

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УСКОРЕНИЯ ПРОВОДНИКОВ В ИМПУЛЬСНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ СОЛЕНоиДА

В. Н. Бондалетов, Е. Н. Иванов, С. Р. Петров, В. А. Тютюкин

(Истра)

Одним из способов получения сверхзвуковых скоростей твердых тел для исследования явлений, связанных с высокоскоростным соударением, является индукционное ускорение проводников в импульсном магнитном поле. В настоящее время достаточно полно изучены процессы в электромагнитных индукционных ускорителях кольцевых проводников [1—3], которые нашли практическое применение.

Для исследования высокоскоростных взаимодействий требуется получение высоких скоростей тел различной формы, в частности цилиндрической. Ускорение таких проводников можно осуществлять в импульсном магнитном поле индуктора, имеющего форму соленоида [4].

На фиг. 1 представлена расчетная схема индукционного соленоидного ускорителя. Система дифференциальных уравнений, описывающих электромеханические переходные процессы при разряде емкостного накопителя энергии на соленоид с расположенным соосно внутри него цилиндрическим проводником в безразмерной форме имеет вид

$$(1) \quad \rho_1 j_1 + (1 + \lambda_0) dj_1/d\tau + \mu dj_2/d\tau + j_2 v d\mu/d\varepsilon = \varphi;$$

$$(2) \quad \rho_2 j_2 + \lambda dj_2/d\tau + \mu dj_1/d\tau + j_1 v d\mu/d\varepsilon = 0;$$

$$(3) \quad d\varphi/d\tau = -j_1;$$

$$(4) \quad d\varepsilon/d\tau = v;$$

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

Начальные условия при  $\tau = 0$ :  $j_1(0) = j_2(0) = 0$ ,  $\varphi(0) = 1$ ,  $\varepsilon(0) = \varepsilon_0$ ,  
 $v(0) = \begin{cases} 0 \\ v_0 \end{cases}$  Размерные и безразмерные величины связаны соотношениями:

$$j_{1,2} = i_{1,2}/i_0, \quad \varphi = U/U_0, \quad \tau = t/t_0, \quad \varepsilon = x/x_0, \quad \lambda_0 = L_0/L_0, \quad \mu = M/M_0, \\ \lambda = L_2/L_0, \quad \rho = R/R_0, \quad v = v/v_0, \quad \sigma = m/m_0.$$

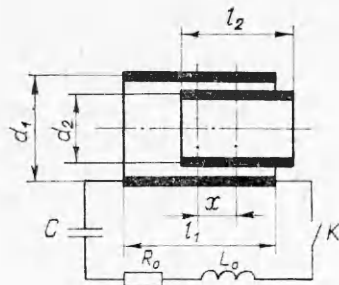
Базисными величинами являются:

$$x_0 = d_1, \quad U_0 = U_0, \quad L_0 = M_0 = L_1, \quad i_0 = U_0 \sqrt{C/L_1}, \quad R_0 = \sqrt{L_1/C}, \\ t_0 = \sqrt{L_1 C}, \quad v_0 = d_1 / \sqrt{L_1 C}, \quad m_0 = C^2 U_0^2 L_1 / d_1^2,$$

где  $C$ ,  $U_0$ ,  $R_0$ ,  $L_0$  — емкость, начальное напряжение, активное сопротивление и индуктивность емкостного накопителя энергии;  $L_1$ ,  $R_1$ ,  $d_1$  — индуктивность, активное сопротивление и средний диаметр соленоида;  $L_2$ ,  $R_2$ ,  $m$  — индуктивность, активное сопротивление и масса ускоряемого проводника;  $M$  — взаимная индуктивность между индуктором и проводником;  $x$  — расстояние между геометрическими центрами индуктора и ускоряемого проводника.

Основным допущением, принятым в расчетной модели ускорителя по сравнению с реальным, является замена индуктора и массивного цилиндрического проводника тонкими соленоидами с равномерно распределенной по их длине плотностью тока, а толщина токового слоя равна эквивалентной глубине проникновения электромагнитного поля в металл индуктора и ускоряемого тела.

Сравнение результатов расчета по данной математической модели с результатами работы [4], полученными методом интегральных уравнений, а также результатами проведенных экспериментальных исследований свидетельствует об удовлетворительном совпадении интегральных характеристик ускорителя, в частности разрядного тока в индукторе и



Ф и г. 1

конечной скорости ускоряемого проводника.

