

8. Кириллов Г. А., Синицин М. В., Григорьев Ф. В., Кормер С. Б., Самылин В. А., Кузнецов О. Н. Экспериментальное определение коэффициента поглощения света и проводимости ударно-сжатými ионными кристаллами.— ФГВ, 1969, № 4.
9. Жданов В. А., Поляков В. В. Уравнения состояния щелочно-галогидных кристаллов.— «Изв. высш. учеб. заведений. Физика», 1976, № 1.
10. Carter W. J. Hugoniot equations of state of some alkali halides.— «High Temp.—High Pressures», 1973, vol. 5, N 3.
11. Vaidya S. N., Kennedy G. C. Compressibility of 27 halides to 45 kbar.— «J. Phys. Chem. Solids», 1971, vol. 32, N 5.

УДК 538.323 : 531.551

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИНДУКЦИОННОГО УСКОРИТЕЛЯ ПРОВОДНИКОВ

В. П. Гальетов, Е. Н. Иванов

(Истра)

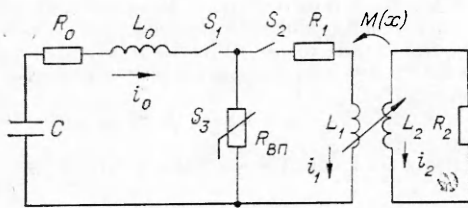
Одним из способов создания сверхзвуковых скоростей твердых тел для исследования высокоскоростных взаимодействий является ускорение проводников в импульсном магнитном поле [1, 2]. При индукционном ускорении кольцевых проводников относительно малой массы с использованием конденсаторных батарей КПД процесса ускорения снижается из-за вылета ускоряемого тела из магнитного поля индуктора [3]. Повышения эффективности преобразования электромагнитной энергии в кинетическую энергию ускоряемого проводника можно добиться форсированием магнитного давления либо путем удерживания ускоряемого тела в исходном положении вплоть до того момента, когда плотность энергии электромагнитного поля, сообщаемого индукторной системе (ИС) от внешнего источника, достигает достаточно высокого уровня, соответствующего необходимой полноте ее использования [4], либо увеличением скорости ввода электромагнитной энергии в ИС. В данной работе рассмотрен способ повышения эффективности высокоскоростного индукционного ускорителя кольцевых проводников путем увеличения скорости ввода электромагнитной энергии в ИС.

При практическом применении высокоскоростного ускорителя твердых тел возникает необходимость перекрытия максимально возможного диапазона скоростей метаемых тел различной массы. При правильном согласовании параметров нагрузки и источника энергии на индукционном ускорителе можно добиться высокой эффективности преобразования электромагнитной энергии в кинетическую энергию ускоряемого тела [3]. Однако при метании относительно малых масс хорошее согласование и достижение высоких скоростей ограничены скоростью передачи энергии от емкостного накопителя в ИС.

Повышение скорости ввода энергии в индуктивную нагрузку в известных пределах возможно уменьшением индуктивности разрядной цепи и увеличением зарядного напряжения конденсаторной батареи. Большой крутизны нарастания магнитного поля в ИС можно добиться также путем переключения тока разряда накопителя энергии по параллельным цепям (обострение фронта тока).

На фиг. 1 представлена схема замещения индукционного ускорителя кольцевых проводников с обострителем фронта тока в индукторе.

В период зарядки батареи конденсаторов коммутаторы S_1 и S_2 разомкнуты, переключатель S_3 замкнут. После включения S_1 батарея разряжается через собственные индуктивность L_0 , активное сопротивление



Ф и г. 1

разрядной цепи R_0 и сопротивление переключателя $R_{ВП}$. Если в определенный момент времени разомкнуть переключатель S_3 и замкнуть S_2 , то в ветви L_1 произойдет резкое увеличение тока, крутизна нарастания которого выше, чем в обычной RLC -цепи.

