

Ж.М. МИРЗАБЕКЯН, В.К. КАЗАРЯН

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ИМПУЛЬСНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ УСКОРЕНИЯ ТВЕРДЫМ НЕМАГНИТНЫМ ТЕЛАМ

Разработана теория расчета импульсного магнитного поля для передачи ускорения твердым немагнитным телам при условии ограничения скорости тела от теплового поля. Даются окончательные формулы для расчета электромагнитных и конструктивных параметров индукционных катушек, триггтронов и электрические схемы замещения.

**Ключевые слова:** импульсные магнитные поля, ускорение, индукционные катушки, емкость, летательное тело, триггтрон.

Импульсные магнитные поля находят все более широкое применение в различных областях науки, техники и обороны. Это обусловлено отчасти тем, что их генерирование осуществляется значительно более простыми методами, чем постоянных полей, а современная диагностическая техника, обладающая необходимым временным разрешением, позволяет использовать эти поля без серьезных экспериментальных затруднений.

Целью настоящей работы является создание сильного импульсного магнитного поля для передачи ускорения и определенной ударной силы немагнитному твердому телу. Исследования проводились в основном на немагнитных материалах, для чего был рассчитан, изготовлен и испытан соответствующий магнитный ускоритель. Созданная нами установка состояла из емкостного накопителя, серии индукционных катушек, триггтронных разрядников и пускорегулирующих и измерительных аппаратур.

Схема катушек ускорителя приведена на рис.1. Летательное тело представляет собой голый алюминиевый цилиндр 4, толщина стенки которого намного меньше его диаметра. Поскольку длина летательного тела почти равна индуктору 2, распределение плотности тока по длине тела разное. Следовательно, можно считать, что летательное тело представляет собой систему LR контуров, которые связаны друг с другом жесткими связями (его деформацией пренебрегаем).

Триггтроны, зажигаясь в разные промежутки времени, дают возможность разрядить конденсаторы на индукторы, порождая по длине ускорителя бегущее магнитное поле, которое, в свою очередь, ускоряет летательное тело (рис.2).

Для описания летательного вида ускорения был использован метод расчета цепей с сосредоточенными параметрами. Соответствующая электрическая схема замещения ускорителя приводится на рис.3, для которой можно написать, что

$$U_{1R_1} + U_{1L_1} + U_{1M_{21}} = U, \quad (1)$$

$$U_{2R_2} + U_{2L_2} + U_{2M_{21}} + U_{2M_{31}} = 0, \quad (2)$$

$$U_{3R_3} + U_{3L_3} + U_{3M_{23}} = 0, \quad (3)$$

$$R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M_{12} \frac{di_2}{dt} = U, \quad (4)$$

$$R_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + M_{12} \frac{di_1}{dt} + M_{23} \frac{di_3}{dt} = 0, \quad (5)$$

$$R_3 i_3 + L_3 \frac{di_3}{dt} + M_{23} \frac{di_2}{dt} = 0, \quad (6)$$

где  $R_1, R_2, R_3$  - активные сопротивления;  $L_1, L_2, L_3$  - коэффициенты самоиндукции обмоток индуктора, внутреннего металлического цилиндра и летательного тела;  $M_{12}$  - коэффициент взаимной индукции между индуктором и внутренним металлическим цилиндром;  $M_{23}$  - коэффициент взаимной индукции между внутренним металлическим цилиндром и летательным телом. В этой задаче  $M_{12}=M_{21}$ ,  $M_{23}=M_{32}$ , а  $M_{13}=M_{31} \approx 0$ .

Поскольку и индуктор, и летательное тело нагреваются, то можно написать, что

$$R_1(t) = R_{10} + D_1 \int_0^t i_1^2(t) R_1(t) dt, \quad (7)$$

$$R_1(t) = R_{10} + D_1 \sum_{j=1}^n [I_{1j}^2(t_j) R_{1j}(t_j) \Delta t_j], \quad (8)$$

$$R_2(\ell, t) = R_{20} + \left[ D_2 \int_0^t I_2^2(\ell, t) R_2(\ell, t) dt \right] [d\ell]^2, \quad (9)$$

$$\frac{R_{2i}(\ell_i, t)}{\Delta \ell_i^2} = \frac{R_{20}}{\Delta \ell_i^2} + \left[ D_2 \sum_{k=1}^n [I_{2ki}(\ell_i, t) R_{2ik}(\ell_i, t) \Delta t] \right], \quad (10)$$

где  $D_1$  и  $D_2$  - коэффициенты теплоотдачи индуктора и летательного тела,  $1/A^2c$ .

