

## Література

1. Suseela, P. Design of Solar-Powered Electric Vehicle Charging System. / Suseela, P. B., Chennapragada, Bhanu. // 2023 International Conference for Advancement in Technology (ICONAT) - p. 1-8. - 2023.- 10.1109/ICONAT57137.2023.10080468.
2. A. Shukla. Solar Powered Electric Vehicle Charging Station With Integrated Battery Storage System / Shukla, Aradhana & Shukla, Harisharanam & Yadav, Satish & Singh, Jyotsna & Singh, Rajendra. // Energy Storage. 6. – 2024/ - 10.1002/est2.70077.
3. Off-Grid EV Charging Stations: A Comprehensive Guide to Design, Deployment and Benefits. / Pulse Energy. - September 2, 2025. [Electronic Resource]. - Access Mode: <https://pulseenergy.io/blog/off-grid-solar-ev-charger>
4. Leontiev D., Klymenko V., Frolov A.; Regarding the efficiency of using solar panels of low power to obtain maximum charging current for batteries vehicle. *AIP Conf. Proc.* 5 June 2025; 3238 (1): 050009. <https://doi.org/10.1063/5.0248928>

УДК 621.318

### **ПРИТЯГАННЯ ТОНКОСТІННИХ МЕТАЛІВ З ВИКОРИСТАННЯМ РЕЗОНАНСНОГО МАГНІТНО-ІМПУЛЬСНОГО КОМПЛЕКСУ**

С.О. Шиндерук, Ю.В. Батигін

*Харківський національний автомобільно-дорожній університет*  
*s.shinderuk.2016102@ukr.net    yu.v.batygin@gmail.com*

Досягнення в галузі створення магнітно-імпульсних установок (МІУ), як потужних енергетичних джерел, визначають перспективи використання імпульсних електромагнітних полів у реалізації сучасних екологічно чистих, ресурсозберігаючих та високопродуктивних технологій з обробки металів тиском. Можна виділити деякі основні наукові видання, які розкривають та узагальнюють інформацію про розвиток обладнання для польових технологій [1,2,3]. Так, авторами наукового видання [1] досить докладно описані приклади магнітно-імпульсних установок, створених у різний час світовими електротехнічними виробниками. Висвітлено успіхи у розробках МІУ фірмами Німеччини, Великобританії, США та ін. Огляд у праці [2] присвячений опису розробок технічних аспектів у реалізації різних штампувальних, складальних та зварювальних виробничих операцій. У праці [3] висвітлено ключові проблеми та досягнення сучасних методів обробки металів тиском. Особливо виділяються пропозиції технологій високошвидкісного формування, які мають високий потенціал створення складних деталей. Автори акцентують увагу на низькій вартості інструментів виробництва, їхній високій гнучкості та розширених межах формування при кімнатній температурі.

Вчені під керівництвом Г.А. Шнеерсона викладають проблеми та підходи до їх вирішення в галузі отримання надсильних імпульсних електромагнітних полів не тільки для виробничих цілей, але й для великомасштабних фізичних досліджень [4].

Одна з останніх авторських публікацій, що відкривають новий науковий напрямок, присвячена притяганню заданих ділянок тонкостінних металів за допомогою низькочастотних імпульсних електромагнітних полів [5]. У монографії теоретично та експериментально проілюстровано фізику процесів, що протікають, сформульовано умови їх реалізації та приклади застосування в сучасних технологіях.

Успіхи у дослідженнях явищ природи дозволяють вийти на якісно новий рівень технічних можливостей у різних сферах людської діяльності. Концентруючи увагу на електротехніці та прикладній електродинаміці, слід зазначити, що явище резонансу та введення резонансних елементів у схеми генераторів імпульсних магнітних полів має істотно підвищувати ефективність технологій, де вони використовуються як джерела електричної потужності [6, 7]. Розробки Н.Тесла, виконані ще на початку минулого століття, вказали Людству шляхи до створення потужної енергетики на базі резонансних електротехнічних структур [6]. Прикладом практичного розвитку його ідей є двоконтурний резонансний підсилювач електричної потужності для магнітно-імпульсної обробки металів, представлений у роботі [7]. Як відомо, в електротехніці резонансні ефекти виявляються при збудженні виключно гармонічних коливань у послідовних і паралельних активно-реактивних контурах [8].

