

О. С. САБОКАР

СТУПІНЧАТИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ НАПРУГИ ЯК АЛЬТЕРНАТИВНЕ ДЖЕРЕЛО ЖИВЛЕННЯ СИСТЕМ МАГНІТНО-ІМПУЛЬСНОЇ ОБРОБКИ МЕТАЛІВ ТА ІНДУКЦІЙНОГО НАГРІВУ

Застосування попереднього індукційного нагріву робочої зони магнітно-імпульсної обробки листових металів, може підвищити ефективність останньої і розширити існуючу номенклатуру технологічних операцій безконтактної обробки металів. Інтегрування систем індукційного нагріву потребує вдосконалення існуючих технічних рішень з перетворення і передачі електричної енергії. Робота присвячена математичному та експериментальному аналізу фізичних процесів, що протікають в електричній системі ступеневого перетворювача напруги, технічна реалізація якого спрямована на підвищення якісних і кількісних показників ефективності роботи систем магнітно-імпульсної обробки металів і індукційного нагріву. Новизна роботи полягає в розробці системи ступеневого заряду який представляє собою автономний блок, що дозволяє реалізувати перетворювач рівнів напруги в якості контрольованого джерела електричної енергії. Представлена методика математичного опису нестационарного перехідного процесу у вигляді кусочно-неперервних функцій була підтверджена експериментально. Отримані експериментальні дані модельного прототипу запропонованої системи перетворення напруги повністю відповідають аналогічним розрахунковим значенням, а сам перетворювач напруги є працездатним для застосування в якості конструктивного елемента систем магнітно-імпульсної обробки металів з використанням систем індукційного нагріву як інтегрованого допоміжного вузла. Результати проведених досліджень мають практичну значимість для створення більш компактних і автоматизованих систем безконтактної обробки металів.

Ключові слова: індукційний нагрів, магнітно-імпульсна обробка, напівпровідниковий ключ, математичне моделювання.

О. С. САБОКАРЬ

СТУПЕНЧАТЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ НАПРЯЖЕНИЯ КАК АЛЬТЕРНАТИВНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ СИСТЕМ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ И ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА

Применение предварительного индукционного нагрева рабочей зоны магнитно-импульсной обработки листовых металлов, может повысить эффективность последней и расширить существующую номенклатуру технологических операций бесконтактной обработки металлов. Интегрирование систем индукционного нагрева требует усовершенствования существующих технических решений по преобразованию и передаче электрической энергии. Работа посвящена математическому и экспериментальному анализу физических процессов, протекающих в электрической системе ступенчатого преобразователя напряжения, техническая реализация которого направлена на повышение качественных и количественных показателей эффективности работы систем магнитно-импульсной обработки металлов и индукционного нагрева. Новизна работы состоит в разработке системы ступенчатого заряда представляющей собой автономный блок, позволяющий реализовать преобразователь уровней напряжения в качестве контролируемого источника электрической энергии. Представленная методика математического представления нестационарного переходного процесса в виде кусочно-непрерывных функций была подтверждена экспериментально. Полученные экспериментальные данные модельного образца предложенной системы преобразования напряжения полностью соответствуют аналогичным расчетным значениям, а сам преобразователь напряжения является работоспособным для применения в качестве конструктивного элемента систем магнитно-импульсной обработки металлов с использованием систем индукционного нагрева в качестве интегрированного вспомогательного узла. Результаты проведенных исследований имеют практическую значимость для создания более компактных и автоматизированных систем бесконтактной обработки металлов.

Ключевые слова: индукционный нагрев, магнитно-импульсная обработка, полупроводниковый ключ, математическое моделирование.

O. S. SABOKAR

STEP VOLTAGE CONVERTER AS AN ALTERNATIVE SOURCE FOR MAGNETIC PULSE METAL WORKING SYSTEMS AND INDUCTION HEATING SYSTEMS

The use of preliminary induction heating of the working zone of magnetic-pulse sheet metals working can improve its efficiency and expand the existing range of technological operations for contactless metal working. Integration of the induction heating systems requires the improvement of existing technical solutions for the electrical energy transformation and transmission. This work is devoted to the mathematical and experimental analysis of the physical processes in the electrical system of a step voltage converter, the technical realization of which is aimed to improve the qualitative and quantitative efficiency indicators of the magnetic pulse metals processing systems and induction heating systems. The novelty of the work is the development of a step charging system to be realized as a controlled source of electrical energy that is a self-contained unit allows to convert voltage levels. The method presented of the non-stationary transient process mathematical representation in the form of piecewise-continuous functions was confirmed experimentally. The experimental data obtained for the model sample of the voltage conversion system proposed was fully correspond to those of the values calculated, that is why the voltage converter is operable itself for using as previous charge systems for magnetic pulse metals processing using induction heating systems as an integrated auxiliary unit. The results of the studies conducted direct on the practical importance for the creation of more compact and automated systems for contactless metal processing.

