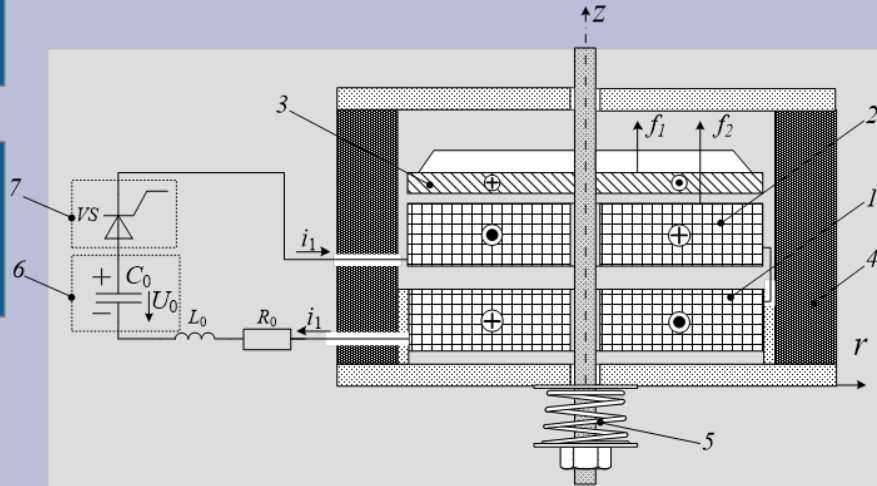


## Схема і фізичні процеси ЛІЕП

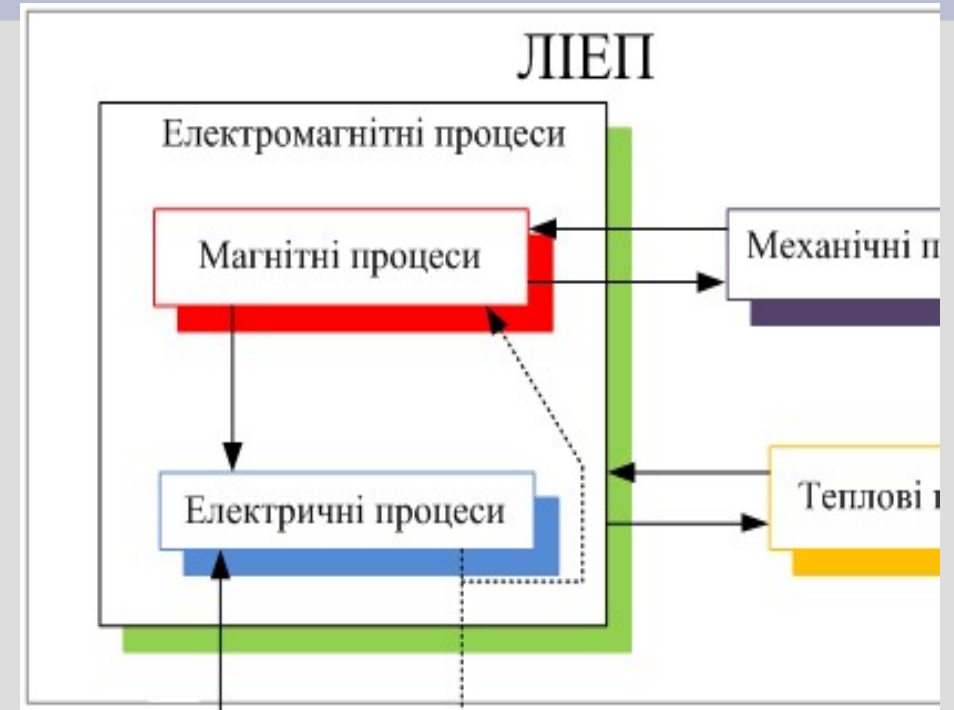
Схема ЛІЕП мультіякірної конфігурації:

Фізичні процеси в ЛІЕП



1 – нерухома ОІ; 2 – КЯ; 3 – ЕЯ; 4 – ФЕ; 5 – зворотня пружина; 6 – ЄНЕ; 7 – напівпровідниковий ключ

ОІ – обмотка індуктора; КЯ - котушковий якір; ЕЯ - масивний електропровідний якір; ФЕ – феромагнітний якір; ЄНЕ – ємнісний накопичувач енергії



# Математична модель електромагнітних процесів ЛІЕП мультитяжкірної конфігурації

в області обмотки індуктора  $\Omega_1$ :

$$\gamma_1 \frac{\partial A_{1\varphi}(t)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{1}{\mu_1} \cdot \frac{\partial A_{1\varphi}(t)}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{\mu_1 \cdot r} \cdot \frac{\partial (rA_{1\varphi}(t))}{\partial r} \right) = -j_1(t) = -\frac{i_1(t) \cdot N_1}{S_1} k_{1s}$$

в області котушкового якоря  $\Omega_2$ :

$$\gamma_2 \frac{\partial A_{2\varphi}(t)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{1}{\mu_2} \cdot \frac{\partial A_{2\varphi}(t)}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{\mu_2 \cdot r} \cdot \frac{\partial (rA_{2\varphi}(t))}{\partial r} \right) - v_{z2}(t) \cdot \frac{\gamma_2}{\mu_2} \cdot \frac{\partial A_{2\varphi}(t)}{\partial z} = -j_2(t) = -\frac{i_2(t) \cdot N_2}{S_2} k_{2s}$$

в області електропровідного якоря  $\Omega_3$ :

$$\gamma_3 \frac{\partial A_{3\varphi}(t)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{1}{\mu_3} \cdot \frac{\partial A_{3\varphi}(t)}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{\mu_3 \cdot r} \cdot \frac{\partial (rA_{3\varphi}(t))}{\partial r} \right) - v_{z3}(t) \cdot \frac{\gamma_3}{\mu_3} \cdot \frac{\partial A_{3\varphi}(t)}{\partial z} = 0$$

в області ФЕ  $\Omega_4$ :

$$\gamma_4 \frac{\partial A_{4\varphi}(t)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{1}{\mu_4} \cdot \frac{\partial A_{4\varphi}(t)}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{\mu_4 \cdot r} \cdot \frac{\partial (rA_{4\varphi}(t))}{\partial r} \right) = 0$$

в області повітряного простору  $\Omega_5$ :

$$\frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{\partial A_{5\varphi}(t)}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{\mu_0 \cdot r} \cdot \frac{\partial (rA_{5\varphi}(t))}{\partial r} \right) = 0$$

Розрахунок складових вектора та модуля індукції магнітного поля:

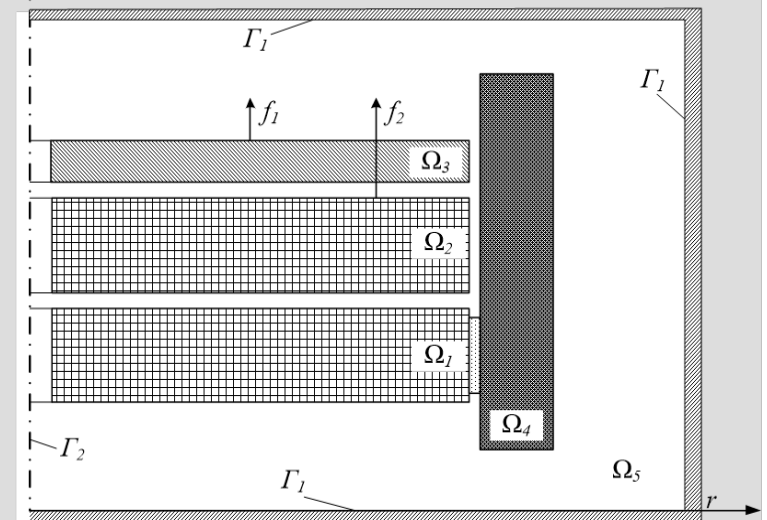
$$B_r = -\frac{\partial A_\varphi}{\partial z} \quad B_z = \frac{1}{r} \frac{\partial (rA_\varphi)}{\partial r}$$

$$B = \sqrt{B_r^2 + B_z^2} \quad f_{\vec{z}} = \oint_S 2\pi r T_z ds = \frac{1}{\mu_0} \oint_S 2\pi r (B_r \cdot B_z) ds$$

