

ИНДУКЦИОННО-ИМПУЛЬСНОЕ ГАШЕНИЕ СКОРОСТИ ПОДВИЖНОГО ОБЪЕКТА

Запропонована концепція та розроблена математична модель індукційно-імпульсного гасителя швидкості рухомого об'єкту, на зовнішній поверхні якого закріплений циліндричний яркор, що проходить крізь внутрішній отвір нерухомого індуктора. Шляхом вибору відстані між аксіально центральними площинами ярка та індуктора в момент початку збудження індуктора можна забезпечити мінімальні значення швидкості ярка та рухомого об'єкту, висоти підскоку ярка і перевищень температур активних елементів.

Предложена концепция и разработана математическая модель индукционно-импульсного гасителя скорости подвижного объекта, на внешней поверхности которого закреплен электропроводящий цилиндрический яркор, проходящего через внутреннее отверстие неподвижного индуктора. Путем выбора расстояния между аксиально центральными плоскостями ярка и индуктора в момент начала возбуждения индуктора можно обеспечить минимальные значения скорости ярка и подвижного объекта, высоты подскока ярка и превышений температур активных элементов.

ВВЕДЕНИЕ

Во многих технических устройствах с линейным движением исполнительного элемента возникает задача плавного снижения (гашения) его скорости. Такие задачи возникают, например, в линейных электродвигателях или приводах циклического действия, у которых яркор с исполнительным элементом совершают возвратно-поступательное движение [1, 2]. Совершая полезную работу при отталкивании от индуктора, при обратном ходе яркор с исполнительным элементом под действием, например, возвратной пружины механически соударяется с индуктором.

Сходная проблема виброакустического взаимодействия возникает и в баллистическом гравиметре с симметричной схемой измерения ускорения свободного падения. В этом устройстве осуществляется вертикальное подбрасывание и последующее свободное падение исполнительного элемента с оптическим отражателем, который взаимодействует с неподвижным лазерным интерферометром [3]. Гашение скорости падающего элемента должно быть плавным, поскольку любые виброакустические процессы негативно влияют на точностные показатели гравиметра [4].

Проблема гашения скорости подвижного объекта возникает также в различных устройствах, предназначенных для испытания ответственной аппаратуры на ударные воздействия, в ударно-механических и вибрационных системах и др.

При отсутствии системы гашения скорости возникают ударно-механические взаимодействия подвижного исполнительного объекта с неподвижной частью устройства. Вследствие этого ускоренно снижаются параметры устройства и ухудшаются функциональные характеристики, что может привести к преждевременному выходу его из строя. Кроме того, возникает значительный акустический шум, ухудшающий экологическую обстановку.

Известны гасители скорости пневматического, гидравлического, механического и др. типов [5, 6]. Однако в этих устройствах осуществляется взаимодействие исполнительного объекта с неподвижной частью устройства через соответствующую среду или элементы (газ, жидкость, контактно-механические устройства и др.). Одним из перспективных способов

гашения скорости подвижного объекта является бесконтактное магнитное взаимодействие подвижного и неподвижного элементов.

Магнитное торможение можно реализовать за счет сил электромагнитного притяжения, для чего на подвижном объекте, движущемся вдоль оси в направлении неподвижного индуктора, закрепляют ферромагнитный сердечник. Для обеспечения торможения движущегося объекта индуктор должен возбуждаться в момент, когда аксиально центральная плоскость ферромагнитного сердечника находится за аналогичной плоскостью индуктора относительно направления перемещения. Однако такое перемещение подвижного объекта не всегда допустимо по техническим условиям эксплуатации устройства, поскольку объект выходит за пределы неподвижного индуктора. Кроме того, ферромагнитный сердечник может существенно увеличить массогабаритные показатели устройства.

Магнитное торможение также можно реализовать за счет индукционного отталкивания, для чего на подвижном объекте закрепляют тонкостенный яркор, выполненный из электропроводящего материала. Для обеспечения торможения индуктор должен возбуждаться в момент, когда аксиально центральная плоскость электропроводящего ярка находится до аналогичной плоскости индуктора относительно направления перемещения. Тормозное устройство на основе индукционного отталкивания обладает существенно меньшими массогабаритными показателями по сравнению с устройством на основе электромагнитного притяжения.

Наиболее целесообразно осуществлять возбуждение индуктора от импульсного источника, например емкостного накопителя энергии (ЕНЭ). Однако при неправильном выборе параметров индукционно-импульсного гасителя скорости (ИИГС) подвижный объект может недостаточно снизить скорость или приобрести противоположно направленную скорость значительной величины с последующим механическим взаимодействием с неподвижной частью устройства.

До настоящего времени индукционно-импульсное взаимодействие неподвижного индуктора и подвижного ярка в основном использовалось для ускорения, а не для плавного торможения подвижного объекта [7]. При индукционном ускорении не сущест-

вует проблемы выбора момента возбуждения индуктора, начального расположения якоря относительно индуктора и их обоснования в зависимости от параметров ускоряемого объекта.

Целью статьи является обоснование момента начала возбуждения, формы и величины импульса тока индуктора ИИГС подвижного объекта с закрепленным на нем якорем в зависимости от скорости и массы объекта.

