

УДК 537.85
DOI 10.17223/19988621/71/3

**А.П. Баганов, В.Г. Бутов, Г.В. Носов, М.Г. Носова,
С.В. Синяев, В.А. Солоненко**

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ КАТАПУЛЬТА ДЛЯ ЗАПУСКА ТЯЖЕЛЫХ ДРОНОВ С МАЛОРАЗМЕРНЫХ СУДОВ¹

Представлены результаты математического моделирования работы оригинальной схемы электромагнитной катапульти, основными элементами которой являются односекционный многорельсовый ускоритель с металлическим якорем и импульсный источник энергии на основе мощного импульсного МГД-генератора и повышающего ток трансформатора. Исследуются возможности такой схемы для разгона тел массой 7 т до скоростей ≈ 150 км/ч при максимально допустимом ускорении $15g$. Математическая модель описывает согласованную работу устройства, начиная с подключения импульсного МГД-генератора в режиме холостого хода к первичной обмотке трансформатора и до момента разгона дрона до заданной скорости взлета. С помощью предложенной модели исследована эффективность электромеханического преобразования энергии в предложенной схеме катапульти, определены параметры основных элементов устройства, включая длину разгонного участка катапульти и максимальное ускорение дрона при разгоне.

Ключевые слова: *МГД-генератор, вольт-амперная характеристика, повышающий трансформатор, многорельсовый ускоритель, скорость взлета, длина разгона, математическое моделирование, параметрический анализ.*

В течение последнего десятилетия в ряде промышленно развитых стран разрабатываются и испытываются электромагнитные ускорители (катапульти) для запуска самолетов палубной авиации с авианосцев и тяжелых авианесущих крейсеров. На судах только этих классов возможно размещение устройств разгона самолетов со взлетной массой 30–40 т. Так, разгонный участок электромагнитной катапульти (EMALS) авианосца «Gerald R. Ford» [1] имеет длину 91 м. Сокращение разгонной части катапульти ограничено величиной допустимого пикового ускорения для пилотируемого самолета, примерно равного $7g$. Даже при оптимальном режиме разгона с постоянным ускорением $7g$ до взлетной скорости 250 км/ч длина разгонного участка составляет ≈ 35 м. Реальная длина разгонной части катапульти в разы больше из-за конструктивных особенностей индукционного ускорителя, состоящего из нескольких разнесенных по трассе последовательно включаемых разгонных блоков. При запуске тяжелых беспилотных летательных аппаратов (дронов) величина предельно допустимого ускорения обусловлена его динамической прочностью и составляет не менее $15g$, а взлетная скорость дрона заметно ниже, чем у самолета за счет его конструктивных особенностей. Это позволяет производить запуск тяжелого дрона с помощью моноблочного ускорителя, что в разы сокращает длину разгонного участка катапульти. При оптимальном

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Программы повышения конкурентоспособности ТГУ, проекты 8.2.05.2020 и 8.2.10.2020

режиме разгона с ускорением 15 g длина ускорителя при взлетной скорости дрона 150 км/ч составит $\approx 6\text{ м}$. Указанные особенности электромагнитных катапульт для запуска тяжелых дронов позволят располагать их на относительно малоразмерных судах автономного плавания. С учетом развития Арктической зоны России и необходимостью защиты ее природных ресурсов актуальной задачей является разработка и создание судов ледового класса с возможностями оперативного запуска летательных аппаратов различного назначения с использованием автономных источников электрической энергии высокой степени готовности. В отличие от накопителя катапульты авианосца «Gerald R. Ford», заряжаемого от основной энергетической установки авианосца в течение 45 с при отключении других потребителей [2], предлагаемый генератор [3] представляет собой автономный импульсный источник энергии с постоянной оперативной готовностью к работе.

Общая схема и особенности работы катапульты

Моделируемая электромагнитная катапульта состоит из трех основных функциональных узлов: генератора электрической энергии, накопителя-преобразователя энергии и многорельсового ускорителя [4] с металлическим якорем, выполняющим функцию электродинамического поддона, разгоняющего дрон.