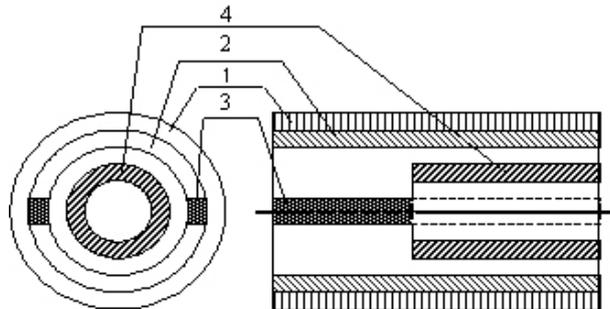


Рис.1.

1- катушка, намотанная медной проволокой; 2- металлический каркас из двух половинок; 3 - прорез по длине каркаса; 4 - летательное тело

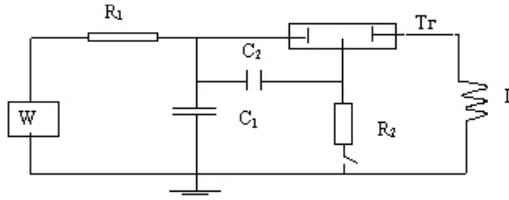


Рис.2

$R_1=2 \cdot 10^3 \text{ Ом}$ ,  $C_1=10^{-3} \text{ Ф}$ ,  $L=10^{-6} \text{ Гн}$ ,  $R_2=27 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}$ ,  $C_2=5 \cdot 10^{-10} \text{ Ф}$ , W - высоко-  
вольтный источник питания ( $U=4 \cdot 10^3 \text{ В}$ ), Tr - тригготронный разрядник

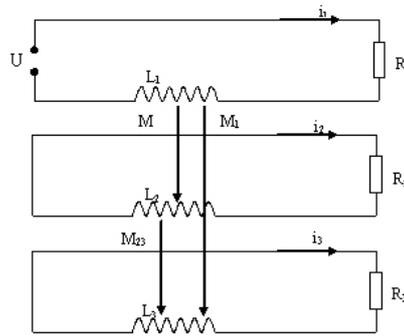


Рис.3

Далее в соответствии со вторым законом Ньютона для уравнения летательного тела в катушке с цилиндрическим ярком из двух половинок можно написать

$$-m \frac{d^2 x}{dt^2} + i_2 \int_0^{l_0} i_3 \frac{dM}{dx} = 0. \quad (11)$$

Здесь сопротивлением воздуха пренебрегаем, поскольку оно на несколько порядков меньше ускоряющей силы.

Формулы (1)-(11) представлены только для первого каскада ускорителя. Однако они действительны и для остальных каскадов. Только необходимо менять предварительные условия решения интегрально-дифференциальных уравнений.

Геометрические параметры первого каскада ускорителя следующие: внутренний радиус катушки  $r_1=5,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ , толщина медной проволоки обмотки  $a=3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ , внутренний радиус летательного цилиндра  $r_1=5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ , толщина его стенки  $a_1=1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ . Тогда соответственно получим

$$R_1=43 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}, R_2=6 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}, R_3=2 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}. L_1=(\mu(r_1(r_1-a_1)))^{1/2} \cdot f(k),$$

где  $K=4 \cdot r_1 \cdot r_2 / (h^2 + (r_1+r_2)^2)$ ,  $h$  - расстояние между центрами контуров,  $L_1=0,068 \cdot 10^{-7} \text{ Гн}$ ,

$$L_2=(\mu(r_2(r_2-a_2)))^{1/2} \cdot f(k)=0,063 \cdot 10^{-7} \text{ Гн}, L_3=(\mu(r_3(r_3-a_3)))^{1/2} \cdot f(k)=0,06 \cdot 10^{-7} \text{ Гн},$$

$$M_{12}=(\mu \cdot (r_1 \cdot r_2))^{1/2} \cdot f(k)=0,062 \cdot 10^{-7} \text{ Гн}.$$

В нашем случае  $h=0$  (расстояние между кругами) [4,6], тогда  $M_{23}=M_{32}(0,058 \cdot 10^{-7} \text{ Гн})$ ,  $M_{31}=M_{13}(0)$ .