Key words: induction heating, magnetic pulse working, semiconductor, mathematical modeling.

Вступ, аналіз публікацій. З метою підвищення якості виконання операцій, авторами [1, 2] було запропоновано використовувати індукційний нагрів (ІН) як можливу попередню обробку зони впливу з метою ослаблення пружних властивостей металу перед безпосередньою магнітно – імпульсною (МІ) обробкою.

Практичний інтерес представляють собою про-

позиції [3, 4], що дозволяють інтегрувати систему ІН як складову магнітно імпульсної установки (МІУ). Дана модернізація дозволить підвищити універсальність самої МІУ та розширити її технічні можливості, на кшталт можливості виконання деформацій металів з більш складною геометричною конфігурацією поверхні, або видалення вм'ятин з поверхні листових металів у випадку використання систем МІ рихту-

вання. Доцільним є рішення використовувати спільний вузол перетворення первинної напруги як джерела живлення силових контурів ІН та МІУ.

У найбільш відомих схемних реалізаціях, пристрій заряду складається із блоку підвищувачого силового трансформатора та випрямляючого блоку. Перший представляє собою високовольтний трансформатор з індуктивним обмеженням струму, другий – групу кремнієвих або селенових діодів. Більш детальне описання принципу роботи та самої схеми представлено у посібнику [5, 6].

Основними недоліками такого зарядного пристрою є наявність перетворюючого трансформатора, який має обмежений рівень максимальної вихідної напруги. У поєднанні з ємнісним навантаженням, яке, у випадку магнітно-імпульсної установки, представлено конденсаторним накопичувачем енергій, постійний рівень вихідної напруги суттєво впливає на швидкість заряду, що є важливим показником якості роботи усього комплексу магнітно-імпульсної обробки.

Відомим є пристрій заряду, який описаний у монографії [7]. За своєю будовою, він є спорідненим до першого аналогу, але у поєднанні із додатковою системою контролю та автоматики утворює джерело струму нормованої амплітуди. На відміну від першого, заряд від джерела струму дозволяє отримати значно вищий коефіцієнт корисної дії усього процесу магнітно-імпульсної обробки загалом. Основним недоліком цього пристрою є значна складність його

побудови, яка потребує використання елементів контролю значної вартості.

Альтернативою до попередніх двох пристроїв заряду є імпульсний перетворювач електричної енергій [8, 9]. В основу його роботи покладено застосування високих робочих частот струмів, які протікають у підвищувачому трансформаторі. За своєю фізичною суттю, такий підхід дозволяє суттєво знизити масогабаритні показники пристрою в цілому та підвищити ККД перетворювача, за рахунок привалювання реактивних опорів електричних контурів над активними – омичними опорами, на яких відбувається теплове розсіювання енергії.

Перераховані вище недоліки існуючих розробок, можуть бути виключені за рахунок реалізації безтрансформаторної системи ступеневого заряду ємнісних накопичувачів комплексів МІОМ.

Мета роботи полягає в підтвердженні працездатності запропонованої системи ступеневого заряду, як джерела живлення магнітно – імпульсних установок і систем індукційного нагріву, шляхом виконання математичного аналізу моделі системи, її експериментальної апробації та представлени практично значимих рекомендацій, щодо її проектування.

Постановка задачі. Розглянемо більш докладно систему ступеневої заряду.

Схема - електрична силових контурів в реалізації для МІУ, з додатковими елементами контролю представлена на рис. 1.