граничними умовами на поверхні та на границях:

$$\begin{aligned} \text{rot} \vec{A}_i \cdot \vec{n} &= \text{rot} \vec{A}_j \cdot \vec{n} \\ \frac{1}{\mu_i} \text{rot} \vec{A}_i \times \vec{n} &= \frac{1}{\mu_j} \text{rot} \vec{A}_j \times \vec{n} \\ \vec{A} &= 0 \quad \vec{n} \cdot \vec{A} = 0 \end{aligned}$$

Схема ЛІЕП



$\Omega_1$  – область ОІ;  $\Omega_2$  – область КЯ;  $\Omega_3$  – область ЕЯ;  $\Omega_4$  – область ФЕ;  $\Omega_5$  – область повітряного середовища;  $\Gamma_1$  – внутрішня розрахункова границя;  $\Gamma_2$  – границя вісі симетрії

## Модель механічних процесів ЛІЕП

$$\left\{ \begin{array}{l} (m_3 + m_e) \frac{dv_3(t)}{dt} = f_3(t) - K_{mp} \cdot v_3(t) \\ \frac{dz_3(t)}{dt} = v_3(t) \\ (m_3 + m_2 + m_e) \frac{dv_2(t)}{dt} = f_2(t) - K_{mp} \cdot (v_3(t) + v_2(t)) - K_B \cdot (v_3(t) + v_2(t))^2 - K_P \cdot (z_3(t) + z_2(t)) \\ \frac{dz_3(t)}{dt} = v_3(t) \end{array} \right.$$

Початкові умови:  $v_3(0)=0$ ;  $v_2(0)=0$ ;  $z_3(0)=0$ ;  $z_2(0)=0$ .

## Модель теплових процесів ЛІЕП

$$c_n(T) \cdot \gamma_n \frac{\partial T_n}{\partial t} = \lambda_n(T) \left( \frac{\partial^2 T_n}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_n}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_n}{\partial z^2} \right) + j_n^2(t) \cdot k_n \cdot \rho_n(T)$$

$n$ -і активні елементи ЛІЕП

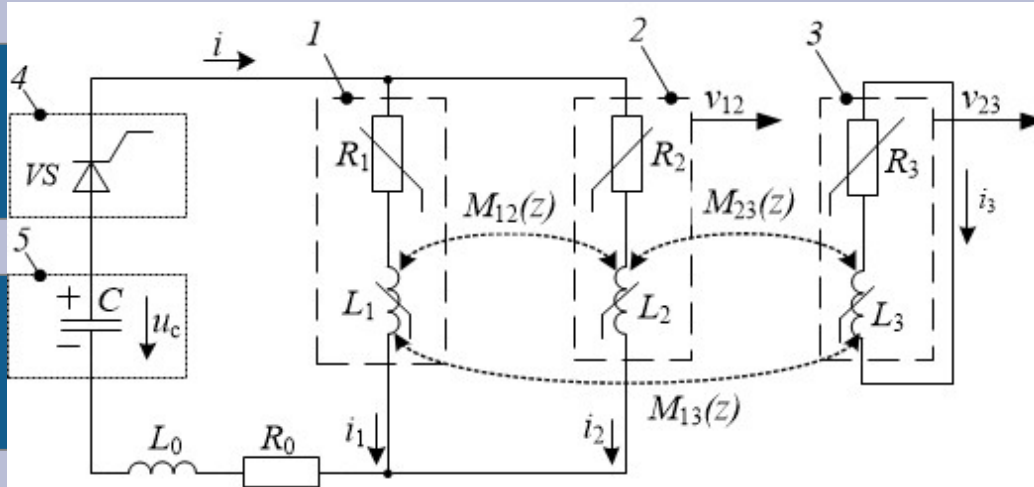
граничні умови на поверхні :

$$-\frac{\partial T_\xi}{\partial n} = \frac{\alpha}{\lambda_k} (T_\xi - T_0)$$

граничні умови на осі симетрії :

$$\left( \frac{\partial T}{\partial r} \right)_\xi = 0$$

# Електрична схема та математична модель ЛІЕП з паралельним з'єднанням ОІ і КЯ



$$\begin{cases} \frac{d\psi_1}{dt} + L_0 \frac{di}{dt} + R_0 i + i_1 R_1 + u_c = 0 \\ \frac{d\psi_2}{dt} + L_0 \frac{di}{dt} + R_0 i + i_2 R_2 + u_c = 0 \\ \frac{d\psi_3}{dt} + i_3 R_3 = 0 \\ \frac{du_c}{dt} = \frac{i}{C_0} \\ i = i_1 + i_2 \end{cases}$$

1 – обмотка індуктора; 2 – котушковий ярк; 3 – електропровідний ярк; 4 – ключ; 5 – ємнісний накопичувач енергії.

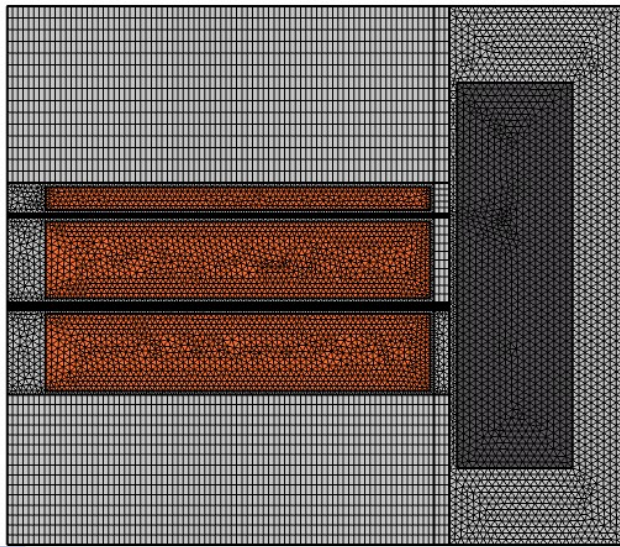
$$\psi_k = N_k \cdot \int_{S_k} \vec{B}_k d\vec{s} = N_k \cdot \int_{S_k} \text{rot } \vec{A}_k d\vec{s} = 2\pi \frac{N_k}{S_k} \cdot \int_{S_k} r A_k dr dz$$

$$\begin{aligned} \frac{d\psi_1}{dt} &= e_{v12} + e_{v13} + L_1 \frac{di_1}{dt} + M_{12}(z) \frac{di_2}{dt} + M_{13}(z) \frac{di_3}{dt} \\ \frac{d\psi_2}{dt} &= e_{v22} + e_{v23} + M_{21}(z) \frac{di_1}{dt} + L_2 \frac{di_2}{dt} + M_{23}(z) \frac{di_3}{dt} \\ \frac{d\psi_3}{dt} &= e_{v32} + e_{v33} + M_{31}(z) \frac{di_1}{dt} + M_{32}(z) \frac{di_2}{dt} + L_3 \frac{di_3}{dt} \end{aligned}$$