Система дифференциальных уравнений (1)–(5) интегрировалась на ЭВМ ЕС-1020 методом Рунге — Кутты с переменным шагом. Влияние нагрева индуктора и ускоряемого проводника на процесс преобразования энергии не учитывалось. Взаимная индуктивность между индуктором и проводником рассчитывалась по формуле [5]

$$M = \frac{\pi}{8} \mu_0 N_1 N_2 \frac{d_2^2}{l_1 l_2} (l_{01} F_1 - l_{02} F_2 - l_{03} F_3 + l_{04} F_4),$$

где  $N_1, N_2$  — числа витков соленоидов;  $l_{0i}$  — геометрическая величина, определяемая взаимным расположением соленоидов;

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Г/м}; \quad l_{0i} = \sqrt{(d_1/2)^2 + x_i^2}; \quad i = 1, 2, 3, 4;$$

$$x_1 = x + (l_1 + l_2)/2; \quad x_2 = x - (l_1 - l_2)/2;$$

$$x_3 = x + (l_1 - l_2)/2; \quad x_4 = x - (l_1 + l_2)/2;$$

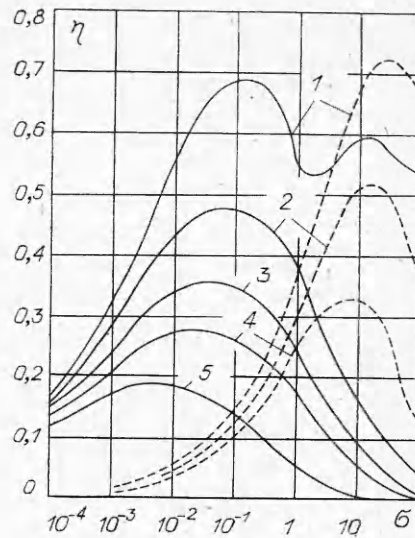
$F_i$  — табличная величина, которая аппроксимировалась с погрешностью 2–6% выражением  $F_i = 1 - 0,024(d_2/l_{0i})^2$ .

Эффективность преобразования энергии емкостного накопителя в кинетическую энергию ускоряемого проводника оценивается по величине КПД, выражение для которого в общем случае при наличии начальной скорости проводника  $v_0$  имеет вид

$$\eta = [m(v^2 - v_0^2)] / (CU_0^2) = \sigma(v^2 - v_0^2).$$

Предварительные расчеты показали существование слабо выраженного максимума в зависимости КПД от аксиальных размеров индуктора  $l_1^* = l_1/d_1$  и проводника  $l_2^* = l_2/d_1$ . Сильное влияние на КПД оказывает начальное положение ( $\epsilon_0 = x_0/d_1$ ) геометрического центра проводника относительно центра индуктора. В дальнейшем поиск оптимальных величин  $l_1^*, l_2^*, \epsilon_0$  проводился симплексным методом [6] для каждого фиксированного набора безразмерных параметров  $\rho_1, \rho_2, \lambda_0, \sigma, d^* = d_2/d_1$ . Исходный регулярный симплекс строился в факторном пространстве, образованном тремя факторами  $l_1^*, l_2^*, \epsilon_0$ , кодовые единицы которых выбраны соответственно 0,1; 0,1; 0,05. Оптимум считался достигнутым, если одна и та же точка входила 5 раз в последовательные симплексы  $P = 1,65n + 0,05n^2$ , где  $n$  — число факторов. В качестве оптимальных параметров выбирались те, которые соответствовали точке с максимальным значением КПД ускорения.

На фиг. 2 представлены зависимости КПД соленоидного ускорителя (сплошные кривые) от относительной массы проводника при начальной скорости  $v_0 = 0$ , оптимальных  $\epsilon_0$  и  $\rho_1 = 0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,5$  (кривые 1–5 соответственно) при  $\rho_2 = 0,5\rho_1$ . Здесь и далее  $\lambda_0 = 0,1, d^* = 0,98$ .



