

Особенности управления матричными преобразователями для достижения высокого качества входных и выходных параметров

В отделе преобразования и стабилизации электромагнитных процессов Института электродинамики НАН Украины исследованы особенности управления матричными преобразователями для достижения максимальных значений коэффициента передачи напряжения в координатах входного и выходного сдвигов фаз. Показано, что векторный подход к синтезу скользящего режима обеспечивает высокое качество выходного напряжения с минимальным количеством коммутаций и форму тока сети, приближенную к синусоидальной. Обосновано применение быстродействующего наблюдателя входного напряжения матричного преобразователя, который позволяет избежать нежелательных коммутаций при управлении матричным преобразователем в скользящем режиме. Разработаны стратегия модуляции и алгоритм непосредственного управления совокупностью коэффициента передачи напряжения и коэффициента передачи реактивной составляющей входного тока в функции выходного сдвига фаз путем прямого задания необходимых параметров пространственных векторов управляющих функций. Приведены результаты моделирования. Библ. 11, рис. 5, табл. 2.

Ключевые слова: матричный преобразователь, коэффициент передачи напряжения, скользящий режим, векторный метод.

V.M. Mykhalskiy, T.V. Mysak, V.M. Sobolev, S.Yo. Polishchuk, V.V. Chopyk, I.A. Shapoval

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

Features of the matrix converters control to achieve high quality of the input and output parameters

Features of the matrix converter control to achieve the maximum values of the voltage transfer ratio in coordinates of the phase shift between voltage and current on the input and output have been investigated. It is shown that vector approach to the synthesis of a sliding mode provides a high quality output voltage with a minimum amount of commutations and the input current waveform close to a sine wave. The use of the high-speed input voltage observer of the matrix converter avoids the undesirable commutations in the real sliding mode control of the matrix converter. An appropriate modulation strategy and an algorithm for direct control of a set of voltage transfer ratio and the transfer ratio of the reactive component of the input current as a function of output power factor by direct assignment of the required parameters of the duty-cycle space vectors has been developed. The simulation results are presented. References 11, figures 5, tables 2.

Key words: matrix converter, voltage transfer ratio, sliding modes, vector control.

Надійшла 15.04.2015

Received 15.04.2015

№ 2. ВІДДІЛ СТАБІЛІЗАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ЕНЕРГІЇ

УДК 621.314.1

**ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ ЕЛЕКТРОТЕРМІЧНІ УСТАНОВКИ
ДЛЯ ВИСОКОЧАСТОТНОГО ІНДУКЦІЙНОГО НАГРІВАННЯ**

А.К. Шидловський, акад. НАН України, **А.Ф. Жаркін**, чл.-кор. НАН України, **В.Б. Павлов**, докт. техн. наук, **В.О. Новський**, докт. техн. наук, **А.Г. Пазєєв**, канд. техн. наук, **С.О. Палачов**, канд. техн. наук, **В.Є. Павленко**, **П.С. Бойко**, **Ю. П. Тугаєнко**, **Д.О. Малахатка**

Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна
e-mail: novsky@ukr.net

Розглянуто практичні аспекти розробки силових схем та систем управління тиристорними та транзисторними перетворювачами частоти і створення на цій основі експериментальних зразків енергозберігаючих електротермічних установок (ЕТУ) індукційного нагрівання різноманітного призначення. Отримані у 2014 році результати математичного та імітаційного моделювання електромагнітних процесів у системі «ЕТУ - феромагнітне завантаження» дали змогу розробити нові оптимізовані схеми силової частини і системи керування ЕТУ потужністю 300 кВА. Створено, виготовлено та випробувано в лабораторних умовах експериментальний зразок ЕТУ-300 на основі застосування нових алгоритмів керування IGBT-модулями напівпровідникового перетворювача частоти у її складі. Бібл. 5, рис. 8.

Ключові слова: електротермічна установка, тиристор, IGBT-модуль, індукційне нагрівання, імітаційне моделювання.

Серед різноманіття електротермічних процесів індукційне нагрівання найбільш часто використовується в машинобудуванні, металургії, будівництві, на транспорті та ін. Це пояснюється тим, що воно має такі переваги, як висока концентрація енергії в феромагнітному матеріалі, що нагрівається, безконтактність нагрівання, зручність регулювання та можливість автоматизації електротехнологічного процесу, екологічність виробництва і можливість забезпечити більш комфортні умови праці при досить невеликих матеріальних витратах. Цей метод термообробки металевих виробів є високоефективним з точки зору забезпечення енергозбереження і екології. Він може вирішити широке коло завдань електротермії, таких як гаряче пресування, монтаж і демонтаж гарячих посадок, загартування, відпускання, нормалізація, попереднє нагрівання під кування, зварювання деталей, плавлення та ін. [3, 4].

При такій технології для отримання максимального електричного і теплового ККД, а також забезпечення необхідної динаміки нагрівання необхідно мати індивідуальний індуктор для кожної деталі, тобто потрібен такий напівпровідниковий перетворювач частоти, який без перебудови частоти управління міг би ефективно працювати з будь-яким індуктором електротермічних установок (ЕТУ). Крім того, в процесі нагрівання сталевих деталей зі збільшенням температури значно змінюються магнітна проникність і питомий електричний опір завантаження (деталі, що нагрівається), а значить, змінюються еквівалентний активний опір у колі «індуктор–завантаження» та індуктивність індуктора.