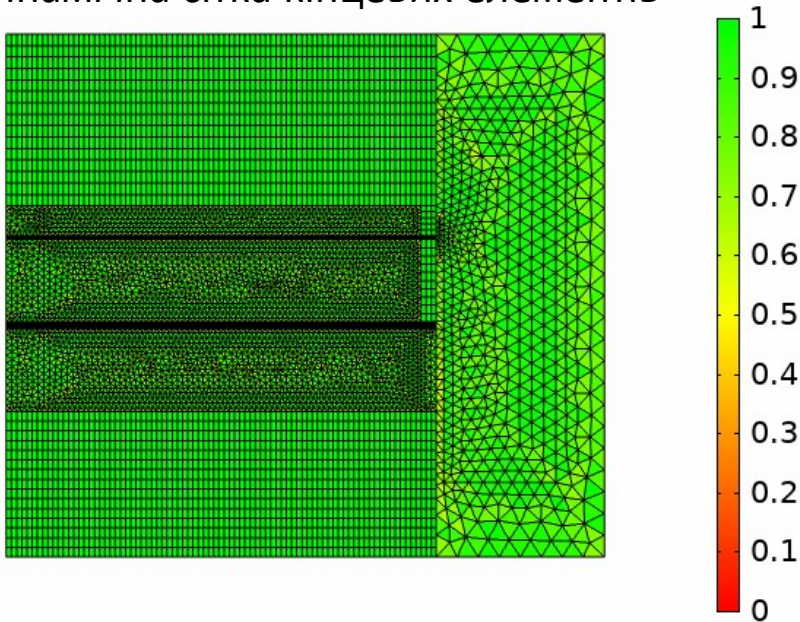
$$\begin{cases} 2\pi \frac{N_1}{S_1} \cdot \int_{S_1} \frac{dr A_{1\varphi}}{dt} dr dz + L_0 \frac{di}{dt} + R_0 i + i_1 R_1 + u_c = 0 \\ 2\pi \frac{N_2}{S_2} \cdot \int_{S_2} \frac{dr A_{2\varphi}}{dt} dr dz + L_0 \frac{di}{dt} + R_0 i + i_2 R_2 + u_c = 0 \\ 2\pi \frac{N_3}{S_3} \cdot \int_{S_3} \frac{dr A_{3\varphi}}{dt} dr dz + i_3 R_3 = 0 \\ \frac{du_c}{dt} = \frac{i}{C_0} \\ i = i_1 + i_2 \end{cases}$$

Початкові мови:  $u_c(0) = 300$ ;  $i(0) = 0$ ;  $i_1(0) = 0$ ;  $i_2(0) = 0$ ;  $i_3(0) = 0$ ;  $A_{1\varphi}(0) = 0$ ;  $A_{2\varphi}(0) = 0$ ;  $A_{3\varphi}(0) = 0$ .

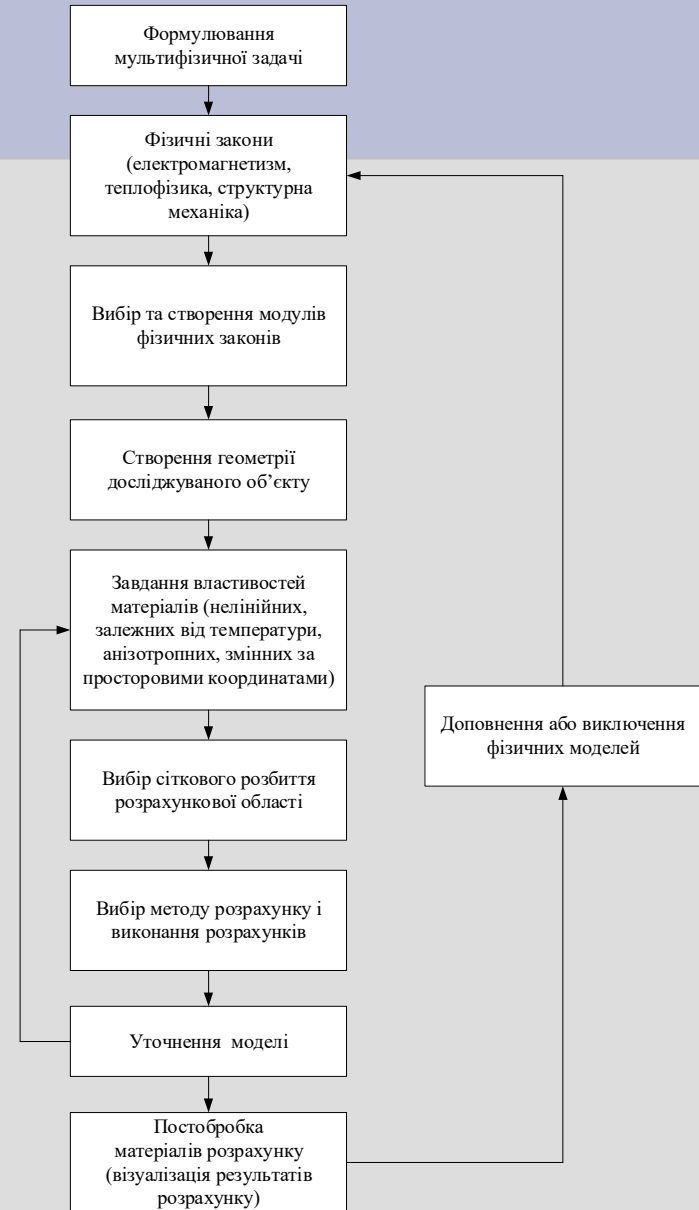
Сітка кінцевих елементів



Динамічна сітка кінцевих елементів



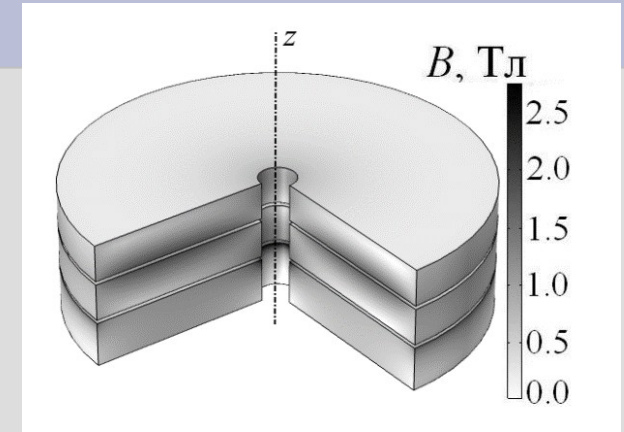
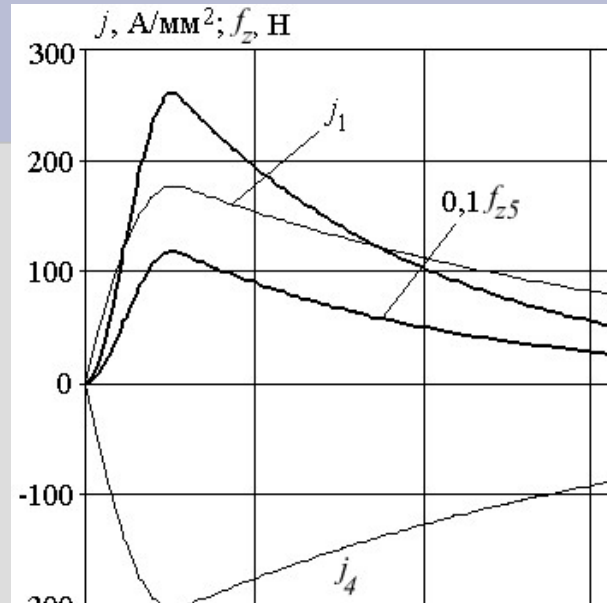
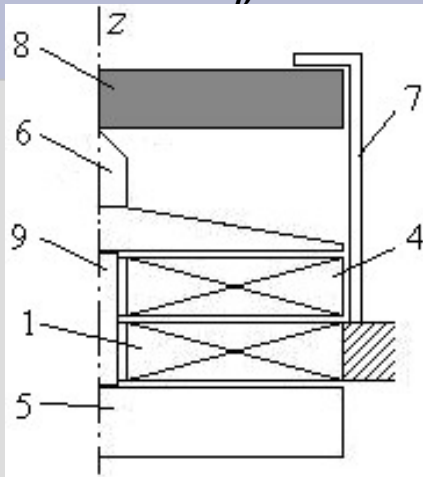
## Основні етапи реалізації мультифізичного моделювання ЛЕП в програмному пакеті COMSOL Multiphysics