КОНСТРУКТИВНАЯ СХЕМА ИИГС

Рассмотрим ИИГС, состоящий из коаксиально расположенного неподвижного индуктора 1 и якоря 2, установленного на наружной поверхности подвижного объекта 3. На рис. 1 представлены конструктивная (а) и электрическая (б) схемы ИИГС. Индуктор установлен на основании 4 таким образом, что объект 3 с закрепленным якорем 2, падающие вертикально вниз со скоростью V_0 под действием силы тяжести, могут свободно пройти через внутреннее окно индуктора. Рабочий процесс начинается в момент, когда аксиально центральная плоскость 5 якоря находится над аксиально центральной плоскостью 6 индуктора на расстоянии ΔZ_0 . Емкостной накопитель энергии (ЕНЭ) C через преобразователь 7 заряжается от сети с напряжением U . При поступлении сигнала на электронный ключ 8 индуктор 1 посредством импульсного магнитного поля индуцирует токи в электропроводящем якорю 2, который под действием электродинамических сил отталкивания f_z обеспечивает плавное торможение объекта 3.

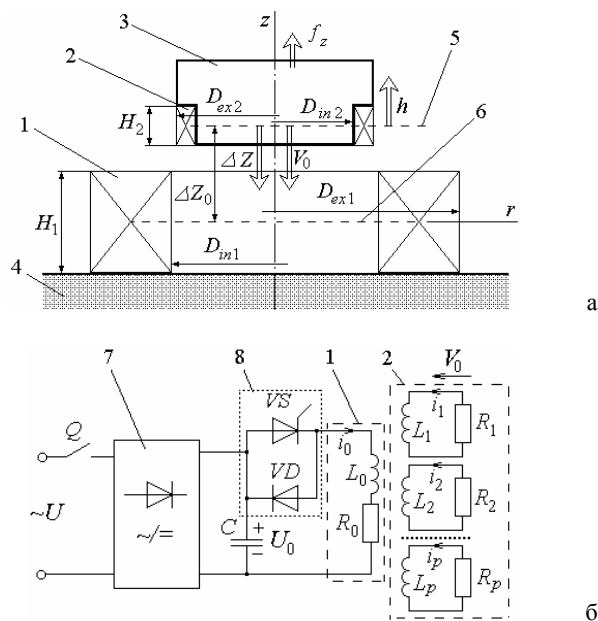


Рис. 1

В зависимости от эффективности ИИГС объект 3 может продолжить перемещение вниз на расстояние ΔZ со скоростью V или совершить обратное подбрасывание вертикально вверх на высоту h от положения, при котором начинается возбуждаться индуктор. В качестве оптимального будем рассматривать ИИГС, обеспечивающий уменьшение скорости якоря до нуля, т.е. полное гашение кинетической энергии подвижных масс при отсутствии обратного подбрасыва-

ния. Основные параметры базового ИИГС представлены в таблице. Якорь выполнен в виде медного кольца, плотно закрепленного на подвижном объекте.

Таблица

Параметр	Обозначение	Величина
Внешний диаметр индуктора, мм	D_{ex1}	90
Внутренний диаметр индуктора, мм	D_{in1}	56
Высота индуктора, мм	H_1	25
Внешний диаметр якоря, мм	D_{ex2}	54
Внутренний диаметр якоря, мм	D_{in2}	46
Высота якоря, мм	H_2	10
Количество витков индуктора, шт	N_1	100
Сечение провода индуктора, мм ²	$a \times b$	1,0 × 3,5
Масса тормозимого объекта, кг	P	0,12
Энергия ЕНЭ, Дж	W_0	20

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИИГС

Будем полагать, что индуктор и якорь индукционно-импульсного гасителя скорости расположены коаксиально, не деформируются и перемещение якоря происходит вдоль вертикальной оси z . Для сохранения общности исследования влиянием подводящих проводов и остальных элементов тормозного устройства пренебрегаем. Вспомогательные и конструкционные элементы устройства выполнены либо неметаллическими, например, из стеклотекстолита, углепластика, либо из слабопроводящего металла, например, нержавеющей стали с высоким удельным сопротивлением, и не оказывают влияния на электромагнитные процессы.

Работу ИИГС определяют электрические, механические и тепловые характеристики [8] при начальных условиях: $i_k(0)=0$ – усредненный ток k -ого активного элемента ($k=1$ – индекс индуктора, $k=2$ – индекс якоря); $\Delta z(0)=\Delta Z_0$ – взаимное осевое смещение аксиально центральных плоскостей индуктора и якоря; $u_c(0)=U_0$ – зарядное напряжение ЕНЭ; $T_k(0)=T_0$ – усредненная температура k -ого активного элемента; $V(0)=-V_0$ – начальная скорость якоря с подвижным объектом.