Поява нових технологій та інтенсифікація виробництва вимагають створення нових високоефективних і в той же час надійних в експлуатації, простих по виконанню та мінімально спотворюючих форму напруги мережі живлення ЕТУ, що дають змогу на більш високому рівні вирішувати технологічні завдання електротермії. Одним з основних факторів енергоефективності процесу індукційного нагрівання є частота струму в індукторі ЕТУ. При різних видах термообробки, розмірах і конфігурації деталей, що нагріваються, оптимальними значеннями частот струму можуть бути частоти від 25 Гц до сотень кілогерц. Для створення струму в індукторі ЕТУ необхідної частоти необхідно застосування високочастотних напівпровідникових перетворювачів частоти – джерел живлення ЕТУ, виконаних на основі тиристорних або транзисторних схем. Досліджено два основних принципи їх побудови: перший з них реалізовано на основі застосування мостових схем резонансного тиристорного інвертора з адаптивним керуванням, а другий – на основі схем мостових транзисторних інверторів напруги з незалежним регулюванням частоти струму в індукторі. Розглянемо більш докладно обидва варіанти практичної реалізації джерел живлення ЕТУ різної потужності.

При розробці резонансного тиристорного інвертора та розрахунку параметрів його елементів необхідно знати характеристики системи «індуктор – деталь, що нагрівається». У процесі нагрівання сталевих деталей зі збільшенням температури значно змінюються магнітна проникність і питомий електричний опір, отже, змінюються еквівалентний активний опір у колі завантаження та індуктивність індуктора, що призводить до зміни власної частоти контура навантаження інвертора. При цьому його вихідна напруга залежить від значень напруги джерела живлення і добротності контура завантаження, оскільки в цій схемі корисну потужність завантаження можна розглядати як потужність втрат коливального контура резонансного інвертора ЕТУ.

Тиристорні інвертори, які виготовлені за мостовими схемами, через значний час відновлення запірної здатності тиристорів перекривають у цілому діапазон частот до 10 кГц. Для забезпечення оптимальних режимів електротермічного процесу при високочастотному нагріванні (швидкість нагрівання, тепловий і електричний ККД) незалежно від зміни параметрів навантаження необхідно вводити корекцію вихідних режимних параметрів перетворювача ЕТУ за допомогою відповідної зміни параметрів його силової схеми та алгоритмів роботи системи керування (СК). Ці вимоги можна задовольнити при використанні принципу самозбудження послідовного резонансного інвертора. На відміну від керованих інверторів у самозбудних інверторах керуючі імпульси формуються за рахунок використання процесу обміну енергією між реактивними елементами інвертора і його навантаженням, чим

забезпечується надійна і стійка його робота. Самозбудні інвертори за способом формування керуючих імпульсів можна розділити на дві групи: у першій групі формування імпульсів керування здійснюється за рахунок використання напруги на елементах інвертора, у другій – за рахунок струму навантаження інвертора.

Найбільш простим і надійним самозбудним резонансним інвертором є мостовий інвертор напруги, що належить до другої групи та виконаний за схемою, представленою на рис. 1, у якій використано принцип самозбудження з додатковим формуванням імпульсів керування тиристорами, незалежно від характеру і величини навантаження. Розроблений перетворювач для ЕТУ виконано за мостовою схемою зі зворотними діодами, що розділені магнітно-зв'язаними реакторами L_{K1} і L_{K2} , які формують необхідну зворотну напругу для відновлення замикаючої здатності тиристорів при вимиканні. Адаптивність керування такого перетворювача полягає в тому, що в його системі керування використовується принцип самозбудження з додатковим формуванням керуючих імпульсів, який дає змогу при будь-якій зміні характеру і величини навантаження (періодичні або неперіодичні коливання струму навантаження) формувати керуючі імпульси для включення відповідних керованих вентилів у моменти переходу струму через нульове значення [3]. На рис. 1 позначено: РІНА – резонансний інвертор напруги адаптивний; БУ1 і БУ2 – блоки управління двох каналів РІНА; БЖЗ – блок живлення та захисту. Тут у діагональ тиристорного моста включено LC -навантаження (L_1 та C_1). Силкові тиристори та зворотні діоди розділені магнітно-зв'язаними реакторами L_{K1} , L_{K2} , що формують необхідну зворотну напругу для відновлення запірних здатностей тиристорів при їхньому вимиканні. СК інвертора дає змогу регулювати значення потужності в завантаженні шляхом зміни інтервалу часу між моментом переходу струму індуктора через нульове значення і включенням наступної пари тиристорів. Це дає змогу при необхідності стабілізувати струм або вихідну напругу інвертора.

За розробленою схемою створено експериментальний макет ЕТУ першого покоління, де в тиристорному мосту застосовано швидкодіючі тиристори типу ТБ171-160-12, а у якості вентилів випрямного мосту і зворотних діодів використано частотні діоди типу ДЧ161-160-12. Батарея комутуючих конденсаторів C_1 складається з частотних конденсаторів типу МБГЧ (сумарна ємність $C_1=200$ мкФ). Індуктор L_1 виготовляється індивідуально для кожного виду деталі, що нагрівається. Система керування містить два ідентичні блоки управління (БУ1 і БУ2), таймер, блок живлення та органи керування. На вхід кожного блока керування надходять сигнали від імпульсних трансформаторів струму (ТС1, ТС2) в моменти переходу струму навантаження через нульове значення.