Решая эту систему, можно получить скорость летательного тела в каждый момент времени  $V(t)$ , ток индуктора  $i_1(t)$ , плотность тока летательного тела  $I_2(t, \ell)$ . Все эти решения проводились на ЭВМ.

Так, например, если каждому каскаду передается 7.000 Дж энергии, среднее значение ускорения  $a=10^6$  м/с<sup>2</sup> и коэффициент полезного действия 30%, то скорость тела в первом каскаде будет 320 м/с, а для  $i$ -го каскада:

$$V_i = \sqrt{\frac{2\Delta E}{m} + V_{i-1}^2} = \sqrt{(320^2) + V_{i-1}^2} = V_i \sqrt{i}, \quad (12)$$

время ускорения:

$$t_1 = \frac{V_1}{a} \sqrt{n}. \quad (13)$$

С помощью выведенных выражений рассчитаны на ЭВМ основные предварительные параметры полета летательного тела (табл. 1). Как следует из этих данных, длительность ускорения очень мала  $\approx 1,5$  мс.

Поэтому можно принять, что в каждом каскаде при данной длительности времени ускорение колебания тока в индукторе (синусоид с затухающей амплитудой) длится на порядок, равный одному периоду.

При этих условиях можно получить частоту колебания тока в данном каскаде. Приращение частоты тока объясняется тем, что тело, набирая скорость, проходит через данный индуктор (длина индуктора во всех каскадах одинаковая) на более короткий промежуток времени. Следовательно, необходимо увеличить скорость потока энергии.

Рассчитывается также, что при таком магнитном поле можно придать летательному телу энергию в заданном пределе. Здесь снова принимается, что электрическое сопротивление тела равно нулю. Поскольку это тело является идеальным диамагнитным материалом, магнитный поток в задней и боковых сторонах остается неизменным, т.е.  $\Phi=\Phi_1=\Phi_2$ .

Тогда энергия совпадающей занимаемой точки летательного тела равняется

$$\Delta W = W_1 - W_2, \quad (14)$$

$$W_1 = \frac{1}{2\mu_0} B^2 \ell \omega (R^2 - a^2), \quad (15)$$

$$W_2 = \frac{1}{2\mu_0} B^2 \ell \omega R^2, \quad (16)$$

$$\Delta W = \frac{\pi \ell B_0 a^2}{2\mu_0 (1 - \frac{a}{R})^2}. \quad (17)$$

С другой стороны,

$$\Delta W = \Delta E_i - \frac{mV^2}{2} - \frac{\rho_m QV^2}{2} - \frac{\rho_m V^2}{2} \ln(R^2 + a^2). \quad (18)$$

Следовательно,

$$B_0 = V \left( \frac{R}{a} - \frac{a}{R} \right) \sqrt{\mu_0 \rho_m}, \quad (19)$$

где  $V$  – скорость тела;  $B_0$  – индукция летательного тела;  $\rho_m$  – плотность летательного тела.

Подставляя в (19)  $V=300$  м/с и учитывая, что летательное тело из алюминия, получим  $B_0=20$  Тл.

Для получения максимального коэффициента полезного действия при видоизменении энергии целесообразно, чтобы индуктивности индуктора и летательного тела были бы одного порядка.

Нижний предел индуктора ограничивается значениями внутренней индуктивности конденсаторов и соединительных проводов. Индуктивность индуктора должна быть по крайней мере в 10 раз больше суммарного значения индуктивностей остальных устройств.

Учитывая это условие, выбирается индуктивность  $\sim 10^{-6}$  Гн. В этом случае величина тока, который создает магнитное поле в пределах 20 Гн, будет равной

$$I = \sqrt{\frac{2W}{L_1}} = 230 \cdot 10^3 \text{ А}. \quad (20)$$

Емкость конденсаторов каждого каскада и их рабочие напряжения рассчитываются по формулам

$$C = \frac{1}{4N^2 I^2 L}, \quad (21)$$

$$U = N \Phi_m 2(\mu), \quad (22)$$

где  $f$  – частота тока;  $L$  – индуктивность индуктора;  $N$  – число витков катушки индуктора;  $\Phi_m$  – амплитудное значение магнитного потока.