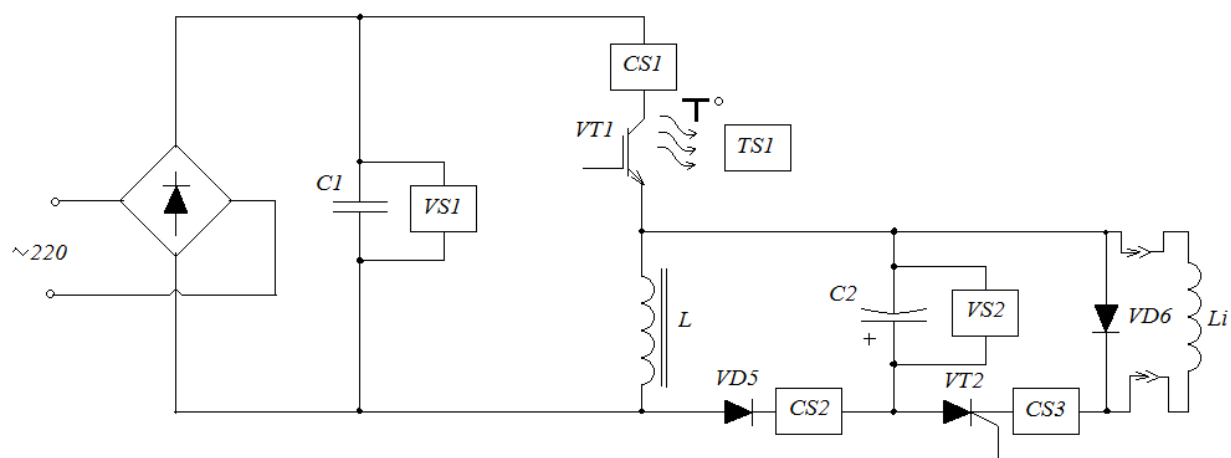


Рис. 1. Перетворювач напруги в складі МІУ

На рис. 1 представлені наступні позначки:

- VS1, VS2 – датчики напруги;
- CS1...CS3 – датчики струму;
- TS1 – датчик температури силового ключа;
- VT1, VT2 – напівпровідникові ключі;
- VD1...VD6 – силові високочастотні діоди;
- L – дросель;
- Li – індуктор – інструмент, що підключається;
- C1...C2 – ємності.

Фактично, L елемент контура являє собою ідеальне джерело електричної енергії в заданих рамках умов роботи, а також, характеристик елементів, що використовуються.

Індуктивний накопичувач енергії, без урахування втрат на активному опорі провідника обмотки, в

умовах безперервного повторення циклу заряду описаного в патенті [3], представляє собою джерело енергії на інтервалі часу, який у багато разів перевищує час одного циклу. За рахунок цього, система ступеневого заряду як елемент МІУ може бути вдосконалена і адаптована для установки ІН в якості вузла перетворення енергії і регулювання потужності, що споживається силовим контуром перетворювача частоти.

В основі запропонованої схеми зарядного контуру ємнісного накопичувача C2 лежить принцип послідовного ступеневого заряду імпульсами струму рівної енергії. Нормування величини енергії заряду кожного ступеня здійснюється постійністю параметрів індуктивності L і величиною сили струму, що

протікає в ній.

Роботу схеми можна умовно розділити на два режими:

- режим накопичення енергії в магнітному полі індуктивності, далі дроселя, рис. 2, а;
- режим передачі накопиченої енергії на ємність, рис. 2, б.

При відкритті ключа VT1 струм, що протікає через дросель призводить до накопичення в ньому енергії пропорційної індуктивності і квадрату значення струму. Наявність діода VD5 запобігає протіканню струму по паралельній гілці з C_2 при відкритому стані ключа.

У другому режимі, в момент закриття ключа VT1 накопичена в індуктивності енергія передається в ємність за рахунок виконання умови безперервності струму на індуктивності.

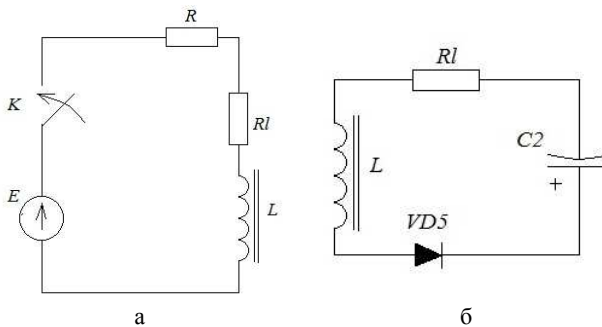


Рис. 2. Ідеалізація електричного зарядного контуру: а – для замкнутого стану ключа; б – для розімкненого стану ключа

Розв'язок рівняння стану при нульових початкових умовах для функції струму дроселя має вигляд

$$J_i(t - \tau_{1i}) = \frac{U_{II}}{R + R_L} \left[1 - e^{-\left(\frac{R + R_L}{L}\right)(t - \tau_{1i})} \right] \quad (1)$$

де τ_{1i} – час дії відповідного циклу;

U_{II} – напруга живлення;

R, R_L – активні опори контуру і дроселя.