На основі проведених досліджень створено дослідні зразки ЕТУ-100, які призначені для індукційного нагрівання металевих виробів (гаряче пресування, розбирання запресованих деталей і вузлів ходової частини рухомого складу залізничного транспорту, метрополітену, трамваїв та ін., монтаж і демонтаж гарячих посадок, загартування, термообробка металокompозитних матеріалів та ін.). Зокрема, в якості об'єкта застосування такої ЕТУ був обраний технологічний процес демонтажу (зняття з вала) одного з ос-

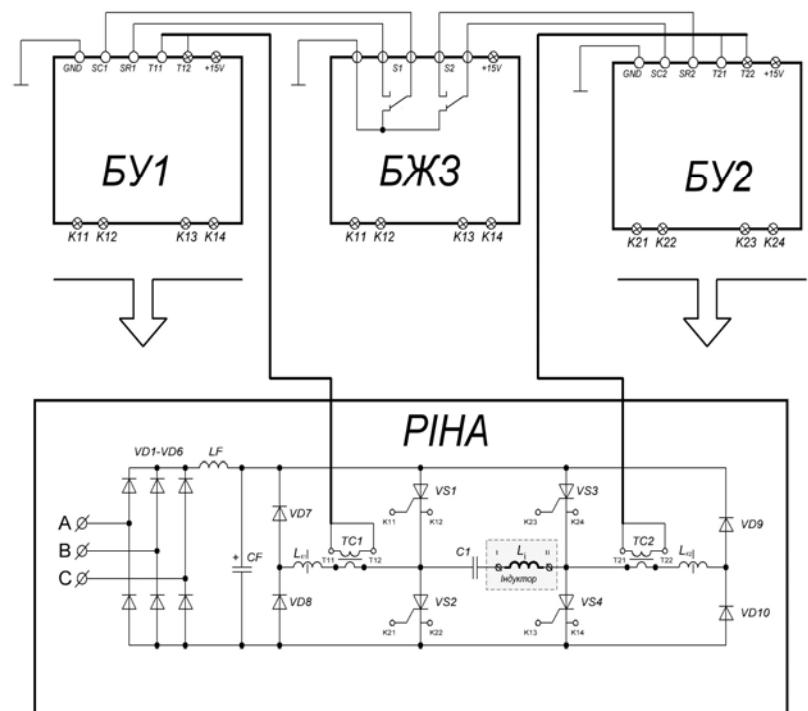


Рис. 1

новних відповідальних вузлів – внутрішніх кілець опорних підшипників і лабіринтового кільця колісної пари ходового візка вагона метрополітену для реалізації технологічного завдання – досягти заданої температури (160°C) за час порядку 20...25 с. Проведені експериментальні дослідження розробленого високочастотного перетворювача в реальних умовах індукційного нагрівання показали високу динаміку нагріву: нагрівання кілець опорних підшипників при оптимальній частоті струму 3,3 кГц до технологічної температури 160°C відбувалось за 25 с. За такого часу нагрівання має місце незначне нагрівання вала через явища теплопровідності, що полегшує зняття кільця. З іншого боку, сталь опорного кільця втрачає свої властивості при температурі вище 180°C , що викликає необхідність забезпечення рівномірного нагрівання поверхні, що не перевищує зазначеного рівня.

Крім такого випадку практичного застосування ЕТУ здійснені експериментальні роботи по індукційному нагріванню внутрішніх кілець опорних підшипників ходової частини вагона метро з метою монтажу і демонтажу на гарячій посадці. На осі біля кожного колеса на гарячій посадці змонтовано два внутрішніх кільця опорних підшипників типу ДК-408 №32310 ГОСТ 8328 з натягом 0,001...0,042 мм. Оптимальна температура нагрівання становить 140...160 $^{\circ}\text{C}$, вище якої починають відбуватися незворотні структурні зміни в сталі, і вона втрачає свою первинну механічну міцність.

Продуктивність ЕТУ-100 забезпечується за рахунок можливості використання широкої гами індукторів і відповідно видів деталей і вузлів різної маси, геометричних розмірів і конфігурації (наприклад, ведуча шестерня і фланець тягового редуктора, кільце заземлення, лабіринтове кільце, бандаж колеса, кільце опорного підшипника та ін.) без проведення додаткового регулювання та настроювання параметрів адаптивної системи керування ЕТУ.