В ИИГС в цилиндрическом якорю возникает существенная неравномерность распределения токов, индуцированных при возбуждении индуктора от ЕНЭ. В математической модели это можно учесть путем представления сплошного (массивного) якоря в виде совокупности упорядочено расположенных по его сечению p коаксиальных короткозамкнутых контуров малого поперечного сечения. В этом случае электрические процессы в ИИГС можно описать системой уравнений [9]:

$$\begin{aligned}
 R_0 i_0 + L_0 \frac{di_0}{dt} + \frac{1}{C} \int_0^t i_0 dt + M_{01}(z) \frac{di_1}{dt} + \dots \\
 \dots + M_{0p}(z) \frac{di_p}{dt} + V(t) \left(i_1 \frac{dM_{01}}{dz} + \dots + i_p \frac{dM_{0p}}{dz} \right) = U_0; \\
 R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M_{01}(z) \frac{di_0}{dt} + M_{12} \frac{di_2}{dt} + \dots + M_{1p} \times \\
 \times \frac{di_p}{dt} + V(t) \left(i_0 \frac{dM_{01}}{dz} + i_2 \frac{dM_{12}}{dz} + \dots + i_p \frac{dM_{1p}}{dz} \right) = 0; \\
 R_p i_p + L_p \frac{di_p}{dt} + M_{0p}(z) \frac{di_0}{dt} + M_{1p} \frac{di_1}{dt} + \dots \\
 \dots + M_{p-1p} \frac{di_{p-1}}{dt} + V(t) \left(i_0 \frac{dM_{0p}}{dz} + i_1 \frac{dM_{1p}}{dz} + \dots + i_{p-1} \frac{dM_{p-1p}}{dz} \right) = 0,
 \end{aligned} \quad (1)$$

где i_0 , L_0 , R_0 – соответственно ток, индуктивность и сопротивление индуктора; i_p , L_p , R_p – соответственно ток, индуктивность и сопротивление элементарного короткозамкнутого p -го контура якоря, перемещающегося со скоростью $V(t)$ вдоль оси z относительно индуктора; M_{jp} – взаимоиндуктивность между соответствующими токовыми контурами ($j \neq p$); C , U_0 – соответственно емкость и зарядное напряжение ЕНЭ.

Аксиальное торможение подвижного объекта возникает под действием импульса силы, действующего на затормаживаемый якорь

$$F_z = \int_0^t f_z(t) dt, \quad (2)$$

где $f_z(t)$ – мгновенное значение аксиальной составляющей электродинамической силы, действующей на якорь:

$$f_z(t) = i_0(t_n) \cdot \sum_p i_p(t_n) \frac{dM_{0p}}{dz}(z). \quad (3)$$

Величину перемещения ΔZ и скорости V якоря с объектом можно представить в виде рекуррентных соотношений [9]:

$$\Delta Z(t_{n+1}) = \Delta Z(t_n) + V(t_n) \Delta t + \vartheta \cdot \Delta t^2 / (P + m_2), \quad (4)$$

$$V(t_{n+1}) = V(t_n) + \vartheta \cdot \Delta t / (P + m_2), \quad (5)$$

где m_2 , P – масса якоря и подвижного объекта соответственно; $\Delta t = t_{n+1} - t_n$;

$\vartheta = i_1(t_n) i_2(t_n) \frac{dM}{dz}(z) - (P + m_2)g - 0,125\pi\gamma_a \beta_a D_{2m}^2 V^2(t_n)$, g – ускорение свободного падения; γ_a – плотность среды, в которой осуществляется перемещение объекта; β_a – коэффициент аэродинамического сопротивления.

Усредненную температуру индуктора и якоря можно описать в виде рекуррентных соотношений:

$$T_k(t_{n+1}) = \frac{R_k(T_k) \cdot i^2(t_n)}{F_a \alpha_T(T_k)} + \exp\left(-\frac{4\alpha_T(T_k) F_a \cdot \Delta t}{\pi \cdot \gamma \cdot H_k (D_{exk}^2 - D_{ink}^2) c_k^*(T_k)}\right) \times \\ \times \left(T_k(t_n) - T_0 - \frac{R_k(T_k) \cdot i^2(t_n)}{F_a \alpha_T(T_k)}\right) + T_0. \quad (6)$$

где γ , c_k^* , F_a – плотность, усредненная удельная теплоемкость и площадь поверхности охлаждения активного элемента; α_T – коэффициент теплоотдачи.

Для того чтобы рассчитать комплекс взаимосвязанных электрических, тепловых и механических процессов с учетом соответствующих функциональных нелинейных зависимостей, используем следующий подход. Весь переходный процесс при численном расчете разбивается на большое число малых интервалов времени $\Delta t = t_{n+1} - t_n$, в пределах которых все величины, считаются неизменными. Для расчета токов на численно малом временном интервале можно использовать линейные дифференциальные уравнения. Величина расчетного шага при использовании ЭВМ подбирается таким образом, чтобы она не оказывала заметного влияния на результаты расчета.

Если размер a (толщина якоря или провода индуктора) оказываются меньше глубины скин-слоя $\delta \approx 500\sqrt{\rho(T) \cdot t_1}$, где $\rho(T)$ – удельное сопротивление материала, t_1 – период первой гармоники тока, то уве-

личивается соответствующее сопротивление путем уменьшения размера a до величины δ . Блок-схема расчетного алгоритма представлена на рис. 2.

