

УДК 621.3

В.Т. ЧЕМЕРИС, канд. техн. наук (Нац. авиационный ун-т Украины, г. Киев)

АНАЛИЗ КОНЦЕПЦИИ МНОГОСТУПЕНЧАТОГО УСКОРЕНИЯ МАКРОТЕЛ (Часть 1)

Рассмотрены принципы построения многоступенчатых импульсных индукционных ускорителей макротел в виде дискретной последовательности одноступенчатых ускорителей, имеющих на метаемом теле либо многовитковую катушку, аналогичную катушке индуктора, либо сплошное короткозамкнутое кольцо. Анализируются особенности этих принципов и характеристики рабочих процессов ускорителей. В 1-й части работы приведены результаты моделирования ускорителей на ЭВМ и примеры реализации лабораторных моделей ускорителей индукционного типа.

Розглянуто принципи побудови багатоступінчастих імпульсних індукційних прискорювачів макротіл у вигляді дискретної послідовності одноступінчастих прискорювачів, що мають на прискорюваному тілі або багатовиткову котушку, подібну до котушки індуктора, або суцільне короткозамкнуте кільце. Аналізуються особливості цих принципів та характеристики робочих процесів прискорювачів. В 1-й частині роботи подано результати моделювання прискорювачів на ЕОМ і наведено приклади здійснення лабораторних моделей прискорювачів індукційного типу.

Техническая проблема использования электромагнитной энергии для разгона электропроводных макротел до скорости, измеряемой километрами в секунду, остается актуальной на протяжении нескольких десятилетий. Тенденция к реализации многоступенчатых систем ускорения проявилась уже в первых изобретениях в этой области [1]. Более поздние исследования одноступенчатых индукционных ускорителей выявили существование предельной скорости, обусловленной разрушением метаемого проводящего контура. Это привело к окончательному закреплению подхода к достижению высокой скорости разгона путем последовательного ускорения тела в системе индукторов, энергонапряженность которых должна быть ниже предельной. Успехи в изучении предельных возможностей одноступенчатых ускорителей способствовали такой тенденции. Так, например, в 1970–1980-е гг. в г. Истра (Россия) специалисты электротехнического института под руководством доктора технических наук В.Н. Бондалетова осуществляли разгон до космических скоростей комплект непроводящих шариков на электропроводном носителе в форме медного кольца, разрушавшегося в полете, что позволило смоделиро-

вать условия соударения корпусов космических аппаратов с метеоритной пылью. Дальнейшее развитие индукционных ускорителей шло по пути поиска методов разгона тел массой до 1 кг или более до скорости 2–3 км/с.

В основе индукционного ускорения лежит принцип концентрации энергии магнитного поля в полости импульсного соленоида (этот процесс часто называют компрессией магнитного потока) или в зазоре между витками соленоида и поверхностью проводящего тела, выталкиваемого магнитным полем. Этот процесс сопровождается диффузией магнитного поля в проводники, ограничивающие его объем. Ускорение тела может быть эффективным, если плотность энергии магнитного поля нарастает со скоростью, превышающей скорость диффузии поля в ограничивающие его проводники. При таком условии проводящее тело ведет себя подобно диамагнитному. Выталкивание диамагнитного тела неоднородным магнитным полем теоретически изучалось В.С. Мингалевым (1965) [2]. С точки зрения электромагнитной теории, наиболее корректным методом для расчета сил, действующих на тело при индукционном ускорении, является расчет квазистационарного магнитного поля в системе индуктор-ускоряемое

© В.Т. ЧЕМЕРИС, 2014

тело с последующим определением силы через тензор натяжений магнитного поля. Поскольку при таком расчете можно определить токи, индуцированные в ускоряемом теле, интегральная сила, действующая на тело, может быть найдена также на основании закона Ампера. Расчету силы взаимодействия между двумя тонкими соленоидами при известных токах каждого из них была посвящена работа Н.И. Дойникова (1965) [3], в которой для определения силы использованы сферические функции Лежандра. В большинстве последующих работ сказано, что сила, ускоряющая метаемое тело, вычислялась по изменению магнитной энергии системы индуктор-ускоряемое тело при виртуальном перемещении последнего. Для вычисления магнитной энергии использовались индуктивные параметры (собственная и взаимная индуктивность), определяемые с помощью эллиптических интегралов 1-го и 2-го рода [4], и уравнения магнитно-связанных контуров [5]. Для контуров с достаточно протяженными размерами (в отличие от точечных) такие уравнения получают из интегральных уравнений по методу вторичных источников [6] путем дискретизации поперечных сечений взаимодействующих контуров с током [7, 8].

Если пренебречь распространением электромагнитной энергии за пределы стенок рабочего объема электромеханического преобразователя, баланс мощности для этого объема можно записать так:

$$P = Q + \frac{dW}{dt} + \frac{dA}{dt} + P_{кэ}, \quad (1)$$

где P — мощность, затрачиваемая первичным источником энергии, от которого запитан ускоряющий индуктор; $Q = \int_{V_1} (j_1^2/\sigma_1) dV_1 + \int_{V_2} (j_2^2/\sigma_2) dV_2 dV_2$ — сумма мощностей тепловых потерь в объеме токонесущих слоев катушки индуктора (индекс «1») и проводника ускоряемого тела (индекс «2») соответственно; $W = \int_V \rho_m dV$ — энергия магнитного поля; $\rho_m = B^2/2\mu$ — локальная плотность энергии

магнитного поля (или магнитное давление); $\frac{dA}{dt} = i_1 i_2 \frac{dL_{12}}{dt}$ — мощность силы, совершающей работу по перемещению тела; L_{12} — коэффициент взаимной индуктивности между катушкой индуктора и ускоряемым телом; $P_{кэ}$ — мощность тепловых потерь в конструктивных элементах, имеющих электромагнитную связь с полем индуктора. Учитывая, что $dA = Fdl$, получают выражение для электромагнитной силы $F = i_1 i_2 \frac{dL_{12}}{dl}$, где dl — виртуальное перемещение подвижного контура при неизменных токах $i_1 i_2$. Для выполнения механической работы природа тока во вторичном контуре не существенна: это может быть как ток, индуцированный в результате изменения магнитного поля, созданного индуктором, так и ток, созданный благодаря питанию катушки, размещенной на ускоряемом теле, от стороннего источника электрической энергии.