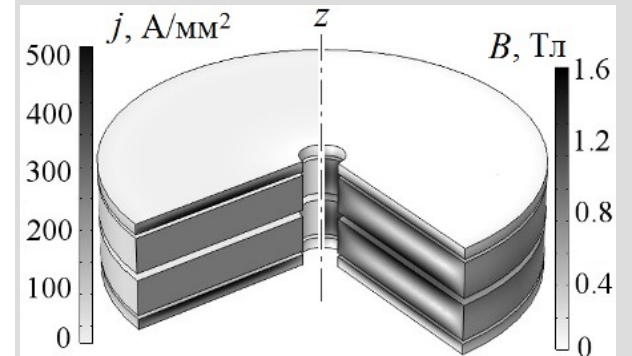
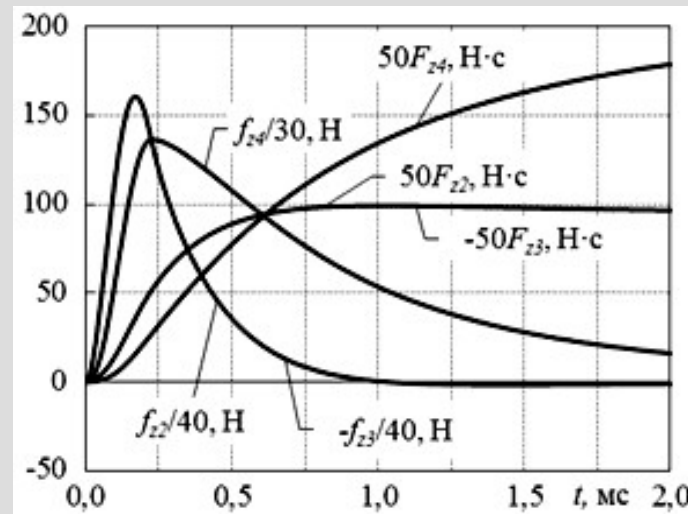
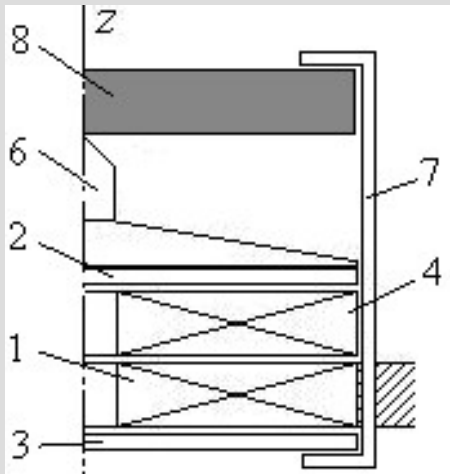
# Електромеханічні характеристики ЛІЕП мультіякірних конфігурацій

16

ЛІЕП-К<sub>p</sub>-Ф

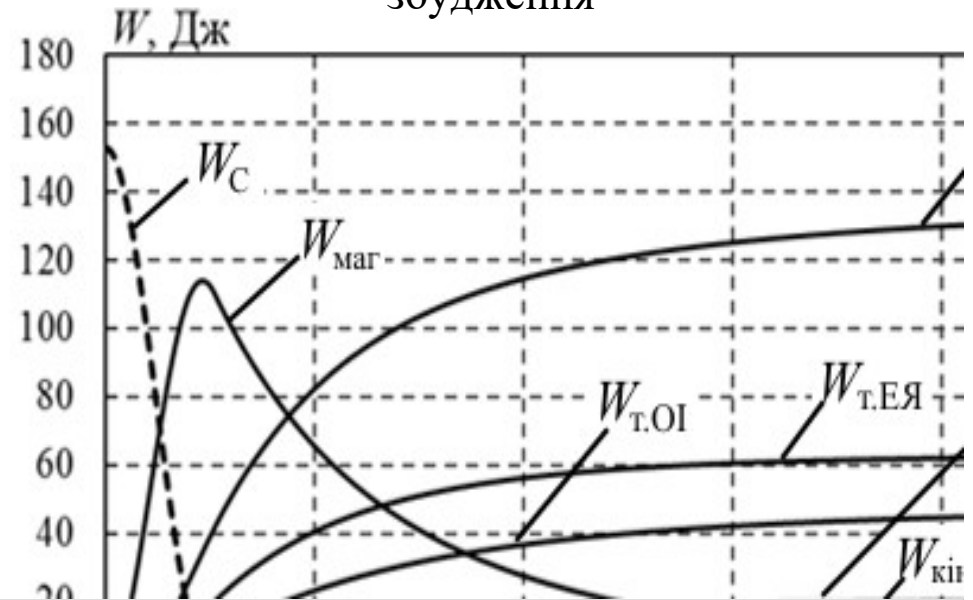
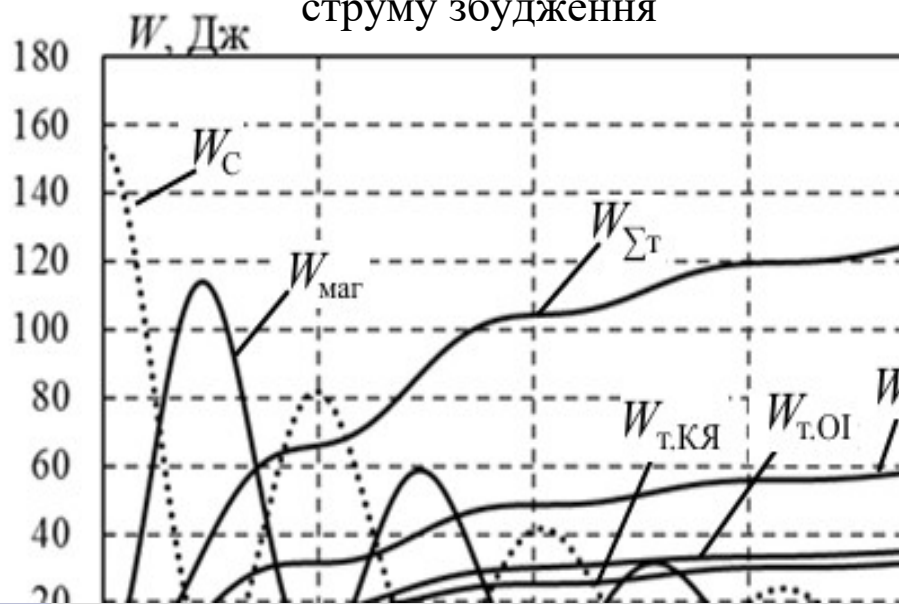


ЛІЕП-К<sub>p</sub>-Е2



при коливально-  
загасаючому імпульсу  
струму збудження

при аперіодичному імпульсу струму  
збудження



$$W_C = \frac{C_0 u_C^2}{2} - \text{енергія ЄНЕ};$$

$$W_{\text{маг}} = \frac{1}{2} \int_V H B dV - \text{енергія магнітного поля};$$

$$W_{\text{кін}} = \frac{m_e v_z^2}{2} - \text{кінетична енергія};$$

$$W_{T.OI} = \int_0^{t_p} i_1^2 \cdot R_1(T_1) dt - \text{теплова енергія, яка виділяється в ОІ};$$

$$W_{T.КЯ} = \int_0^{t_p} i_2^2 \cdot R_2(T_2) dt - \text{теплова енергія, яка виділяється в КЯ};$$

$$W_{T.ЕЯ} = \int_0^{t_p} i_3^2 \cdot R_3(T_3) dt - \text{теплова енергія, яка виділяється в ЕЯ};$$

$$W_{\Sigma T} = W_{T.OI} + W_{T.ЕЯ} + W_{T.КЯ} - \text{сумарна теплова енергія в ОІ, КЯ та ЕЯ};$$