Час досягання заданого значення струму на дроселя

$$t_L = \frac{L}{R + R_L} \ln \left(1 - \frac{J_3 (R + R_L)}{U_{II}} \right)^{-1} \quad (2)$$

де J_3 – фіксоване значення струму заряду.

Рівняння стану для циклу заряду ємності від джерела струму вигляді індуктивності має класичний вигляд для «RLC» контуру [10].

При виконанні умови коливального перехідного процесу $R < 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ отримуємо рішення (3) рівняння для другого режиму заряду ємності

$$\begin{cases} U_C(t - \tau_{2i})_i = e^{-\beta(t - \tau_{2i})} (C_{1i} \cos(\omega(t - \tau_{2i})) + \\ \quad + C_{2i} \sin(\omega(t - \tau_{2i}))) \\ J_2(t - \tau_{2i})_i = C e^{-\beta t} ((C_{1i} \omega - C_{2i} \beta) \sin(\omega(t - \tau_{2i})) - \\ \quad - (C_{2i} \omega + C_{1i} \beta) \cos(\omega(t - \tau_{2i}))) \end{cases} \quad (3)$$

де $\beta = \frac{R_L}{2L}$ – декримент затухання;

$\omega_0^2 = \frac{1}{LC}$ – власна частота;

$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$ – частота перехідного процесу;

τ_{2i} – час дії відповідного циклу;

C_{1i} – константи інтегрування.

Початкові умови для кожного наступного циклу сформульовані у вигляді (4)

$$\begin{cases} U_C(t = \tau_{2i})_i = C_{1i} = U_C(t)_{i-1} \\ J_2(t = \tau_{2i})_i = C(-J_3 \beta - C_{2i} \omega) = J_3 \end{cases} \quad (4)$$

Вирази для функцій струму (6) і напруги (5) на ємності на кожному i -тому циклі заряду

$$U_C(t - \tau_{1i})_i = (U_C(t - \tau_{2i-1})_{i-1} \cos(\omega(t - \tau_{2i})) + \\ + \left[\frac{J_3 + C \beta U_C(t - \tau_{2i-1})_{i-1}}{C \omega} \right] \sin(\omega(t - \tau_{2i}))) e^{-\beta(t - \tau_{2i})} \quad (5)$$

$$J_2(t - \tau_{2i})_i = C \int_0^t U_C(t - \tau_{1i})_i dt \quad (6)$$

Час перенесення електричної енергії дроселя в ємнісний накопичувач отримуємо з виразу (6) з умови уніполярного характеру струму, що протікає, обумовленого наявністю діода VD5 в контурі (рис. 2, б).

$$t_{c_i} (J_2(t)_i = 0) = \frac{1}{\omega} \arctg \times$$

$$\times \left(\frac{J_3}{C U_C(\tau_{i-1})_{i-1} \omega + \frac{\beta J_3}{C \omega} + U_C(\tau_{i-1})_{i-1} \frac{\beta^2}{\omega}} \right) \quad (7)$$

Відповідні значення проміжків часу $t_{c_i} (J_2(t)_i = 0)$ та $t_L (J_1(t) = J_3)$ на кожному i -тому циклі буде визначати тривалість одного циклу заряду ємності.

Безперервні часові залежності функцій струму заряду ємності і напруги можуть бути представлені у вигляді суми функцій для кожного з циклів заряду за відповідного інтервалу часу визначеного i -того циклу. З використанням ступінчастої функції $\eta(t)$ отримуємо

$$\begin{cases} U_C(t) = \sum_{i=1}^{\infty} U_{C_i}(t - it_L - \sum_{n=1}^i t_{c_{n-1}}) \times \\ \quad \times \left[\eta \left(t - it_L - \sum_{n=1}^i t_{c_{n-1}} \right) - \eta \left(t - it_L - \sum_{n=1}^i t_{c_n} \right) \right] \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} J_2(t) = \sum_{i=1}^{\infty} J_{2i}(t - it_L - \sum_{n=1}^i t_{c_{n-1}}) \times \\ \quad \times \left[\eta \left(t - it_L - \sum_{n=1}^i t_{c_{n-1}} \right) - \eta \left(t - it_L - \sum_{n=1}^i t_{c_n} \right) \right] \end{cases} \quad (9)$$

Числові оцінки, експериментальне моделювання. Для підтвердження достовірності отриманих залежностей струму і напруги, зробимо порівняння результатів моделювання і реальних часових залежностей отриманих експериментально при різних

параметрах контура.

