

Վ.Կ. ՂԱԶԱՐՅԱՆ

## ԳԼԱՆԱՅԻՆ ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔԻ ԲԱԶՄԱՍՏԻՃԱՆ ԻՆՊՈԼԿՏԻՈՆ ԱՐԱԳԱՑՈՒՑԻ ՀԱՇՎԱՐԿԸ

Բերված է գլանային կառուցվածքի իմպուլսային մագնիսական ինդուկտիվ կոճերից կազմված բազմաստիճան ինդուկցիոն արագացուցչի հաշվարկի թվային մեթոդը՝ կատարված Maple 9.01 ծրագրային համակարգում:

**Առանցքային բառեր.** կենտրոնացված պարամետրերով էլեկտրամեխանիկական շղթա, ինդուկցիոն բազմաստիճան արագացուցիչ, փոխինդուկտիվության գործակից, դիֆերենցիալ հավասարումների համակարգ, Maple 9.01.

Ֆիզիկա-տեխնիկական հետազոտություններում և արտադրական պրոցեսում լայն տարածում են գտել ուժեղ իմպուլսային մագնիսական դաշտերը, որոնց շնորհիվ հնարավոր է ստանալ մեխանիկական մեծ ուժային ազդեցություններ և, որպես հետևանք, մետաղյա պինդ մարմինների արագացման երևույթը: Այդ համակարգերում էներգիայի աղբյուրը փոքր ներքին ինդուկտիվության ունակային կուտակիչներն են: Ընդ որում՝ նետվող մարմնի թռիչքի մեծ արագություններ ստանալու համար նպատակահարմար է կիրառել էլեկտրամագնիսական բազմաստիճան ինդուկցիոն արագացման սկզբունքը [1]:

Այս ասպարեզի աշխատանքներում բերված են բազմաստիճան գլանային կառուցվածքի ինդուկցիոն արագացուցիչների փորձնական հետազոտությունների վերջնական արդյունքները [1-3], որտեղ բացակայում են տվյալներ կատարված հաշվարկի սխեմայի վերաբերյալ կամ էլ մեկ աստիճանային արագացուցչի համակարգում բերված է թվային հաշվարկի ուղիղ խնդիրը [4]: Որոշ կարևոր դեպքերում անհրաժեշտ է լուծել բազմաստիճան ինդուկցիոն արագացուցչի հաշվարկի հակադարձ խնդիրը, որը և բերված է ներկայացվող աշխատանքում:

Ընդ որում՝ [4]-րդ աշխատանքում բերված փոխինդուկտիվության գործակցի հաշվարկի մոտարկման մեթոդը, մեր կողմից վերարտադրվելիս, ճշգրիտ արդյունքներ չի ստացվել, այդ պատճառով բերված է այդ գործակցի հաշվարկի ճշգրիտ արտահայտությունը:

**Համակարգի նկարագիրը.** Նկ. 1-ում պատկերված է գլանային կառուցվածքի բազմաստիճան իմպուլսային էլեկտրամագնիսական ինդուկցիոն արագացուցչի հաշվարկային սխեման: Դիֆերենցիալ հավասարումների համակարգը, որը բնութագրում է էլեկտրամեխանիկական անցողիկ երևույթը, երբ ունակային կուտակիչը լիցքաթափվում է գլանային կառուցվածքի ինդուկտորի վրա, որում գտնվում է նետվող մարմինը (շարժական ինդուկտիվ կոճը), ունի հետևյալ տեսքը.

$$\begin{cases} R_1 i_1(t) + (L_0 + L_1) \frac{\partial i_1(t)}{\partial t} + \frac{\partial(i_2(t)M(x))}{\partial t} = u(t), \\ R_2 i_2(t) + L_2 \frac{\partial i_2(t)}{\partial t} + \frac{\partial(i_1(t)M(x))}{\partial t} = 0, \\ \frac{\partial u(t)}{\partial t} = -\frac{i_1(t)}{C}, \quad \frac{\partial v(t)}{\partial t} = \frac{i_1(t)i_2(t)}{m} \frac{\partial M(x)}{\partial x}, \\ \frac{\partial x}{\partial t} = v(t), \quad x = x(t), \quad M = M(x), \end{cases} \quad (1)$$