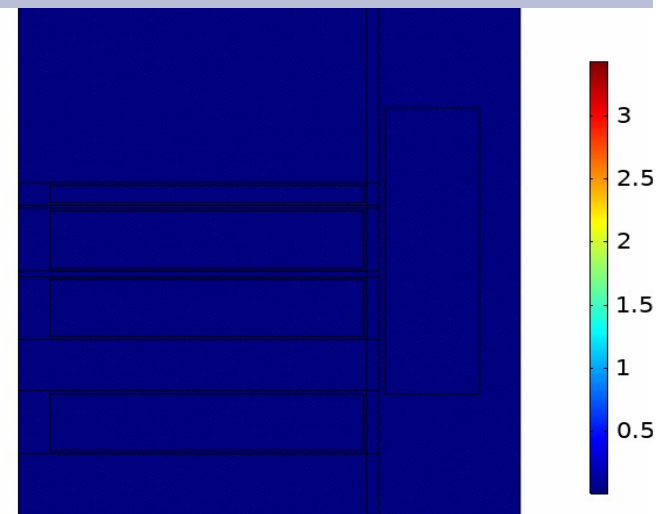
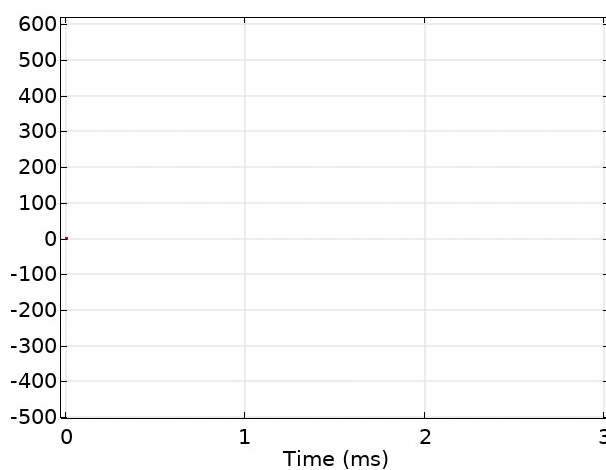
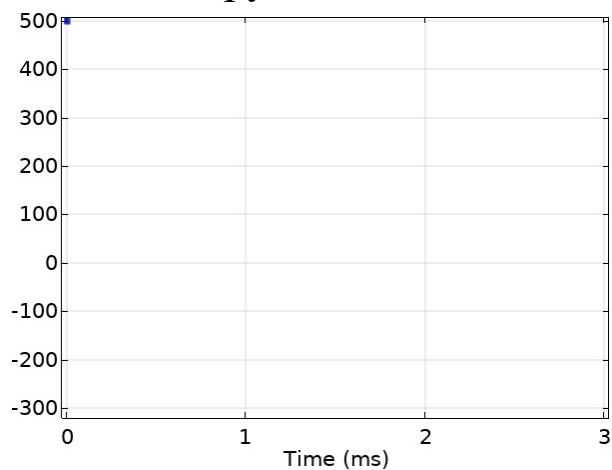
# Електромеханічні характеристики ЛІЕП в динаміці

18

Розподіл індукції магнітного поля

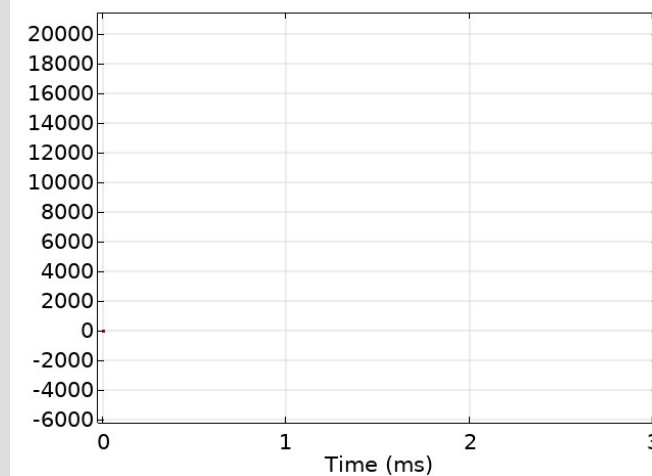
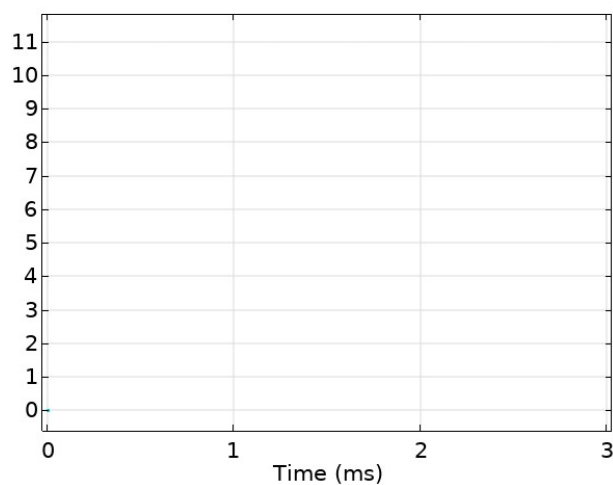
Напруга на ЄНЕ

Густина струмів



Швидкість і переміщення ВЕ

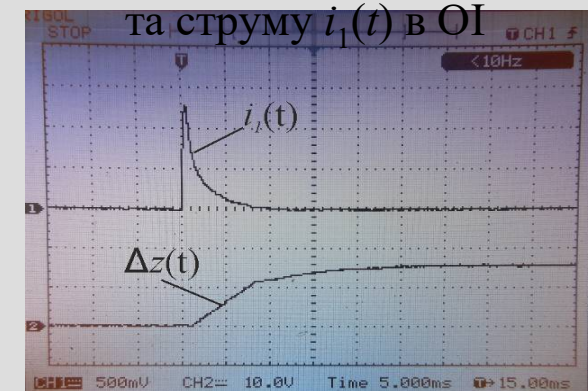
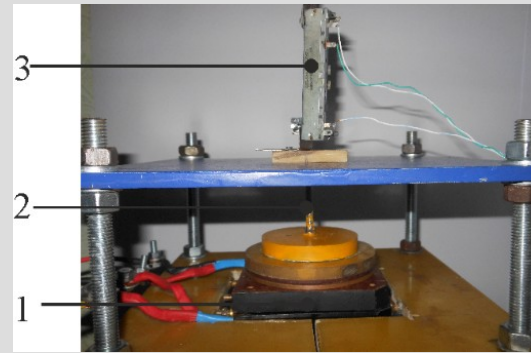
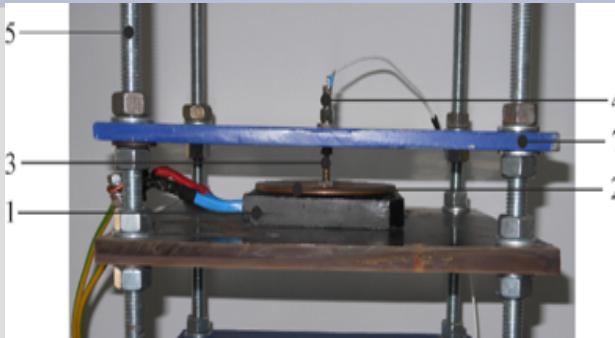
Сили



## Експериментальні дослідження ЛІЕП

Експериментальна установка для дослідження ЛІЕП силового і швидкісного призначення

