

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНДУКЦИОННО-ДИНАМИЧЕСКОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ НАЛИЧИИ УСКОРИТЕЛЬНОЙ И ТОРМОЗНОЙ ФАЗ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА

Болух В.Ф., д.т.н., проф., Марков А.М., Лучук В.Ф., к.т.н., доц., Щукин И.С., к.т.н., доц.
Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"
Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПИ",
кафедры "Общая электротехника", "Электрические машины",
тел. (057) 70-76-427, e-mail: bolukh@kpi.kharkov.ua, tech@tetra.kharkiv.com.

Розглянуті особливості роботи індукційно-динамічного двигуна при наявності прискорювальної та гальмівної фаз робочого процесу. Встановлені особливості електромеханічних процесів, що виникають при початковому утриманні якоря форсувальним пристроєм та при різкому гальмуванні якоря, яке виникає при взаємодії бойка з об'єктом деформування. Запропоновані критерії оцінки ефективності двигуна. Виготовлений та випробуваний двигун, призначений для захисту інформації комп'ютерів шляхом пробивання жорстких магнітних дисків.

Рассмотрены особенности работы индукционно-динамического двигателя при наличии ускорительной и тормозной фаз рабочего процесса. Установлены особенности электромеханических процессов, возникающих при начальном удержании якоря форсирующим устройством и при резком торможении якоря, которое возникает при взаимодействии бойка с объектом деформирования. Предложены критерии оценки эффективности работы двигателя. Изготовлен и испытан двигатель, предназначенный для защиты информации компьютеров путем пробивания жестких магнитных дисков.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из наиболее перспективных электромеханических устройств, обеспечивающих максимальную кинетическую энергию для линейно перемещаемого исполнительного элемента на коротком рабочем участке или максимальное ударное электродинамическое воздействие на массивный объект, является индукционно-динамический двигатель (ИДД) [1, 2]. Такой двигатель, совершающий возвратно-поступательное движение, используется в системах различного назначения. При прямом ходе якоря совершается полезная работа, например, перемещение исполнительного элемента, а при обратном ходе осуществляется возврат якоря в исходное состояние [3, 4]. Однако эффективность работы этого двигателя, как правило, не высока (КПД не превышает 10-15%), а габариты и масса - значительны.

Различают энергетический и силовой режимы работы ИДД. В энергетическом режиме основным является обеспечение максимальной кинетической энергии исполнительного элемента. При этом якорь совершает свободное перемещение на значительное расстояние. В силовом режиме основным является механический импульс, а перемещение якоря незначительно из-за его взаимодействия с неподвижным массивным объектом. Электромеханические процессы при таких режимах работы ИДД относительно хорошо изучены [1-4]. Однако в двигателях, обеспечивающих деформацию массивного объекта, возникает сложный характер перемещения якоря: начальная фаза начального ускорения и последующая фаза резкого торможения. Кроме того, для форсирования силовых характеристик перспективно начальное удержание якоря в зоне сильного магнитного взаимодействия с неподвижным индуктором и последующее свободное его перемещение. Из-за наличия ускорительной и тормозной фаз рабочего процесса возника-

ет сложный характер движения якоря, что влияет на электромагнитные и тепловые процессы в двигателе. Поскольку возбуждение индуктора от импульсного источника, например емкостного накопителя, может осуществляться импульсами различного типа (колебательно-затухающий, однополупериодный, аперидический), то характер электромеханических процессов становится еще менее очевидным. Однако исследования работы электродвигателя при наличии ускорительной и тормозной фаз рабочего процесса не проводились.

Целью статьи является выявление особенностей работы индукционно-динамического двигателя, обеспечивающего линейное перемещение якоря с исполнительным элементом при наличии ускорительной и тормозной фаз рабочего процесса.