որտեղ  $R_1$ -ը,  $R_2$ -ը,  $L_0$ -ը,  $L_1$ -ը,  $L_2$ -ը,  $C$ -ն,  $m$ -ը շղթայի էլեկտրականեմատիկ պարամետրերն են. համապատասխանաբար՝ ինդուկտորի շղթայի ակտիվ դիմադրությունը, նետվող մարմնի դիմադրությունը, ունակային կուտակիչի ներքին ինդուկտիվությունը, ինդուկտորի ինդուկտիվությունը, նետվող մարմնի ինդուկտիվությունը, ունակային կուտակիչի ունակությունը և նետվող մարմնի զանգվածը, իսկ  $i_1(t)$ -ն,  $i_2(t)$ -ն,  $u(t)$ -ն,  $v(t)$ -ն,  $M(y)$ -ն,  $x(t)$ -ն՝ հոսանքի ուժի ակնթարթային արժեքը ինդուկտոր-նետվող մարմնում, լարման ակնթարթային արժեքը ունակային կուտակիչի վրա, շարժման արագությունը, փոխինդուկտիվության գործակցը և տեղափոխությունը:

(1)-ի համար նախնական պայմաններ են.

$$\begin{cases} i_1(0) = 0, \quad i_2(0) = 0, \quad u(0) = u_0, \quad x(0) = x_0, \\ v(0) = \{0, v_1, v_2, \dots, v_n\} \end{cases} \Rightarrow t = 0: \quad (2)$$

Նետվող մարմնի սկզբնական արագության արժեքի բազմությունը համապատասխանում է արագացուցչի արագացման թե՛, որ աստիճանում է լուծվում խնդիրը:

(1) դիֆերենցիալ հավասարումների համակարգը համալարված (2) նախնական պայմաններով կլուծենք թվային մեթոդներով, դրա համար պետք է (1)-ում կատարել որոշակի ձևափոխություններ.

$$\frac{\partial(i(t)M(x))}{\partial t} = M(x) \frac{\partial i(t)}{\partial t} + i(t)v(t)\Phi(x), \quad \Phi(x) = \frac{\partial M(x)}{\partial x}, \quad (3)$$

որտեղ  $\Phi(x)$ -ն փոխինդուկտիվության գործակցի փոփոխման արագությունն է ըստ տեղափոխման կոորդինատի:

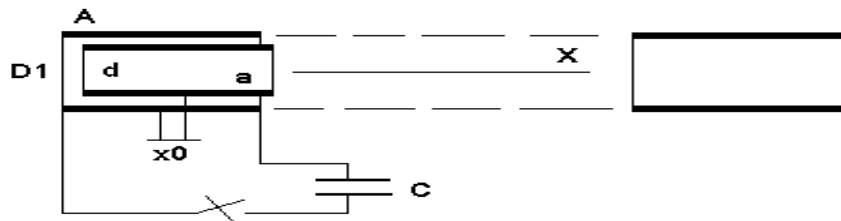
Համակարգը թվային մեթոդով լուծելու համար հարկավոր է անցնել անչափանի (հարաբերական) մեծությունների՝ հետևյալ արտահայտությունների միջոցով.

$$\left\{ \begin{array}{l} x' = \frac{x}{D1}, \quad u' = \frac{u}{U_0}, \quad t' = \frac{t}{U_0 \sqrt{L_1 C}}, \quad L00' = \frac{L_0}{L_1}, \quad L01' = \frac{L_2}{L_1}, \\ M' = \frac{M}{L_1}, \quad R1' = \frac{R_1}{\sqrt{\frac{L_1}{C}}}, \quad R2' = \frac{R_2}{\sqrt{\frac{L_1}{C}}}, \quad v' = \frac{v}{\frac{D1}{\sqrt{L_1 C}}}, \\ m' = \frac{m}{\frac{C^2 U_0^2 L_1}{D1^2}}, \quad \Phi(x)' = \left( \frac{D1}{L1} \right) \Phi(x), \quad i_{1,2}' = \frac{i_{1,2}}{U_0 \sqrt{\frac{C}{L_1}}} : \end{array} \right. \quad (4)$$

Կարևորագույն պարամետր է արագացուցչի օգտակար գործողության գործակիցը (օ.գ.գ.-ն), որը որոշվում է հետևյալ կերպ.