Теоретичні та експериментальні спроби посилення реактивної електричної потужності при резонансі напруги висвітлені в роботах [9,10]. Їхні висновки дозволяють перейти до наслідків їх узагальнення, згідно з якими використання активно-реактивних електротехнічних контурів може дати вирішення нагальних проблем сучасної електроенергетики. Йдеться про створення підсилювача вже активної електричної потужності струмів і напруг, вперше запропонованому і описаному авторами роботи [11]. У технічній реалізації цей пристрій складається з двох послідовних активно-реактивних контурів із загальним ємнісним накопичувачем електричної енергії.

Слід зазначити, що з фізичної точки зору, магнітно-імпульсна установка, виконана за вищеописаною резонансною схемою, і поєднує посилення реактивної потужності з перетворенням її в активну електричну потужність, зрештою, є резонансним генератором енергії для механічної обробки металів згідно з заданою виробничою програмою.

Безсумнівною і значною перевагою використання послідовних активно-реактивних контурів замість громіздкого силового устаткування традиційних зарядних пристроїв є конструктивна простота і можливість підвищення-зниження напруги за рахунок варіації характеристик зарядного

ланцюга (добротність і час процесу). Причому коефіцієнт посилення в резонансній схемі буде незрівнянно вищим, ніж у схемі традиційного зарядного пристрою.

Метою цієї роботи є пропозиція та обґрунтування дієздатності магнітно-імпульсного комплексу для притягання тонкостінних металів, що складається з двох послідовних контурів із загальним ємнісним накопичувачем енергії, перший з яких – це резонансний зарядний пристрій з живленням від мережі промислової напруги та частоти, а другий блок – це розряд. виробничого завдання.

### **Схема, принцип дії. Постановка задачі.**

Всі характеристики обладнання, як вихідні дані чисельних оцінок, взяті з роботи [5].

#### Експериментальний магнітно-імпульсний комплекс – МІУС-2.

Зарядний контур: джерело – трифазна мережа ( $\sim 380$  В), що підвищує трансформатор напруги до  $\sim 2500$  В, випрямляч, накопичувач електричної енергії ємністю 1200 мкФ.

Розрядний контур: напруга на ємності – 2000 В, струм у розряді – 38000 А, частота – 1900 Гц (на виході імпульсного трансформатора струму з коефіцієнтом посилення  $\sim 5$ ), індуктивність контуру – 5,84 мкГн, активний опір – 0,04 Ом.

На рис. 1 представлені принципова схема резонансного магнітно-імпульсного комплексу (МІК), що є, з фізичної точки зору, імпульсним резонансним підсилювачем активної електричної енергії та призначеного для притягання заданих ділянок поверхні листових металів.

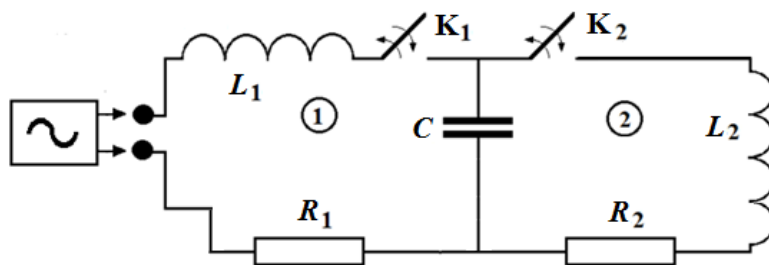


Рис. 1. Принципова схема магнітно-імпульсного комплексу, що складається з 2-х послідовних резонансних контурів із загальним ємнісним накопичувачем енергії,

- 1 – зарядний контур з індуктивністю  $L_1$  і активним опором  $R_1$
- 2 – розрядний контур з індуктивністю  $L_2$ , що включає індуктивність інструменту-індуктора з струмопідводами і активним опором  $R_2$ .