Для експериментальної оцінки були вибрані наступні електричні параметри експериментального зразка ступеневого перетворювача напруги:

- індуктивність дроселя $L=0.022$ Гн;
- активний опір дроселя $R\approx 0.9$ Ом
- напруга живлення $U=10$ В;
- струм дроселя $I=3$ А
- зарядна ємність 100, 200 мкФ.

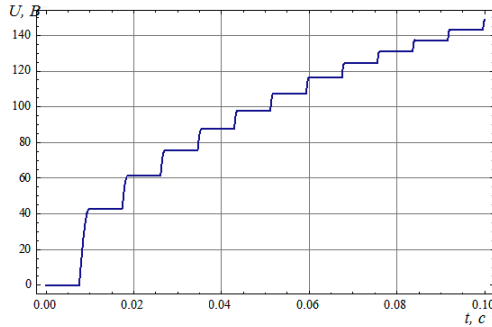


Рис. 3. Розрахункова часова залежність напруги для $C=100$ мкФ

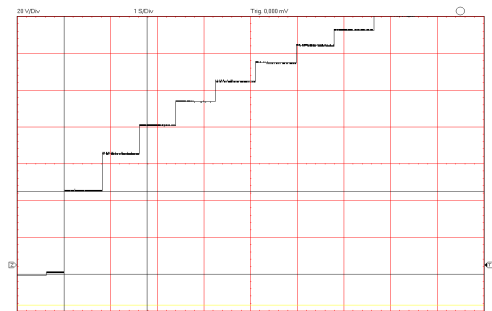


Рис. 4. Осцилограма залежності напруги для $C=100$ мкФ, 20 В/діл

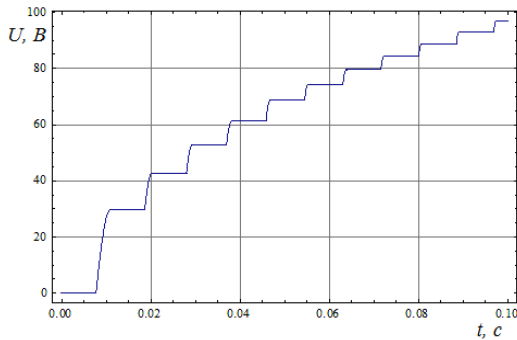


Рис. 5. Розрахункова часова залежність напруги для $C=200$ мкФ

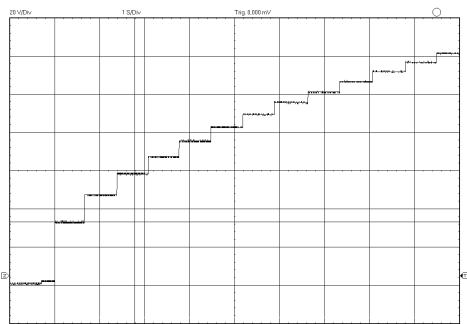


Рис. 6. Осцилограма залежності напруги для $C=200$ мкФ, 20 В/діл

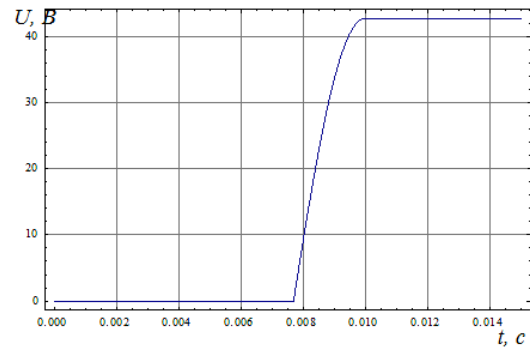


Рис. 7. Розрахункова залежність наростання напруги на першому циклі заряду для $C = 100$ мкФ