$$\eta = \frac{\frac{m(v^2 - v_0^2)}{2}}{\frac{CU_0^2}{2}} = m'(v'^2 - v'^2_0), \quad (5)$$

որտեղ  $U_0$  -ն ունակային կուտակիչի վրա լարման սկզբնական արժեքն է:



Նկ.1. Արագացուցչի կառուցվածքային պատկերը

*Փոխինդուկտիվության գործակցի հաշվարկը.* Գլանային կառուցվածքի ինդուկտոր-նետվող մարմին համակարգի փոխինդուկտիվության գործակցի ճշգրիտ արտահայտությունը բերված է [5]-ում և ունի հետևյալ տեսքը.

$$\left\{ \begin{aligned} M(x) &= \frac{\pi}{8} \mu_0 N_1 N_2 \frac{d^2}{A} \frac{q_2}{l_2} \left[ 1 - \frac{1}{8} \frac{D1^2}{l_2^2} \beta_2^2 \left( \xi_2 + \xi_4 \eta_2'' \beta_2^2 + \xi_6 \eta_4'' \beta_2^4 + \dots \right) \right] - \\ &- \frac{\pi}{8} \mu_0 N_1 N_2 \frac{d^2}{A} \frac{q_1}{l_1} \left[ 1 - \frac{1}{8} \frac{D1^2}{l_1^2} \beta_1^2 \left( \xi_2 + \xi_4 \eta_2' \beta_1^2 + \xi_6 \eta_4' \beta_1^4 + \dots \right) \right], \\ q_1 &= x - \frac{A}{2} \quad q_2 = x + \frac{A}{2}, \quad l_1 = \sqrt{\left(\frac{D1}{2}\right)^2 + q_1^2}, \quad l_2 = \sqrt{\left(\frac{D1}{2}\right)^2 + q_2^2}, \\ \beta_1 &= \frac{b}{l_1}, \quad \beta_2 = \frac{b}{l_2}, \quad b = \frac{1}{2} \sqrt{d^2 + a^2}, \\ \xi_2 &= 1 - \frac{7}{4} \left(\frac{d}{2b}\right)^2, \quad \xi_4 = 1 - \frac{9}{2} \left(\frac{d}{2b}\right)^2 + \frac{33}{8} \left(\frac{d}{2b}\right)^4, \\ \xi_6 &= 1 - \frac{33}{4} \left(\frac{d}{2b}\right)^2 + \frac{143}{8} \left(\frac{d}{2b}\right)^4 - \frac{715}{64} \left(\frac{d}{2b}\right)^6, \\ \eta_2'' &= 1 - \frac{7}{4} \left(\frac{D}{2l_2}\right)^2, \quad \eta_4'' = 1 - \frac{9}{2} \left(\frac{D}{2l_2}\right)^2 + \frac{33}{8} \left(\frac{D}{2l_2}\right)^2, \\ \eta_2' &= 1 - \frac{7}{4} \left(\frac{D}{2l_2}\right)^2, \quad \eta_4' = 1 - \frac{9}{2} \left(\frac{D}{2l_2}\right)^2 + \frac{33}{8} \left(\frac{D}{2l_2}\right)^2, \end{aligned} \right.$$

իսկ ինդուկտիվությունները որոշվում են հետևյալ կերպ.

$$\left\{ \begin{aligned} L_1 &= \frac{\mu_0}{3} N_1^2 D1 \left[ \sqrt{\alpha_1^2 + 1} \left( K_1 + \frac{1 - \alpha_1^2}{\alpha_1^2} E_1 \right) - \frac{1}{\alpha_1^2} \right], \\ L_2 &= \frac{\mu_0}{3} N_2^2 d \left[ \sqrt{\alpha_2^2 + 1} \left( K_2 + \frac{1 - \alpha_2^2}{\alpha_2^2} E_2 \right) - \frac{1}{\alpha_2^2} \right], \\ K_1 &= \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\partial \theta}{\sqrt{1 - \frac{\sin^2(\theta)}{1 + \left(\frac{A}{D1}\right)^2}}}, \quad E_1 = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - \frac{\sin^2(\theta)}{1 + \left(\frac{A}{D1}\right)^2}} \partial \theta, \quad K_2 = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\partial \theta}{\sqrt{1 - \frac{\sin^2(\theta)}{1 + \left(\frac{a}{d}\right)^2}}}, \\ E_2 &= \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - \frac{\sin^2(\theta)}{1 + \left(\frac{a}{d}\right)^2}} \partial \theta, \quad \alpha_1 = \frac{A}{D1}, \quad \alpha_2 = \frac{a}{d}: \end{aligned} \right.$$

