_H Z_H = I_C \frac{1}{j\omega C} \\ I_L = I_C + I_H \end{cases} \quad (3)$$

де I_L, I_C, I_H – струми відповідно в ланцюгах дроселя, конденсатора і навантаження.

Із цієї системи одержано співвідношення для змінного коефіцієнта трансформації:

$$K_T = \frac{0,75 I_H}{\sqrt{3} E_L} \omega L (1 + |K_C|), \quad \text{, умова стабілізації струму навантаження:}$$

$$1 - \omega^2 LC(1 + |K_C|) = 0$$

та умова зменшення k -тих гармонік струму конденсатором, що шунтує навантаження:

$$\frac{I_{HK}}{I_{СК}} = \frac{1}{k \cdot n_H}, \text{ де } n_H = \frac{Z_H}{\omega \cdot L} = Z_H \cdot \omega \cdot C \cdot (1 + |K_C|) \text{ – параметр схеми.}$$

При імпульсно-фазовому управлінні ключовими елементами в лінійних струмах трьохфазних перетворювачів виникають гармоніки, що перевищують частоту електромережі. Оскільки в трикутному контурі LC - ланок виключені гармоніки, кратні трьом, то в даній трьохфазній системі допоміжні фільтри для послаблення гармонік в лінійних струмах не використовуються.

Система електроживлення у вигляді трьохфазного індуктивно-ємкісного перетворювача з некерованим випрямлячем подана на рис. 4.

Для аналізу параметрів режимів стабілізації струму, напруги і потужності змінного навантаження в цій схемі складена система трансцендентних рівнянь, які подані нижче функціональними залежностями:

$$U_{d\alpha} = f(\alpha, I_d, U_\phi) \text{ - вихідної напруги від фазної } U_\phi \text{ і кута управління } \alpha;$$

$$I_d = f(U_\phi, X_S, \alpha, \gamma) \text{ - вихідного струму від фазної напруги } U_\phi, \text{ реактивного опору}$$

$$X_S, \text{ кутів управління } \alpha \text{ та комутації } \gamma; S = f(P_d, \nu, \varphi_1) \text{ - повної потужності}$$

від активної потужності P_d , коефіцієнта перекручування ν струму, що споживається з

мережі, та кута зсуву φ_1 першої гармоніки струму відносно напруги мережі;

$$Q = f(S, \nu, \varphi_1) \text{ - реактивної потужності, що споживається з мережі;}$$

$$T = f(S, P_d, Q) \text{ - потужності скривлення.}$$

Рис. 4. Індуктивно-ємкісний перетворювач змінної напруги в постійну:
а) – силова схема; б), в) – вхідні та вихідні експериментальні характеристики

$$\text{Використовуємо співвідношення кутових величин: } \varphi_1 = f(\alpha, \gamma) \text{ та}$$

$$\text{коефіцієнтів } \nu = f(\gamma), \text{ умови стабілізації вихідного струму або потужності:}$$

$$I_d = \frac{U_{d(\alpha_{\min})}}{R_{d \max}} = \text{const}; \quad P_d = U_{d \max} \cdot I_{d \min} = U_{d \min} \cdot I_{d \max} = \text{const}; \text{ а також}$$

$$\text{вводимо параметри: } \lambda = \frac{R_{d \max}}{R_{d \min}}, \quad d = \frac{I_{d \max}}{I_{d \min}} \text{ - відповідно, кратність змінювання опору}$$

еквівалентного активного навантаження та кратність змінювання випрямленого струму, що стабілізується.

Внаслідок рішення системи трансцендентних рівнянь для режимів джерела струму и джерела потужності отримані співвідношення, що використовуються для проектування:

$$\bar{Q} = Q / P_d = f(\alpha, \gamma, \lambda, d) \quad - \text{ для розрахунку встановленої}$$

потужності компенсуючих конденсаторів;

$$\bar{T} = T / P_d = f(\alpha, \gamma, \lambda, d) \quad - \text{ для розрахунку встановленої}$$

потужності фільтра вищих гармонік, в якості котрого виступають регульовані реактори LC-ланки.