Схема запропонованого комплексу складається з двох блоків із загальним ємнісним накопичувачем  $C$ . Перший із блоків (послідовний активно-реактивний контур, позначений цифрою 1) – це блок заряду ємності, з фізичної точки зору, що є блоком посилення реактивної потужності. Другий блок (послідовний активно-реактивний контур, позначений цифрою 2) – це

розрядний блок, фізично, що є блоком перетворення енергії, що запасається в ємнісному накопичувачі, в енергію магнітно-імпульсного притягання, що генерується індуктором-інструментом.

#### Постановка задачі.

- Отримати вихідні характеристики запропонованої резонансної схеми, що є аналогічні за величини вихідним характеристикам у роботі [5], які забезпечують практичне виконання заданої виробничої операції.
- Зовнішнє джерело живлення – мережа промислової напруги  $\sim 220$  В (амплітудне значення  $E_m = 311$  В) з частотою  $f_1 = 50$  Гц.
- Вибір ємності накопичувача електричної енергії довільний  $C = 250 \cdot 10^{-6}$  Ф.
- Власна частота зарядного контуру  $f_1 = 50$  Гц, розрядного контуру  $f_2 = 1500$  Гц.
- Активні опори зарядного та розрядного контурів  $R_{1,2} = 0,1$  Ом.

#### **Розрахункові співвідношення.**

Усі наведені розрахункові співвідношення були отримані методами теорії електричних ланцюгів, описаними у роботах [8,12,13]. Щоб уникнути громіздкості викладу, математичні перетворення та аналітичні залежності, необхідні для виконання цих чисельних оцінок, взяті з раніше опублікованої авторської статті [11]. Наведемо, з прийнятою постановкою завдання, результати аналізу енергії перехідних процесів у блоках підсилювача.

#### Зарядний контур.

Енергія, що запасається ємністю, по відношенню до енергії джерела живлення:

$$\Delta W_C(\varphi) = \frac{Q_1}{2} \cdot \frac{\left(1 - e^{-\frac{1}{2Q_1}\varphi}\right)^2 \cdot \cos^2(\varphi)}{\int_0^\varphi \left(1 - e^{-\frac{1}{2Q_1}x}\right) \sin^2(x) \cdot dx} \quad (1)$$

#### Розрядний контур.

Енергія поля в індуктивності щодо енергії живильного джерела:

$$\Delta W_{L_2}(\varphi) = \Delta W_C(\varphi_1) \cdot e^{-\frac{1}{Q_2}\varphi} \cdot \sin^2(\varphi). \quad (2)$$

Графічні ілюстрації електромагнітних процесів у зарядному контурі 1 МК.

Процес заряду ємнісного накопичувача (рис. 2), на відміну традиційних схем з випрямлячами, носить хвилеподібний характер. Протягом майже напівперіоду ємність запасається відповідним максимумом енергії, причому цей максимум значно перевищує енергію, що відбирається у джерела (більше, ніж  $\sim 140$  разів на початку процесу).

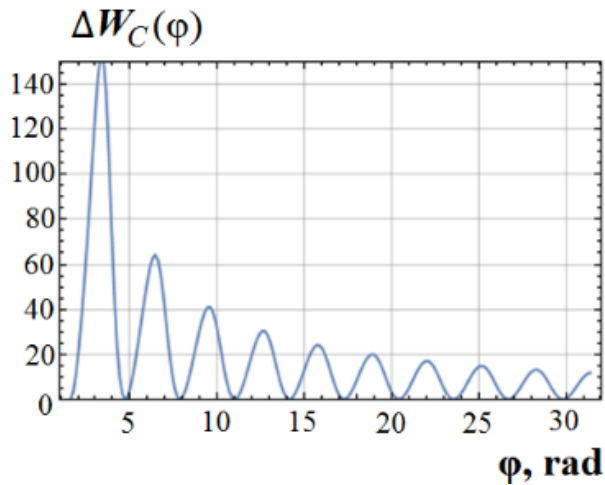


Рис.2.