Ускорители соленоидного типа, в которых на метаемом теле размещается катушка, вполне аналогичная катушке индуктора, запитанная либо последовательно с индуктором, либо независимо от дополнительного источника тока, были изучены в достаточной мере. Методика расчета таких ускорителей была предложена в работах [9, 10]. Проведенные исследования позволили сделать вывод о том, что по условиям механической прочности подвижной катушки ее предельная скорость при ускорении ее с нулевой начальной скоростью в одноступенчатом ускорителе не может превышать 400–550 м/с. Представляет интерес проанализировать особенности выполнения многоступенчатого ускорителя с катушкой, размещенной на метаемом теле. При этом возможны два режима работы такой катушки: либо она будет замкнута накоротко в процессе движения, либо будет сохранять гальванический контакт с внешним источником благодаря токопроводам через скользящий контакт. Для определения параметров электромагнитной связи между катушкой индуктора и подвижной катушкой снаряда (ускоряемого тела) могут быть использованы формулы и таблицы,

приведенные в справочной книге [4]. Ниже рассматриваются некоторые варианты структуры многоступенчатого ускорителя из числа возможных, которые были перечислены в работе [24].

1. Соленоидный ускоритель в виде последовательности одноступенчатых ускорителей с подпиткой подвижной катушки от отдельного источника тока. В такой системе импульсный процесс в каждом индукторе происходит практически без взаимного влияния соседних индукторов за исключением того, что предыдущая ступень задает начальную скорость снаряда для следующей ступени. Размещение индукторов отдельных ступеней на расстояниях, равных длине каждого индуктора, вполне достаточны для того, чтобы их взаимное влияние было минимальным. Таким образом, процесс ускорения выглядит как последовательность отдельных актов импульсного взаимодействия движущегося снаряда с импульсными магнитными полями, включаемыми на его пути в соответствии с законом его движения. Здесь предпочтительным является движение тела с постоянным (в среднем) по длине разгона ускорением, которое не должно превышать допустимую величину по условиям прочности метаемого тела. Важной проблемой является синхронизация включения индукторов в соответствии с движением тела. Для этого могут быть применены датчики перемещения, осуществляющие запуск коммутирующих устройств, с целью подачи тока в индукторы [16, 21] либо устройства с программируемым запуском индукторов и отслеживанием (а при необходимости и с корректировкой) движения тела с помощью таких же датчиков перемещения [26]. В остальном анализ многоступенчатого ускорителя мало, чем отличается от анализа одноступенчатых ускорителей, многократно рассматривавшихся в научной литературе.

При постоянстве среднего ускорения $a_{\text{ср}}$ на всем пути движения тела прирост кинетической энергии тела в каждой ступени будет $\Delta W_K = ma_{\text{ср}}\Delta l = 2ma_{\text{ср}}d$, где $\Delta l = 2d$ — длина зоны взаимодействия; d — диаметр (калибр) метаемого тела.

Магнитная энергия системы индуктор-тело равна $W_M = \frac{L_1 i_1^2}{2} + \frac{L_2 i_2^2}{2} - i_1 i_2 L_{12}$. Индуктивности всегда можно представить в виде выражений вида $L_1/\omega_1^2 = \mu_0 R_1 \Phi_1$, $L_2/\omega_2^2 = \mu_0 R_2 \Phi_2$, $L_{12} = \mu_0 \omega_1 \omega_2 R_1 \Phi_{12}$, где R_1 , R_2 — радиусы катушек первичного и вторичного контура; Φ_1 , Φ_2 , Φ_{12} — форм-факторы, вычисляемые по методикам работы [4]. Вводя в рассмотрение отношение ампервитков вторичного и первичного контуров $s = i_2 \omega_2 / i_1 \omega_1$, получаем выражение для магнитной энергии

$$W_M = \mu_0 R_1 \Phi_1 \frac{A_1^2}{2} \left[1 + \frac{R_2 \Phi_2}{R_1 \Phi_1} s^2 - \frac{\Phi_{12}}{\Phi_1} s \right],$$

где $A_1 = i_1 \omega_1$.

Средняя осевая сила взаимодействия между контурами на основании теоретических исследований [3] может быть найдена по формуле

$$F_z = \mu_0 i_1 \omega_1 i_2 \omega_2 \frac{R_1 R_2}{l_1 l_2} \Phi_z, \quad (2)$$

где l_1 , l_2 — длина первичного и вторичного контура в осевом направлении; ω_1 и ω_2 — числа витков соответственно; Φ_z — соответствующий силовой форм-фактор [3]. Поскольку $F_z = ma_{\text{ср}}$, можно записать $A_1^2 = \frac{ma_{\text{ср}} l_1 l_2}{\mu_0 s R_1 R_2 \Phi_z}$ и оценить, какая доля магнитной энергии преобразуется в механическую,

$$\Delta W_K / W_M = \frac{sG}{1 + \frac{R_2 \Phi_2}{R_1 \Phi_1} s^2 - \frac{\Phi_{12}}{\Phi_1} s},$$

где величина G содержит комплекс конструктивных параметров ускорителя:

$$G = \frac{4dR_2}{l_1 l_2} \frac{\Phi_z}{\Phi_1}.$$

Отношение $\Delta W_K / W_M$ имеет экстремум при $s = s_{\text{опт}} = (R_1 \Phi_1 / R_2 \Phi_2)^{1/2}$. После подстановки этого выражения относительная величина кинетической энергии принимает значение

$$(\Delta W_K / W_M)_{\max} = \frac{\Phi_z}{2\sqrt{\Phi_1 \Phi_2} - \Phi_{12} \sqrt{\frac{R_1}{R_2}}} \times \frac{4d\sqrt{R_1 R_2}}{l_1 l_2}.$$

Это соотношение может быть полезным для анализа энергопреобразования при любом способе возбуждения тока во вторичном контуре. Предположив, что $s \approx 1$, $d \approx l_1 \approx l_2$, $R_1 \approx R_2 \approx l_1/2$, $\Phi_{12} \approx \Phi_1 \approx \Phi_2$ (что недалеко от истины при разумном выборе размеров индукторной системы и снаряда), получаем оценку сверху для коэффициента преобразования магнитной энергии в кинетическую: $(\Delta W_K / W_M)_{\max} \approx 2\Phi_z / \Phi_1$. Другими словами, эффективность энергопреобразования определяется отношением силового форм-фактора Φ_z к форм-фактору индукторной системы Φ_1 . Форм-фактор Φ_z здесь должен вычисляться на основании результатов работы [3] для взаимного расположения первичного и вторичного контуров, соответствующего среднему значению ускоряющей силы на длине интервала взаимодействия Δl или же по результатам математического моделирования электромагнитного поля в индукторной системе.