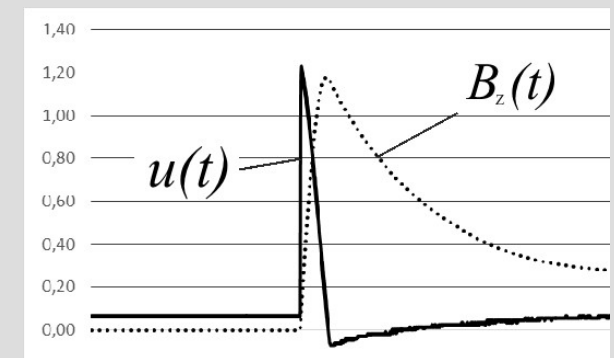
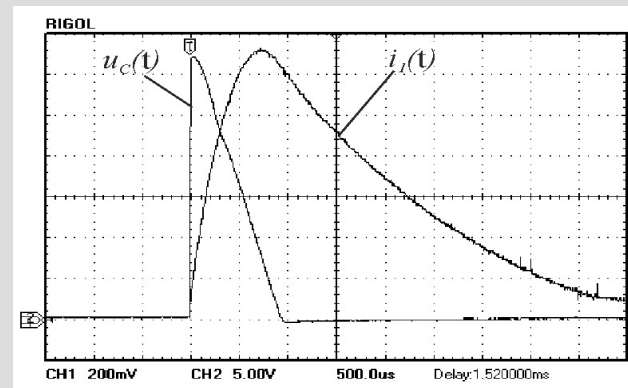
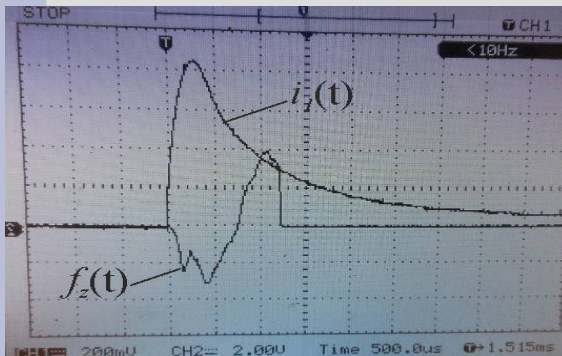
Осцилограми переміщення  $\Delta z(t)$  виконавчого елемента



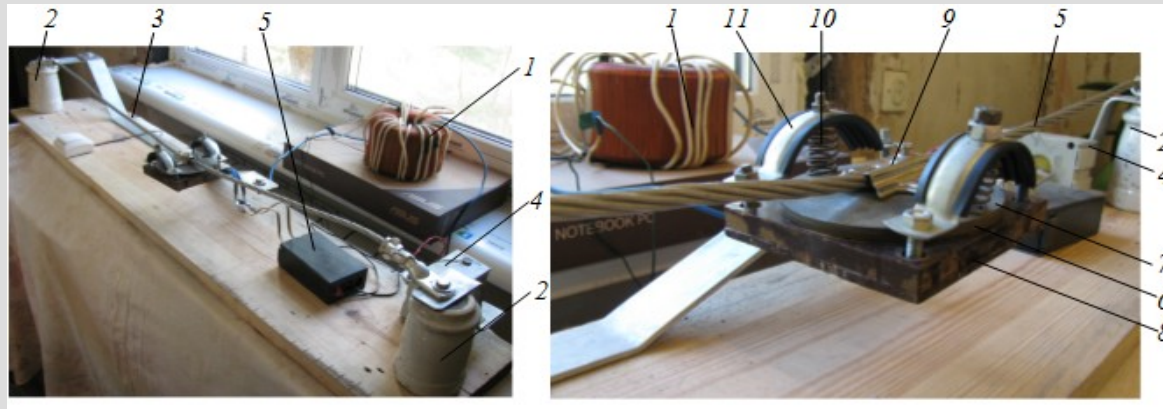
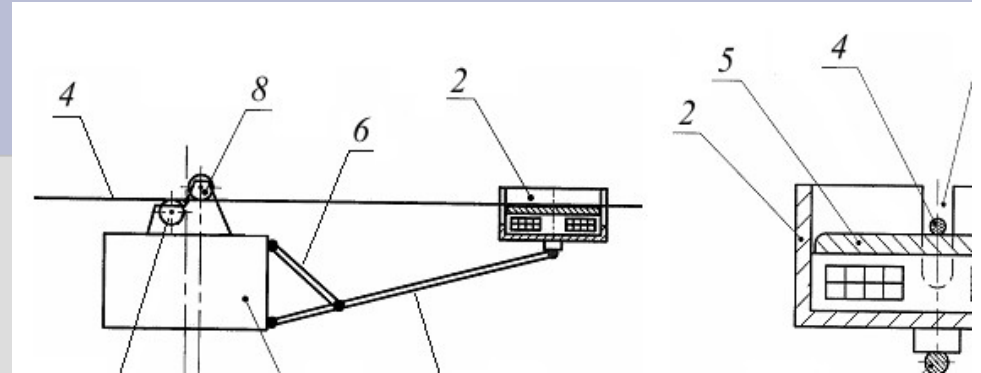
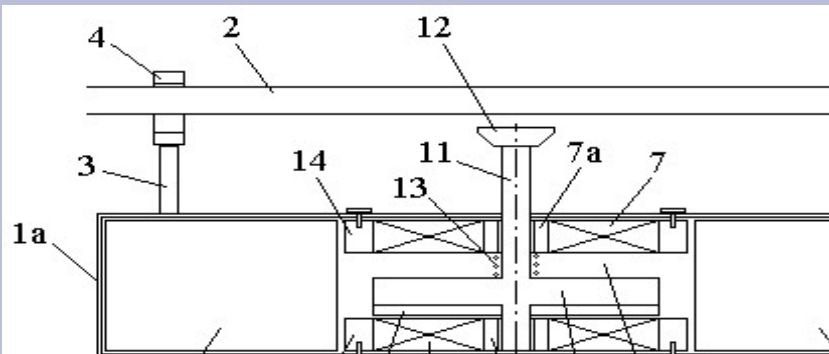
Осцилограма сили  $f_z(t)$  та струму  $i_1(t)$  в ОІ

Осцилограма напруги  $u_c(t)$  та струму  $i_1(t)$  в ОІ

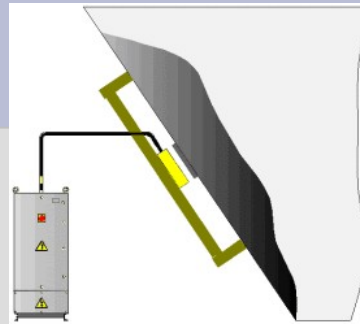
Осцилограма та розрахунок індукції магнітного поля



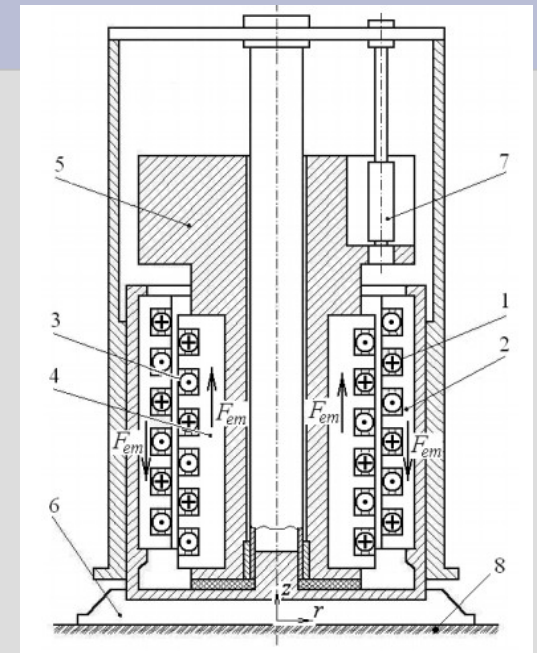
## Пристрій для скидання ожеледних і снігових відкладень з проводу лінії електропередач