Общая схема катапульты приведена на рис. 1. Генератором электрической энергии является мощный импульсный МГД-генератор на твердом плазмобразующем топливе [5]. В качестве преобразователя энергии рассматривается трансформатор с повышающей ток вторичной обмоткой, к которой подключен рельсовый ускоритель. Традиционные рельсовые ускорители, имеющие одну пару направляющих рельсов, обладают низкой погонной индуктивностью, что обычно компенсируется заметным увеличением пропускаемого тока. Погонная индуктивность ускорителей из нескольких индуктивно связанных пар рельсов [6] существенно выше, что позволяет значительно уменьшить ток при сохранении силы, ускоряющей якорь. Тыльные торцы рельсов ускорителя гальванически соединены по диагонали, как показано на рис. 1. Такое соединение обеспечивает последовательное прохождение тока по каждой паре рельсов и замыкающих их токосъемных скоб якоря. Якорь I состоит из n токосъемных скоб в виде «ласточкиного хвоста», каждая из которых замыкает советующую пару рельсов 2. Все скобы размещены в жестком неэлектропроводном поддоне с зацепом для разгона дрона. Рельсы одной полярности электроизолированы друг от друга.

Работа начинается с зажигания плазмобразующего топлива в камере генератора плазмы (ГП). В момент выхода МГД-генератора на режим холостого хода его электроды с помощью ключа K_1 подключаются к первичной обмотке L_1 трансформатора. Трансформатор с подключенным к нему ускорителем является активно-индуктивной нагрузкой для МГД-генератора. Накопление и преобразование электрической энергии в обмотках трансформатора происходят во время нарастания тока в его первичной обмотке, т.е. в процессе выхода МГД-генератора на максимальную мощность. Предполагается, что заряд плазмобразующего топлива сгорает на заключительной стадии разгона дрона. Перед завершением работы МГД-генератора катапульта переводится в режим «кроубар» [7] ключом K_2 , который замыкает первичную обмотку трансформатора на балластное сопротивление R_1 , которое утилизирует большую часть остаточной магнитной энергии

трансформатора и ускорителя. После начала механического торможения якоря выходные торцы каждой пары рельсов гальванически замыкаются на сопротивления (на рис. 1 не показаны) до полного обесточивания катапульты перед следующим запуском.

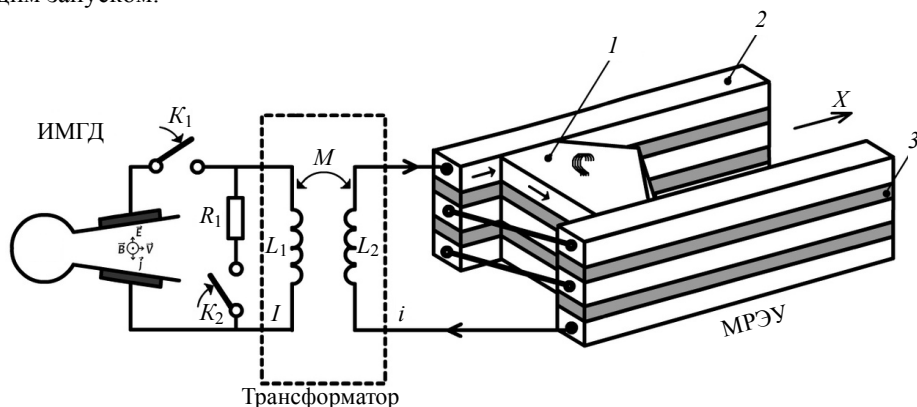


Рис. 1. Общая схема электромагнитной катапульты: ИМГДГ – импульсный МГД-генератор; ГП – генератор плазмы; МРЭУ – многорельсовый электродинамический ускоритель; K_1, K_2 – быстродействующие замыкающие ключи; R_1 – балластное сопротивление; L_1, L_2, M – индуктивности обмоток трансформатора и их взаимная индуктивность; $I(t), i(t)$ – токи в обмотках трансформатора; 1 – металлический якорь; 2 – направляющие рельсы-электроды; 3 – изоляторы

Fig. 1. General diagram of an electromagnetic catapult: ИМГДГ is the pulsed MHD generator; ГП is the plasma generator; МРЭУ is the multi-rail electrodynamic accelerator; K_1, K_2 are the high-speed closing keys; R_1 is the ballast resistance; L_1, L_2, M are the inductances of the transformer windings and their mutual inductance; $I(t), i(t)$ are the currents in the transformer windings; 1, a metal anchor; 2, guide rails-electrodes; and 3, insulators