С использованием методики расчета, описанной в работах [9, 10], был выполнен оценочный расчет многоступенчатого ускорителя соленоидного типа простейшей структуры (8 ступеней) с предварительно захлажденной катушкой снаряда при питании индукторов от секционированного емкостного накопителя. Емкость первой ступени была выбрана по ус-

ловиям согласования времени разряда конденсатора со временем пролета снаряда и составляла 7 мФ. Емкость всех остальных ступеней для упрощения схемы была задана одинаковой (1,75 мФ), исходя из режима частичного разряда емкостей. Масса подвижной части (снаряда) 0,33 кг, калибр 27 мм, материал проводников обмотки — алюминий. Отношение калибра снаряда к внутреннему диаметру ускоряющих соленоидов составляло 0,736. За счет захлаживания при 77 °К начальное сопротивление алюминиевых проводников снаряда было снижено в 10 раз. Подвижный соленоид запитывался импульсами тока через скользящий контакт синхронно с подачей импульсов тока в ускоряющие соленоиды. Температура подвижной катушки после прохождения очередного импульса тока указана в табл. 1. После 8-й ступени температура катушки снаряда возвращается к комнатной. Амплитуда импульсов тока в каждой ступени составляла до 100 кА, начальное смещение подвижного соленоида относительно неподвижного в каждой ступени — на 0,36 длины соленоида. КПД каждой ступени в табл. 1 определялся выражением $\eta_c = \Delta W_K / \Delta W_{C0}$, а общий КПД после прохождения очередной ступени — отношением $\Sigma \Delta W_K / \Sigma \Delta W_{C0}$.

В данном примере общий КПД ускорителя едва превышал 10 %, несмотря на захлаживание катушки снаряда, из-за излишне большого зазора между поверхностью снаряда и витками катушек индуктора. В результате имели место малый коэффициент магнитной связи между ускоряющими индукторами и

Таблица 1. Результаты расчета 8-ступенчатого соленоидного ускорителя

Номер ступени		1	2	3	4	5	6	7	8
Начальное напряжение U_{C0}	кВ	9,5	19	19	19	19	19	19	19
Емкость C	мкФ	7000	1750	1750	1750	1750	1750	1750	1750
Скорость на выходе ступени $v_{\text{кон}}$	м/с	541,26	649,7	718,4	770,3	816,25	852,6	886,54	918
Конечная температура $T_{\text{кон}}$	°К	167,19	199,5	221,3	238,56	255,6	268,83	281,7	294,6
Затраченная энергия ΔW_{C0}	кДж	277,46	236,9	181	151,615	145,8	121,9	121	120,35
Прирост кинетической энергии ΔW_K	кДж	48,34	21,3	15,5	12,75	12,1	9,94	9,74	9,37
$\eta_c = \Delta W_K / \Delta W_{C0}$	%	17,42	9	8,6	8,4	8,3	8,16	8,04	7,78
$\Sigma \Delta W_K / \Sigma \Delta W_{C0}$									
Кинетическая энергия W_K	кДж	48,34	69,65	85,16	97,9	109,9	119,95	129,68	139,06

снарядом, а также заниженное значение силового форм-фактора Φ_z .

При выбранном соотношении диаметров снаряда и индуктора (0,736) значительная часть магнитной энергии остается запасенной в магнитном поле индукторов и не преобразуется в кинетическую энергию снаряда. Спад коэффициента преобразования энергии с увеличением номера ступени объясняется недостаточной скоростью нарастания тока в индукторах. Для увеличения общего КПД ее надо наращивать от ступени к ступени путем уменьшения емкости ступеней накопителя с одновременным повышением зарядного напряжения. Задача оптимизации режимов питания отдельных ступеней ускорителя решалась в работе [10].

Система уравнений для моделирования ускорения снаряда с короткозамкнутой катушкой якоря была описана в работе [12]. При ее численной реализации была использована формула из работы [4] для взаимной индуктивности катушек как тонкослойных соленоидов

$$L_{12} = \frac{\pi}{2} \mu_0 w_1 w_2 \frac{R_2^2}{a_1 a_2} [l_1 F(\lambda_1) - l_2 F(\lambda_2) - l_3 F(\lambda_3) + l_4 F(\lambda_4)],$$

в которой табличные значения форм-фактора $F(\lambda_i)$ были аппроксимированы аналитическими выражениями с минимальным числом исходных параметров: $\delta = R_2/R_1$ и $\lambda_i = R_1/l_i$, $i = 1, \dots, 4$, а коэффициенты $l_1 - l_4$ вычислялись в зависимости от осевого перемещения якоря z , как $l_{1,2} = \sqrt{R_1^2 + x_{1,2}^2}$, $l_{3,4} = \sqrt{R_1^2 + x_{3,4}^2}$, где $x_{1,2} = z \pm 0,5(a_1 \pm a_2)$, $x_{3,4} = z \pm 0,5(a_1 \pm a_2)$; a_1, a_2 — осевой размер неподвижного и подвижного соленоидов соответственно (причем $a_1 > a_2$).

Следует отметить, что процедура вычисления собственных и взаимных индуктивностей электрических контуров весьма существенно влияет на точность расчета динамических характеристик ускорителя. Во многих работах по моделированию электромагнитных ускорителей подробности этих вычислений умалчиваются, а в ряде работ для вычисления соб-

ственных индуктивностей используются формулы одних авторов, а для расчета взаимных индуктивностей — формулы других авторов без проверки того, насколько формулы взаимной индуктивности сходятся к формулам собственных индуктивностей при полном совмещении контуров. Отсутствие такой сходимости грозит большими ошибками в расчетах, особенно при использовании приема дискретизации контуров конечных размеров, то есть разбиения их на большее число контуров с малыми поперечными размерами. Для исключения этой ошибки нами применяется прием вычисления собственных и взаимных индуктивностей контуров с конечными поперечными размерами на основе единой формулы для взаимной индуктивности между этими контурами [12]. Задавая в этой формуле, в одном случае, размеры и число витков дважды только первичного контура (вместо первичного и вторичного), а в другом — размеры и число витков дважды только вторичного контура (снова вместо первичного и вторичного), получаем значения собственных индуктивностей. Они согласуются с предельными значениями взаимной индуктивности, получаемыми при совмещении двух контуров в объеме либо одного, либо другого контура.

2. Ускоритель индукционного типа в виде последовательности одноступенчатых ускорителей с массивным проводником на якоре (снаряде).