Բերված (1) և (4) հավասարումների համակարգը հնարավոր չէ հաշվարկել վերլուծական մեթոդներով, ուստի այն լուծենք թվային մեթոդներով, Maple 9.01 համակարգում, որտեղ դիֆերենցիալ հավասարումների լուծման համար ընտրված է

Ռունգե-Կուրտ-Ֆելբերգի 4 և 5 կարգի մեթոդները՝ կախված փնտրվող մեծության արժեքի փոփոխման արագությունից:

Հաշվարկի արդյունքները բերված են նկ.2-ում: Ինպես երևում է, գոյություն ունի հարաբերական զանգվածի օպտիմալ արժեք, որի դեպքում օ.գ.գ.-ն առավելագույնն է ( $m' = 0.1$ ): Օպտիմալ արժեքից փոքր և մեծ հարաբերական զանգվածների դեպքում օ.գ.գ.-ն փոքրանում է, որը պայմանավորված է նետվող մարմինը ինդուկտորից արագ դուրս թռչելու պատճառով (երբ ունակային կուտակիչը դեռ չի հասցրել ամբողջովին լիցքաթափվել), երբ զանգվածը փոքր է, և կինետիկ էներգիայի փոքրացմամբ, երբ զանգվածը մեծ է: Էլեկտրական դիմադրության ավելացումը փոքրացնում է օ.գ.գ.-ն, քանի որ այդ դեպքում մեծանում է ջերմային կորուստը: Սկզբնական արագության առկայությունը ընդհանուր դեպքում փոքրացնում է օ.գ.գ.-ն, որովհետև փոքրանում է այն ժամանակը, երբ նետվող մարմինը գտնվում է ինդուկտորի առաջացրած մագնիսական դաշտի ուժային ազդեցության տիրույթում: Այդ դեպքում, որպեսզի օ.գ.գ.-ն մեծացվի, անհրաժեշտ է, որ փոքրացվի ինդուկտոր-նետվող մարմին համակարգի միջնագծերի սկզբնական հեռավորությունը (նաև նրա բացասական արժեքի դեպքում)՝  $x_0$ -ն՝ նկ.1,2-ում:

*Խնդրում հայտնի պարամետրերը.* Խնդիրը վճռենք տրված պարամետրերով արագացուցչի համար, որում հայտնի են ինդուկտոր-նետվող մարմնի ինդուկտիվությունները և դիմադրությունները, նետվող մարմնի զանգվածը, երկրաչափական չափերը: Ընդունենք, օրինակ, որ

$$\begin{cases} D1 = 0.04 \square & A = 0.06 \square & d = 0.036 \square & a = 0.04 \square \\ N1 = 68, & N2 = 1, & \mu_0 = 4\pi 10^{-12} \square \square / \square & M = 0.01 \square q \\ S_0 = 2.3 \times 2.3 \square \square \square, & \delta = 4 \square \square \end{cases} \quad (6)$$

$M, \delta, S_0$ -ը, համապատասխանաբար, նետվող մարմնի զանգվածը ու հատույթի պատերի հաստությունը և ինդուկտորի փաթույթի լարի հատույթի մակերեսն են:

Հաշվի առնելով (6)-ը, կարելի հաշվարկել ինդուկտորի և նետվող մարմնի (պղինձ) ակտիվ դիմադրությունները և ինդուկտիվությունները.

$$\begin{cases} R_1 \approx 0.03 \square \square \square & R_2 \approx 10^{-5} \square \square \square & R_1 / R_2 \approx 3000, \\ L_1 \approx 10^{-4} \square \square & L_2 \approx 2 \cdot 10^{-8} \square \square \end{cases} \quad (7)$$