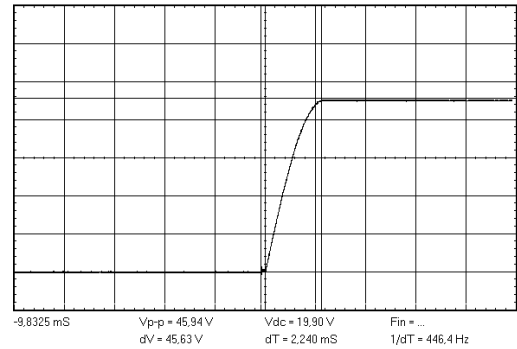


Рис. 8. Осцилограма напруги на першому циклі заряду для $C=100$ мкФ 10 В/діл

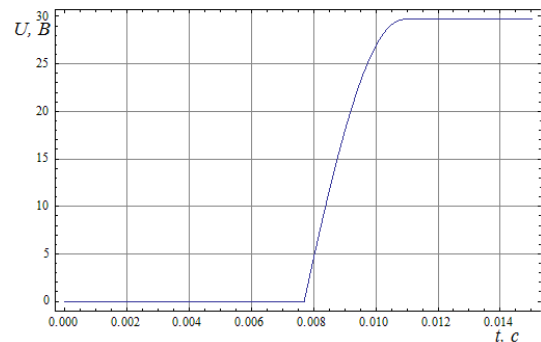


Рис. 9. Розрахункова залежність наростання напруги на першому циклі заряду для $C = 100$ мкФ

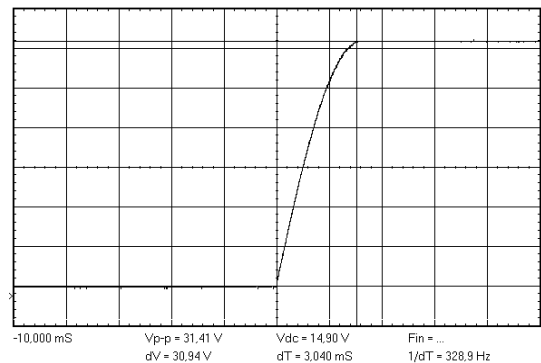


Рис. 10. Осцилограма напруги на першому циклі заряду для $C=200$ мкФ 5 В/діл

Зведені числові показники представлені у вигляді табл. 1.

Таблиця 1 – Числові показники процесу заряду

	Зарядна ємність $C = 100$ мкФ		Зарядна ємність $C = 200$ мкФ	
	Моделювання	Експеримент	Моделювання	Експеримент
Напруга заряду першого циклу, В	43,5	45,6	29,0	30,9
Час встановлення значення заряду першого циклу, мс	2,5	2,24	3,0	3,0
Кількість циклів заряду до напруги 100 В	5	5	11	9

Як видно з табличних значень, і часових розгортки функцій, крім візуальної ідентичності результатів моделювання та експерименту, можна відзначити більш значуще для практики проектування, числову відповідність основних вихідних показників поведінки даної схеми. Даний факт дає можливість стверджувати про достовірність отриманих функцій, а отже, їх придатність для подальшого розрахунку робочого варіанту системи заряду.

Практичний інтерес представляють процеси, що протікають в діючій установці [11]. Так, на рис. 11-12 представлені часові розгортки напруги заряду ємності 1200 мкФ для струмів заряду від 10 А до 100 А і індуктивності дроселя 0,01 Гн і 0,05 Гн.