Ф и г. 2

Из кривых фиг. 2 следует, что максимальная эффективность преобразования энергии накопителя достигается в области  $\sigma = 0,01-0,1$ , когда процесс ускорения происходит в течение длительности первого полупериода разрядного тока. С ростом  $\sigma$  в области  $\sigma > 0,1$  КПД падает вследствие несогласованности процесса ускорения и увеличения доли энергии, идущей на активные потери в проводниках. В области  $\sigma < 0,01$  КПД снижается из-за быстрого вылета проводника из зоны взаимодействия с индуктором и возрастания ЭДС движения  $e_d = i_2 v dM/dx$ , не допускающей полного разряда емкостного накопителя энергии за время процесса ускорения.

Представляет интерес сравнить по эффективности преобразования энергии соленоидный ускоритель и ускоритель с плоской индукторной системой, используемой при ускорении кольцевых проводников [3]. Зависимости  $\eta(\sigma)$  для плоской индукторной системы приведены на фиг. 2 (штриховые кривые). Сравнение приведено для случая равенства средних диаметров соленоида и плоского индуктора при относительной ширине токовой полосы плоского индуктора  $\alpha = 0,1$ , где  $\alpha = (r_1 - r_2)/(r_1 + r_2)$ ,  $r_1, r_2$  — соответственно внешний и внутренний радиусы индуктора. Из приведенных на фиг. 2 результатов расчета следует, что при оптимальных относительных массах ускоряемых проводников соленоидная и плоская индукторные системы позволяют достичь примерно одинаковой эффективности преобразования энергии накопителя. Однако при прочих равных условиях максимальная эффективность ускорения в индукторной системе соленоидного типа достигается при относительной массе проводника  $\sigma$ , в 100—200 раз меньшей, чем в случае плоского индуктора, что объясняется различием в зависимостях взаимной индуктивности от перемещения проводника.

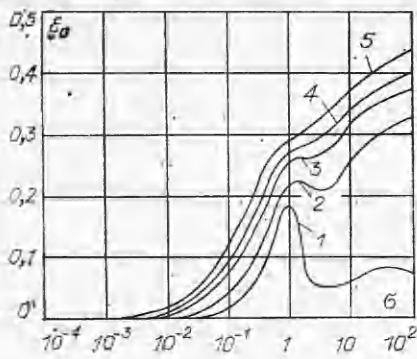
При  $\sigma > 1$  эффективность плоской индукторной системы выше, поскольку она позволяет обеспечить большую величину производной  $d\mu/d\varepsilon$ , что является определяющим фактором при малых перемещениях проводника за время разряда накопителя. При  $\sigma < 1$  КПД плоской индукторной системы по сравнению с соленоидной ниже, что можно объяснить более быстрым вылетом проводника из зоны взаимодействия с индуктором. В плоской индукторной системе величина зоны взаимодействия индуктора с проводником составляет  $\varepsilon_k = 0,3-0,4$ , а в соленоидной  $\varepsilon_k = 1,2-1,5$ . Кроме того, в плоской индукторной системе при малых значениях  $\sigma$  КПД снижается в результате ограничения разрядного тока быстро нарастающей ЭДС движения, в то время как в индукторной системе соленоидного типа подбор оптимального  $\varepsilon_0$  обуславливает малое начальное значение  $d\mu/d\varepsilon$ , и в период нарастания тока ЭДС движения еще мала. В результате процесс ускорения протекает при более высоких значениях разрядного тока, что повышает эффективность соленоидной системы при малых  $\sigma$ . Относительные активные сопротивления разрядного контура оказывают более сильное влияние на КПД в случае соленоидной системы по сравнению с плоской, поэтому при одинаковых  $\rho_1$  и оптимальных значениях относительной массы  $\sigma$  КПД ускорителя с плоским индуктором выше, чем с соленоидом (см. фиг. 2).