В качестве элементов S_1 и S_2 можно использовать обычные ком-

мутирующие устройства, применяемые в силовоточной импульсной технике (разрядники, игнитроны). Более сложным элементом является переключатель S_3 , который должен разрывать большие токи при высоких напряжениях. Существует удачный тип размыкателя, основанного на принципе взрывающихся металлических проволочек или фольг. Несмотря на многочисленность работ по исследованию процессов в проводнике при его электрическом взрыве, до настоящего времени не существует общепринятой теории, позволяющей объяснить и количественно описать эти процессы. В работе [5] на основании ряда упрощающих допущений проведено математическое моделирование первого импульса тока при электрическом взрыве проводников (ЭВП) и показано, что расчет на ЦВМ основных параметров, характеризующих ЭВП в функции комплекса $\Pi = GU_0^6 C^5 / L_0^2 S^7$, дает хорошее согласие с результатами экспериментов. Здесь U_0 — начальное напряжение на батарее конденсаторов, L_0 — индуктивность разрядной цепи, l и S — длина и площадь поперечного сечения взрывающегося проводника, $G_{Cu} = 6,72 \cdot 10^{-60}$ кг·м¹⁵/А⁸·с⁶, $G_{Al} = 1,25 \cdot 10^{-59}$ кг·м¹⁵/А⁸·с⁶. Аналогичное сочетание параметров разрядной цепи и геометрических размеров взрывающегося проводника (ВП) использовано в [6] при расчете некоторых параметров ЭВП. Комплекс Π можно представить через введенные в [6] критерии подобия $\pi_1 = \rho_0 l / ZS$ и $\pi_2 = W_0 / ZS^2$ как $\Pi = G\pi_1 \pi_2$, где W_0 — энергия, запасенная в конденсаторах; $Z = \sqrt{L_0 / C}$ — волновое сопротивление разрядного контура; ρ_0 — начальное удельное сопротивление ВП.

При исследовании схемы использована математическая модель ЭВП, изложенная в [5], кроме того, сделаны допущения:

1) активные (R_0, R_1, R_2) и индуктивные (L_0, L_1, L_2) элементы цепи в процессе разряда остаются неизменными;

2) коммутаторы S_1 и S_2 идеальные, т. е. коммутация происходит мгновенно и без потерь;

3) замыкание ключа S_2 происходит в момент времени, соответствующий максимуму напряжения на переключателе S_3 ;

4) силы сопротивления, действующие на ускоряемое кольцо, малы.

Система уравнений, описывающих процессы в ускорителе, в безразмерной форме имеет вид

$$(1) \quad dj_0/d\tau + r_0 j_0 + r_{ВП}(\tau)(j_0 - j_1) + \varphi_0 = 0;$$

$$(2) \quad d\varphi_0/d\tau = j_0;$$

$$(3) \quad \frac{dj_1}{d\tau} + \frac{L_0}{L_1} r_1 j_1 + \frac{L_0}{L_1} r_{ВП}(\tau)(j_1 - j_0) + \frac{d}{d\tau} [\mu(\varepsilon) j_2] = 0;$$

$$(4) \quad \frac{dj_2}{d\tau} + \frac{L_0}{L_2} r_2 j_2 + \frac{d}{d\tau} [\mu(\varepsilon) j_1] = 0;$$

$$(5) \quad \frac{d^2 \varepsilon}{d\tau^2} = \frac{1}{\sigma} \frac{d\mu(\varepsilon)}{d\varepsilon} j_1 j_2.$$

Безразмерные и размерные величины связаны соотношениями $j = i/i_0$; $U/U_0 = \varphi$; $r = R/R_0$; $\tau = t/t_0$; $\varepsilon = x/x_0$; $\mu = M/M_0$; $\sigma = m/m_0$.

В качестве базисных величин приняты следующие:

$$R_0 = \sqrt{L_0/C}, L_0 = L_0, M_0 = L_1, i_0 = U_0 \sqrt{C/L_0}, \\ U_0 = U_0, t_0 = \sqrt{L_0 C}, m_0 = C^2 U_0^2 L_0 / D^2, x_0 = D,$$

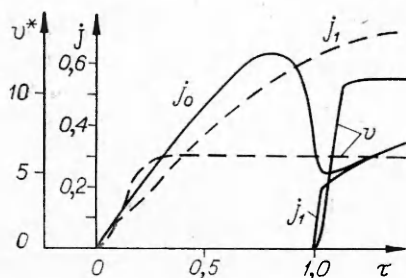
где m — масса ускоряемого кольца; x — координата перемещения; D — средний диаметр индуктора и тела.

В данном случае в качестве базисной индуктивности в отличие от [3] принята индуктивность накопителя L_0 , а не L_1 , так как при этом облегчается задача определения массы проводника, для которой обострение фронта тока приводит к увеличению его конечной скорости.

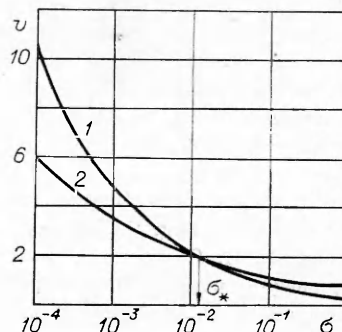
Система дифференциальных уравнений (4)–(5) интегрировалась на ЭЦВМ ЕС-1020 методом Рунге — Кутты с переменным шагом. Погрешность расчета переменных составляла 0,1%. При интегрировании пренебрегали нагревом индуктора и ускоряемого кольца, а их взаимная индуктивность рассчитывалась по [7]. Для контроля правильности составления программы расчета и достоверности получаемых результатов рассчитывался баланс энергии. Погрешность расчета суммарной энергии в системе колебалась от 0,1 до 3%.