Основні технічні характеристики ЕТУ - 100

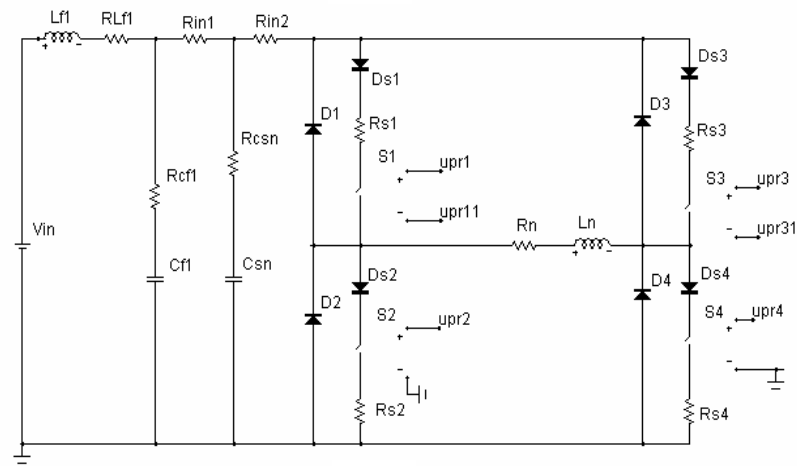
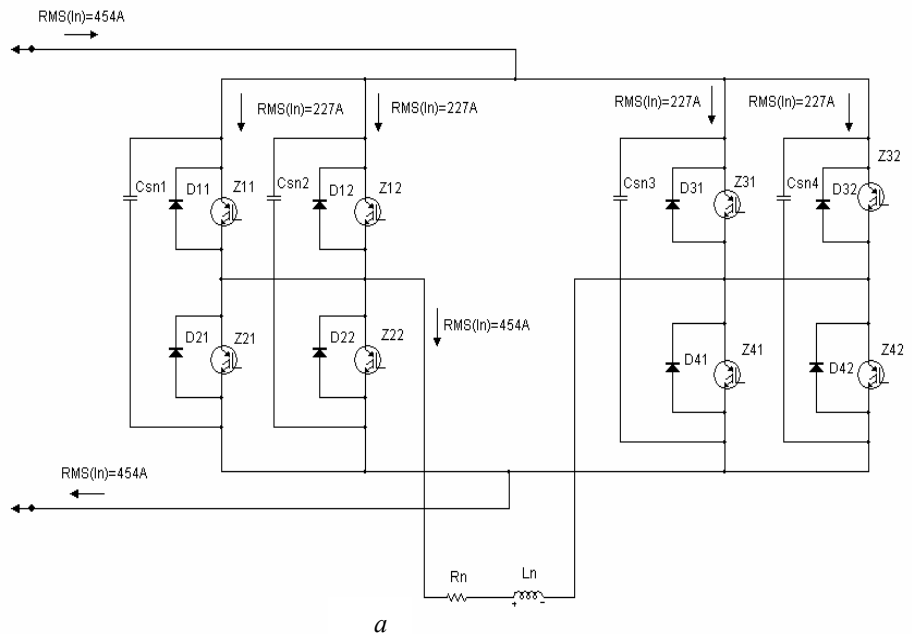
Напруга трифазної мережі живлення, В	380/220 (+10 -15) %
Частота напруги живлення, Гц	50
Максимальна вихідна потужність, кВА	100
Кількість ступенів регулювання вихідної потужності з кроком у 20 кВт	5
Частота струму індуктора, кГц *	0,5...7,5
ККД	0,95
Питома швидкість нагрівання, $^{\circ}\text{C}/\text{кг}\cdot\text{с}$	30-40

Для значного підвищення (до 200 кВА) потужності електротермічної установки індукційного нагрівання було розроблено та виготовлено експериментальний зразок тиристорного мостового інвертора резонансного типу, який виконано на тиристорах ТБ 253-800-10 і зворотних діодах ДЧ 171-320-10 з двоканальною системою адаптивного управління установки ЕТУ-600/200/6 другого покоління. Максимальна її потужність становить 200 кВА, а максимальна робоча частота – 6,0 кГц [5].

Тиристорні перетворювачі при всіх своїх позитивних якостях мають обмеження по вихідній частоті на рівні 6...8 кГц. Тому в деяких видах електротермії для ефективного використання індукційного нагрівання необхідне джерело живлення ЕТУ з частотою вихідного струму, що перевищує цю частоту в кілька разів. У більшості випадків перетворювачі частоти розробляються для живлення конкретних навантажень, при цьому сучасна елементна база дає можливість створити перетворювачі з частотою вихідного струму до 50 кГц і потужністю до 400 кВА практично для будь-яких видів навантажень.

Друге покоління електротермічної установці типу ЕТУ-300 потужністю 300 кВА дає змогу реалізувати багатофункціональність її використання при значному підвищенні частоти струму в індукторі та забезпечити безаварійну роботу в умовах значного діапазону змін як вихідної потужності, так і частоти вихідного струму. Для забезпечення багатофункціональності в якості високочастотного напівпровідникового перетворювача ЕТУ доцільно використовувати мостову схему інвертора напруги на повністю керованих перемикаючих елементах, навантаженням якого безпосередньо є індуктор високочастотного нагрівання (рис. 2 а). При цьому електромагнітні процеси в схемі визначаються еквівалентними параметрами

завантаження, які змінюються в значному діапазоні [1, 2]. Відомі приклади розрахунку завантаження високочастотного перетворювача – індуктора електротехнологічної установки індукційного нагрівання показують, що сам розрахунок є незалежною технічною задачею. При цьому як вхідні дані необхідно мати визначений комплекс технічних та технологічних параметрів для кожного окремого випадку використання ЕТУ. Вказані параметри на етапі розробки багатофункціональної ЕТУ можуть бути не визначені в повному обсязі. В той же час на етапі вибору елементної бази для високочастотного напівпровідникового перетворювача ЕТУ необхідно мати інформацію про можливі значення струмів та напруг в елементах перетворювача.



б
Рис. 2

Оскільки еквівалентні параметри завантаження визначаються в кожному конкретному випадку сукупністю точних даних про технологічні вимоги щодо забезпечення температурних режимів, швидкості нагрівання, геометрії деталей та індукторів і, як зазначалось, можуть змінюватись у широких межах, було проведено дослідження роботи перетворювача для різних значень еквівалентних параметрів завантаження ЕТУ.

Дослідження проводились у пакеті схемотехнічного моделювання MC9 на розрахунковій моделі перетворювача, схему якої представлено на рис. 2 б. У моделі завантаження ЕТУ, тобто індуктор з завантаженою деталлю, представлено послідовною схемою заміщення, яка складається з еквівалентної індуктивності L_n та еквівалентного опору R_n . Елементи $D1, Ds1, Rs1$ та керований напругою ключ $S1$ (і відповідно аналогічні елементи в інших плечах мостової схеми) складають модель силового транзистора з зустрічно-паралельно ввімкненим зворотним діодом, дросель L_{f1} та конденсатор C_{f1} становлять вхідний фільтр, конденсатор C_{sn} – снабер, що зменшує викиди напруги при вимиканні ключів.