2.1. *Замечания о питании ступеней ускорителя от секционированного емкостного накопителя.* Количество работ, посвященных исследованию многоступенчатых ускорителей с питанием индуктора каждой ступени от отдельного емкостного накопителя (большинство из них выполнено в США), достаточно велико, однако изготовление и испытания реальных конструкций описано в сравнительно небольшом числе публикаций. Весьма впечатляющие результаты получены в лаборатории Sandia Lab (США) [16]. Здесь была спроектирована модель 670-ступенчатого ускорителя для метания снаряда массой 60 кг с конечной скоростью 3,3 км/с. Длина ускорителя должна была составлять 60 м. Иссле-

Таблиця 2. Результаты моделирования 4-ступенчатого индукционного ускорителя

Порядковый номер ступени	1	2	3	4
Скорость якоря на входе, м/с	0	230	346	424
Скорость якоря на выходе, м/с	230	346	424	494
КПД ступени	0,12	0,15	0,136	0,145
Джоулево тепло в якоре Q_a	0,11	0,1	0,12	0,14
Джоулево тепло в индукторе $Q_{\text{и}}$	0,53	0,29	0,244	0,205
Энергия магнитного поля W_M	0,24	0,46	0,5	0,08
Энергия, возвращаемая в накопитель W_{rec}	–	–	–	0,43
Число витков индуктора w	54	28	20	10
Время пролета $t_{\text{пр}}$, мс	0,45	0,217	0,166	0,136

дования в этой лаборатории проводились на 35-ступенчатом ускорителе [25]. Каждая из 30 ступеней подключалась к емкостному накопителю (171 мкФ) с энергозапасом 12 кДж, а последние 5 ступеней имели емкости по 513 мкФ с энергозапасом по 70 кДж. Испытания проводились с алюминиевым снарядом, который был охлажден в жидком азоте при 77 °К и подавался в канал ускорителя с начальной скоростью 10 м/с. Поскольку удельная масса емкостных накопителей, по данным фирмы General Atomics (США), в зависимости от рабочего напряжения составляет в лучшем случае 3–10 кг/кДж, конденсаторные источники импульсного тока из-за чрезмерной массы и габаритов не могут быть использованы, как мобильные источники, для энергообеспечения ускорителей с выходной энергией снаряда 4–5 МДж и более.

Система уравнений для моделирования индукционного ускорителя, питаемого от емкостного накопителя, была приведена в работе [17]. Далее в табл. 2 указаны данные расчета лабораторной модели 4-ступенчатого индукционного ускорителя и число витков индуктора в каждой ступени. На каждый индуктор разряжается батарея конденсаторов емкостью $C = 3$ мФ, заряженная до напряжения $U_0 = 5$ кВ. Коммутация управляемого разрядника производится в момент времени, когда якорь занимает относительно индуктора оптимальное начальное положение (то есть смещен на 0,3 длины его обмотки в сторону движения). Данные обмотки индуктора: внутрен-

ний диаметр 24 мм, длина намотки $a_1 = 85$ мм. Якорный контур имеет вид медного цилиндра калибром 23 мм с толщиной стенки 0,4 мм и длиной $a_2 = 72$ мм. Внутренняя полость якоря заполнена полиуретаном высокого давления, общая масса якоря 17 г. Расстояние между близлежащими индукторами принималось равным длине намотки, то есть 85 мм. Кроме коэффициента преобразования энергии емкостного накопителя в кинетическую энергию якоря (КПД ступеней), рассчитывались потери энергии в якоре Q_a и в индукторе $Q_{\text{и}}$, энергия, остающаяся в магнитном поле индуктора W_M , и энергия, возвращаемая емкостному накопителю W_{rec} . В таблице эти величины даны для момента времени $t_{\text{пр}}$ от начала подачи тока в данный индуктор. За это время якорь проходит расстояние до следующего индуктора, то есть $\Delta l = 2a_1 = 0,17$ м. Изменение во времени всех составляющих энергии показано на рис. 1, а и б. Там же даны кривые изменения тока индуктора i и полной электромагнитной силы $F_{\text{эм}}$, действующей на якорь. Все значения энергии даны в долях от начальной энергии накопителя $W_{C0} = CU_0^2/2 = 3,75$ кДж. В качестве единицы измерения силы на графиках принята величина $F_{\text{бес}} = W_{C0}/\Delta l = 22$ кН. Как видно из табл. 2, значительная часть энергии накопителя остается в магнитном поле индуктора и не преобразуется в полезную работу. Подбором времени разряда емкости на индуктор, то есть вариацией числа витков индуктора и емкости

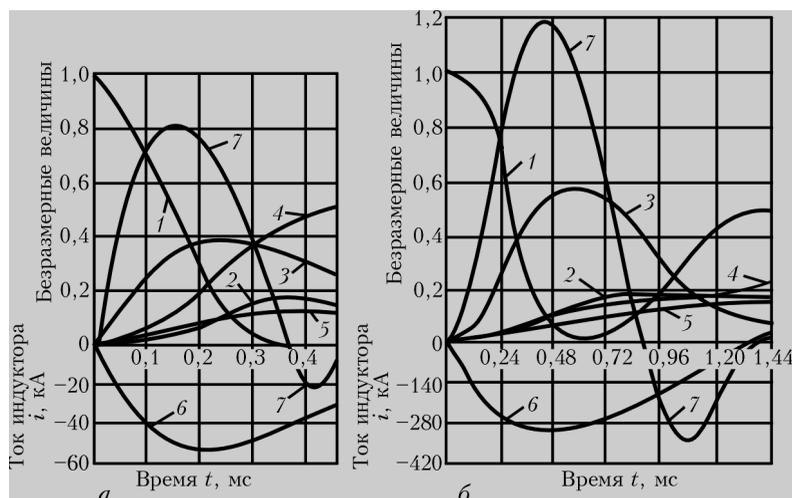


Рис. 1. Расчетные зависимости величин, характеризующих работу 4-ступенчатого ускорителя: *a* – первой ступени ($C = 3\text{ мФ}$, $\omega_1 = 54$); *б* – 4-й ступени ($C = 3\text{ мФ}$, $\omega_4 = 10$); 1 – энергия накопителя W_C ; 2 – кинетическая энергия снаряда W_K ; 3 – энергия магнитного поля W_M ; 4 – джоулевы потери в индукторе Q_H ; 5 – джоулевы потери в якоре Q_a ; 6 – ток индуктора i ; 7 – электромагнитная сила, ускоряющая якорь

накопителя, можно несколько понизить неиспользуемый остаток энергии. Если допустима перезарядка накопителя, этот остаток может быть возвращен в накопитель. Такой режим выбран для 4-й ступени, где в накопитель возвращается 0,43 начального запаса энергии. Полная эффективность рассмотренного 4-ступенчатого ускорителя составляет 14 %, выходная кинетическая энергия якоря 2 кДж. Температурный режим якоря таков, что в скин-слое якоря возможно поверхностное оплавление медного проводника.

Результаты моделирования процесса ускорения якоря в виде короткозамкнутого проводящего кольца неизменно обнаруживают некоторое притормаживание якоря при его вылете из индуктора, когда электромагнитная сила меняет свой знак вследствие перехода индуктированного тока в якоре через нуль, если ток индуктора к этому моменту времени не снизился до нуля.