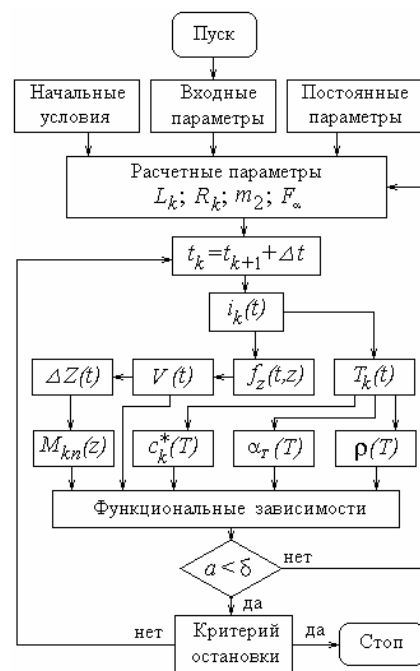


Рис. 2

Эффективность процесса электродинамического торможения оценим следующими показателями:

- минимальной (по абсолютной величине) скоростью V_m якоря и подвижного объекта по направлению к индуктору после подачи импульса возбуждения;
- минимальной высотой подбрасывания якоря h ;
- минимальными превышениями температур активных элементов $\theta_k = T_k - T_0$.

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

Рассмотрим электромеханические процессы ИИГС при использовании базового ЕНЭ с параметрами $C=250$ мкФ и $U_0=400$ В. В момент начала возбуждения индуктора скорость подвижного объекта и якоря составляет $V_0 = -2$ м/с, а расстояние между центральными плоскостями якоря и индуктора – $\Delta Z_0=14$ мм. В такой системе на якорь действует тормозная сила f_z , имеющая характер последовательно затухающих во времени импульсов (рис. 3).

Максимальное значение аксиальной силы, действующей на якорь, составляет $f_{zm}=411$ Н. Три силовых импульса, следующие с частотой примерно 1 кГц, обеспечивают величину импульса силы $F_z=0,426$ Нс. Подвижные элементы на начальном этапе продолжают перемещение на расстояние $\Delta Z=2$ мм в направлении индуктора после начала процесса торможения. При этом их скорость V начинает по абсолютной величине снижаться, достигая нулевого значения с последующим небольшим возрастанием до величины $V_m=0,321$ м/с в противоположном направлении. После получения тормозного импульса подвижные элементы подбрасываются (перемещаются в противоположном направлении) на высоту $h=3,2$ мм относительно начального положения. При этом превышение темпе-

ратуры индуктора составляет $\theta_1=19$ мК, а якоря – $\theta_2=0,43$ К. Эти значения несут существенны при работе с одиночными импульсами, но принимают предельные значения при циклической работе ИИГС.

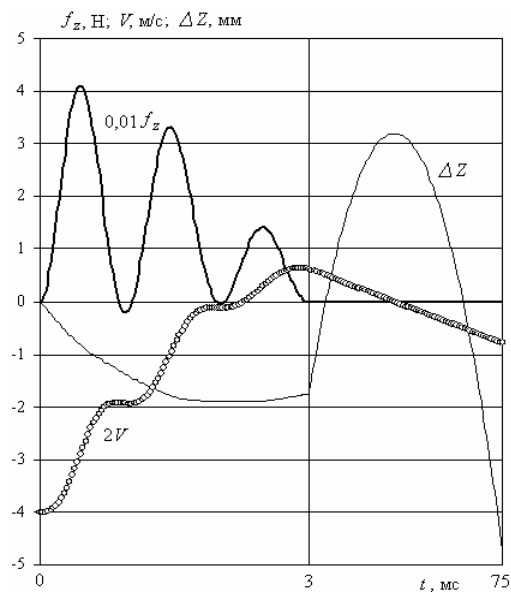


Рис. 3

При увеличении начальной скорости якоря V_0 от 2 до 3 м/с и сохранении расстояния между центральными плоскостями якоря и индуктора $\Delta Z_0=14$ мм характер механических процессов изменяется (рис. 4). Величина максимальной силы возрастает до $f_{zm}=426$ Н, но величина импульса силы снижается до $F_z=0,414$ Нс. Подвижные элементы при этом не изменяют направления перемещения ΔZ и скорости V , т.е. подбрасывания не происходит.

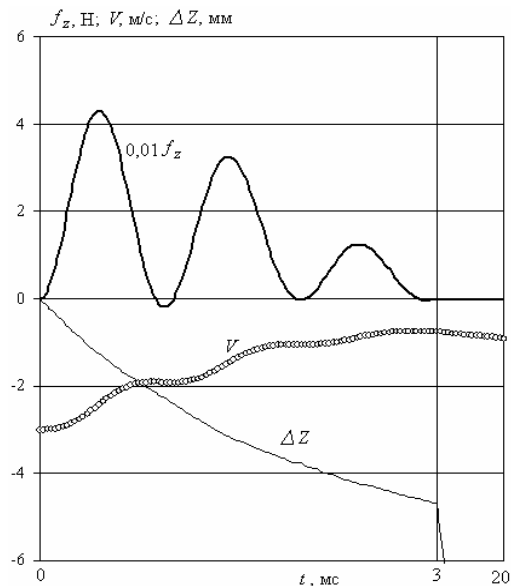


Рис. 4

Таким образом, в рассмотренном варианте ИИГС не происходит полного торможения, а наблюдается лишь частичное гашение скорости подвижного объекта. Превышение температуры индуктора уменьшается до $\theta_1=18$ мК, а якоря возрастает до $\theta_2=0,45$ К.