# Пристрій для очищення технологічного обладнання від сипких матеріалів і утворення сейсмоімпульсів



## Сейсмічне джерело

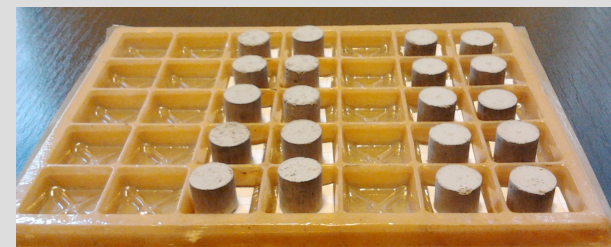
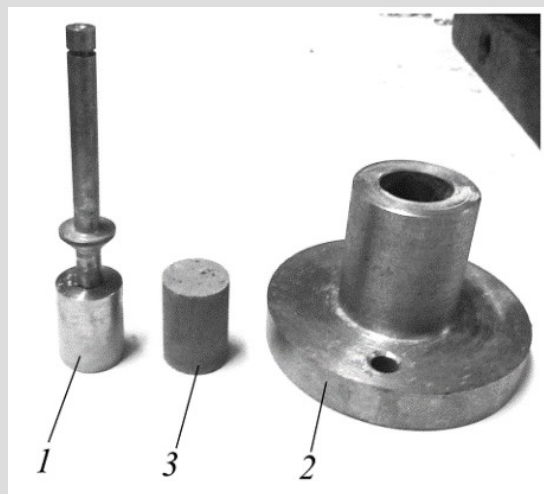
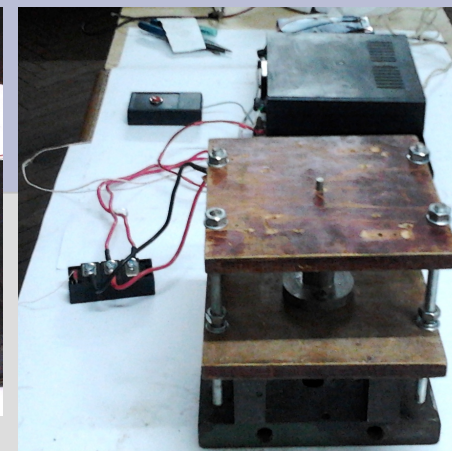
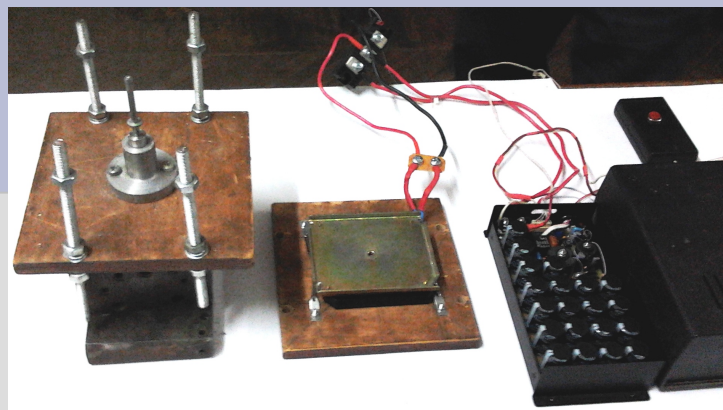
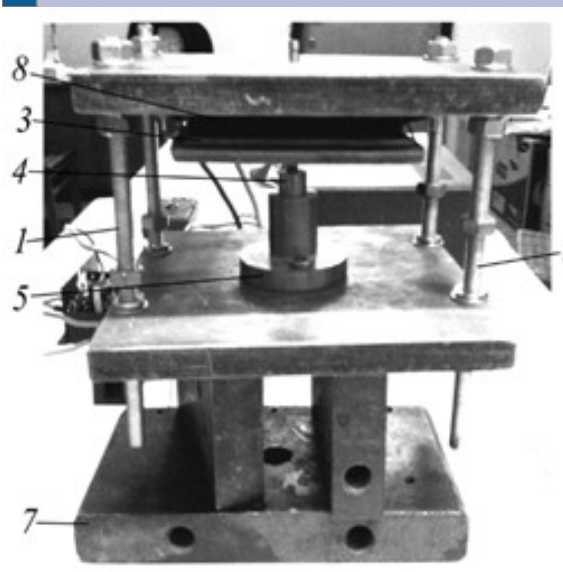


а

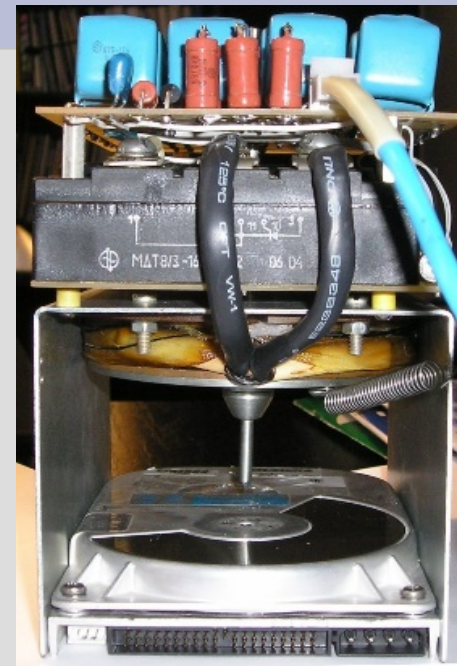
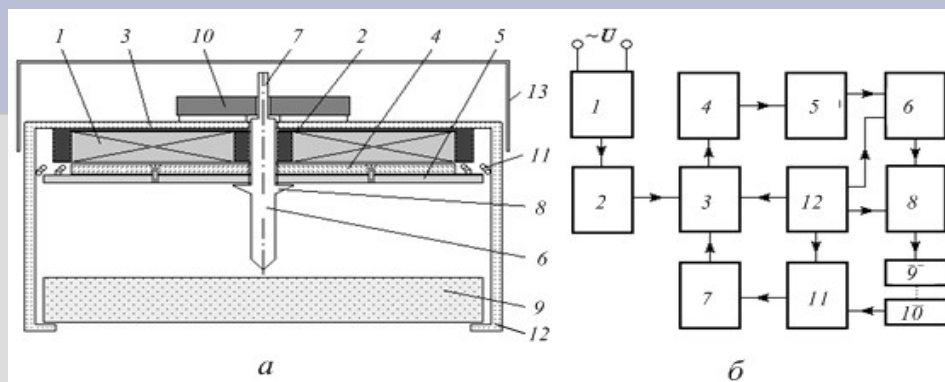
б