Существенное влияние на КПД соленоидного ускорителя оказывает начальное положение проводника в индукторе, определяемое расстоянием между их геометрическими центрами  $\varepsilon_0$ . В случае неподвижного в начальный момент времени проводника его оптимальное положение в индукторе удовлетворяет условию

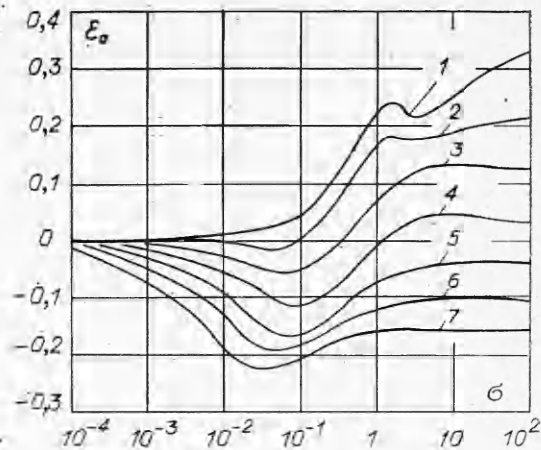
$$0 < \varepsilon_0 < \varepsilon_m,$$

где  $\varepsilon_m$  — положение центра проводника в индукторе, при котором величина производной  $d\mu/d\varepsilon$  достигает максимума.

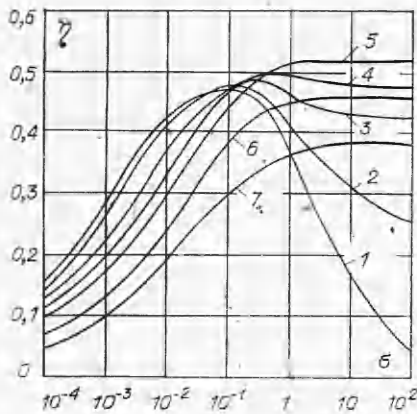
Зависимости оптимальных значений  $\varepsilon_0$  от параметров  $\sigma$  и  $\rho_1$  представлены на фиг. 3 (кривые 1—5 соответствуют  $\rho_1 = 0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,5$ ). С ростом относительной массы проводника, а также с ухудшением характеристик ускорителя за счет увеличения активных потерь оптимальное



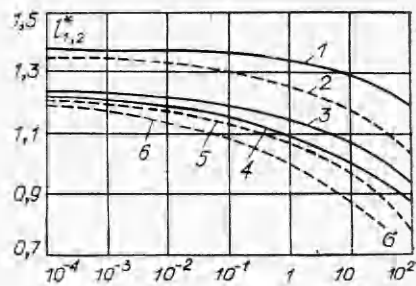
Фиг. 3



Фиг. 5



Фиг. 4



Фиг. 6

начальное положение проводника смещается в направлении к выходному отверстию индуктора, приближаясь к координате  $\epsilon_m$ , но не достигая ее. В случае отсутствия активных потерь ( $\rho_1 = \rho_2 = 0$ ) при относительных массах  $\sigma > 0,1$  КПД ускорения существенно зависит от момента вылета проводника из зоны взаимодействия с индуктором, т. е. имеет ли ток в этот момент максимальное или нулевое значение. В результате этого в зависимостях  $\eta(\sigma)$  и  $\epsilon_0(\sigma)$  наблюдаются местные экстремумы. С ростом активных потерь влияние второго и последующих полупериодов разрядного тока ослабевает и кривые  $\eta(\sigma)$  и  $\epsilon_0(\sigma)$  сглаживаются.

Отличительной особенностью соленоидной индукторной системы по сравнению с плоской является возможность создания на ее основе каскадного индукционного ускорителя. В связи с этим далее рассматривается влияние начальной скорости проводника  $v_0$ , соответствующей моменту подключения накопителя энергии к индуктору, на эффективность преобразования энергии. На фиг. 4 даны результаты расчета КПД ускорения в функции параметра  $\sigma$  при  $\rho_1 = 0,1$  и  $v_0 = 0; 0,1; 0,3; 0,5; 0,7; 1,0; 1,5$  (кривые 1—7 соответственно). Величины относительного начального расстояния  $\epsilon_0$  выбирались оптимальными. Максимум КПД достигается при оптимальной начальной скорости  $v_0 = 0,5-1,0$ . При начальной скорости проводника меньше оптимальной эффективность процесса ускорения снижается в связи с ростом доли энергии, идущей на активные потери, а при скорости больше оптимальной — вследствие быстрого вылета проводника из зоны взаимодействия с индуктором.