Если при сохранении энергии $W_0=20$ Дж увеличить емкость ЕНЭ до $C=550$ мкФ, характер электро-механических процессов изменится (фиг. 5). На якорь действует тормозная сила, имеющая характер в основном двух последовательно затухающих импульсов, следующих с частотой примерно 0,8 кГц. Максимальная сила уменьшается до $f_{zm}=342$ Н, а величина импульса силы – до $F_z=0,39$ Нс.

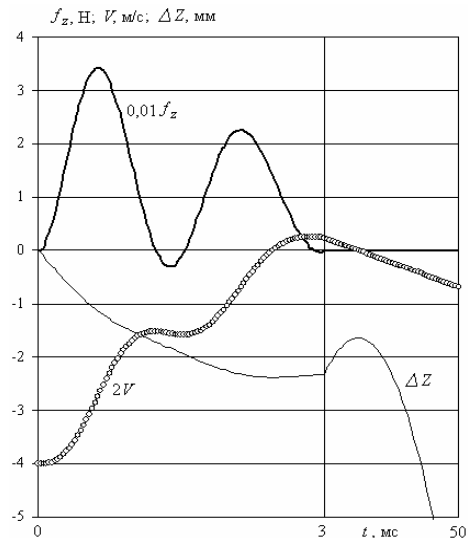


Рис. 5

Скорость V элемента (подвижный объект с якорем) изменяется от отрицательной -2 до положительной $+0,128$ м/с. После получения тормозного импульса подвижный элемент не подбрасывается на высоту h относительно начального положения. Торможения якоря с объектом практически до нулевой скорости V при удержании их относительно индуктора на определенное время можно рассматривать как наиболее благоприятное. При этом превышение температуры индуктора составляет $\theta_1=20$ мК, а якоря $\theta_2=0,39$ К.

АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ ИИГС

Рассмотрим электро-механические и тепловые показатели ИИГС в зависимости от начальной скорости V_0 подвижного объекта и расстояния между центральными плоскостями якоря и индуктора ΔZ_0 в момент начала возбуждения индуктора при использовании базового ЕНЭ. Величина максимальной силы f_{zm} при увеличении скорости V_0 подвижного объекта возрастает незначительно (рис. 6,а). Наблюдается выраженный максимум силы f_{zm} при расстоянии $\Delta Z_0 \approx 12$ мм. Величина импульса силы F_z с увеличением скорости V_0 подвижного объекта не имеет столь однозначной зависимости: при небольших значениях $\Delta Z_0=10-12$ мм с ростом скорости импульс силы F_z уменьшается, а при больших значениях $\Delta Z_0=16-20$ мм – возрастает. При изменении расстояния ΔZ_0 наблюдается максимум импульса силы, который при низких скоростях $V_0=-0,5$ м/с возникает при $\Delta Z_0=12$ мм, а при высоких скоростях $V_0=-3$ м/с – при $\Delta Z_0=16$ мм.

В результате указанных силовых воздействий на якорь подвижный объект изменяет скорость V_m следующим образом (рис. 6,б). При низких начальных скоростях, например $V_0=-0,5$ м/с, происходит изме-

нение направления скорости на противоположное, что приводит к вертикальному подбрасыванию объекта на значительную высоту – наиболее сильное ($h=166,4$ мм) при $\Delta Z_0=12$ мм. При высоких начальных скоростях, например $V_0=-3$ м/с, происходит лишь уменьшение скорости V без изменения ее направления и при отсутствии подбрасывания относительно начального положения. Наиболее сильное снижение скорости до величины $V_m=-0,68$ м/с наблюдается при $\Delta Z_0=16$ мм. Таким образом, ИИГС наиболее эффективен при начальных скоростях $V_0 \approx -2$ м/с.

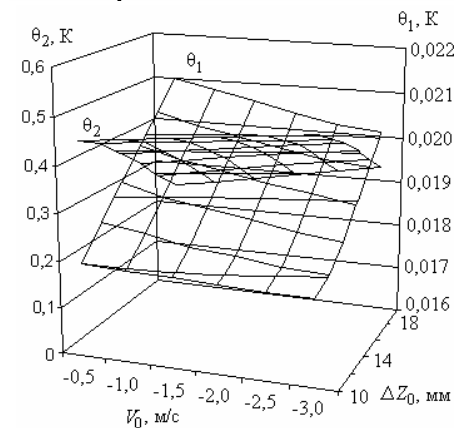
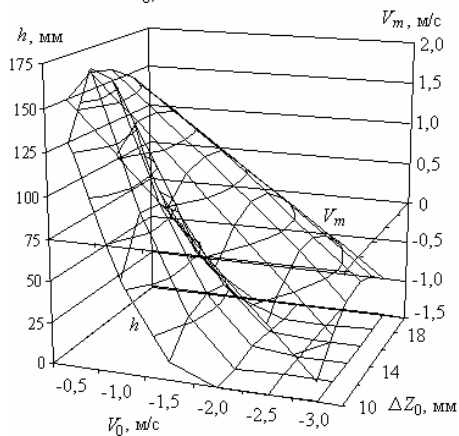
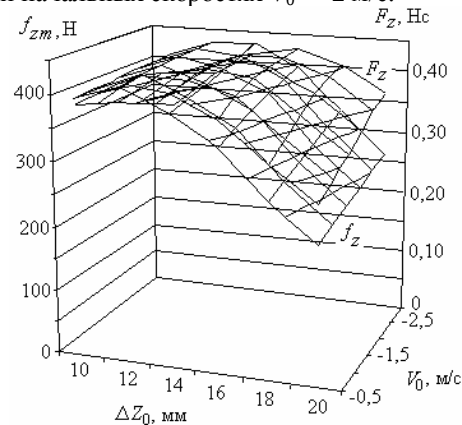
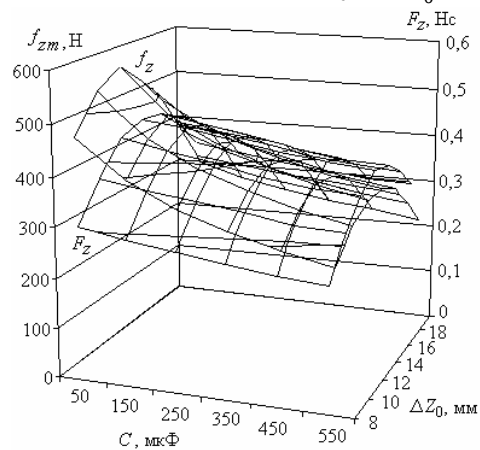