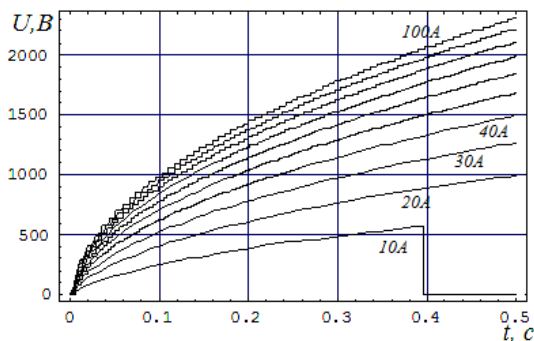


Рис. 11. Процес заряду ємнісного накопичувача дроселем 0,01 Гн

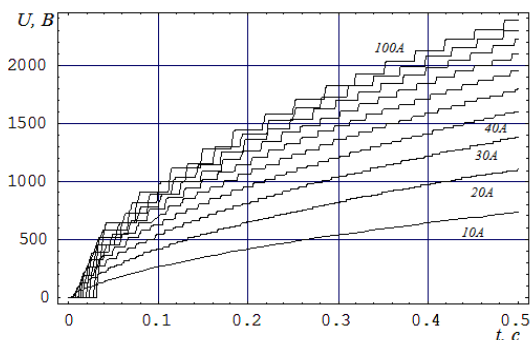


Рис. 12. Процес заряду ємнісного накопичувача дроселем 0,05 Гн

Як видно з рис. 11-12, для обраних параметрів контуру, необхідна напруга заряду ємності може бути досягнута за 0,35 с і 0,3 с, що на практиці може відповідати частоті повторення силових імпульсів на рівні від 3 Гц. У підтвердженні закону збереження енергії, середній час заряду, або потужність, що передається, залежить тільки від струму комутації, а величина індуктивності дроселя впливає тільки на необхідну частоту комутації. Даний показник позитивно відбивається на можливості вибору оптимальних параметрів дроселя і струмо-часових параметрів комутатора. Виходячи з цього, була отримана формула для виконання наближеного інженерно-технічного розрахунку необхідного струму комутації у вигляді (10), яка дозволяє не враховувати первинну напругу мережі живлення.

$$J_3 = \sqrt{\frac{2\langle P \rangle}{Lf}} \quad (10)$$

де $\langle P \rangle$ – середня задана потужність;

f – середня частота комутації напівпровідникового комутатора.

З урахуванням втрат активної потужності в провідниках, вираз (10) повністю корелює з наведеними модельними і експериментальними даними.

На відміну від стандартного трансформаторного перетворювача напруги, розглянута система, фактично, не має обмежень з боку якості мережі живлення, тому що вихідна напруга і потужність перетворювача визначається тривалістю спрацьовування силового ключа.

Єдиним суттєвим недоліком запропонованої системи перетворювача напруги є схематична складність побудови систем контролю та управління та можливе перевищення вартості у разі її проектування на велику потужність більше 20 кВт.

Висновки. Розроблена система ступеневого заряду являє собою автономний блок, що дозволяє реалізувати перетворювач рівнів напруги в якості контрольованого джерела електричної енергії.

Отримана математична модель показала принципову можливість використання даного джерела в якості елемента підвищення напруги заряду ємнісних накопичувачів МІУ і регулятора потужності для живлення інтегрованої або автономної системи індукційного нагріву.

При роботі на заряд ємнісних накопичувачів МІУ було отримано, що рівень заряду не має асимптотичного стаціонарного характеру і має наближену до квадратичної залежність від тривалості циклу заряду.

Вихідна потужність залежить тільки від амплітуди струму комутації дроселя і не залежить від обраної величини індуктивності дроселя.

Отримані експериментальні дані модельного варіанта повністю відповідають аналогічним розрахунковим значенням, а сам перетворювач напруги є працездатним для роботи в якості конструктивного елемента систем МІОМ з використанням систем ІН як інтегрованого допоміжного вузла.

Розглянута методика математичного представ-

лення перехідного нестационарного процесу, в схемах зі змінними електричними параметрами, включаючи напівпровідникові елементи, дозволяє з абсолютною точністю представляти фізичні часозалежні величини у вигляді кусково-неперервних функцій.

Результати проведених досліджень мають практичну значимість для створення більш компактних і автоматизованих систем безконтактної обробки металів.

Список літератури

1. Белый И.В., Горкин Л.Д. СРСР. Установка для нагрева изделий высокочастотными импульсами. В.Ю. Кленов, В.А. Матвейчук, М.П., Пшиков, Л.Т. Хименко. – №945194; Опубл. 23.07.1982.
2. Брон О.Б. Горячая магнитно-импульсная обработка металлов. О.Б. Юрон, В.П. Епечурин, Ю.И. Вершилов // Кузнечно-штамповочное производство. – 1970. – № 2. – С. 12-14.
3. Батигін Ю.В., Чаплигін Є.О. Пат. Україна. В21D 26/14 (2006.01). Спосіб обробки листових металів концентрованими джерелами енергії магнітних полів з попереднім нагрівом. Сабокар О.С., Стрельнікова В.А. – №121597; Опубл. 11.12.2017, Бюл. №23.
4. Larsson Linus. Warm Sheet Metal Forming with Localized In-Tool Induction Heating. Lund University. October 2005 76pp.
5. Батигін Ю.В. Гнатів А.В., Чаплигін Є.О., Єрьоміна Є.Ф. *Фізичні основи прогресивних магнітно-імпульсних технологій*. ХНАДУ 2013. 336 с
6. Данилевич О.И. Учет намагничивающего тока трансформатора при заряде емкостного накопителя магнитно-импульсной установки. *Вестник ХПИ*. 1971. Вып. 4. С. 62-65.
7. Батыгин Ю.В. Лавинский В.И. Хименко Л.Т. Импульсные магнитные технологии для прогрессивных технологий. ХПИ 2-е изд. Харьков 2003. 288с.
8. URL: <http://www.irf.com/application-notes/Infeneon>. (дата звернення 20.04.2018)
9. Гилев А.А. Данилов В.Н. Устройство заряда емкостных накопителей энергии быстродействующих приводов электроаппаратов. *Вісник КДПУ*. Випуск 4/2006 (39). Частина 1 С. 60-61.
10. Electrical Circuit Theory and Technology. Revised second edition. John Bird ISBN 0 7506 5784 7/ – 2003. – 984pp.
11. Аргун Ш.В., Батыгин Ю.В., Гнатів А.В., Чаплигін Е.А. Магнитно-импульсная установка для внешней рихтовки кузовных панелей автомобилей / ХНАДУ 2015 – 172с.