Для встановлення області раціонального застосування проаналізовані режими і параметри пристроїв аналогічного призначення: керованого мостового випрямляча, що управляється, (УМВ) з LC-фільтром; ідуктивно-ємнісного трансформуючого пристрою, що управляється згідно методу В.А. Кулінича (ІЄУ) (він відзначається селективним послабленням гармонік), а також досліджуваного ідуктивно-ємнісного перетворювача (ІЄП) з некерованим випрямлячем. Для співставлення пристроїв прийнято такий номінальний режим: з урахуванням компенсуючих конденсаторів

коефіцієнт зсуву по основній гармоніці струму, що споживається, $\cos \varphi_1 = 1$;

кратність змінювання опору активного навантаження $1 \ll J \ll 10$; з урахуванням вихідного дроселя в режимі стабілізації струму або напруги навантаження коефіцієнт пульсацій по основній гармоніці випрямленого струму не перевищує 5,7%; кут комутації $\gamma \approx 0$.

На основі поданої методики встановлено, що в режимі стабілізації струму і у вузькому діапазоні змінювання опору активного навантаження УМВ має переваги перед ІЄП та ІЄУ по наступним параметрам: при $1 \ll J \ll 2$ – по відносній встановленій потужності дроселів, а при $1 \ll J \ll 1,7$ - по відносній сумарній встановленій потужності реактивних елементів. Однак при змінюванні опору активного навантаження в широкому діапазоні ($1,23 \ll J \ll 10$) стабілізатор струму на основі ІЄП перевершує стабілізатори струму на основі УМВ та ІЄУ.

При змінюванні величин l і d в обмежених значеннях: $1 \ll J \ll 10$ ($1 < d < 1,5$); $1 \ll J \ll 5,7$ ($d=2$); $1 \ll J \ll 3,2$ ($d=3$); $1 \ll J \ll 3,2$ ($d=3$) в режимі регульованого стабілізатора струму УМВ має переваги по відносним встановленим потужностям реактивних елементів.

При змінюванні величин l і d в межах: $1 \ll J \ll 3$ ($d=2$); $1 \ll J \ll 5$ ($d=1$) переваги має ІЄУ; при змінюванні величин l і d в широких межах, що визначаються нерівностями: $3,2 \ll J \ll 10$ ($d=2$); $3,2 \ll J \ll 10$ ($d=3$) та $1 \ll J \ll 10$ ($d=5$), переваги по вказаним критеріям має регульований стабілізатор струму на основі ІЄП.

Для виявлення умов стабілізації струму, напруги або потужності навантаження проаналізована система авторегулювання по відхиленню. В залежності від параметра, що стабілізується, одне з рівнянь зовнішньої характеристики $U_d = f(U_\phi, I_d, \alpha)$ або

$I_d = f(U_\phi, R_d, \alpha)$ подається у вигляді:

$$\Delta U_d = \frac{\partial U_d}{\partial U_\phi} \Delta U_\phi + \frac{\partial U_d}{\partial R_d} \Delta R_d + \frac{\partial U_d}{\partial \alpha} \Delta \alpha \quad (4)$$

Для ряду схем випрямлення і режиму стабілізації вихідної напруги визначені

коефіцієнти схем: $\beta = \frac{\partial U_d}{\partial U_\phi}, \delta = \frac{\partial U_d}{\partial R_d}, \gamma = \frac{\partial U_d}{\partial \alpha}$ та за допомогою

прямого перетворення Фур'є отримана комплексна передавальна функція системи:

$$\frac{\Delta U_d(p)}{\Delta U_\phi(p)} = \frac{|\beta| - |\delta| \cdot \frac{\Delta R_d(p)}{\Delta U_\phi(p)}}{1 + W_a(p) \cdot |\gamma|}, \quad (5)$$

де $W_a(p)$ - передавальна функція контуру регулювання по відхиленню, який складається з ланок зворотного зв'язку, підсилювача помилки регулювання та імпульсно-фазового управління.

Використовуючи заданий коефіцієнт стабілізації $\lambda = \frac{\Delta U_\phi}{\Delta U_d}$, відоме співвідношення

$$\varphi = \frac{\Delta R_d}{\Delta U_\phi}, \text{ при умові } p = 0 \text{ для усталеного режиму системи отримуємо}$$

потрібний коефіцієнт передачі:

$$K_a = \frac{\lambda \cdot |\beta| - |\delta| \cdot \varphi - 1}{|\gamma|} \quad (6)$$

Для режиму стабілізації вихідного струму коефіцієнти схем

$$\beta_i = \frac{\partial I_d}{\partial U_\phi}, \delta_i = \frac{\partial I_d}{\partial R_d}, \gamma_i = \frac{\partial I_d}{\partial \alpha} \text{ та параметр } K_{ai} \text{ визначені аналогічно.}$$

В третьому розділі подана методика розрахунку елементів системи електроживлення при стабілізації напруги, струму і потужності.