Влияние начальной скорости проводника  $v_0$  на его оптимальное положение, соответствующее моменту подключения накопителя к индуктору, иллюстрируется кривыми 1—7 на фиг. 5 ( $v_0 = 0; 0,1; 0,3; 0,5; 0,7; 1; 1,5$  соответственно). С увеличением  $v_0$  значение оптимального  $\epsilon_0$  смещается от выходного отверстия к центру индуктора. При дальнейшем возрастании

начальной скорости ( $v_0 > 0,1$ ) наиболее выгодным становится подключение накопителя энергии к индуктору до момента прохождения проводником центра индуктора ( $\epsilon_0 < 0$ ). В этом случае некоторое притормаживание проводника компенсируется тем, что в дальнейшем его ускорение происходит при больших значениях разрядного тока. Максимумы зависимостей  $\eta(\sigma)$  соответствуют примерно случаям, когда оптимальным является подключение накопителя к индуктору в момент прохождения проводником центра индуктора. Незначительное увеличение КПД при  $v_0 = 0,5-0,7$  по сравнению с  $v_0 = 0$  объясняется тем, что оптимальное начальное положение проводника смещается от выходного отверстия индуктора к его центру, обеспечивая тем самым большую кратность изменения суммарной индуктивности индукторной системы.

На фиг. 6 показано влияние начальной скорости  $v_0$  на оптимальные аксиальные размеры индуктора и проводника (сплошные и штриховые кривые соответственно; 1, 2 —  $v_0 = 0,7$ ,  $\rho_1 = 0,4$ ; 3, 5 —  $v_0 = 0$ ,  $\rho_1 = 0,4$ ; 4, 6 —  $v_0 = 0$ ,  $\rho_1 = 0,3$ ). При  $v_0 = 0$  оптимальные длины индуктора  $l_1^*$  и проводника  $l_2^*$  находятся в пределах 0,8—1,2, причем  $l_2^* < l_1^*$ . Рост относительной массы проводника и активных потерь в разрядном контуре приводит к некоторому уменьшению оптимальных величин  $l_1^*$  и  $l_2^*$ . При  $v_0 \neq 0$  оптимальные значения аксиальных размеров увеличиваются и при  $v_0 = 0,5-0,7$  составляют 1,1—1,4. Это позволяет увеличить время взаимодействия проводника с магнитным полем индуктора и повысить КПД преобразования энергии накопителя.

В заключение отметим следующее.

1. При нулевой начальной скорости максимальный КПД ускорения проводника в импульсном магнитном поле соленоида достигается при оптимальных значениях длины соленоида  $l_1^* = 0,8-1,2$ , длины проводника  $l_2^* = (0,8-0,9)l_1^*$ , начального смещения центра проводника относительно центра индуктора  $0 < \epsilon_0 < \epsilon_m$  и значениях относительной массы  $\sigma = 0,1-0,01$ .

2. С ростом активных потерь в разрядном контуре оптимальные значения аксиальных размеров индуктора и проводника уменьшаются, а оптимальное начальное смещение возрастает, приближаясь к значению  $\epsilon_m$ .

3. При начальной скорости проводника, отличной от нуля, оптимальное начальное положение его смещается в направлении к входному отверстию индуктора, причем при оптимальной начальной скорости наиболее выгодным является подключение накопителя энергии к индукторной системе при  $\epsilon_0 \approx 0$ .

4. При одинаковых значениях основных безразмерных параметров соленоидная и плоская индукторные системы в оптимальных режимах позволяют достигать близких значений КПД, однако в соленоидной индукторной системе оптимальные значения относительной массы проводника в 100—200 раз меньше, чем в плоской.

Поступила 8 I 1982

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бондалетов В. Н., Иванов Е. Н. Бесконтактное индукционное ускорение проводников до гиперзвуковых скоростей. — ПМТФ, 1975, № 5.
2. Гальетов В. П., Иванов Е. Н. Повышение эффективности электромагнитного индукционного ускорителя проводников. — ПМТФ, 1979, № 4.
3. Андреев А. Н., Бондалетов В. Н. Индукционное ускорение проводников и высокоскоростной привод. — Электричество, 1973, № 10.
4. Чемерис В. Т., Подольцев А. Д. Исследование магнитоимпульсного взаимодействия проводящих контуров на ЭЦВМ с учетом движения вторичного контура. — Техническая электродинамика, 1979, № 1.
5. Калантаров П. Л., Цейтлин Л. А. Расчет индуктивностей. Л.: Энергия, 1970.
6. Хартман К., Лецкий Э., Шефер В. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов. М.: Мир, 1977.