в

# Магнітно-імпульсний прес і імпульсне компактування кераміки



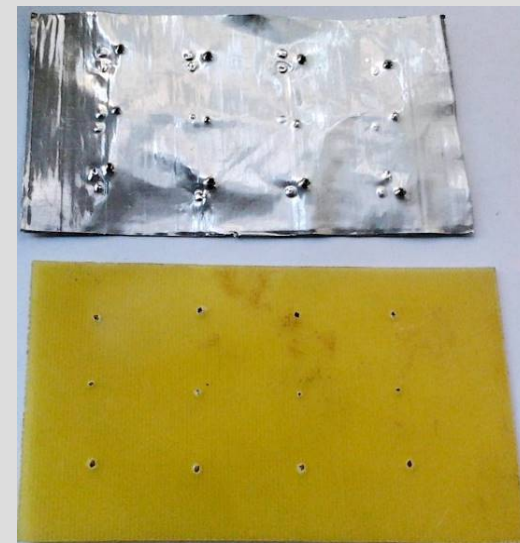
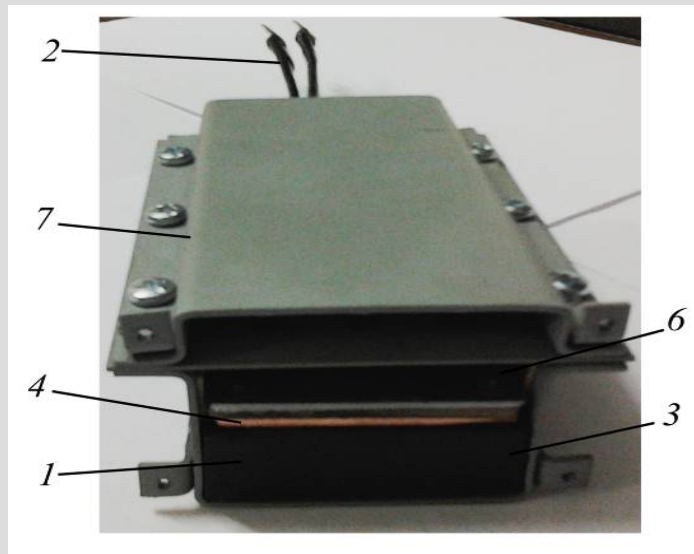
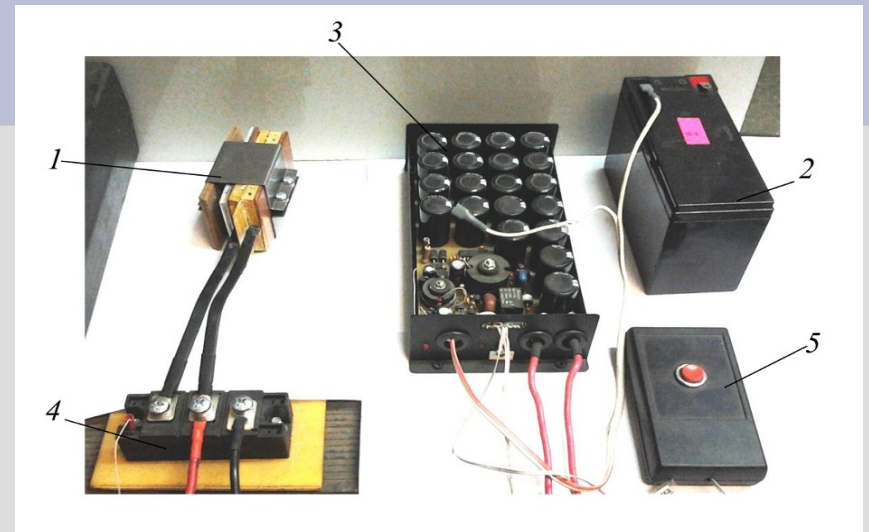
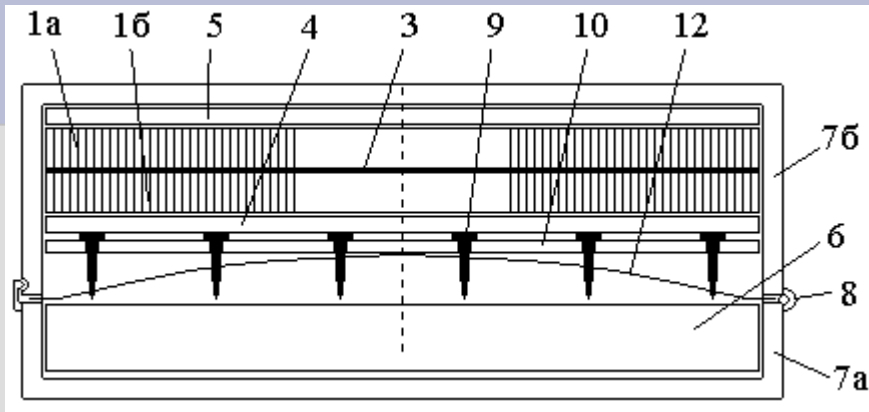
## Електромеханічні пристрої знищення інформації на цифрових накопичувачах



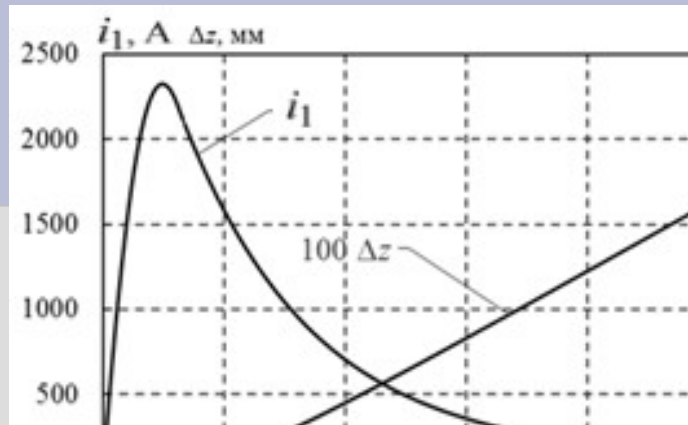
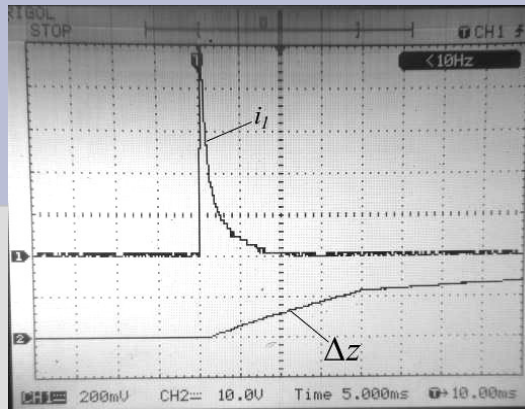
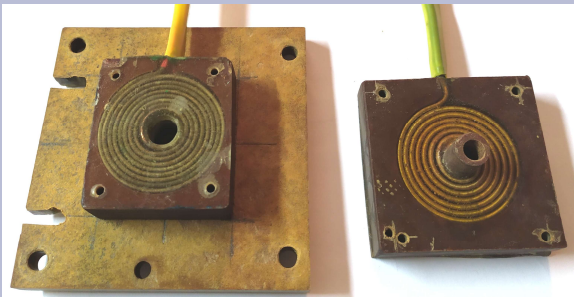
## Електромеханічні пристрої знищення інформації на цифрових накопичувачах



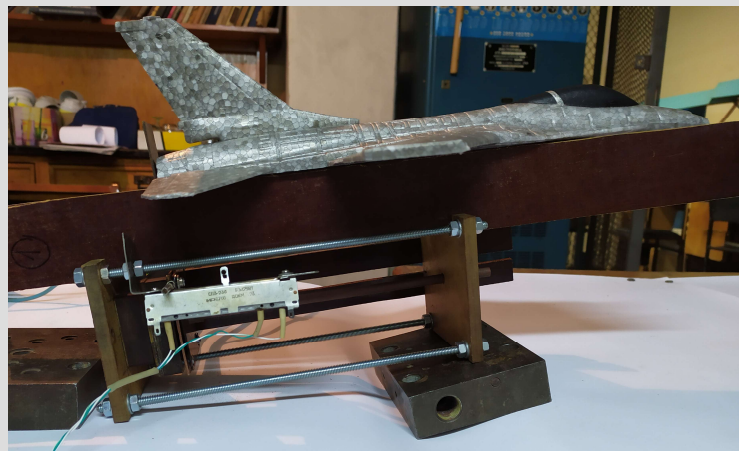
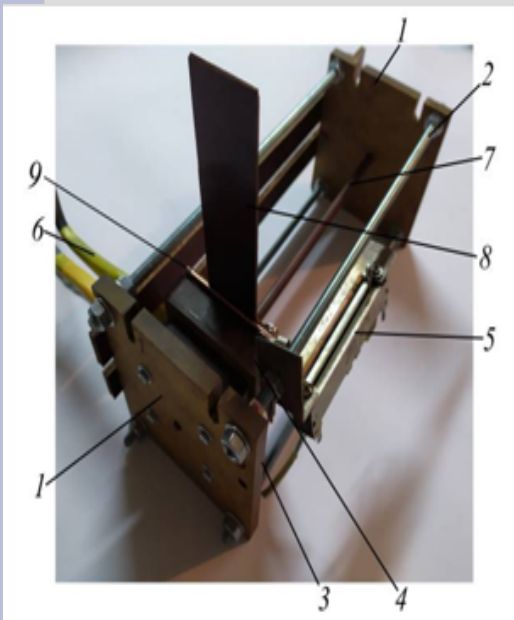
# Електромеханічні пристрої знищення інформації на на твердотільному SSD накопичувачі



# Електромагнітна катапульта безпілотного літального апарату



## Модель електромагнітної катапульти БПЛА



***Thanks for your attention***