При переході системи з режиму стабілізації струму в режим стабілізації потужності, або з режиму стабілізації напруги в режим стабілізації потужності, вхідні ємкості та

індуктивності виконують роль фільтра. Тому визначення встановленої потужності конденсаторів і реакторів як елементів, що компенсують реактивну потужність, є однією з основних задач.

Складена система трансцендентних рівнянь, що подана нижче функціональними залежностями:

$U_{d\alpha} = f(\alpha, I_d, U_\phi)$ – вихідної напруги від фазної U_ϕ і кута управління α з

допоміжними умовами сталості вихідних струму, напруги або потужності;

$I_d = f(U_\phi, X_S, \alpha, \gamma)$ – вихідного струму від фазної напруги U_ϕ , реактивного опору

X_S , кутів управління α і комутації γ ; $Q_\alpha = f(P_d, \alpha)$ – реактивної

потужності від потужності P_d , що передається в навантаження при змінюванні кута

управління α ; $Q_c = f(P_d, \varphi)$ – реактивної потужності конденсатора від

активної потужності P_d і кута зсуву основної гармоніки вхідного струму j ;

$Q_d = f(\omega, L_d, I_d, s_L, \sigma)$ – реактивної потужності дроселя від

вихідного струму I_d , індуктивності L_d , еквівалентної частоти ω , коефіцієнта згладжування s_L та коефіцієнта розсіювання магнітного потоку σ .

Внаслідок рішення цієї системи рівнянь з урахуванням кратності змінювання опору

еквівалентного активного навантаження $\lambda = \frac{R_{d \max}}{R_{d \min}}$ отримані співвідношення (рис.5):

$$\overline{Q}_c = Q_c(\lambda) / P_{d \max}, \quad \overline{Q}_d = Q_d(\lambda) / P_{d \max}, \quad h_c(\lambda) = \frac{\overline{Q}_c(P_d = \text{const})}{\overline{Q}_c(I_d = \text{const})},$$

$$h_d(\lambda) = \frac{\overline{Q}_d(P_d = \text{const})}{\overline{Q}_d(I_d = \text{const})}.$$

Рис. 5. Характеристики системи комбінованого електроживлення:

- а) – вплив режиму роботи на встановлені потужності реактивних елементів;
- б) – співвідношення встановлених потужностей конденсаторів і реакторів

Виявлено, що режиму $P_d = \text{const}$ в порівнянні з режимом $I_d = \text{const}$ відповідають менші розрахункові відносні потужності компенсуючих конденсаторів $\overline{Q}_c(\lambda)$ та згладжуючого реактора $\overline{Q}_d(\lambda)$. Фізично це пояснюється тим, що при тих самих значеннях параметра l у режимі $I_d = \text{const}$ глибина регулювання системи електроживлення у вигляді керованого випрямляча, оскільки діапазон змінювання кутів управління тиристорами $a=f(l)$ більше, ніж в режимі $P_d = \text{const}$.

Якщо керований випрямляч, спроектований як стабілізатор випрямленого струму, що відповідає більшим встановленим потужностям, ніж для режиму стабілізації вихідної напруги, то при ідентичності параметрів навантаження його можна використовувати як стабілізатор вихідної потужності, так і для переходу системи електроживлення в цей режим.

В четвертому розділі подано опис об'єктів впровадження розробки, методики випробувань та визначення систематичної похибки при комбінованих режимах електроживлення змінного навантаження.

Для дослідного заводу Харківського науково-виробничого об'єднання “Карбонат” розроблений перетворювач з наступними параметрами: потужність - 4,5 кВт, вхідна напруга 3*380 В, частота – 50 Гц, коефіцієнт пульсацій при максимальному вихідному струмі - менш 0,35%. Значення $KKД$ лежить в інтервалі 0,61 до 0,865, а мінімум сумарної встановленої потужності в режимі к.з. дорівнює 0,607. Величина коефіцієнта потужності не залежить від діапазону регулювання струму навантаження, а залежить від діапазону змінювання навантаження.