На фиг. 2 представлены результаты расчета переходного процесса ускорения кольцевого проводника круглого сечения при равенстве диаметров индуктора и ускоряемого кольца на ускорителе с обострением и без обострения (сплошные и штриховые кривые соответственно) фронта тока в индукторе при $r_1 = r_2 = 0$. Здесь и далее относительный начальный зазор между индуктором и телом $\varepsilon_0 = 0,01$.

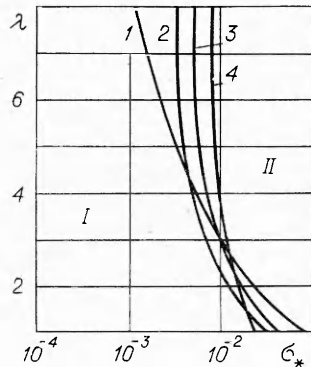
На фиг. 3 даны результаты расчета конечной относительной скорости проводника в функции параметра σ при $\Pi = 10$, $\lambda = L_0/L_1 = 3$, $r_1 = r_2 = 0$. Из сравнения кривых видно, что обострение фронта тока в индукторе при метании тел, относительная масса которых меньше некоторой критической σ_* , приводит к увеличению получаемых скоростей. Причем эффективность обострения возрастает с уменьшением σ . Так, для $\sigma = 10^{-4}$ прирост скорости за счет обострения тока составляет 72% по сравнению с 36% для $\sigma = 10^{-3}$ и 6% для $\sigma = 10^{-2}$. Связь критической относительной массы ускоряемого проводника и параметра λ при $\Pi = 10$ представлена на фиг. 4. В зоне I обострение фронта тока в индукторе приводит к увеличению конечной скорости проводника. Здесь же



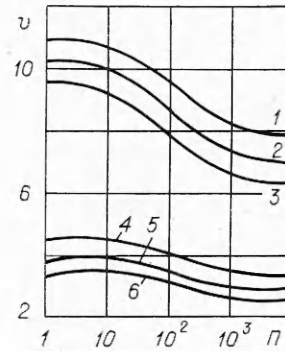
Фиг. 2



Фиг. 3



Ф и г. 4



Ф и г. 5

показано влияние относительных активных сопротивлений индуктора r_1 и ускоряемого кольца r_2 на изменение зоны I ($I - r_1 = r_2 = 0$; $2 - r_1 = r_2 = 0,05$; $3 - r_1 = r_2 = 0,1$; $4 - r_1 = r_2 = 0,2$).

Закономерность изменения конечной скорости метаемого проводника от величины комплекса Π при различных относительных массах ($I - 3 - \sigma = 10^{-4}$; $4 - 6 - \sigma = 10^{-3}$) и различных отношениях внутренней индуктивности источника к индуктивности индуктора ($I, 4 - \lambda = 3$; $2, 5 - \lambda = 5$; $3, 6 - \lambda = 7$) показана на фиг. 5.

Для получения максимального значения конечной скорости проводника необходимо выбирать Π в диапазоне от 1 до 10. Это особенно важно для правильного выбора величины поперечного сечения взрываемого проводника переключателя S_3 .

Поступила 25 VII 1978

ЛИТЕРАТУРА

1. Агарков В. Ф., Бондалетов В. Н., Калихман С. А., Пичугин Ю. П. Ускорение проводников до гиперзвуковых скоростей в импульсном магнитном поле.— ПМТФ, 1974, № 3.
2. Бондалетов В. Н., Иванов Е. Н. Бесконтактное индукционное ускорение проводников до гиперзвуковых скоростей.— ПМТФ, 1975, № 5.
3. Андреев А. И., Бондалетов В. Н. Индукционное ускорение проводников и высокоскоростной привод.— «Электричество», 1973, № 10.
4. Чемерис В. Т., Гаврилко С. А. Диффузия электромагнитного поля в движущийся проводящий поршень и систему вторичных контуров импульсного электромеханического преобразователя энергии. Препринт 155 ИЭД АН УССР. Киев, 1978.
5. Иванов Е. Н. Математическое моделирование первого импульса при электрическом взрыве проводников.— В кн.: Электрофизические процессы при импульсном разряде. Чебоксары, изд. Чувашск. ун-та, 1976.
6. Азаркевич Е. И. Применение теории подобия к расчету некоторых характеристик электрического взрыва проводников.— ЖТФ, т. 43, вып. 1, 1973.
7. Калантаров П. Л., Цейтлин Л. А. Расчет индуктивностей. Л., «Энергия», 1970.