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА И КОНСТРУКЦИЯ ИДД

Рассмотрим электродвигатель дисковой конфигурации, предназначенный для пробивания отверстий в массивном объекте. ИДД является автономным управляемым электродвигателем, состоящим из исполнительного устройства и электронного блока. Основными структурными элементами его являются: зарядное устройство ЗУ, аккумулятор А, преобразователь ПР, трансформаторно-выпрямительный блок ТВ, емкостной накопитель ЕН, разрядник Р, датчик положения ДП, коммутатор К, формирователь импульсов тока ФИ, неподвижный индуктор И и ускоряемый якорь Я (рис.1). Исполнительное устройство ИДД содержит индуктор, подвижный электропроводящий якорь и ускоряемый боек с заостренным концом. При поступлении запускающего сигнала $U_{зап}$ на электронный блок осуществляется зарядка емкостного накопителя и при достижении определенного напряжения, устанавливаемого разрядником, происхо-

дит импульсное возбуждение индуктора. Перемещение якоря с бойком при прямом ходе осуществляется со скоростью $V(t)$ под действием электродинамической силы $f_z(t)$, действующей со стороны индуктора, а при обратном ходе – под действием возвратной пружины. Такой цикл повторяется до перемещения бойка в массивный объект на определенную величину, задаваемую датчиком положения.

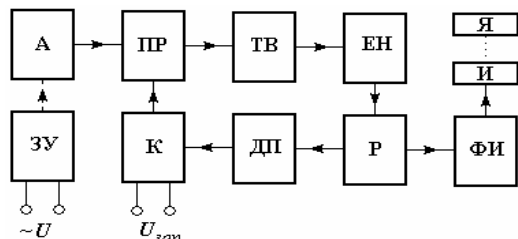


Рис. 1

Конструктивно ИДД включает неподвижный индуктор 1, намотанный из медной шины и закрепленный на неметаллическом основании 2, и подвижный якорь 3, выполненный в виде медного диска, который соединен с немагнитным ударным элементом 4 (рис. 2). Последний взаимодействует с бойком 5, который соединен с центральным направляющим штырем 6 и установлен напротив деформируемого объекта 7. Упругие элементы 8 обеспечивают возврат якоря 3 в исходное состояние – плотное прижатие к индуктору 1. Для начального удержания якоря в исходном состоянии предназначено форсирующее устройство 9, использующее постоянный магнит или электромагнит.

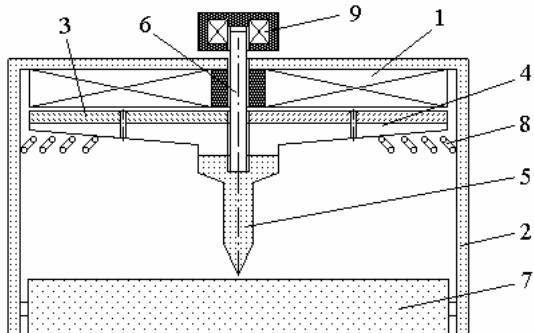


Рис. 2

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИДД

Поскольку при работе электродвигателя в сплошном (одновитковом) якоре в каждый момент времени возникает существенная неравномерность распределения индуцированного тока, воспользуемся методикой, при которой якорь заменяется совокупностью элементарных короткозамкнутых токовых контуров, а индуктор представляется первичным контуром, подсоединенным к системе возбуждения. Электрические процессы ИДД описываются системой дифференциальных уравнений:

$$R_0(T_0) \cdot i_0 + L_0 \frac{di_0}{dt} + \frac{1}{C} \int_0^t i_0 dt + M_{01}(z) \frac{di_1}{dt} + \dots + M_{0k}(z) \times$$

$$\times \frac{di_k}{dt} + V(t) \left(i_1 \frac{dM_{01}}{dz} + \dots + i_k \frac{dM_{0k}}{dz} \right) = U_0;$$

$$R_1(T_1) \cdot i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M_{01}(z) \frac{di_0}{dt} + M_{12} \frac{di_2}{dt} + \dots + M_{1k} \frac{di_k}{dt} +$$

$$+ V(t) \left(i_0 \frac{dM_{01}}{dz} + i_2 \frac{dM_{12}}{dz} + \dots + i_k \frac{dM_{1k}}{dz} \right) = 0;$$

$$R_k(T_k) \cdot i_k + L_k \frac{di_k}{dt} + M_{0k}(z) \frac{di_0}{dt} + M_{1k} \frac{di_1}{dt} + \dots + M_{k-1k} \times$$

$$\times \frac{di_{k-1}}{dt} + V(t) \left(i_0 \frac{dM_{0k}}{dz} + i_1 \frac{dM_{1k}}{dz} + \dots + i_{k-1} \frac{dM_{k-1k}}{dz} \right) = 0,$$

где i_0, L_0, R_0 – соответственно ток, индуктивность и сопротивление индуктора; i_k, L_k, R_k – соответственно ток, индуктивность и сопротивление элементарного короткозамкнутого k -го контура массивного якоря, перемещающегося со скоростью $V(t)$ вдоль оси z относительно индуктора; M_{kp} – взаимоиנדуктивность между соответствующими токовыми элементами двигателя ($k \neq p$); T_0, T_k – температура 0, k -го токового контура; C, U_0 – емкость и зарядное напряжение емкостного накопителя.