References (transliterated)

1. Bilyy I.V., Horkyn L.D. USSR. Ustanovka dlya nagreva izdeliy vysokochastotnymi impul'sami [Plant for heating products with high-frequency pulses.] V.YU. Klenov, V.A. Matveychuk, M.P., Pshikov, L.T. Khimenko / №945194; Printed. 23.07.1982.
2. Bron O.B., Yepchurin V.P., Vershilov YU.I. Goryachaya magnitno – impul'snaya obrabotka metallov. [Hot magnetic pulse processing of metals]. *Russian – Forging - stamping production*. 1970. no 2. pp. 12-14.
3. Batyhin Yu. V., Chaplyhin Ye. O. Sabokar O. S., Strelnikova V. A. Ukraine. Sposib obrabky lystovykh metaliv kontsentrovanyymi dzhirelamy enerhiyi mahnitnykh poliv z poperednim nahrivom. [Method of sheet metals with concentrated processing energy sources of magnetic fields with preheating.]. no. 21597; Printed. 11.12.2017.
4. Larsson Linus . Warm Sheet Metal Forming with Localized In-Tool Induction Heating. Lund University. October 2005 76 pp.
5. Batigin Yu.V. Hnatov AV, Chaplygin Ye.O., Eryomina Ye.F. *Fizichni osnovy prohresyvykh mahnitno-impul'snykh tekhnolohiy. [Physical basis of progressive magnetic pulse technologies.] KhNAHU 2013. 336 s*
6. Danilevich O. I. Uchet namagnichivayushchego toka transformatora pri zaryade yemkostnogo nakopiteya magnitno-impul'snoy ustanovki [Accounting for the magnetizing current of the transformer when the capacitive accumulator of a magnetic pulse installation]. *Herald of KHPI*. 1971. no. 4. pp. 62-65.
7. Batygin Yu.V. Lavinskiy V.I. Khimenko L.T. Impul'snyye magnitnyye tekhnologii dlya progressivnykh tekhnolohiy. [Pulsed magnetic fields for advanced technologies] *KhPI 2nd ed. Kharkiv 2003. 288p.*
8. URL: <http://www.irf.com/application-notes/Infeneon>. (дата звернення 20.04.2018)
9. Gilev A.A. Danilov V.N. Ustroystvo zaryada yemkostnykh nakopiteley energii bystrodeystvuyushchikh privodov elektroapparatov. [Device for charging energy capacitors for quick-driving electrical appliances] *Bulletin KSPU*. no. 4. 2006. pp. 60-61.
10. Electrical Circuit Theory and Technology. Revised second edition. John Bird ISBN 0 7506 5784 7. 2003. 984pp.
11. Argun Shch.V., Batygin Yu.V., Gnatov A.V., Chaplygin Ye.A. Magnitno-impul'snaya ustanovka dlya vneshney rikhtovki kuzovnykh paneley avtomobiley [Magnetic-impulse plant for external working of car body panels]. *KhNAHU*. 2015. 172pp.

Надійшла (received) 29.05.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the authors

Сабокар Олег Сергійович (Сабокарь Олег Сергеевич, Sabokar Oleh Vasilyevich) – аспірант, асистент кафедри фізики, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0001-5146-1489; e-mail: o.s.sabokar@gmail.com.