Таким образом, с момента выхода МГД-генератора на режим холостого хода процесс катапультирования дрона включает в себя три последовательных этапа. На первом этапе происходит накопление магнитной энергии трансформатором при неподвижном якорь. Сцепка «якорь – дрон» начинает ускоряться в момент t_1 , когда действующая на якорь электромагнитная сила достигает значения «форсирования» F_{sp} . На втором этапе дрон разгоняется при работающем МГД-генераторе до момента t_2 перехода в режим «кρουбар». Финишное ускорение дрона происходит на третьем этапе за счет накопленной трансформатором магнитной энергии до начала механического торможения якоря.

Постановка задачи

Электрические схемы замещения для катапульты на каждом из трех этапов ее работы приведены на рис. 2. Наклонная стрелка указывает на изменение соответствующей величины во времени.

Вольт-амперная характеристика МГД-генератора моделируется квадратичной зависимостью

$$U(I) = U_0 - rI + qI^2, \quad (1)$$

где U_0 – напряжение холостого хода генератора; r и q – параметры внутреннего сопротивления МГД-канала.

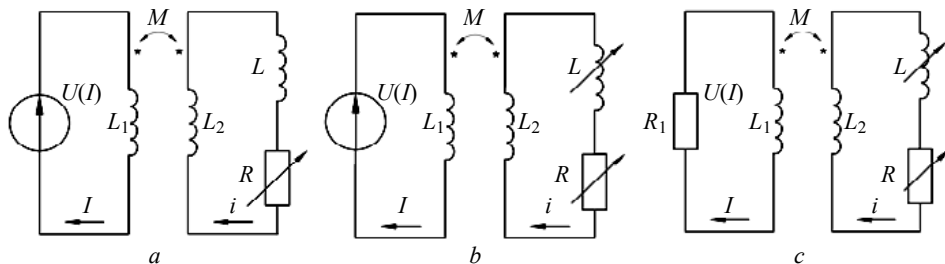


Рис. 2. Электрические цепи на трех этапах работы катапульты: *a* – до момента t_1 «форсирования» дрона; *b* – ускорение дрона с работающим МГД-генератором до момента t_2 ; *c* – режим «кроубар» до момента t_3

Fig. 2. Electric circuits at the three stages of catapult operation: (*a*) before the drone "forcing" instant t_1 ; (*b*) acceleration of the drone with an operating MHD generator up to a time instant of t_2 ; and (*c*) "crowbar" mode till the instant of t_3

Индуктивности обмоток трансформатора L_1 и L_2 , а также их взаимная индуктивность M рассчитываются по следующим формулам:

$$L_1 = \frac{2W_0}{(1-k_c^2)I_m^2}, \quad L_2 = \frac{2k_c^2 W_0}{(1-k_c^2)i_m^2}, \quad M = \frac{2k_c^2 W_0}{(1-k_c^2)I_m|i_m|}, \quad k_c = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}, \quad (2)$$

где I_m – предельно допустимое значение тока в МГД-генераторе; i_m – максимальное значение тока во вторичной обмотке; W_0 – магнитная энергия трансформатора при токах I_m и i_m ; k_c – коэффициент связи его обмоток. Значение $|i_m|$ определяется из условия предельно допустимого ускорения для дрона:

$$|i_m| = \sqrt{2m a_m / \chi},$$

где χ – погонная индуктивность ускорителя; $m = m_a + m_d$ – масса сцепки «якорь-дрон». Обмотки трансформатора предполагаются сверхпроводящими. Такое состояние обмоток из сверхчистой меди практически достигается при температуре жидкого водорода [8].

Индуктивность ускорителя L зависит от положения якоря x :

$$L(x) = L_0 + \chi(x + l_0) + \gamma - \delta \exp[-\varepsilon(x + l_0)], \quad (3)$$

где L_0 – индуктивность токоподводящих шин; l_0 – расстояние между тыльным торцом ускорителя и начальным положением якоря $x(t=0) = 0$; γ , δ , ε – постоянные коэффициенты в выражении для индуктивности системы «якорь – обратные провода».