Перемещение якоря с исполнительным элементом (ударный элемент с бойком) возникает из-за электродинамической силы

$$f_z(t) = i_0(t_n) \cdot \sum_k i_k(t_n) \frac{dM_{0k}}{dz},$$

действующей на якорь со стороны индуктора. При этом их скорость можно представить в виде рекуррентного соотношения:

$$V(t_{n+1}) = V(t_n) + \frac{t_{n+1} - t_n}{m_1 + m_2} i_0(t_n) \cdot \sum_k i_k(t_n) \frac{dM_{0k}}{dz} - K_p \times$$

$$\times \Delta Z(t_n) - K_T \cdot V(t_n) - 0,125 \cdot \pi \cdot \gamma_a \beta_a D_{2m}^2 V^2(t_n),$$

где m_1, m_2 – масса якоря и исполнительного элемента, соответственно; K_p – коэффициент упругости пружины; $\Delta Z(t)$ – величина перемещения; K_T – коэффициент динамического трения; γ_a – плотность воздуха; β_a – коэффициент аэродинамического сопротивления; D_{2m} – максимальный диаметр исполнительного элемента.

Для определения температуры, изменяемой во времени в течение рабочего процесса и распределенной по сечению индуктора и якоря, используется нелинейное уравнение теплопроводности в цилиндрической системе координат

$$c^*(T) \cdot \gamma \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_w(T) \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + j^2(t) \cdot k_z \cdot \rho(T),$$

где $c^*(T)$ – усредненная удельная теплоемкость; γ – усредненная плотность материала; $j(t)$ – плотность тока; $\lambda_w(T)$ – коэффициент теплопроводности; k_z – коэффициент заполнения индуктора; $\rho(T)$ – удельное сопротивление.

На основе представленных выражений разработана компьютерная программа, моделирующая работу электродвигателя с учетом всех основных характеристик и параметров при различных режимах работы [5]. Рассмотрим ИДД, предназначенный для защиты информации на компьютере при несанкционированном доступе путем пробивания жестких магнитных дисков [6]. Параметры двигателя представлены в табл. 1. Жесткость возвратной пружины – 75 кН/м.

Масса исполнительного элемента – 0,25 кг.

Рассмотрим работу ИДД при возбуждении индуктора импульсами различной формы.

Таблица 1

Индуктор	
Наружный диаметр	– 100 мм
Внутренний диаметр	– 10 мм
Высота	– 10 мм
Число витков	– 46
Провод медный	– 4,8×1,8 мм ²
Пропитка	– эпоксидный компаунд
Намотка	– 2 ряда с внешними выводами
Якорь	
Наружный диаметр	– 100 мм
Внутренний диаметр	– 4 мм
Высота медного диска	– 2 мм
Емкостной накопитель	
Емкость	– 3000 мкФ
Зарядное напряжение	– 450 В

РАБОТА ИДД ПРИ НАЧАЛЬНОМ УДЕРЖАНИИ ЯКОРЯ

Начальное удержание якоря задается форсирующим устройством (рис. 2). Если величина электродинамической силы, действующей на якорь, превышает силу удержания f_0 , которая действует практически только в исходном положении, то начинается движение якоря. На рис. 3 представлены усредненные плотности тока в индукторе j_1 и якоре j_2 при возбуждении индуктора колебательно-затухающим (а), однопериодным (б) и аperiodическим (в) импульсами. Показаны электрические характеристики при свободном движении якоря (тонкие линии), при начальном удержании силой $f_0=24,5$ кН (тонкие линии с метками) и при полностью заторможенном якоре (сила $f_0 > f_m$, жирные линии). Здесь f_m – максимальная электродинамическая сила, действующая на якорь.