2.2. Многоступенчатые ускорители с питанием индукторов от единого индуктивного накопителя. Общие принципы применения индуктивных накопителей для питания индукционных ускорителей макротел были рассмотрены в работах [18–20]. Примером успешного создания экспериментального 10-ступенчатого индукционного ускорителя с питанием от индуктивного накопителя энергии яв-

ляется ускоритель, который был создан в НИИЭФА (Россия) [21]. Катушка индуктивного накопителя (L_0 на рис. 2) заряжалась током 100 кА до энергии 5 МДж от униполярного генератора постоянного тока (G на рис. 2) с запасом кинетической энергии ротора 40 МДж. Для коммутации потока энергии к индукторам ступеней использовались однозарядные взрывные замыкатели M_0-M_{10} и взрывные размыкатели тока B_1-B_8 на рис. 2 с расходом взрывчатого вещества 1–3 г на одно срабатывание, а также электровзрывные размыкатели (ЭВР), то есть плавкие вставки F_1-F_8 , включенные параллельно размыкателям B_1-B_8 . Плавкие вставки F_1-F_8 срабатывали после размыкания взрывных ключей B_1-B_8 . Конденсатор C , подключенный параллельно индукторам, улучшал коммутационный процесс, снимая излишние перенапряжения. Управление всеми коммутирующими приборами осуществлялось от датчиков положения снаряда. Калибр снаряда был равен 57 мм. Амплитуда импульсов тока в катушках индукторов, имевших 12 витков каждая, составляла 70 кА. Были задействованы 6 ступеней, что позволило ускорить снаряд массой 0,5 кг до 600 м/с при полном КПД системы 11 %.

Особенностью схемы на рис. 2 является поочередное включение тока в индуктор очередной ступени с одновременным закорачиванием предыдущего индуктора. Такая схема

ускорителя была несколько модернизирована нами с целью исключения коммутаторов, работающих на взрывчатом веществе (рис. 3). Вместо униполярного генератора в лабораторных условиях в схеме на рис. 3 используется емкостный накопитель (C). Одновременно изменен принцип подачи тока в индукторы 6-ступенчатого ускорителя (L₁-L₆). Подключаемый индуктор очередной ступени после взаимодействия со снарядом остается включенным в цепь тока накопителя. Это дает возможность использовать остаток неиспользованной магнитной энергии каждой ступени для питания последующих. В схеме на рис. 3 основными коммутирующими элементами являются ЭВР, а для обеспечения их срабатывания в нужный момент используются вспомогательные емкостные накопители небольшой энергоемкости, разряжающиеся на плавкие вставки ЭВР по команде от управляющего устройства. Каждая вставка ЭВР (R_{разм} на схеме рис. 3) шунтируется термическими нелинейными сопротивлениями R_ш, снижающими чрезмерные перенапряжения и обеспечивающими нужную скорость нарастания тока в индукторах.

Для моделирования работы ускорителя с индуктивным накопителем математическую модель, описанную в [7, 8, 22] необходимо дополнить уравнениями коммутационного процесса в ЭВР. Для этого используются данные об ЭВР, накопленные учеными России в НИИЭФА [22]. Однако предварительные исследования особенностей работы ускорителя могут быть выполнены по усеченной системе уравнений (без ЭВР), если задать форму токового импульса близкую к той, которую может обеспечить индуктивный накопитель с ЭВР.

Для этого используется уравнение тока в индукторе как функции времени в виде

$$i_n = I_m [1 - (1 - (t/t_\phi)^\beta)] \quad (3)$$

где I_m — амплитуда тока; t — текущее время от момента включения индуктора; t_φ — базовое время нарастания тока, которое выбирается равным t_φ = (0,1-0,3)Δt_k, где Δt_k — время движения снаряда в одной ступени у-

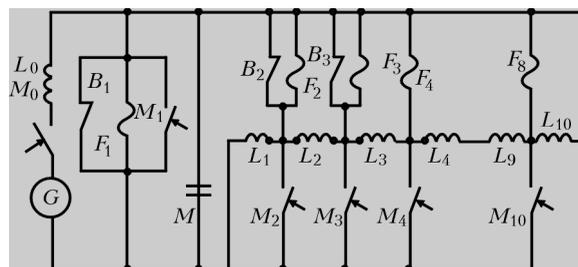


Рис. 2. Электрическая схема подключения индукторов в ускорителе НИИЭФА [21]

корителя; 0 < β < 20 — коэффициент, устанавливающий скорость нарастания тока в индукторе. Зависимость (3) отображена на рис. 4.

При постоянстве среднего ускорения a_{cp} снаряда в каждой ступени ускорителя время пролета снаряда на участке взаимодействия с одной ступенью определяется формулой

$$\Delta t_k = t_k - t_{k-1} = (\sqrt{k} - \sqrt{k-1})(2l_k/a_{cp})^{1/2}, \quad (4)$$

где k — порядковый номер ступени (k = 1, ..., n); t_k — время пролета снаряда от стартовой позиции до выхода из k-й ступени; t_{k-1} — аналогично время входа снаряда в k-ю ступень ускорителя; l_k = l_{разг}/n = l_и + l_z — длина, занимаемая каждой ступенью вдоль оси движения снаряда z; l_{разг} — полная длина разгонного участка; l_и — осевой размер катушки индуктора; l_z — конструктивный промежуток длины между катушками соседних индукторов. Выражение (4) соответствует условию постоянства прироста кинетической энергии снаряда в каждой ступени ускорителя:

$$\Delta W_K = 0,5m(u_k^2 - u_{k-1}^2) = [F_{эм}]_{cp} l_k,$$

где m — масса снаряда; u_{k-1}, u_k — скорость снаряда на входе и выходе k-й ступени соответственно; [F_{эм}]_{cp} = ma_{cp} — средняя ускоряющая электромагнитная сила на участке вза-

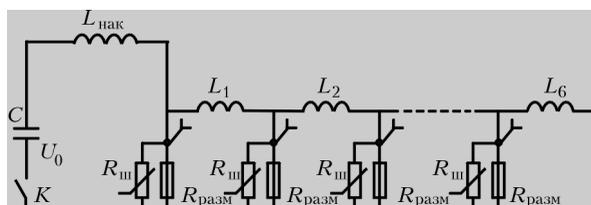


Рис. 3. Схема с последовательным включением индукторов в цепь тока индуктивного накопителя

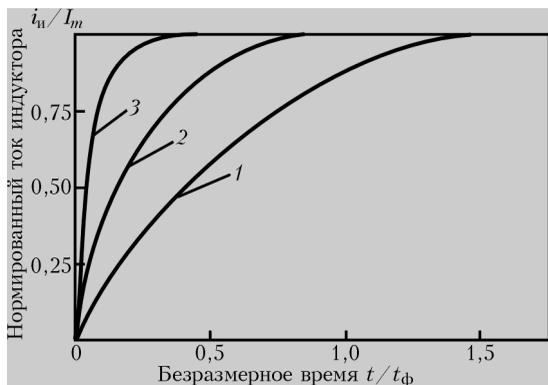


Рис. 4. Зависимость тока индуктора от безразмерного времени с момента включения тока в индуктор согласно (3). Обозначения: 1 – при $\beta = 2$; 2 – $\beta = 5$; 3 – $\beta = 20$

имодействия длиной l_k . Зависимость времени Δt_k от номера ступени показана на рис. 5 в безразмерной форме: $\Delta t_k^* = \Delta t_k / (2l_k / a_{cp})^{1/2} = \sqrt{k} - \sqrt{k-1}$. Принципиальная схема индуктора одной ступени приведена на рис. 6, где обозначены основные размеры и указана координата начального осевого смещения снаряда z_c относительно катушки индуктора в момент включения тока в катушке.