Расчетные величины  $C$  и  $U_m$  для 10 каскадов приводятся в табл.1.

Потраченная средняя мощность при движении летательного тела в первом каскаде будет  $P = \frac{\Delta E}{\Delta f} \approx 54 \cdot 10^3$  Вт, а в последнем каскаде  $P \approx 100 \cdot 10^3$  Вт.

Таблица 1

N/N	C, мФ	U <sub>m</sub> , кВ
1	1,3	2,3
2	1,7	5,7
3	1,1	7
4	0,9	7,9
5	0,55	10,2
6	0,52	10,5
7	0,48	10,9
8	0,38	12,2
9	0,31	13
10	0,28	14,4

**Условия ограничения скорости тела от теплового нагрева.** Поскольку процесс ускорения очень короткий ( $10^{-3}$  с) и летательное тело не соприкасается с окружающей средой, то без особой погрешности можно считать, что тепловая энергия полностью идет на увеличение температуры тела, т.е.

$$\Delta Q = \Delta W, \quad (23)$$

$$\Delta W = \int_0^t I_2^2 \frac{P_t}{S_2} dt \text{ и } \rho_t = \rho_0(1 + \beta\theta), \quad (24)$$

где  $\rho_t$  — удельное сопротивление летательного тела;  $\rho_0$  — удельное сопротивление при  $20^\circ\text{C}$ ;  $S_2$  — площадь поперечного сечения тела;  $\beta$  — коэффициент зависимости сопротивления тела от температуры;  $\theta$  — разность температур;

$$\frac{\rho_t}{\rho_0} = 1 + \frac{\beta}{S_2} \int_0^t i_2^2 \rho dt \quad (25)$$

или 
$$\frac{1}{\rho_t} = \frac{d}{dt}(\rho / \rho_0) = \frac{\beta}{S_2} i_2^2. \quad (26)$$

Поскольку

$$\frac{dV}{dt} = \frac{1}{m} i_1 i_2 \frac{dM}{dX} = \frac{1}{m} \frac{L_2}{M} i_2^2 \frac{dM}{dX} \quad (27)$$

и  $L_2 i_2 = M i_1$ ,

$$dV = \frac{1}{m} \frac{L_2}{M} \frac{S_2}{\rho_0 \beta} \frac{dM}{dX} d(\ln K), \quad (28)$$

то

$$\Delta V = \frac{L_2 S_2}{m} \frac{d(\ln K)}{dX} A, \quad M = K \sqrt{L_1 L_2}, \quad (29)$$

где  $K$  — коэффициент связи;  $L_2 \approx 10^{-8}$  Гн — приблизительная индуктивность летательного тела;  $m \approx 0,2$  кг.  $\gamma_{Sm}^{Al} \approx 0,028$  мк, Ом·м  $\rho_m = 2,7 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>, поэтому получим  $\Delta V \approx 1,0$  км/с.

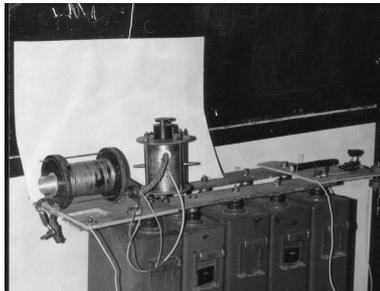


Рис. 4

На основании проведенных расчетов и исследований спроектирована конструкция индукционных катушек и триггтронов для двух каскадов ускорителя и разработана технология их изготовления. Собраны также конденсаторные батареи с соответствующими параметрами, смонтированные на площадке. Проведены испытания и измерены скорости полета (рис 4).

Предварительные расчеты электромагнитного индукционного ускорителя проведены для 10 каскадов, где летательное диамангнитное тело весом 150 *гр* должно набрать скорость 1000 *м/с*.

Результаты окончательных расчетных величин параметров летательного тела приведены в табл. 2.