Робота системи керування перетворювача моделювалась за допомогою розрахункової схеми, представленої на рис. 3. У ній формуються сигнали керування роботою ключів $S1 - S4$ з обраною частотою. Тут і в подальшому при імітаційному моделюванні процесів для зручності прийняте позначення «навантаження» замість терміну «завантаження», який застосовується в електротермії.

Контрольованими були такі параметри: P_n – активна потужність навантаження; P_{in} –

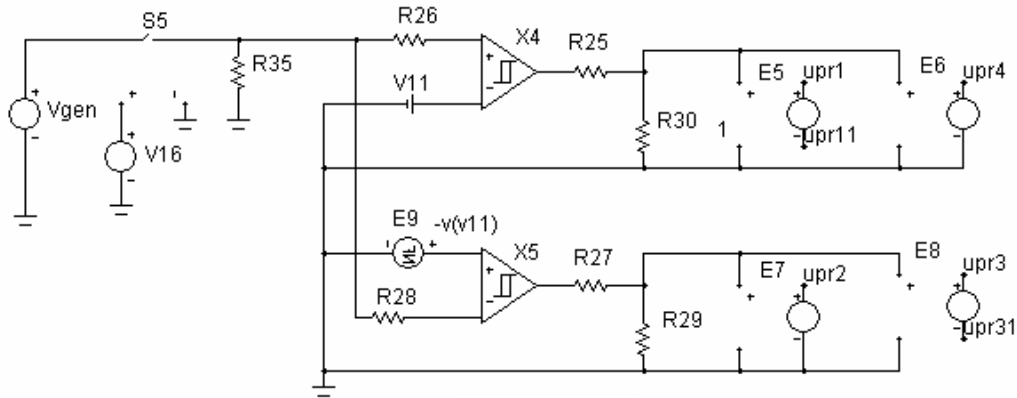


Рис. 3

вхідна потужність перетворювача; I_m – максимальний струм навантаження R_n , він же максимальний струм силових транзисторів перетворювача, які в моделі представлені керованими ключами $S1 - S4$; $I_{RMS Rn}$, $I_{RMS Lf1}$, $I_{RMS Cf1}$ – відповідно діючі значення струмів навантаження, дроселя фільтра $Lf1$ та конденсатора фільтра $Cf1$; U_{Cf1} , U_{Csn} – відповідно напруги на конденсаторі фільтра $Cf1$ та конденсаторі снабера Csn .

Розрахунки проводились для частот F , що становили 2; 3,333; 4; 5; 10; 20; 50 кГц.

Еквівалентна індуктивність дроселя L_n обиралась для всіх випадків з ряду 22, 30, 40, 50, 100, 150 мкГн. Еквівалентний активний опір R_n навантаження ЕТУ змінювався в діапазоні 0,1...1,0 Ом. Вказані еквівалентні параметри навантаження ЕТУ відповідають більшості з можливих параметрів реальних навантажень – височастотних індукторів з феромагнітним матеріалом деталей, що підлягають нагріванню. Так, наприклад, для індуктора з деталлю, що підлягає нагріванню, параметри якого були розраховані вище, еквівалентні параметри для розрахункової моделі становлять $L_n = 41,2$ мкГн та $R_n = 0,428$ Ом.

Результати деяких розрахунків представлені на рис. 4, 5.

Крім наведених було отримано низку різних графічних залежностей, що відображають результати розрахунків, з аналізу яких можна зробити наступні висновки.

Електромагнітні процеси в перетворювачі значною мірою залежать як від частоти змінного струму, так і від еквівалентних параметрів навантаження. При збільшенні частоти струму для навантаження з фіксованими еквівалентними параметрами L_n та R_n спостерігається зменшення активної потужності, що виділяється в навантаженні, та максимального і діючого значень струмів у навантаженні, а значить, і в силових транзисторах інвертора. Це пояснюється зростанням еквівалентного реактивного опору навантаження. Позитивним наслідком такого явища можна вважати можливість регулювання потужності, що виділяється в