Система дифференциальных уравнений для неизвестных токов в проводящей оболочке снаряда имеет вид

$$[L] \left\{ \frac{di}{dt} \right\} dt [R(\theta)] \{i\} + u_c i_n \times \times \frac{d}{dz_c} \{L_{in}\} + \{L_{in}\} \frac{di_n}{dt} = 0. \tag{5}$$

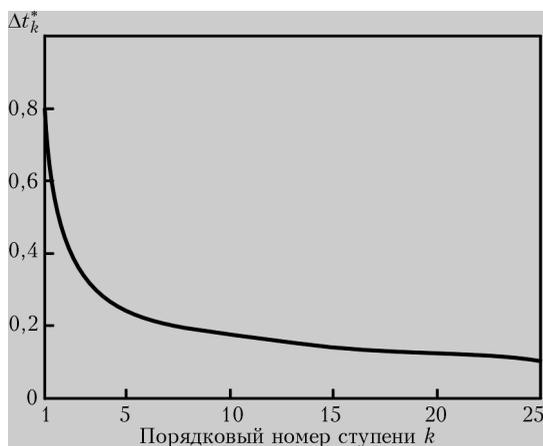


Рис. 5. Нормированное время движения снаряда в пределах одной ступени ускорителя в зависимости от ее номера

В уравнении (5) $[L]$ – это матрица собственных и взаимных индуктивностей элементарных контуров, образующих проводящую оболочку снаряда; $\{L_{in}(z_c)\}$ – переменный вектор-столбец взаимных индуктивностей контуров снаряда с катушкой индуктора, зависящий от положения снаряда z_c в системе координат индуктора; $[R(\theta)]$ – диагональная матрица активных сопротивлений элементарных контуров оболочки снаряда, зависящих от температуры θ ; i_n – ток индуктора согласно (2); $\{i\}$ – вектор токов в элементарных контурах оболочки снаряда; u_c – скорость снаряда.

Движение якоря под действием электромагнитной силы $F_{эм}$ определяется уравнениями

$$m \frac{du_c}{dt} = F_{эм} = \frac{1}{2} \{I^p\}^T \frac{dL_{in}}{dz_c} \{I^p\}; \tag{6}$$

$$u_c = \frac{dz_c}{dt}. \tag{7}$$

Здесь $\{I^p\}$ – полный вектор токов, включающий токи в элементарных контурах якоря и ток индуктора, верхний индекс T означает транспонирование матрицы.

Изменение температуры элементарных токовых контуров, образованных после дискретизации сечений проводника якоря и катушки индуктора, учитывается с помощью уравнения вида

$$\frac{d\theta_i}{dt} = \frac{i_i^2 R_i(\theta_i)}{c_{pi}(\theta_i) \rho_i V_i}, \tag{8}$$

где индекс « i » принимает значения, соответствующие номерам контуров от 1 до q (общее количество элементарных контуров); $c_{pi}(\theta_i)$, ρ_i , V_i – удельная теплоемкость, плотность и

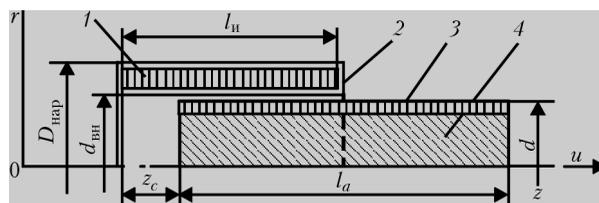


Рис. 6. Продольное сечение индуктора и ускоряемого тела (расчетная схема): 1 – витки катушки индуктора; 2 – электроизоляция катушки; 3 – проводящая оболочка якоря (показано ее условное деление на элементарные контуры); 4 – наполнитель (движение якоря осуществляется в направлении оси z (u – вектор скорости))

объем элементарного контура соответственно. Собственные и взаимные индуктивности контуров тока вычислялись по методикам [4, 11] с учетом размеров поперечного сечения каждого контура. Активные сопротивления были вычислены с учетом глубины скин-слоя для импульсного тока [23]. Система уравнений решалась на ЭВМ методом Рунге–Кутты с использованием стандартных подпрограмм при нулевых начальных условиях для $\{i(0)\}$ и $i_{\text{и}}(0)$. Начальная скорость $u_c(0)$, начальное положение снаряда $z_c(0)$ и начальные температурные условия проводников $\theta_i(0)$ изменялись от ступени к ступени. Для поиска оптимальных соотношений между параметрами процесса использовался метод ЛП-поиска [17]. Точность вычислений контролировалась по балансу энергии, затрачиваемой на тепло и механическую работу.

Результаты численного моделирования выявили сильную зависимость КПД ступеней ускорителя от величины начальной скорости снаряда $u_c(0)$ при входе в индуктор и от начального положения снаряда относительно индуктора в момент включения тока, которое измеряется в долях длины катушки индуктора: $\tilde{z}_{\text{нач}} = z_c(0)/l_{\text{и}}$. Так, если при $u_c(0) = 0$ наибольшее значение КПД ступени достигается при $\tilde{z}_{\text{нач}} = 0,3$, то при $u_c(0) = 250$ м/с для этого необходимо, чтобы $z_c(0) = 0$. С увеличением начальной скорости снаряда до 1 км/с и более оптимальные значения $\tilde{z}_{\text{нач}}$ смещаются в область отрицательных значений (от $-0,2$ до $-1,0$). При нулевой начальной скорости величина КПД менее критична к отклонению величины $\tilde{z}_{\text{нач}}$ от оптимальной, чем при $u_c(0) = 1$ км/с, в последнем случае выбор величины $\tilde{z}_{\text{нач}}$ существенно влияет на КПД ступени. При этом целесообразно использовать снаряд удлиненной формы, чтобы осевой размер его проводящей оболочки был больше, чем у катушки индуктора. Это необходимо для того, чтобы при большом начальном смещении $\tilde{z}_{\text{нач}}$ можно было избежать тормозящего взаимодействия носовой части снаряда с индуктором (которое заметно на кривых 8, 9 рис. 7).