Таблица 2

N	$V_n$ , <i>м/с</i>	$\Delta T_n$ , $\Delta$ <i>мл/с</i>	$f_n$ , <i>кГц</i>	$C_n$ , <i>мл.Ф</i>	$U_k$ <i>кВ</i>
1	320	0,62	1,6	1,3	2,3
2	452,5	0,25	4,0	1,7	5,7
3	554	0,2	4,9	1,1	7,0
4	640	0,18	5,5	0,9	7,9
5	715,5	0,14	7,1	0,55	10,2
6	784	0,136	7,3	0,52	10,5
7	846,6	0,132	7,6	0,48	10,9
8	905	0,118	8,5	0,39	12,2
9	960	0,106	9,4	0,31	13
10	1000	0,1	10	0,28	14,4

Здесь  $V_n$  – скорость летательного тела в конце *n*-го каскада;  $\Delta T_n$  – время ускорения тела в данном каскаде;  $f_n$  – частота тока в цепи (RLC) *n*-го каскада;  $C_n$  – емкость накопителя *n*-го каскада;  $U_n$  – начальное напряжение зарядки *n*-го емкостного накопителя.

Величина импульсного магнитного поля во всех индуктивных катушках равна 20 *Тл*. Вначале изготовлен ускоритель для одного каскада, где емкость накопителя равна  $10^{-3}$  *Ф* и напряжение зарядки  $4 \cdot 10^3$  *В*. Индуктивность катушки диаметром 4,5 *см*.  $10^{-6}$  *Н*. В этой цепи в качестве коммутационного элемента был принят триггтроный разрядник.

Электрическая схема электромагнитного ускорителя приведена на рис 2. В результате испытаний скорость полета летательного тела в первом каскаде составляла 200 *м/с*, а во втором – 390 *м/с*.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Том К.** Теория гиперзвукового электромагнитного ускорителя. – В кн: Техника гиперзвуковых исследований: Сб. ст. 1-е изд.-М.: Мир, 1964.-524 с.
2. **Кнопфель.** Сверхсильные импульсные магнитные поля.-М.: Мир, 1972.-400 с.
3. IEEE TRANSACTION ON «MAGNETICS» January 1991.- V. 27, N<sup>o</sup> 1. A publication of the IEEE magnetics society.
4. **Тамм А.** Основы теории электричества: Пособие для вузов . 10-е изд.- М.: Госэнергоиздат.- 1989.-256 с.
5. **Калантаров П.Л., Цейтлик Л.Р.** Расчет индуктивностей: Справ. пособие. –1-е изд.- Л. : Мир, 1955. – 365 с.
6. **Нейман Л.Р., Демирчян К.С.** Теоретические основы электротехники.-М.: Энергия.- 1989.- 445с.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 22.12.2001.

**Ժ.Մ. ՄԻՐԶԱԲԵԿՅԱՆ, Վ.Կ. ԴԱԶԱՐՅԱՆ**  
**ՈՉ ՄԱԳՆԻՍԱԿԱՆ ՄԱՐՄԻՆՆԵՐԻՆ ԱՐԱԳԱՑՈՒՄ ՀԱՂՈՐԴՈՂ**  
**ԷԼԷԿՏՐԱՄԱԳՆԻՍԱԿԱՆ ԻՄՊՈՒԼՍԱՅԻՆ ԱՐԱԳԱՑՈՒՑԻՉ**

Մշակվել են իմպուլսային մագնիսական դաշտում պինդ, ոչ մագնիսական մարմիններին արագացում հաղորդելու հաշվարկային տեսությունը և առաջացող ջերմային դաշտում վերջիններիս արագության սահմանափակման պայմանները: Տրված են ինդուկցիոն կոճերի, տրիգոտրոնների էլեկտրամագնիսական ու կառուցվածքային պարամետրերի հաշվարկի վերջնական բանաձևերը և փոխարինման սխեմաները:

**Zh.M. MIRZABEKYAN, V.K. GHAZARYAN**  
**ELECTROMAGNETIC PULSE ACCELERATOR FOR ACCELERATION**  
**TRANSMISSION TO SOLID NON-MAGNETIC BODIES**

The theory of pulse magnetic field calculation for acceleration transmission to solid non-magnetic bodies under conditions of body velocity limitation from the thermal field is developed. The final formulas and electric replacement circuits for the calculation of electromagnetic and constructive parameters of induction coils, trigotrons are given.