Сопротивление ускорителя R описывается следующим дифференциальным уравнением:

$$\frac{dR(t)}{dt} = \frac{2n\eta_0}{S} u(t) + \alpha i(t)^2 R(t), \quad (4)$$

где t – время; n – число пар рельсов в ускорителе; η_0 – удельное сопротивление материала рельсов при начальной температуре T_0 ; S – площадь поперечного сечения направляющего рельса; $\alpha = \eta_0 \beta / \rho c S^2$; ρ – плотность; c – удельная теплоёмкость; β – температурный коэффициент материала рельсов; u – скорость якоря.

Уравнение (4) получено при следующих предположениях: нагрев рельсов в ускорителе определяется протекающим по ним током $i(t)$, влияние теплопроводности и теплоотдачи на распределение температуры $T(t, x)$ в рельсах пренебрежи-

мо мало, удельное сопротивление материала рельсов является линейной функцией температуры [7]: $\eta(T) = \eta_0 (1 + \beta(T - T_0))$.

Уравнения движения сцепки «якорь – дрон» имеют вид

$$m \frac{du(t)}{dt} = F(t) + F_{tr} - F_f, \quad \frac{dx(t)}{dt} = u(t), \quad F(t) = \frac{1}{2} \frac{dL(x(t))}{dx} i^2(t), \quad (5)$$

где $F(t)$ – электромагнитная сила, ускоряющая якорь; F_{tr} – тяга двигателей дрона; F_f – сила трения якоря в ускорителе.

При работающем МГД-генераторе электротехнические уравнения катапульты следующие:

$$L_1 \frac{dI}{dt} + M \frac{di}{dt} = U(I),$$

$$[L_2 + L(t)] \frac{di}{dt} + \left[\left(\chi + \delta \varepsilon e^{-\varepsilon(x(t)+l_0)} \right) u(t) + R(t) \right] i + M \frac{dI}{dt} = 0. \quad (6)$$

На первом этапе при неподвижном якоре процесс описывается с помощью (4) и (6) с учетом (1) – (3) при $x = 0$, $u = 0$, $I(0) = i(0) = 0$. Второй этап работы катапульты при работающем МГД-генераторе моделируется уравнениями (4) – (6) при начальных значениях токов, определяемых в момент t_1 окончания первого этапа работы катапульты. На третьем заключительном этапе работы катапульты в режиме «кρούбар» электротехнические уравнения преобразуются к виду

$$L_1 \frac{dI}{dt} + R_1 I + M \frac{di}{dt} = 0, \quad [L_2 + L(t)] \frac{di}{dt} + [\chi u(t) + R(t)] i + M \frac{dI}{dt} = 0, \quad (7)$$

поскольку работа МГД-генератора предполагается завершенной, а эффект «обратных проводов» на ускорение сцепки пренебрежимо мал. Разгон дрона завершается в момент t_3 . Начальными условиями для третьего этапа разгона служат значения соответствующих величин в момент t_2 срабатывания ключа K_2 при завершении второго этапа работы катапульты.

Результаты расчетов

Моделирование процесса разгона дрона проведено для электромагнитной катапульты с параметрами: импульсный МГД-генератор мощностью 50 МВт [3] – $U_0 = 1435$ В, $r = 0.0216$ Ом, $q = 0.127 \cdot 10^{-6}$ Ом/А²; трансформатор – $L_1 = 0.078$ Гн, $L_2 = 0.59 \cdot 10^{-3}$ Гн, $M = 6.1 \cdot 10^{-3}$ Гн, $k_c = 0.9$, $L_0 = 0.7 \cdot 10^{-6}$ Гн, $R_1 = 2.5$ Ом; ускоритель – $n = 5$, $\chi = 14.44 \cdot 10^{-6}$ Гн/м, $S = 0.035$ м², зазор между рельсами одной пары $l = 0.4$ м, $l_0 = 0.1$ м, $\gamma = 4.7 \cdot 10^{-6}$ Гн, $\delta = 3.2 \cdot 10^{-6}$ Гн, $\varepsilon = 2.6$ м⁻¹, $\rho = 8.9 \cdot 10^3$ кг·м⁻³, $\beta = 2 \cdot 10^{-3}$ град⁻¹, $C = 0.39 \cdot 10^3$ Дж·кг⁻¹·град⁻¹; сцепка якорь – дрон – $m = 7 \cdot 10^3$ кг, $F_{sp} = 590$ кН, $F_{tr} = 15$ кН, $F_f = 1$ кН; моменты завершения этапов работы катапульты – $t_1 = 0.21$ с, $t_2 = 0.64$ с, $t_3 = 0.65$ с.