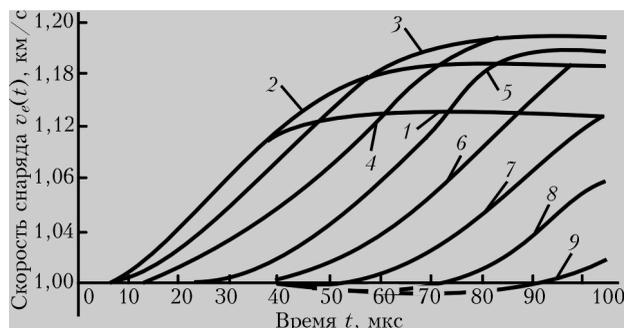


Рис. 7. Изменение скорости снаряда в зависимости от времени взаимодействия с индуктором при $u_c(0) = 1$ км/с и $\beta = 5$ для различных начальных положений снаряда: 1 — $\tilde{z}_{\text{нач}} = 0,4$; 2 — $\tilde{z}_{\text{нач}} = 0,2$; 3 — $\tilde{z}_{\text{нач}} = 0$; 4 — $\tilde{z}_{\text{нач}} = -0,2$; 5 — $\tilde{z}_{\text{нач}} = -0,4$; 6 — $\tilde{z}_{\text{нач}} = -0,6$; 7 — $\tilde{z}_{\text{нач}} = -0,8$; 8 — $\tilde{z}_{\text{нач}} = -1,0$; 9 — $\tilde{z}_{\text{нач}} = -1,2$

Далее в качестве примера даны результаты расчета ступени ускорителя с $u_c(0) = 1$ км/с. Основные размеры снаряда: калибр $d = 30$ мм, длина проводящей оболочки $l_a = 150$ мм; толщина проводника оболочки 1 мм (медь). Масса снаряда 1 кг. Данные индуктора: диаметры катушек $D_{\text{нар}}/d_{\text{вн}} = 52,5$ мм/30,5 мм; длина намотки $l_{\text{и}} = 66$ мм; число витков $w_1 = 23$; материал — медь. Максимальный ток в индукторе $I_m = 70$ кА. Как видно из рис. 7 и 8, оптимальное значение величины $\tilde{z}_{\text{нач}}$ при начальной скорости 1 км/с находится в интервале от 0 до $-0,2$. С уве-

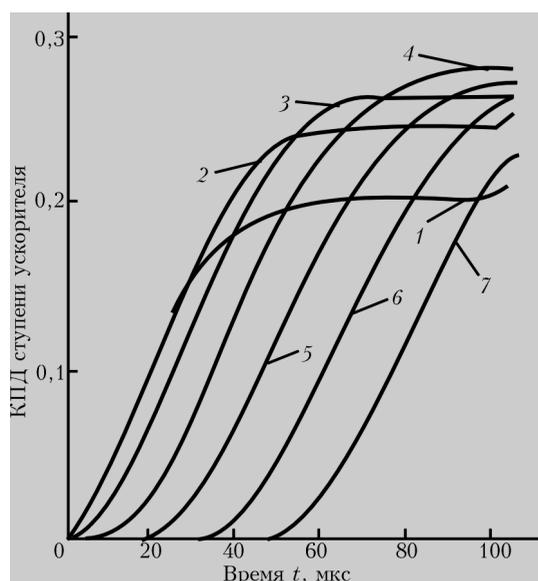


Рис. 8. Изменение КПД ступени ускорителя за время взаимодействия при $u_c(0) = 1$ км/с и $\beta = 5$ для различных начальных положений снаряда $\tilde{z}_{\text{нач}}$ (обозначения см. на рис. 7)

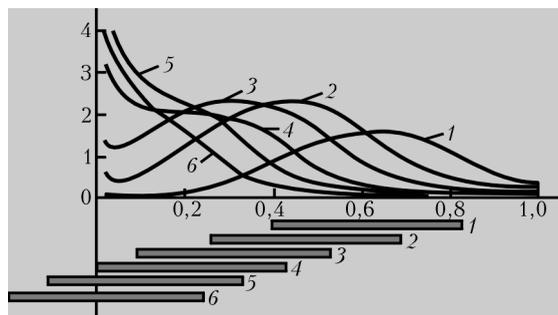


Рис. 9. Кривые распределения линейной плотности индуктированного тока в системе координат снаряда x/l_a при пролете снаряда сквозь индуктор (линии 1–6 в верхней части рисунка); соответствующие им мгновенные положения индуктора относительно снаряда показаны жирными линиями 1–6 в нижней части рисунка

личением начальной скорости эта величина еще больше смещается в область отрицательных значений. При излишнем смещении снаряда назад от оптимального положения его оболочка больше времени находится под действием обжимающих его радиальных сил при малой осевой силе, что ведет к росту потерь на джоулево тепло. Это связано с распределением индуктированного тока по длине снаряда, которое показано на рис. 9 для последовательных моментов времени от момента включения тока $t = 7,5$ мкс (кривая 1); 37,5 мкс (кривая 2); 52,5 мкс (кривая 3); 67,5 мкс (кривая 4); 82,5 мкс (кривая 5); 97,5 мкс (кривая 6). Эти данные получены при $\tilde{z}_{\text{нач}} = 1$ км/с, $\beta = 5$ и неоптимальном начальном смещении $\tilde{z}_{\text{нач}} = -1,0$.

Видно, что только в конце пролета сквозь индуктор (поз. 4–6 на рис. 9) токи концентрируются в хвостовой части снаряда, создавая ускоряющую силу. При правильном выборе $\tilde{z}_{\text{нач}} = 0$ – $-0,2$ токи в течение всего времени взаимодействия сосредоточены на $1/2$ длины снаряда (и менее) в его хвостовой части, благодаря чему прирост скорости (рис. 7) значительно выше.

На основе численного моделирования работы отдельных ступеней индукционного ускорителя были установлены две основные особенности многоступенчатой схемы:

- необходимо тщательно согласовывать моменты включения тока каждой ступени с положением снаряда относительно индуктора;

- чем выше скорость снаряда на входе в индуктор, с тем большим опережением надо включать ток;

- с ростом входной скорости снаряда КПД ступеней неуклонно возрастает в связи с сокращением времени протекания токов и снижением потерь энергии на джоулево тепло.

Выводы

1. В работе рассмотрены возможности технического применения многоступенчатых индукционных ускорителей с индукторной системой в виде набора дискретных катушек. Наиболее технологичной для реализации выглядит схема ускорителя, в которой индукторы запитаны импульсным током от общего индуктивного накопителя с набором электровзрывных размыкателей тока, а на снаряде размещена одновитковая обмотка в виде сплошного проводящего кольца. В такой схеме можно значительно снизить массу и габариты источника питания ускорителя импульсным током по сравнению с традиционным применением емкостных накопителей в качестве источников тока.