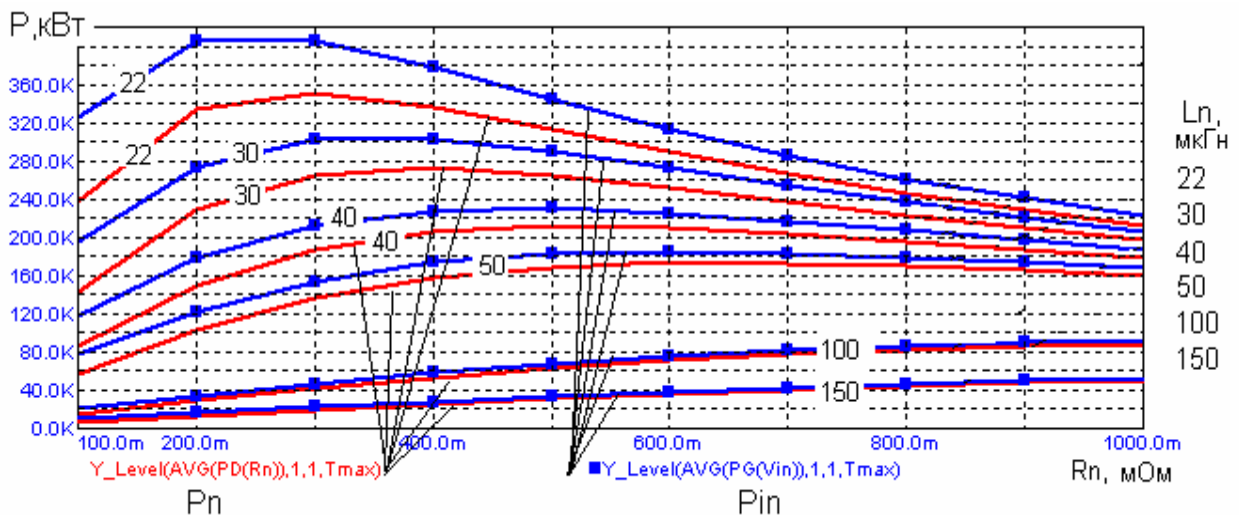


Рис. 4

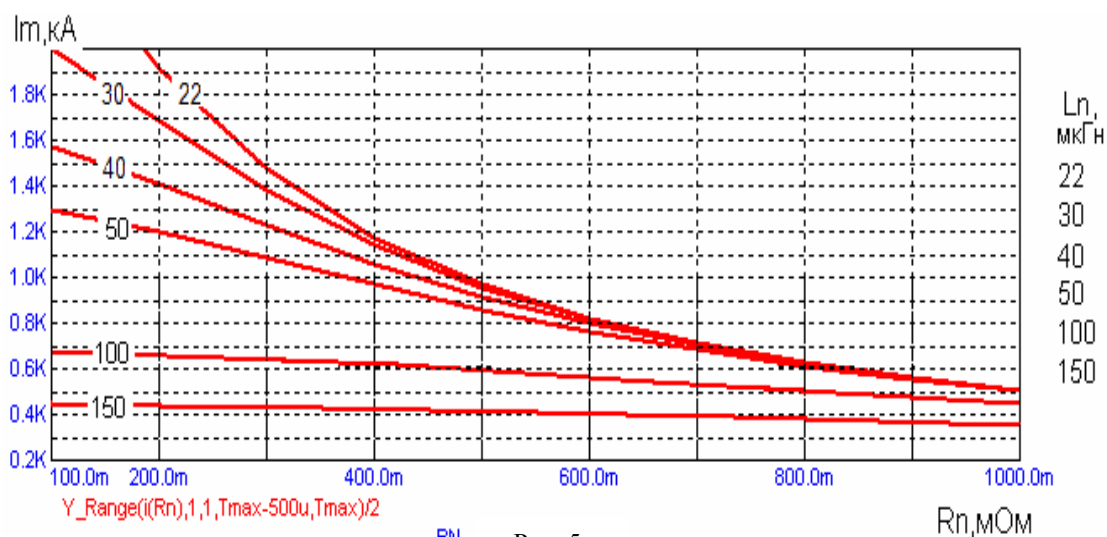


Рис. 5

навантаженні у робочих циклах технологічних процесів нагрівання шляхом регулювання частоти перемикачів силових транзисторів.

При фіксованій частоті змінного струму електромагнітні процеси в перетворювачі ЕТУ цілком визначаються еквівалентними параметрами завантаження. Для прийнятих значень еквівалентних індуктивності й опору розраховані значення активної потужності змінюються в три – п'ять разів залежно від співвідношення активного та реактивного опорів та від частоти. При цьому максимальна активна потужність завантаження визначається в кожному випадку еквівалентною індуктивністю. На практиці еквівалентна індуктивність в основному залежить від геометричних розмірів індуктора та кількості витків, які визначаються параметрами конкретного технологічного процесу.

Для правильного вибору елементної бази високочастотного напівпровідникового перетворювача багатофункціональної електротермічної установки індукційного нагрівання ЕТУ-300 необхідно орієнтуватися на максимальні значення можливих струмів у перетворювачі. Вони, як видно з наведених розрахунків, спостерігаються при відносно низьких значеннях частоти струму в завантаженні або при менших значеннях його еквівалентної індуктивності. Так, вихідну потужність, наприклад, 200 кВт можна забезпечити для значень еквівалентної індуктивності, що менші за 45 мкГн при частоті вихідного струму 2 кГц, менші за 25 мкГн – при 3,33 кГц, менші за 21 мкГн – при 4 кГц [1]. При цьому максимальні та діючі значення струму завантаження будуть відповідно більші за 800 та 570 А, 810 та 580 А, 900 та 630 А. Саме на такі значення максимальних струмів у силових транзисторах високочастотного напівпровідникового перетворювача при вказаних частотах вихідного струму орієнтувалися при виборі типу силових транзисторних модулів.

За результатами теоретичних і експериментальних досліджень створено експериментальний зразок високочастотної установки ЕТУ-300. Одним з конкретних випадків його практичного застосування на ремонтних підприємствах «Укрзалізниця» є відділення шару відпрацьованої фрикційної пластмаси від чавунних гальмових башмаків колісних пар рейкового транспорту з метою подальшого їх використання. Ця проблема ресурсозбереження вирішується розробленим інноваційним технологічним способом, який полягає в тому, що на початку гальмовий башмак охолоджують у посудині з рідким азотом, потім поміщують в індуктор і нагрівають 1,5...2 хв до температури 500 °С. За рахунок різниці температур і коефіцієнтів теплового розширення залишки відпрацьованої фрикційної пластмаси відокремлюються від чавунного башмака. При цьому чим більша швидкість нагрівання, тим ефективніший процес відділення (тут немає обмежень за динамікою і неоднорідністю нагрівання).

Проведено серію експериментів по нагріванню гальмового башмака з метою визначення частоти струму в індукторі ЕТУ-300, при якій необхідна технологічна температура (близько 500 °С) завантаження досягається за мінімальний час, який склало 2 хв при частоті близько 10 кГц.