Расчеты погонной индуктивности ускорителя χ и индуктивности системы «обратные провода – якорь» проведены методом прямоугольных параллелепипедов с равномерным распределением токов по сечениям проводников [9].

Основное ускорение дрона происходит при работающем МГД-генераторе на втором этапе работы катапульты. Этот этап является наиболее продолжительным, его длительность – 0.43 с. На рис. 3 приведены результаты расчета скорости дрона $u(t)$ и его положения в ускорителе $x(t)$. На длине разгона ≈ 10 м якорь разгоняет дрон до скорости 157 км/ч.

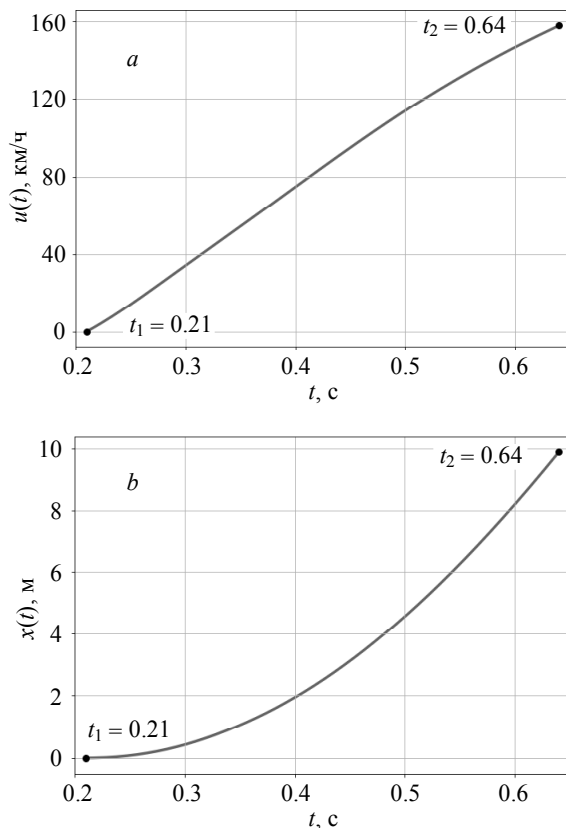


Рис. 3. Параметры разгона дрона при работающем МГД-генераторе:
a – скорость; *b* – положение

Fig. 3. Drone acceleration parameters in the course of the operating MHD generator:
 (a) speed and (b) position

На рис. 4 приведена зависимость ускорения дрона от времени при работающем МГД-генераторе (2-й этап работы катапульти). Пиковая величина ускорения равна 11.5 g, что технически вполне допустимо. Половина времени этапа ≈ 0.2 с реализуется близкий к равноускоренному режим разгона с ускорением ≈ 11.2 g. Такой режим ускорения на начальном участке ≈ 0.15 м разгона дрона обусловлен эффектом «обратных» проводов ускорителя. В результате на якорь действует дополнительная электромагнитная сила, экспоненциально убывающая по мере его удаления от тыльного торца ускорителя (см. рис. 1).

На рис. 5 приведены расчетные осциллограммы токов в обмотках трансформатора на первых двух этапах работы катапульти. Ток во вторичной обмотке и ускорителе достигает своего максимального значения на 0.06 с раньше тока в первичной обмотке, а убывает значительно быстрее: на 20 % по сравнению с 4 % в первичной обмотке к моменту $t_2 = 0.64$ с. Это обусловлено увеличением индуктивно-активной нагрузки на вторичной обмотке трансформатора в процессе разгона дрона.

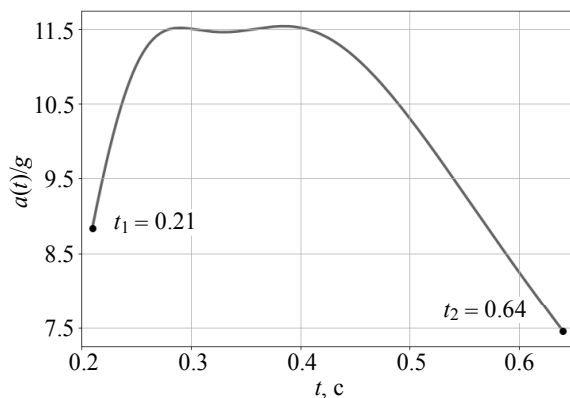


Рис. 4. Ускорение дрона на втором этапе разгона
Fig. 4. Drone acceleration in the second stage