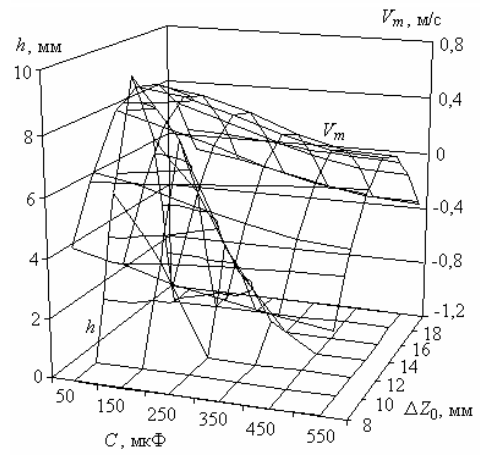
Рис. 6

В результате работы данного ИИГС наблюдается нагрев индуктора и якоря, более сильный – у последнего (рис. 6,в). В зависимости от начальной скорости V_0 превышение температуры индуктора и якоря изменяется незначительно. А с увеличением начального положения ΔZ_0 нагрев индуктора возрастает, а якоря – снижается.

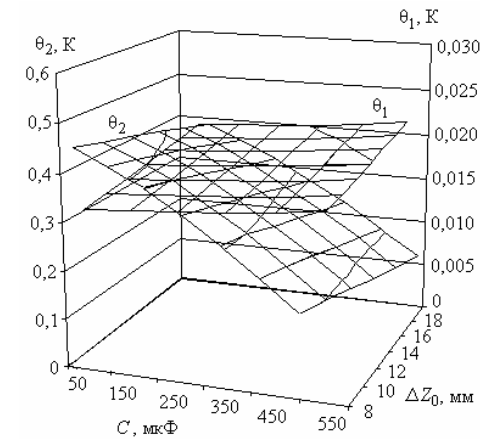
Рассмотрим влияние на электромеханические показатели ИИГС параметров ЕНЭ, имеющего энергию $W_0=20$ Дж, при начальной скорости $V_0=-2$ м/с. На рис. 7 представлены электромеханические и тепловые параметры ИИГС в зависимости от емкости C ЕНЭ и расстояния между центральными плоскостями якоря и индуктора ΔZ_0 в момент начала возбуждения индуктора. Напряжение заряда ЕНЭ возрастает при уменьшении емкости по закону $U_0 = \sqrt{2}W_0^{0,5}C^{-0,5}$.



а



б



б

Рис. 7

При увеличении емкости C , а значит и снижении зарядного напряжения ЕНЭ U_0 уменьшаются как амплитуда f_{zm} , так и величина импульса силы F_z (рис. 7,а).

При определенных значениях расстояния между центральными плоскостями якоря и индуктора ΔZ_0 наблюдается выраженный максимум амплитуды первого импульса силы f_{zm} и величины импульса силы F_z . При

любых значениях емкости из рассматриваемого диапазона $C=50-550$ мкФ максимум амплитуды первого импульса силы f_{zm} достигается примерно при $\Delta Z_0=12$ мм, а максимум величины импульса силы F_z – при $\Delta Z_0=15$ мм.

Такие силовые воздействия обуславливают характер распределения скорости V_m и высоты подбрасывания h в пространстве $C - \Delta Z_0$ (рис. 7,б). С увеличением емкости C ЕНЭ скорость V и высота подбрасывания h уменьшаются. Наибольшие значения скорости $V_m=0,46$ м/с и высоты подбрасывания $h=9,05$ мм достигаются при $\Delta Z_0 = 14$ мм. Таким образом, эффективность торможения существенно зависит от величины ΔZ_0 . Как показывают проведенные исследования, нулевое значение скорости V_m при использовании ЕНЭ с энергией $W_0=20$ Дж повышенной емкости $C=550$ мкФ можно обеспечить при $\Delta Z_0 = 14$ мм, а при пониженной емкости $C=50$ мкФ – при малом или большом расстоянии ΔZ_0 , равном 9 мм или 19 мм.

При изменении параметров C и ΔZ_0 тормозного устройства наблюдается перераспределение нагрева между неподвижным индуктором и движущимся якорем. С увеличением емкости C ЕНЭ и/или расстояния ΔZ_0 нагрев индуктора θ_1 возрастает, а нагрев якоря θ_2 – уменьшается (рис. 7,в).