При проведенні випробувань виявлено, що динамічний діапазон вимірюваної величини більше, ніж каналу вимірів, тому прийняте допущення про рівномірний розподіл систематичної похибки по всьому діапазоні. Довірчі границі результатів вимірів визначені в залежності від співвідношення систематичної похибки і середнього квадратичного відхилення. Через обмеженість точок виміру і числа спостережень вимірювана характеристика була апроксимована в точці виміру прямою $y = a + b \cdot x$. За критерієм Фішера визначена її адекватність прямій $y = x$, при цьому коефіцієнти a і b обчислені з використанням методу найменших квадратів і виконаний розрахунок дисперсійного відхилення, реалізований у вигляді алгоритму.

У скорегованій системі вимірів досліджені параметри джерела електроживлення з точністю до 0.5% не тільки в робочих точках, але і при переході від режиму к.з. до х.х. і назад, що має місце при електроерозійній обробці металів, а також у джерелах електроживлення випробувальних стендів двигунів для літаків.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі запропоновані нові рішення в галузі напівпровідникових перетворювачів електроенергії, які дозволяють поширити якісні показники системи електроживлення із змінними параметрами в галузі навантаження. У ході виконаних досліджень отримані наступні наукові та технічні результати.

1. Виконано аналіз системи електроживлення змінного навантаження із стабілізацією струму, напруги та потужності, при якому визначені раніш невідомі умови знаходження максимуму вихідного параметра.
2. Розроблено математичні моделі для аналізу періодичних режимів, створено алгоритм і програмне забезпечення для оцінки показників якості системи

електроживлення.

3. Проаналізовано комбіноване джерело, що діє як регульоване джерело струму, напруги та потужності змінного навантаження, створено методики розрахунку елементів і функціональних блоків систем стабілізації вихідних параметрів.
4. Отримано подальший розвиток теоретичного дослідження системи електроживлення з індуктивно-ємкісною ланкою змінних навантажень, завдяки чому розроблена оригінальна схема управління, яка забезпечує комбіновані режими стабілізації вихідних параметрів.
5. Запропоновано нову методику оцінки показників якості системи електроживлення, визначені області її раціонального використання та визначені параметри ланок замкнутої САР.
6. Вдосконалена методика розрахунку системи електроживлення з адаптивним регулюванням вихідного імпедансу.
7. Запропоновано методику, яка визначає встановлені потужності компенсуючих конденсаторів і згладжуючого реактора в залежності від потужності навантаження об'єкту.
8. Розроблена математична модель, яка у скоректованій системі вимірів, оптимізує досліджені параметри джерела електроживлення з точністю до 0.5%.
9. На основі теоретичних та експериментальних схемо-технічних рішень систем електроживлення з індуктивно-ємкісною ланкою змінних навантажень із стабілізацією вихідних параметрів створені експериментально-промислові зразки, які втілені на НВО "Карбонат" м. Харків, в системі електроживлення дизель-генератора і для зарядки акумуляторних батарей на заводі "Електроважмаш" м. Харків, а також теоретичні розробки в ХВВКУ ім. Крилова М.М.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Горбачев М.Н., Гурбан В.В., Чернай В.Ф. Особенности расчета режимов стабилизации выходных параметров управляемых выпрямителей с учетом ряда дестабилизирующих факторов // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ. – 2000. – Вып. 113. – С. 271-273.
2. Чернай В.Ф. Динамика отслеживания максимального коэффициента трансформации в многофункциональной системе // Технічна електродинаміка. - К.: ІЕД НАНУ. – 1999. – Тематичний випуск Системи керування та контролю напівпровідникових перетворювачів. - С. 101-102.
3. Анализ системы стабилизации выходного тока управляемого выпрямителя. Горбачев М.Н., Добрыдень В.А., Борисенко А.Н., Чернай В.Ф. // Вестник Харьковского политехнического института. Сер. Автоматика и приборостроение. – Харьков: ХПИ. – 1990. – Вып. 16, №278. – С. 55-58.
4. Управляемый мостовой выпрямитель как источник мощности. Чернай В.Ф., Горбачев М.Н., Добрыдень В.А., Борисенко А.Н. // Вестник Харьковского политехнического института. Сер. электроэнергетика и автоматизация энергоустановок. – Харьков: ХГУИО "Вища школа". – 1989.- Вып. 16, №264. – С.47-50.
5. Генератор импульсов тока для питания электроэрозионных станков. А.с. 1505696 СССР, МКИ В 23 Н 7/04. // А.Н. Борисенко, М.Н. Горбачев, В.Н. Губаревич, Д.А. Фесенко, В.Ф. Чернай (СССР). - №4361292/24-21; Заявлено 08.01.88; Опубл. 07.09.89, Бюл. №33. - 5 с.