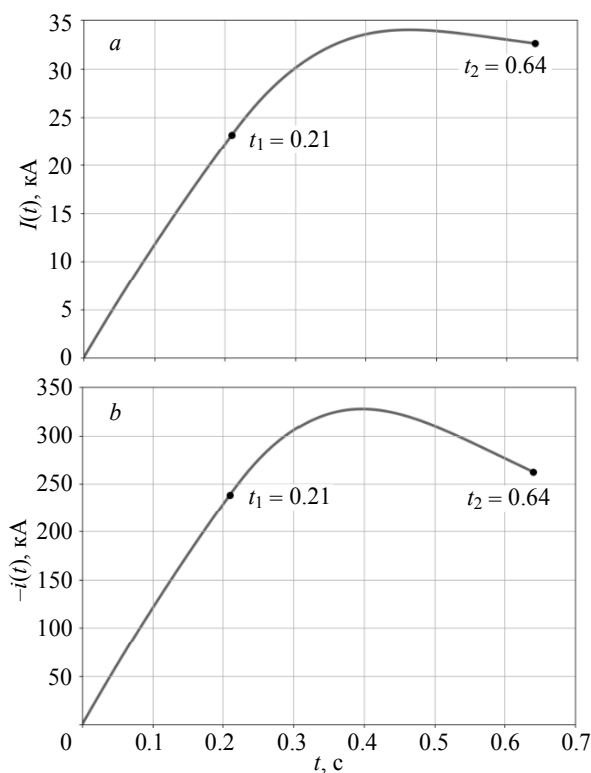


Рис. 5. Расчетные осциллограммы токов в катапульте:
a – ток в МГД-генераторе и первичной обмотке трансформатора, *b* – ток во вторичной обмотке трансформатора и ускорителе

Fig. 5. Calculated oscillograms of currents in the catapult:
(*a*) current in the MHD generator and in the primary winding of the transformer, (*b*) current in the secondary winding of the transformer and in the accelerator

Третий этап работы катапульты наиболее короткий – 10 мс. За это время приращение скорости дрона равно 1.1 км/ч на пути 0.4 м, при этом ускорение сцепки уменьшается с 7.5 g до 1.2 g. Основная функция этого этапа – обесточивание трансформатора и ускорителя путем утилизации их магнитной энергии на балластном сопротивлении R_1 , включаемом в разрыв первичной обмотки трансформатора в момент t_2 . В течение 10 мс ток в первичной обмотке трансформатора уменьшается в 2.5 раза до 13 кА, а во вторичной обмотке и ускорителе – в 2.7 раза до 99 кА. На рис. 6 показано изменение магнитной энергии в системе «трансформатор – ускоритель» на третьем этапе работы катапульты.

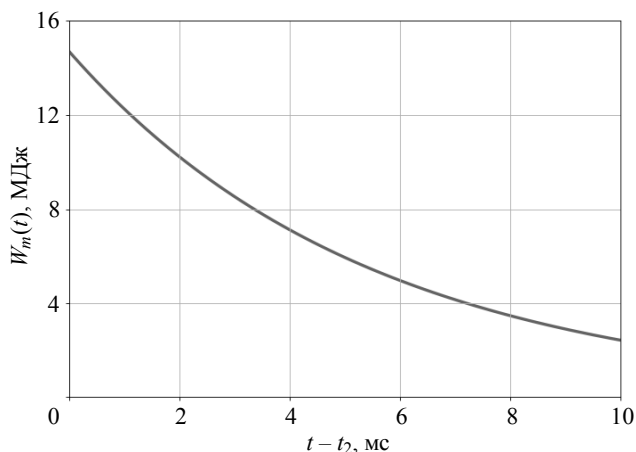


Рис. 6. Изменение величины магнитной энергии в системе «трансформатор – ускоритель» при включенном балластном сопротивлении R_1

Fig. 6. Magnetic energy variation in a "transformer – accelerator" system with the ballast resistance R_1 switched on

За счет утилизации на сопротивлении R_1 магнитная энергия системы сокращается в 6 раз до величины 2.4 МДж. Полное обесточивание катапульты происходит после подключения балластных сопротивлений к выходным сечениям каждой пары рельсов ускорителя.