Рис. 6

Установка ЕТУ-300 призначена для підвищення ефективності електротермічного процесу (високочастотного індукційного нагрівання) при ремонті деталей і вузлів ходової частини рейкового транспорту (метрополітен, залізничний транспорт та міський рейковий електротранспорт). Створення високочастотного напівпро-відникового перетворювача на сучасній елементній базі та нових принципах оптимального управління забезпечує можливість заміни індукторів ЕТУ різних типорозмірів і конфігурації при автоматичній підтримці на заданому рівні параметрів електротермічного процесу за допомогою ЕТУ-300 і відповідно параметричну стабілізацію її вихідної потужності для кожної конкретної деталі колісної пари вагою від одиниць до сотень кілограм. Це дає змогу значно підвищити продуктивність ЕТУ-300 і якість електротермічного процесу, а також

знижити трудомісткість електротермічного процесу при ремонті (гаряче пресування, загартування і розбирання запресованих деталей і вузлів ходової частини рухомого складу залізничного транспорту, поїздів метрополітену і трамваїв) за рахунок можливості використання широкої номенклатури індукторів і відповідно видів деталей і вузлів різної ваги і геометричних розмірів при експлуатації ЕТУ-300 в автоматичному режимі (без проведення додаткових регулювань і настроювання системи управління). На рис. 6 показано експериментальний зразок установки.

Склад дослідного зразка електротермічної установки ЕТУ-300: силовий напівпровідниковий перетворювач; система управління та захисту; індуктор заданої конфігурації; система охолодження.

Силовий напівпровідниковий перетворювач ЕТУ-300 складається з трифазного випрямляча, виконаного на збірках типу *SKKD 380* (1200 В, 600 А); емнісного згладжуючого фільтра, що складається з послідовно-паралельного з'єднання електролітичних конденсаторів типу *SAMWHA* ємністю 4700,0 μF (400 В, *SM850*); однофазного високочастотного інвертора резонансного типу, який виконано на основі інтелектуальних *IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)* – модулів типу *SEMIX503GB12HD* (500 А, 1200 В) фірми *SEMIKRON*.

Систему управління та захисту складено з таких блоків: задання частоти комутації ключових елементів; живлення (вхідна напруга 220 В $\pm 15\%$; вихідні стабілізовані напруги: 5,0; 12,0; 27 В); захисту та блокування; контролю часу (таймер); індикації параметрів.

Індуктори заданої конфігурації (здається видом деталей та вузлів, що нагріваються) виготовляються з мідної трубки діаметром не менше як 15 мм з вхідним та вихідним штуцерами для підведення води, підключення напруги живлення з виходу інвертора забезпечується затискачами, які розміщені на кінцях мідної трубки індуктора, теплоізоляція їх здійснюється алюмофосфатною обмазкою, безконтактний контроль температури «загрузки» (деталі, що нагріваються) здійснюється за допомогою інфрачервоного пірометра типу *Fluke-66*.

На рис. 7 і 8 показано експериментальні зразки індукторів з повітряним та водяним охолодженням відповідно для нагрівання гальмівного башмака.

Система охолодження ЕТУ-300 (рідинна):

- водяне охолодження IGBT-модулів та індукторів має здійснюватися від системи водопостачання цеху трубою діаметром, не меншим як 3/4 дюйма;
- рівень тиску води для охолодження IGBT-модулів та індукторів – не менший як $4 \cdot 10^5$ Па;
- контроль витрати води при розімкненій системі охолодження здійснюється за допо-



Рис. 7



Рис. 8

могою турбінного водоміра типу *WPD DN 40*.

Основні технічні характеристики ЕТУ-300:

- напруга трифазної мережі живлення – 380/220 В, +10 -15%;
- частота напруги живлення – 50/60 Гц;
- максимальна повна потужність – 300 кВА;
- частота струму індуктора – 0,5...20 кГц;
- коефіцієнт корисної дії – 0,95;
- питома швидкість нагрівання – 10...25 °С/кг·с;
- керування ЕТУ-300 – ручне (з передньої панелі);
- індуктивність індуктора – 30...400 мкГн (залежить від типу деталі, що нагрівається);
- електрична ізоляція кіл індуктора має витримувати без пробою досліду напругу 1500 В;
- опір ізоляції вказаних кіл відносно «землі» не менше 5 МОм;
- металевий корпус напівпровідникового перетворювача ЕТУ-300 потребує заземлення;
- рівень звуку, що створюється індуктором ЕТУ-300 на відстані 1 м, становить не більше 45 дБ;
- середній термін роботи – не менше трьох років (технічний ресурс не менше 15 000 год);
- напрацювання на відмову – не менше 7000 год;
- маса – 100 кг.

Згідно з вимогами електробезпеки ЕТУ-300 задовольняє вимогам ОСТ 4.275.003-97 класу захисту 1. За ступенем захисту від ураження електричним струмом установка належить до класу захисту 0,1 (ГОСТ 12.2.007.0.-99). Робочими кліматичними умовами при експлуатації ЕТУ-300 мають бути: температура оточуючого повітря від -10 до +40 °С; відносна вологість повітря до 95 %; середній атмосферний тиск 760 мм.рт.ст.