Քանի որ բազմաստիճան ինդուկցիոն արագացուցչի տարբերակում մենք դիտարկել ենք հակադարձ խնդիրը, ապա պետք է տրված լինի նետվող մարմնի սկզբնական արագության բաշխվածությունը արագացուցչի արագացման աստիճանների միջև, /աղյուսակ 1/:

| Աղյուսակ 1 |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0          | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     |
| 0          | 75    | 110   | 150   | 180   | 210   | 240   | 260   | 280   | 305   |
| $u/v$      | $u/v$ | $u/v$ | $u/v$ | $u/v$ | $u/v$ | $u/v$ | $u/v$ | $u/v$ | $u/v$ |

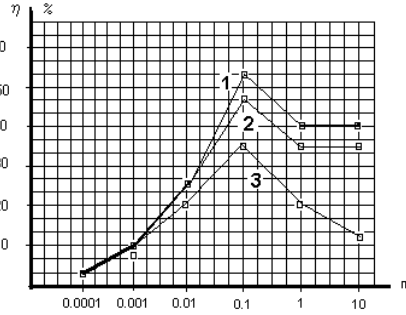
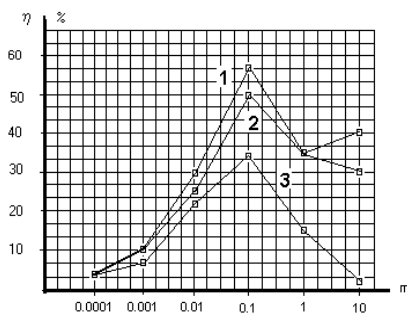
Հակադարձ խնդրի լուծման դեպքում, օգտվելով էլեկտրակինեմատիկ հարաբերական պարամետրերի օպտիմալ արժեքներից և ֆիքսելով նետվող

մարմնի սկզբնական արագությունը, հնարավոր է փոփոխել  $m', x_0', R'$  պարամետրերն այնպես, որպեսզի ստացվի վերջնական տրված արագության (որը հաջորդ աստիճանի սկզբնական արագությունն է) և առավելագույն օ.գ.գ-ի հնարավոր արժեքները:

Հաշվարկի վերջնական արդյունքները 9 աստիճանային արագացուցչի համար բերված են աղյուսակ 2-ում:

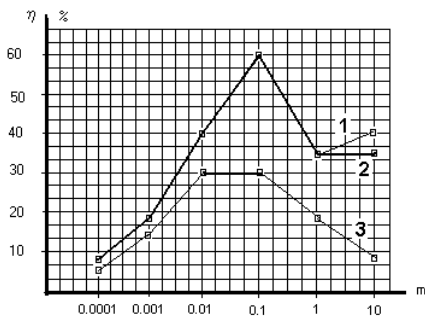
Աղյուսակ 2

| N | V, մ/վ | C, մ/Ֆ | U0, Վ | I, Ա/բժ | Ec, Ջ | օ.գ.գ.% |
|---|--------|--------|-------|---------|-------|---------|
| 1 | 75     | 234    | 1118  | 1768    | 146   | 18      |
| 2 | 110    | 234    | 945   | 1493    | 104   | 33      |
| 3 | 150    | 234    | 1056  | 1670    | 130.5 | 40      |
| 4 | 180    | 234    | 958   | 1516    | 107   | 41      |
| 5 | 210    | 234    | 1076  | 1701    | 135   | 41      |
| 6 | 240    | 234    | 1192  | 1884    | 166   | 37      |
| 7 | 260    | 234    | 1056  | 1670    | 130.5 | 35      |
| 8 | 280    | 234    | 1118  | 1768    | 146   | 32      |
| 9 | 305    | 234    | 1250  | 1976    | 183   | 30      |