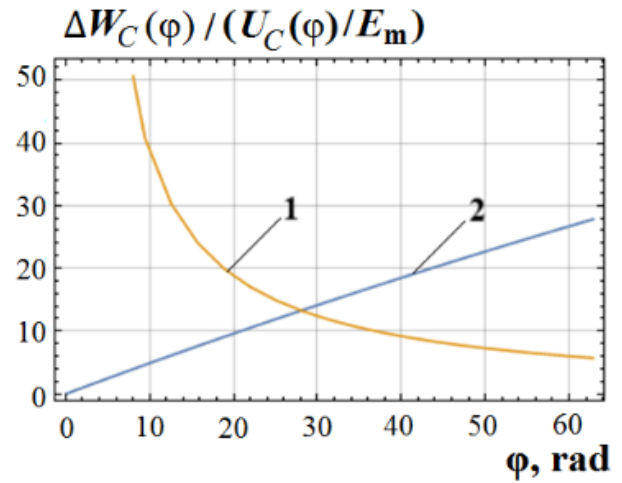


Рис.3.

Рис. 2. Фазова залежність енергії, що запасається  $C$ , щодо енергії джерела.

Рис. 3. Фазові залежності максимумів відносної енергії ємнісної накопичувача,  $\Delta W_C(\varphi) - 1$ , та відносної зарядної напруги,  $(U_C(\varphi)/E_m) - 2$ .

Відносна резонансна енергія заряду ємнісного накопичувача з часом (рис. 3), природно, падає до нуля. Зрештою, повинна і споживатиметься лише енергія джерела. У той же час напруга на ємності зростатиме до свого значення. Можна вважати, що тривалість найефективнішого заряду (відносна енергія та величина зарядної напруги в сукупності) визначається абсцисою до точки перетину кривих на даному малюнку.

Графік основної характеристики і електромагнітного процесу в розрядному контурі 2 схеми МІК представлений нижче .

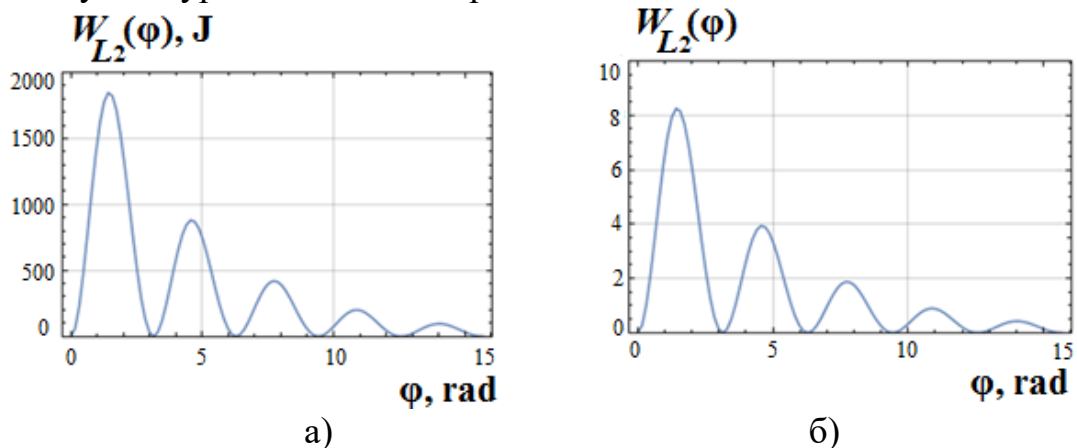


Рис.4. Фазові залежності енергії в індуктивності індуктора-інструменту;  
 а) в абсолютних одиницях вимірювання;  
 б) щодо енергії зовнішнього джерела потужності

Подані графіки належать до енергетики індуктора-інструменту. Енергії магнітного поля, що здійснює роботу з деформування об'єкта обробки, носить загасаючий у часі хвилеподібний характер. За рахунок резонансу її амплітуда більш ніж 8 разів перевищує енергію, що споживається із зовнішнього джерела. В абсолютному вимірі вона становить  $\sim 1850$  Дж. Втрати в порівнянні з енергією, що запасасться ємнісним накопичувачем  $\sim 2640$  Дж, пояснюються дисипацією в активному опорі контуру.