Оценкой эффективности процесса электромагнитного ускорения дрона может служить отношение его кинетической энергии к энергии МГД-генератора, затраченной на питание активно-индуктивной нагрузки «трансформатор – ускоритель»:

$$\lambda = 0.5 m u^2(t_2) / \int_0^{t_2} I(\tau) U(\tau) d\tau,$$

где U – выходное напряжение МГД-генератора. В рассчитанном варианте $\lambda = 0.225$, то есть 22.5 % затраченной генератором электрической энергии преобразовано в кинетическую энергию сцепки «якорь – дрон». С учетом того, что рассчитанный вариант катапульты не является решением оптимизационной задачи, можно рассматривать предложенную схему катапульты как приемлемо эффективную по электромеханическому преобразованию энергии ее первичного источника – МГД-генератора.

Выводы

Методом математического моделирования исследованы особенности работы электромагнитной катапульти с двухступенчатым импульсным накопителем энергии и многорельсовым ускорителем с металлическим якорем. С помощью такого устройства тяжелый дрон с взлетной массой ≈ 7 т разгоняется до скорости ≈ 160 км/ч на длине ≈ 10 м с максимальным ускорением ≈ 12 g. Анализ результатов расчёта указывает на эффективную работоспособность моделируемого устройства катапульти и отдельных её элементов, включая автономный импульсный накопитель энергии. Величина разгонной части ускорителя и оценочные значения весо-габаритных параметров накопителя энергии [3] указывают на возможность размещения катапульти рассмотренного типа на малоразмерных (относительно авианосцев и авианесущих крейсеров) судах автономного плавания.

ЛИТЕРАТУРА

1. White R. Electromagnetic Aircraft Launch System (EMALS). 2020. URL: <https://navalnews.net/electromagnetic-aircraft-launch-system-emals/>.
2. Electromagnetic Aircraft Launch System – EMALS. 2020. URL: <https://www.globalsecurity.org/military/systems/ship/systems/emals.htm>.
3. Butov V.G., Afonin A.G., Sinyayev S.V., Solonenko V.A., Panchenko V.P., Yakushev A.A., Shvetsov G.A., Nosov G.V., and Nosova M.G. Compact electric energy storage system based on a powerful pulsed MHD generator // PPC 2017 Paper Index | IEEE Pulsed Power Conference, June 18–22, Brighton, UK. P. 404–408. DOI: 10.1109/PPC.2017.8291283.
4. Poltanov A. E., Kondratenko A. K., Glinov A. P. and Ryndin V. N. Multi-turn railguns: concept analysis and experimental results // IEEE Transactions on Magnetics. 2001. V. 37. No. 1. P. 457–461. DOI: 10.1109/20.911876.
5. Бреев В.В., Губарев А.В., Панченко В.П. Сверхзвуковые МГД-генераторы / под ред. А.В. Губарева. М.: Энергоатомиздат, 1988. 240 с.
6. Chumakov V., Stolarchuk O. Simulation and comparative analysis of electrodynamic railguns for large masses acceleration: Railguns without biasing system // American Journal of Aerospace Engineering. 2016. V. 4. No. 2. P. 22–26. DOI: 10.11648/j.ajae.20170402.12.
7. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. М.: Мир, 1972. 392 с.
8. Бут Д.А., Алиевский Б.Л., Мизюрин С.Р., Васюкевич П.В. Накопители энергии. М.: Энергоатомиздат, 1991. 400 с.
9. Синяев С.В. Метод расчёта силовых и электромагнитных параметров сложных систем проводников в задачах электродинамики // Тезисы докладов 3-го Сибирского конгресса по прикладной и индустриальной математике, Новосибирск, 22–27 июня 1998 г. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1998. Ч. 3. С. 40–41.

Поступила в редакцию 21.12.2020

Baganov A.P., Butov V.G., Nosov G.V., Nosova M.G., Sinyayev S.V., Solonenko V.A. (2021) AN ELECTROMAGNETIC CATAPULT FOR LAUNCHING HEAVY UAVs (DRONES) FROM SMALL VESSELS. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika* [Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics]. 71. pp. 25–34

DOI 10.17223/19988621/71/3

Keywords: MHD generator, volt-ampere characteristic, step-up transformer, multi-rail accelerator, take-off speed, acceleration length, mathematical modeling, parametric analysis.