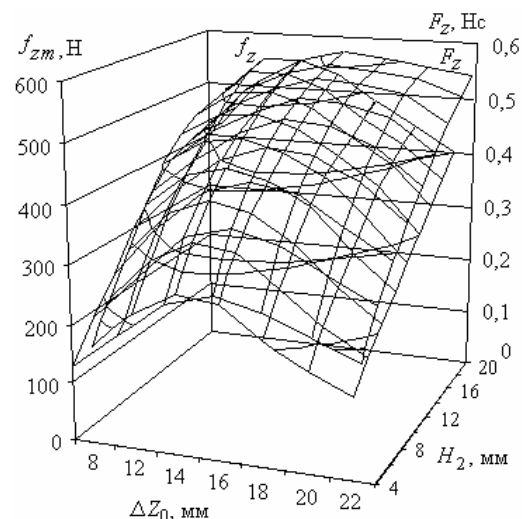
Иным фактором, оказывающим существенное влияние на эффективность ИИГС, является высота якоря H_2 . На рис. 8 показано, что при $V_0=-2$ м/с и увеличении высоты якоря от 4 до 20 мм, силовые параметры в основном возрастают. Лишь при малых значениях расстояния ΔZ_0 и увеличении высоты якоря свыше $H_2=18$ мм происходит уменьшение как амплитуды первого импульса силы f_{zm} , так и величина импульса силы F_z (рис. 8,а). При этом наибольшее значение максимума амплитуды первого импульса силы f_{zm} достигается при $\Delta Z_0=12$ мм, а наибольшее значение импульса силы F_z – при $\Delta Z_0=14$ мм.

С увеличением высоты якоря H_2 масса подвижного элемента возрастает. Вследствие этого скорость якоря V_m имеет выраженный максимум при $\Delta Z_0=14$ мм и использовании якоря с малой высотой $H_2=8$ мм, и при $\Delta Z_0=18$ мм и использовании якоря с большой высотой $H_2=20$ мм.

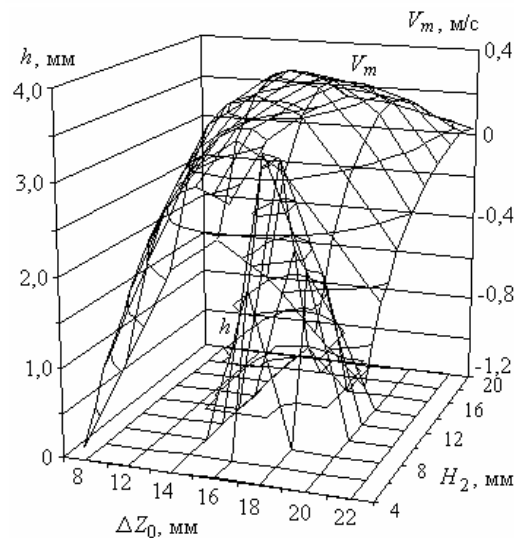
С другой стороны, при увеличении высоты якоря H_2 наблюдается максимум скорости V_m при $\Delta Z_0=14$ мм, что обусловлено силовыми показателями системы.

Интерес представляет распределение высоты подбрасывания якоря h в пространстве параметров $\Delta Z_0 - H_2$. Наибольшая высота подбрасывания якоря с тормозным объектом наблюдается при $\Delta Z_0=14$ мм и $H_2=12$ мм. Вследствие этого можно получить охватывающее данный максимум распределение геометрических параметров ΔZ_0 и H_2 , при которых подбрасывание якоря не происходит ($h=0$).

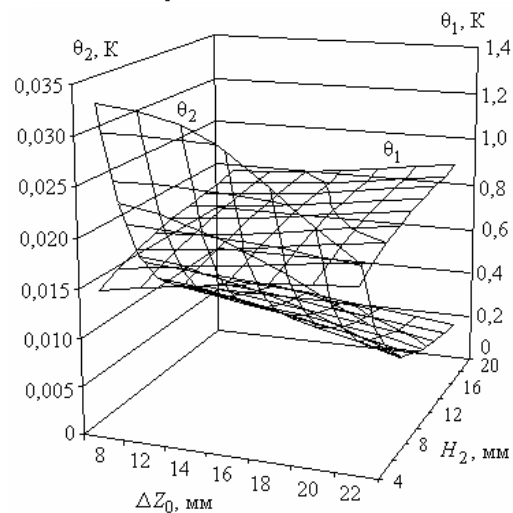
Изменение высоты якоря H_2 существенно меняет тепловое состояние активных элементов ИИГС. Так, с увеличением высоты якоря нагрев индуктора θ_1 незначительно возрастает, а нагрев якоря θ_2 – сильно уменьшается (рис. 7,в).



а



б



в

Рис. 8

Таким образом, на основании полученных диаграмм можно выбрать расстояние между центральными плоскостями якоря и индуктора ΔZ_0 в момент начала возбуждения индуктора при различных значениях высоты якоря H_2 , начальной скорости V_0 , и параметрах ЕНЭ, при которых обеспечиваются минимальные значения скорости V_m якоря и подвижного объекта, высоты подскока якоря h и превышений температуры $\theta_k = T_k - T_0$ активных элементов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обоснована концепция индукционно-импульсного гасителя скорости подвижного объекта, на внешней поверхности которого закреплен электропроводящий цилиндрический якорь, проходящего через внутреннее отверстие неподвижного индуктора.