6. Генератор импульсов технологического тока для электроэрозионных станков. А.с. 1816580 СССР, МКИ В 23 Н 7/04. // И.А. Зайцев, В.Н. Губаревич, О.Ф. Ларин, А.Н. Борисенко, В.В. Пугач, В.Ф. Чернай (СССР). - №4906787/08; Заявлено 04.02.93; Опубл. 23.05.93, Бюл. №19. - 8с.
7. Чернай В.Ф. Соотношения квазиустановившихся режимов промышленных стабилизаторов тока с замкнутой САР // Вестник Харьковского политехнического института. Сер. Автоматика и приборостроение. - Харьков: ХГУИО. "Вища школа". - 1988.- Вып. 14, №256. - С.74-76.
8. Горбачев М.Н., Гурбан В.В., Чернай В.Ф. Анализ специальных режимов систем электропитания, построенных на основе вентильных преобразователей // Труды 3-й Междунар. научн.-техн. конф. "Нетрадиционные электромеханические и электрические системы". - К.: ИЭД НАНУ. - 1997. -Т.3. - С. 1115-1119.
9. Чернай В.Ф. Метод коррекции систематической погрешности измерительных каналов АСИ в многофункциональных системах с использованием критерия Р. Фишера // Вестник Харьковского политехнического института. Сер. Метрологическое обеспечение систем автоматизации. - Харьков: Основа. - 1997. - С. 364-367.
10. Чернай В.Ф. Повышение эффективности систем электропитания технологических установок на основе вентильных преобразователей // Вестник Национального технического университета "ХПИ". - Харьков: НТУ "ХПИ". - 2001. - Вып. 10. - С. 344- 345.

АНОТАЦІЇ

Чернай В.Ф. Стабілізатори напруги, струму та потужності змінного навантаження на основі індуктивно-ємкісної ланки з регульованою індуктивністю
Рукопис. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.12 – напівпровідникові перетворювачі електроенергії. – Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, 2002.

Досліджено перетворювачі з індуктивно-ємкісною ланкою, індуктивність яких регулюється по ланцюзі від змінного навантаження для зміни коефіцієнта передачі в режимах стабілізації струму, напруги і потужності. Проведено узагальнення запропонованого способу корекції вихідних характеристик для трифазних перетворювачів перемінної напруги і на основі гармонійного аналізу виконана оцінка електромагнітної сумісності з іншими системами електроживлення. Визначено енергетичні співвідношення і встановлені потужності реактивних елементів, показана область раціонального застосування досліджуваного й аналогічного пристроїв. Для ряду схем випрямлення побудовані системи авторегулювання та виявлені умови стабілізації вихідних параметрів.

На основі визначення енергетичних показників розроблена методика розрахунку елементів системи електроживлення при стабілізації напруги, струму і потужності. Приведено опис перетворювачів, впроваджених на Харківському НПО "Карбонат", методики іспитів і визначення систематичної погрешності при комбінованих режимах електроживлення змінного навантаження.

Ключові слова: індуктивно-ємкісний перетворювач, регульована індуктивність, змінне навантаження, встановлена потужність елементів, стабілізація параметрів.

Чернай В.Ф. Стабилизаторы напряжения, тока и мощности переменной нагрузки на основе индуктивно-емкостного звена с регулируемой индуктивностью.

Рукопись. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.12 – полупроводниковые преобразователи электроэнергии. – Национальный технический университет “Харьковский политехнический институт”, Харьков, 2002.