The paper presents the results of mathematical modeling of the operation of a novel electromagnetic catapult design. The main elements of the latter are a single-section multi-rail accelerator with a metal armature and a pulsed energy source based on the powerful pulsed MHD generator and current-increasing transformer. The possibilities of such a scheme for accelerating

bodies weighing 7 tons to speeds of about 150 km/h at a maximum permissible acceleration of 15 g are investigated. The mathematical model describes the coordinated operation of the device, starting with connecting of the pulsed MHD generator in idle mode to the primary winding of the transformer and up to the moment when the drone accelerates to a given takeoff speed. Using the proposed model, the efficiency of the electromechanical energy conversion in the developed catapult scheme is tested. The parameters of the main elements of the device, namely the length of the acceleration section of the catapult and the maximum acceleration of the drone, are determined.

Financial support. This work was performed within the Program for improving the competitiveness of Tomsk State University (grant No. 8.2.05.2020 and grant No. 8.2.10.2020).

Anton P. BAGANOV (Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: mr.snowroad@mail.ru

Vladimir G. BUTOV (Doctor of Physics and Mathematics, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: bvg@niipmm.tsu.ru

Gennadiy V. NOSOV (Candidate of Technical Sciences, Energy Institute, Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: nosov@tpu.ru

Mariya G. NOSOVA (Candidate of Physics and Mathematics, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russian Federation). E-mail: nosovamgm@gmail.com

Sergey V. SINYAEV (Candidate of Physics and Mathematics, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: ssv@niipmm.tsu.ru

Viktor A. SOLODENKO (Candidate of Physics and Mathematics, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: vik@niipmm.tsu.ru

REFERENCES

1. White R. (2020) *Electromagnetic Aircraft Launch System (EMALS)*. Access mode: <https://navalnews.net/electromagnetic-aircraft-launch-system-emals/>.
2. *Electromagnetic Aircraft Launch System – EMALS*. Access mode: <https://www.globalsecurity.org/military/systems/ship/systems/emals.htm>.
3. Butov V.G., Afonin A.G., Sinyayev S.V., Solonenko V.A., Panchenko V.P., Yakushev A.A., Shvetsov G.A., Nosov G.V., Nosova M.G. (2017) Compact electric energy storage system based on a powerful pulsed MHD generator. *Proceedings of the 21st International Conference on Pulsed Power. IEEE Xplore. Brighton, UK*. pp. 404–408. DOI: 10.1109/PPC.2017.8291283.
4. Poltanov A.E., Kondratenko A.K., Glinov A.P., Ryndin V.N. (2001) Multi-turn railguns: concept analysis and experimental results. *IEEE Transactions on Magnetics*. 37(1). pp. 457–461. DOI: 10.1109/20.911876.
5. Breev V.V., Gubarev A.V., Panchenko V.P. (1988) *Sverkhzvukovye MGD-generatory* [Supersonic MHD generators]. Moscow: Energoatomizdat.
6. Chumakov V., Stolarchuk O. (2016) Simulation and comparative analysis of electrodynamic railguns for large masses acceleration: railguns without biasing system. *American Journal of Aerospace Engineering*. 4(2). pp. 22–26. DOI: 10.11648/j.ajae.20170402.12.
7. Knoepfel H. (1970) *Pulsed High Magnetic Fields: Physical Effects and Generation Methods Concerning Pulsed Fields Up to the Megaoersted Level*. London: North-Holland.
8. But D.A., Alievskiy B.L., Mizyurin S.R., Vasyukevich P.V. (1991) *Nakopiteli energii* [Energy accumulators]. Moscow: Energoatomizdat.
9. Sinyayev S.V. (1998) Metod rascheta silovykh i elektromagnitnykh parametrov slozhnykh sistem provodnikov v zadachakh elektro-dinamiki [Method for calculating the power and electromagnetic parameters of complex systems of conductors in problems of electrodynamics]. *Tezisy dokladov 3-go Sibirskogo kongressa po prikladnoy i industrialnoy matematike*. Novosibirsk: Izdatel'stvo SO RAN. 3. pp. 40–41.

Received: December 21, 2020