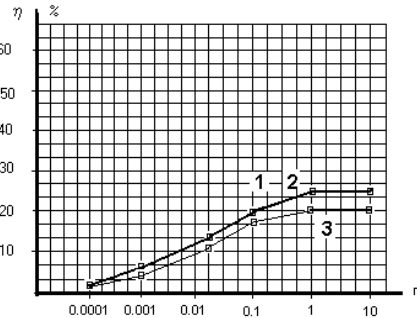


$$u.v'_0 = 0; x'_0 = 0,1$$

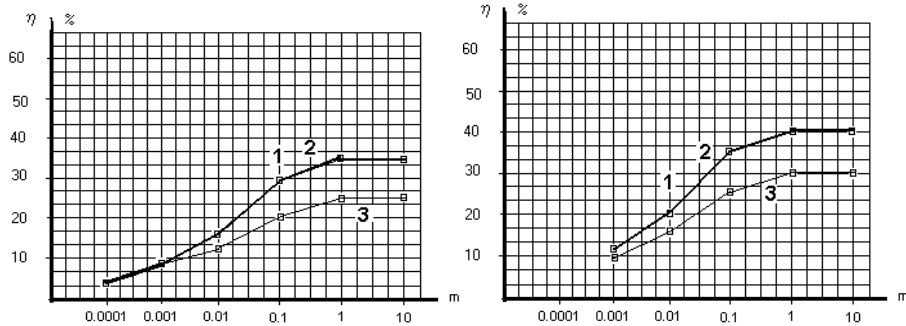
$$p.v'_0 = 0,1; x'_0 = 0,1$$



$$q.v'_0 = 0,1; x'_0 = 0$$



$$r.v'_0 = 1; x'_0 = 0,1$$



$$\text{է. } v'_0 = 1; x'_0 = 0$$

$$\text{զ. } v'_0 = 1; x'_0 = -0,1$$

Նկ.2. Օգտակար գործողության գործակցի կախվածությունը հարաբերական զանգվածից երբ՝

$$1 - R1' = 0; 2 - R1' = 0,01; 3 - R1' = 0,1$$

### Եզրակացություն

Իմպուլսային ինդուկցիոն արագացուցչի խնդրում դիտարկվել է հակադարձ խնդիրը և կատարվել է գլանային կառուցվածքի բազմաստիճան արագացուցչի հաշվարկը թվային մեթոդով, Maple 9.01 ծրագրային համակարգում: Գրաֆիկորեն բերված հաշվարկի արդյունքներից ստացվել են խնդրում չափողականություն չունեցող պարամետրերի լավարկման արժեքները (երբ **օ.գ.գ**-ն առավելագույնն է), որոնք օգտագործվել են տրված պարամետրերով (10 գրամ մարմնին 300 մ/վ արագություն հաղորդող) 9 աստիճանային արագացուցչի խնդիրը լուծելու համար:

Բերված է նաև փոխինդուկտիվության գործակցի հաշվարկի ճշգրիտ արտահայտությունը:

### ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. **Kaye Ronald J.** Desing and performance of a multi-stage cylindrical reconnection launcher // IEEE transactions on magnetics. –1991. –V. 27, №1. –P. 596-600.
2. **Cnare Eugene C. A.** 10-stage reconnection demonstration launcher // IEEE transactions on magnetics. –1991. –V. 27, №1. –P. 644-646.
3. **Winder Melvin M.** WARP-10: A Numerical simulation model for the cylindrical reconnection launcher // IEEE transactions on magnetics. –1991. –V. 27, №1. –P. 305-308.
4. **Бондалетов В.Н., Иванов Е.И.** Исследование эффективности ускорения проводников в импульсном магнитном поле соленоида // ПМТФ. -1983.-№2. -С. 82-86.
5. **Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А.** Расчет индуктивностей. –М.: Наука, 1986. –436 с.

ՀՊՀՀ: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն՝ 20.06.2004:

**В.К. КАЗАРЯН**

**РАСЧЕТ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИНДУКЦИОННОГО УСКОРИТЕЛЯ С  
ЦИЛИНДРИЧЕСКИМИ КАТУШКАМИ**

Численным методом в системе Maple 9.01 произведен расчет импульсного многокаскадного электромагнитного индукционного ускорителя с цилиндрическими катушками.

**Ключевые слова:** электрическая цепь с сосредоточенными параметрами, индукционный многокаскадный ускоритель, коэффициент взаимоиנדуктивности, система дифференциальных уравнений, система Maple 9.01.

**V.K.GHAZARYAN**

**CALCULATION OF PULSED ELECTROMAGNETIC PLANE COIL GUN**

A calculation of pulsed electromagnetic cylindrical coil gun with a numerical method in Maple 9.01 is performed.

**Keywords:** electric circuit with concentrated parameters, inductive multi accelerator, self-inductance coefficient, system of differential equations, Maple 9.01 system.