Исследованы преобразователи с индуктивно-емкостным звеном, индуктивность которых регулируется по цепи от переменной нагрузки для изменения коэффициента передачи в режимах стабилизации тока, напряжения и мощности. Проведено обобщение предложенного способа коррекции выходных характеристик для трехфазных преобразователей переменного напряжения и на основе гармонического анализа выполнена оценка электромагнитной совместимости с другими системами электропитания. Определены энергетические соотношения и установленные мощности реактивных элементов, показана область рационального применения исследуемого и аналогичных устройств. Для ряда схем выпрямления построены системы авторегулирования и выявлены условия стабилизации выходных параметров. На основе определения энергетических показателей разработана методика расчета элементов системы электропитания при стабилизации напряжения, тока и мощности. Приведено описание преобразователей, внедренных на Харьковском НПО “Карбонат”, методики испытаний и определения систематической погрешности при комбинированных режимах электропитания переменной нагрузки.

Впервые рассмотрен стабилизированный источник питания для переменной нагрузки, работающий в качестве регулируемого источника тока, напряжения или мощности с оригинальной системой управления, позволяющей отслеживать максимум переменного выходного параметра.

Предложена новая формула, позволяющая определить область допустимых значений параметров системы, напряжения, коэффициента трансформации и волнового сопротивления контура (U , K_T , ϵ) в периодическом режиме работы.

Графоаналитическим путем решена задача сопоставимости вторичных источников питания и определена зона их рационального применения, с использованием методики определения суммарных относительных установленных мощностей реактивных элементов системы, в качестве основного критерия выбрано и применено условие эквивалентности качества электрической энергии сопоставляемых источников питания ИЕП, УМВ и ИЕУ.

Разработана инженерная методика определения условий стабилизации выходных параметров тока, напряжения и мощности в зависимости от изменений выходного импеданса и угла включения тиристоров преобразователя. Система электропитания рассчитана для m -фазных систем с комбинированным управлением, на основе корневых критериев устойчивости определены условия стабильной работы ее с учетом установленных мощностей компенсирующих конденсаторов и сглаживающего реактора.

В результате рассмотрения m -фазного источника как системы регулирования для режимов стабилизации выходных параметров, получены уравнения внешней характеристики с использованием энергетических соотношений входных и выходных фильтров для комбинированных режимов.

На основе предложенных схем и теоретического анализа их работы в комбинированных режимах (диапазон от Х.Х. до К.З.) созданы опытно-промышленные образцы, примененные на производстве.

Для повышения точности экспериментального определения выходных параметров (10 каналов) применен статистический метод Фишера, позволяющий исследовать

комбинируемую многофункциональную систему электропитания с точностью до 0.5%.

Ключевые слова: индуктивно-емкостной преобразователь, регулируемая индуктивность, переменная нагрузка, установленная мощность элементов, стабилизация параметров.

Chernai V.F. Stabilizers of voltage, current and power of variable load on the base of induction-capacitance circuit with regulated inductance.

Manuscript. Thesis for candidate of sciences degree by speciality 05.09.12 – semiconductor converters of electric energy. – National technical university “Kharkov polytechnic institute”, Kharkov, 2002.

Converters with induction-capacitance circuit, inductance of which is regulated by the circuit from variable load for change of transfer factor in the mode of stabilization of voltage, current and power, have been studied. Generalization of the proposed method of correction of output characteristics of three-phase AC-DC converters has been done and the estimation of electromagnetic compatibility with other power supply systems has been performed on the base of harmonic analysis. Energetic dependence and nominal capacities of reactive elements have been determined. Area of rational application of the studied devices has been shown. For several rectifying circuits the conditions of stabilization of output parameters have been determined, and automatic control system have been designed.

On the base of energetic indices the methodology of calculations of elements of power supplies at stabilization of voltage, current and power has been developed. Description of converters, installed at Kharkov “Carbonat” plant, methods of tests and determination of systematic error at combined modes of power supply of variable load have been presented. Key words: induction-capacitance converter, regulated inductance, variable load, nominal capacity of elements, stabilization of parameters.

Відповідальний за випуск к.т.н., доц. Кривошеєв С.Ю.

Підписано до друку 27.05.2002р. Формат видання 145x215.
Формат паперу 60x90/16. Папір офсетний. Друк офсетний.
Ум. друк. арк. 0.8. Наклад 100 прим. Замовлення №033148.

Надруковано в типографії ПП Ізрайлев Є.М.
Свідоцтво №04058841Ф0050331 від 21.03.2001р.
61024, м. Харків, вул. Гуданова, 4/10.