**Основні результати.** Показана висока ефективність резонансного формування характеристик заряду ємнісного накопичувача електричної енергії від промислової мережі  $\sim 220$  В на частоті  $\sim 50$  Гц за  $\sim 0,1$ с до напруги  $\sim 4595,85$  В (посилення становить  $\sim 14,78$  разів) при запасеній енергії  $\sim 2640$  Дж (енергія джерела  $\sim 8,47\%$ , резонансна енергія  $\sim 91,53\%$ ). Для розрядного контуру на частоті  $\sim 1500$  Гц отримано, що максимум енергії в індукторі-інструменті  $\sim 8,25$  разів перевищує енергію, що споживається із зовнішнього джерела потужності. Розрядний струм в індукторі-інструменті складає  $\sim 45270,4$  А. За даною величиною струму, повинен мати місце ефективний силовий вплив на об'єкт, що обробляється.

У порівнянні з традиційною схемою МІУ перевагами запропонованої схеми магнітно-імпульсного комплексу є значна економія споживаної електроенергії за рахунок резонансних явищ і суттєво нижча собівартість, зважаючи на відсутність дорогих традиційних компонентів зарядного пристрою ємнісного накопичувача електричної енергії.

## ЛІТЕРАТУРА

1. I.V. Belyy, S.M. Fertik and L.T. Khimenko, Handbook of the Magnetic-Pulsed Metals Processing. Kharkov: Vyshcha Shkola, 1970.
2. V. Psyk, D. Risch, B.L. Kinsey, A.E. Tekkaya and M. Kleiner, "Electromagnetic Forming – A review," Journal of Materials Processing Technology, no 211, 2011, pp.787-829.
3. Materials of ICHSF2012 – 5th International Conference on High Speed Forming. Dortmund, Germany, 2012.
4. G.A Shneerson, M.I. Dolotenko and S.I. Krivosheev, Strong and Superstrong Pulsed Magnetic Fields Generation, Berlin: Walter de Gruyter, 2014.
5. Yu. Batygin, M. Barbashova, O. Sabokar, Electromagnetic Metal Forming for Advanced Processing Technologies. Springer International Publishing AG, part of Springer Nature 2018.
6. N. Tesla, My Inventions and Other Writing. Dover Drift Edition. Dover Publication Inc., 2016.
7. Yu.V. Batygin, S.O. Shinderuk, E.O. Chaplygin and D.V. Fendrikov, "Double-circuit resonant electric power amplifier for magnetic-pulse processing of metals," Technical Electrodynamics, vol. 3, 2022, pp. 29–36.
8. K.S. Demirchan, L.R. Neyman, N.V. Korovkin and V.L. Chechurin, Theoretical Foundations of Electrical Engineering. Vol. 1. SPb: Pyter., 2003.

9. UA Patent no. 103215, Yu.M. Likhovid, “The resonant power amplifier,” 2015.
10. Batygin, Yu., Yeryomina, O., Shinderuk, S., Chaplygin, E., Yu. Batygin, O. Yeryomina, S. Shinderuk and E. Chaplygin, “Self-sustaining resonant converter of reactive power into active one,” *Elektrotehniski Vestnik [Journal of Electrical Engineering and Computer Science]* 90(5), 2023, pp. 254–258.
11. Yu. V. Batygin, S. O. Shinderuk, E. O. Chaplygin, Pulse Resonance Active-Power Amplifier. Offer and Justification of Workability. *Global Journal of Researches in Engineering. Electrical & Electronic Engineering. Volume XXIII, Issue 1, Version 1. Year 2023.* pp. 11-19.
12. J.J. Thomson, *Elements of the Mathematical Theory of Electricity and Magnetism*, London: Wentworth Publishing Ltd, 2016.
13. L. Kantorovich, *Mathematics for Natural Scientists. Fundamentals and Basics*, Cham: Springer International Publishing AG, 2018.