2. С использованием авторских методик моделирования и расчета ускорителей в работе определены параметры движения снаряда в ускорителях лабораторного масштаба для метания тел относительно небольшой массы. Несмотря на невысокий КПД стартовых ступеней (10–14 %), при скорости снаряда 1 км/с и более КПД достигает величины 25 % и далее увеличивается от ступени к ступени. Указанная в работах американских авторов [16] величина КПД 45 % вполне достижима при большом числе ступеней.

3. Математическое моделирование ступеней ускорителя позволяет сформулировать требования к точности синхронизации моментов включения тока в индукторах с движением снаряда. Хотя при начальной скорости движения снаряда 1–3 км/с прирост скорости в каждой ступени сильно зависит от положения снаряда относительно катушки индуктора в момент включения тока, указанный в работе [16] допуск на включение тока в пределах ± 1 мкс представляется излишне жестким. Ес-

ли ошибка при включении тока будет составлять ± 10 мкс, при начальной скорости снаряда $1-3$ км/с отклонение в начальном положении снаряда относительно индуктора составит $\pm(1-3)$ см, или $(10-30)$ % от длины индуктора в ускорителе калибра 50 мм, что может заметно повлиять на прирост скорости снаряда в каждой ступени. Очевидно, что допуск на время включения тока должен устанавливаться для каждой ступени отдельно в зависимости от размеров индуктора на основе заданного допуска на конечную скорость снаряда.

4. Имеющиеся литературные данные о реализованных на практике многоступенчатых индукционных ускорителях служат подтверждением реальных возможностей решения данной технической проблемы. 

Список литературы

1. *McNab I.R.* Early Electric Gun Research. // IEEE Trans. on Magnetics. — January 1999. — Vol. 35. — № 1. — P. 250–261.
2. *Мингалев В.С.* О движении идеально проводящего тела в неоднородном магнитном поле // Электрофизическая аппаратура. — 1965. — Вып. 3. — С. 121–136.
3. *Дойников Н.И.* Определение силы взаимодействия двух коаксиальных соленоидов // Электрофизическая аппаратура. — 1965. — Вып. 3. — С. 46–50.
4. *Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А.* Расчет индуктивностей // Справ.-к. — 3-е изд., перераб. и доп. — Л.: Энергоатомиздат, 1986. — 487 с.
5. *Болух В.Ф., Данько В.Г.* Лінійні електромеханічні перетворювачі імпульсної дії. — Харків: НТУ «ХПІ», 2006. — 260 с.
6. *Гозони О.В.* Метод вторичных источников в электротехнике. — М.: Энергия, 1975. — 296 с.
7. *Чемерис В.Т., Подольцев А.Д.* Исследование магнитноимпульсного взаимодействия проводящих контуров на ЭЦВМ с учетом движения вторичного контура // Технич. электродинамика. — 1979. — № 1. — С. 22–26.
8. *Чемерис В.Т., Подольцев А.Д.* Применение метода интегральных уравнений для расчета неустановившихся электромагнитных полей в движущихся проводящих средах // Известия АН СССР. Энергетика и транспорт. — 1987. — № 6. — С. 116–120.
9. *Кучерявая И.Н., Подольцев А.Д., Чемерис В.Т.* Влияние линейных размеров ударного электрического двигателя соленоидного типа на его энергетические характеристики // Электричество. — 1984. — № 10. — С. 50–53.
10. *Чемерис В.Т., Кучерявая И.Н.* Численный эксперимент в задаче оптимизации соленоидного двигателя ударного действия // Технич. электродинамика. — 1989. — № 5. — С. 15–18.
11. *Немцов М.В.* Справочник по расчету параметров катушек индуктивности. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 193 с.
12. *Чемерис В.Т., Болух В.Ф., Махталыр В.В.* О возможности применения в минометах калибра 82 мм индукционного способа метания мин // Артиллерийское и стрелковое вооружение. — 2010. — № 2. — С. 50–58.
13. *Патент США № 5075136.* — 1991 // Aivaliotis E., McKee B.D. Electromagnetic launcher system.
14. *Чемерис В.Т., Маринченко Г.Є.* Застосування моделюючої програми «ELCUT» для дослідження електромагнітних характеристик індукторних систем // Наукоємні технології. — 2011. — № 1-2. — С. 116–123.
15. *Холзунов А.Г.* Основы расчета пневматических приводов. — М.-Л.: Машиностроение, 1964. — 268 с.
16. *Shokair I.R., Cowan M., Kaye R.J., Marder B.M.* Performance of an Induction Coil Launcher // IEEE Trans. on Magnetics. — January 1995. — Vol. 31. — № 1. — P. 510–515.
17. *Чемерис В.Т.* Оптимизация индукционного ускорителя макротел методом ЛП-поиска // Артиллерийское и стрелковое вооружение. — 2008. — № 3. — С. 35–44.
18. *Шнеерсон Г.А.* Поля и процессы в аппаратуре сверхсильных токов. — Л.: Энергоиздат, Ленингр. отд., 1981. — 200 с.
19. *Чемерис В.Т., Подольцев А.Д.* Применение индуктивных накопителей для ускорения проводников // Электричество. — 1984. — № 8. — С. 37–41.
20. *Чемерис В.Т., Подольцев А.Д., Васковский Ю.Н., Петровский В.П.* Применение индуктивного накопителя энергии для ускорения проводящих тел // Электричество. — 1985. — № 1. — С. 53–54.
21. *Kuchinski V., Larionov B., Silin V.* Electromagnetic coil accelerator // The First Intern. Conf. on All Electric Combat Vehicle, Conference Proceedings. — Haifa, Israel, 14–17 May 1995. — P. 255–259.
22. *Буцев В.А., Калинин Н.В., Лучинский А.В.* Электрический взрыв проводников и его применение в электрофизических установках. — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 289 с.
23. *Кнопфель Г.* Сверхсильные импульсные магнитные поля. — М.: Мир, 1972. — 392 с.
24. *Чемерис В.Т.* Многоступенчатый индукционный ускоритель: поиск технических решений // Артиллерийское и стрелковое вооружение. — 2011. — № 3. — С. 45–57.
25. *Kaye R.J., Shokair I.R., Wawrik R.W.* Design and evaluation of coils for a 50 mm diameter induction coilgun launcher // IEEE Trans. on Magnetics. — January 1995. — Vol. 31. — № 1. — P. 478–483.
26. *Чемерис В.Т.* Обчислювально-керуюча система для дослідження руху динамічних об'єктів // Технич. электродинамика. — 1995. — № 3. — С. 72–73.