Результати проведених досліджень дають можливість зробити такі висновки:

1. Основним класом напівпровідникових перетворювачів, що використовуються як джерело живлення ЕТУ, є тиристорні та транзисторні перетворювачі частоти з ланкою постійного струму та інверторами напруги (у т.ч. резонансного типу). Проведені дослідження електромагнітних процесів у колах тиристорних і транзисторних інверторів ЕТУ і динаміки нагрівання показали, що оптимальне значення частоти струму в індукторі залежить від мети електротермічного процесу (монтаж-демонтаж гарячих посадок, розігрівання під кування, загартування і т.д.), а також від ваги, конфігурації деталі й від теплового ККД індуктора.

2. Створення високочастотного напівпровідникового перетворювача на сучасній елементній базі та нових принципах оптимального управління має забезпечувати можливість заміни індукторів ЕТУ-300 різних типорозмірів і конфігурації при автоматичній підтримці на заданому рівні параметрів електротермічного процесу та відповідно параметричну стабілізацію її вихідної потужності для кожної конкретної деталі колісної пари вагою від одиниць до сотень кілограмів.

3. Використання сучасних напівпровідникових модулів при створенні високочастотних перетворювачів спрощує складання і забезпечує мінімальне значення розподільних індуктивностей і, отже, зменшення перехідних перенапруг при комутації. Це дає можливість пе-

рейти до принципово нової концепції конструювання, при якій вхідний випрямляч і IGBT-модулі мають загальну ланку постійного струму. Така конструкція дає можливість знизити загальні втрати перетворювача, спростити топологію з'єднань і систему охолодження, зменшити загальний об'єм і вагу виробу.

4. Проведено розрахунки і моделювання електромагнітних і енергетичних процесів у високочастотних перетворювачах електротермічних установок індукційного нагріву першого і другого покоління, а також визначено особливості застосування силових напівпровідникових IGBT-модулів для створення високочастотних джерел живлення ЕТУ різних потужності та частоти струму в індукторі.

5. Розроблено електричні схеми силової частини та системи керування високочастотного напівпровідникового перетворювача енергозберігаючої ЕТУ потужністю 300 кВА, виготовлено експериментальний зразок ЕТУ та проведено його лабораторні випробування.

1. Новский В.А., Козлов А.В., Бойко П.С., Малахатка Д.А. Обеспечение электромагнитной совместимости в трехфазной системе при подключении высокочастотной электротермической установки // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит: Общегосударственный научно-производственный и информационный журнал. – Спецвып. Т.1. – № 8. – 2013. – С. 235–241.
2. Павлов В.Б., Попов А.В., Павленко В.Е. Высокочастотный полупроводниковый источник питания электротехнологических установок // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2008. – Вип. 20. – С. 48–49.
3. Попов А.В., Новский В.А., Козлов А.В. Полупроводниковые преобразователи для питания перспективных электротехнологических установок // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2007. – № 1 (16). Ч. 2. – С. 19–22.
4. Шидловський А.К., Новський В.О., Жаркін А.Ф. Стабілізація параметрів електричної енергії в трифазних системах напівпровідниковими коригуючими пристроями. – К.: Ін-т електродинаміки НАН України, 2013. – 378 с.
5. Шидловський А.К., Павлов В.Б., Попов А.В. и др. Разработка энергосберегающих полупроводниковых преобразователей для повышения эффективности использования электрической энергии // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2009. – Вип. 23. – С. 13–21.

УДК 621.314

А.К. Шидловский, акад. НАН України, **А.Ф. Жаркин**, чл.-корр. НАН України, **В.Б. Павлов**, докт. техн. наук, **В.А. Новский**, докт. техн. наук, **А.Г. Пазеев**, канд. техн. наук, **С.А. Палачев**, канд. техн. наук, **В.Е. Павленко**, **П.С. Бойко**, **Ю.П. Тугаенко**, **Д.А. Малахатка**

Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина

Энергосберегающие электротермические установки для высокочастотного индукционного нагрева

Рассмотрены практические аспекты разработки силовых схем и систем управления тиристорными и транзисторными преобразователями частоты и создания на этой основе экспериментальных образцов энергосберегающих электротермических установок (ЭТУ) индукционного нагрева различного назначения. Полученные в 2014 году результаты математического и имитационного моделирования электромагнитных процессов в системе «ЭТУ–ферромагнитная нагрузка» позволили разработать новые оптимизированные схемы силовой части и системы управления ЭТУ мощностью 300 кВА. Создан, изготовлен и испытан в лабораторных условиях экспериментальный образец ЭТУ-300 на основе применения новых алгоритмов управления IGBT-модулями полупроводникового преобразователя частоты в ее составе. Библи. 5, рис. 8.

Ключевые слова: электротермическая установка, тиристор, IGBT-модуль, индукционный нагрев, имитационное моделирование.

A.K. Shydlovskiy, A.F. Zharkin, V.B. Pavlov, V.O. Novskiy, A.G. Pazeev, S.O. Palachov, V.E. Pavlenko, P.C. Boyiko, Y.P. Tugaenko, D.O. Malakhatka

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

Electrothermal energy saving unit for high-frequency induction heating

The practical aspects of the development of power circuits and control systems for thyristor and transistor based inverters as well as experimental samples creation of energy-saving electrothermal unit (ETU) for various purposes induction heating are considered. In 2014 were obtained the results of mathematical modeling and simulation of electromagnetic processes in the system "ETU-ferromagnetic load". They contributed to the development of new optimized design of the power unit and control system ETU capacity of 300 kVA. The pilot plant ETU -300, based on the application of new control algorithms for IGBT-inverter semiconductor, was created, manufactured and tested. References 5, figures 8.

Key words: electrothermal unit, thyristor, IGBT-module, induction heating, simulation modeling.

Надійшла 14.04.2015

Received 14.04.2015