Разработана математическая модель гасителя скорости, учитывающая комплекс взаимосвязанных электрических, магнитных, механических и тепловых процессов.

Показано, что при неправильном выборе параметров ИИГС, вертикально падающий подвижный объект может недостаточно снизить скорость или приобрести противоположно направленную скорость значительной величины.

Показано, что путем выбора расстояния между центральными плоскостями якоря и индуктора в момент начала возбуждения индуктора можно обеспечить минимальные значения скорости якоря и подвижного объекта, высоты подбрасывания якоря и превышений температуры активных элементов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Магнитно-импульсная обработка материалов. Пути совершенствования и развития: Труды междунар. науч.-техн. конф. МИОМ-2007. – Самара, 18-19 сентября 2007. – Самара: СГАУ, 2007. – 280 с.
2. Field J.E.. Review of experimental techniques for high rate deformation and shock studies// Int. J. Imp. Eng. – Vol. 30, 2004. – P. 725-775.
3. Измерение силы тяжести / Под ред. Ю.Д. Буланже. – М.: Наука, 1981. – 96 с.
4. Левин Д.М., Кутепов В.С., Антонов В.Ф. Статистический анализ погрешностей гравиметрических измерений // Измерительная техника. – 1997. – № 7. – С. 3-5.
5. <http://tiu.ru/Gasiteli.html>.
6. <http://www.pulsations-dampfer.com>.
7. Болюх В.Ф. Электродинамические процессы в линейном импульсно-индукционном двигателе с подвижной криореактивной обмоткой возбуждения // Электротехника. – 1999. – № 2. – С. 3-10.
8. Болюх В.Ф., Марков А.М., Лучук В.Ф., Шукин И.С. Энергетические процессы и эффективность индукционно-динамического преобразователя ударного действия // Електротехніка і електромеханіка. – 2009. – № 2. – С. 9-14.

9. Болюх В.Ф., Марков А.М., Лучук В.Ф., Шукин И.С. Синтез параметров высокоэффективного электромеханического преобразователя ударного действия // Технічна електродинаміка. Тем. випуск: Проблеми сучасної електротехніки. – 2008. – Ч. 2. – С. 63-68.

Bibliography (transliterated): 1. Magnitno-impul'snaya obrabotka materialov. Puti sovershenstvovaniya i razvitiya: Trudy mezhdun. nauch.-tehn. konf. MIOM-2007. - Samara, 18-19 sentyabrya 2007. - Samara: SGAU, 2007. - 280 s. 2. Field J.E.. Review of experimental techniques for high rate deformation and shock studies// Int. J. Imp. Eng. - Vol. 30, 2004. - P. 725-775. 3. Izmerenie sily tyazhesti / Pod red. Yu.D. Bulanzhe. - M.: Nauka, 1981. - 96 s. 4. Levin D.M., Kutepov V.S., Antonov V.F. Statisticheskij analiz pogreshnostej gravimetricheskikh izmerenij // Izmeritel'naya tehnika. - 1997. - № 7. - S. 3-5. 5. <http://tiu.ru/Gasiteli.html>. 6. <http://www.pulsations-dampfer.com>. 7. Bolyuh V.F. `Elektrodinamicheskie processy v lineinom impul'sno-indukcionnom dvigatele s podvizhnoy kriorezistivnoy obmotkoj возбуждения // `Elektrotehnika. - 1999. - № 2. - S. 3-10. 8. Bolyuh V.F., Markov A.M., Luchuk V.F., Schukin I.S. `Energeticheskie processy i `effektivnost' indukcionno-dinamicheskogo preobrazovatelya udarnogo dejstviya // Elektrotehnika i elektromehanika. - 2009. - № 2. - S. 9-14. 9. Bolyuh V.F., Markov A.M., Luchuk V.F., Schukin I.S. Sintez parametrov vysokoeffektivnogo elektromehanicheskogo preobrazovatelya udarnogo dejstviya // Tehnichna elektrodinamika. Tem. vipusk: Problemi suchasnoi elektrotehniki. - 2008. - Ch. 2. - S. 63-68.

Поступила 20.11.2011

Болюх Владимир Федорович, д.т.н., проф.
Шукин Игорь Сергеевич, к.т.н., доц.
Национальный технический университет
"Харьковский политехнический институт"
ООО Фирма "ТЭТРА Ltd",
61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21
тел. (057) 7076427
e-mail: bolukh@kpi.kharkov.ua, tech@tetra.kharkiv.com

Bolyukh V.F., Schukin I.S.

Induction pulse damping of mobile object velocity.

The authors introduce a concept and a developed mathematical model of an induction pulse moving-object velocity damper with the object, on the outer surface of which a conductive cylindrical armature is fixed, passing through the inner hole of a fixed inductor. By choosing the distance between the axial center plane of the armature and that of the inductor at the beginning of the inductor excitation, minimum values of the armature and the moving object velocity, the armature bounce height, and active elements overtemperature can be supported.

Key words – induction pulse velocity damper, concept, mathematical model, parameters.