Величины и формы плотностей тока в активных элементах ИДД существенно зависят от характера перемещения якоря. Особенно заметное изменение токов от характера перемещения якоря проявляется при возбуждении индуктора колебательно-затухающим импульсом (рис. 3, а), а наименьшее – при возбуждении индуктора аperiodическим импульсом (рис. 3, в). Такое влияние характера перемещения якоря на электрические характеристики ИДД приводит к изменению механических характеристик двигателя, которые представлены на рис. 4. (рис. 4, а,б,в соответствуют вариантам ИДД на рис. 3, а,б,в).

На рис. 4 показаны характеристики при свободном движении якоря (тонкие линии), при начальном удержании силой $f_0 = 10$ кН (жирные линии) и силой $f_0 = 24,5$ кН (тонкие линии с метками).

Аксиально направленная сила f_z , действующая на якорь, имеет ярко выраженный пиковый характер в начальный момент работы двигателя (0,2–0,3 мс). В последующем на якорь действует отрицательная сила, обусловленная, в основном воздействием возвратной пружины. С увеличением силы начального торможения f_0 возрастает и величина импульса электродинамической силы, толкающей якорь с исполнительным элементом в сторону массивного объекта воздейст-

вия. Это объясняется тем, что заторможенный якорь находится в зоне более сильного магнитного взаимодействия с индуктором, чем свободно ускоряемый якорь. Хотя с появлением начального торможения силы, действующие на якорь, возрастают, величины скорости V и перемещения ΔZ не имеют такой зависимости. Наибольшие значения скоростей и перемещений якоря с исполнительным элементом достигаются при свободном движении якоря, а наименьшие – при наибольшей величине начальной тормозной силы f_0 . Это можно объяснить тем обстоятельством, что более позднее начало движения якоря при наличии тормозной силы f_0 не компенсируется повышенной электродинамической силой, толкающей якорь в сторону массивного объекта.

Таким образом, начальное удержание якоря форсирующим устройством приводит к форсированию его скорости, но максимальная величина скорости уменьшается.

РАБОТА ИДД ПРИ РЕЗКОМ ТОРМОЖЕНИИ ЯКОРЯ

Рассмотрим особенности работы электродвигателя при свободном начальном ускорении и последующем резком торможении якоря, которое возникает при взаимодействии бойка с массивным объектом деформирования (рис. 2). При взаимодействии скорость якоря затухает по экспоненциальному закону

$$V(t) = V_e \exp(-t \cdot V_e / \Delta Z_e),$$

где V_e – скорость при контакте бойка с объектом; ΔZ_e – расстояние, на которое боек проходит вглубь объекта.

На рис. 5 представлены усредненные плотности тока в индукторе j_1 и якоре j_2 при возбуждении индуктора колебательно-затухающим (а), однопериодным (б) и аperiodическим (в) импульсами. Здесь боек установлен относительно объекта деформирования на расстоянии: $Z_e=0$ (тонкие линии), $Z_e=1,5$ мм (тонкие линии с метками) и $Z_e=3,0$ мм (жирные линии).

При отсутствии начального зазора между бойком и объектом деформирования кривые плотностей тока в активных элементах имеют плавный характер, обусловленный отсутствием резких изменений в характере перемещения якоря.

При наличии указанного зазора на кривых появляются дополнительные всплески токов, обусловленные резким торможением якоря. При этом, чем больше величина свободного ускорения якоря Z_e , тем ниже величина бросок тока.

На рис. 6 представлены аксиальные силы и скорости для этого электродвигателя. При этом варианты возбуждения ИДД на рис. 6, а,б,в соответствуют вариантам, представленным на рис. 5, а,б,в, и выполнены аналогичные обозначения. При отсутствии начального зазора между бойком и объектом деформирования ($Z_e=0$) якорь приобретает небольшую скорость V и заостренный боек совершает незначительное перемещение вглубь массивного объекта. При этом форма кривой аксиальной силы f_z имеет гладкий характер, изменяемый в зависимости от импульса тока возбуждения индуктора. При наличии началь-

го зазора и свободного ускорения якоря наблюдается значительный бросок электродинамической силы, связанный с резким торможением якоря при взаимодействии заостренного бойка с массивным объектом.

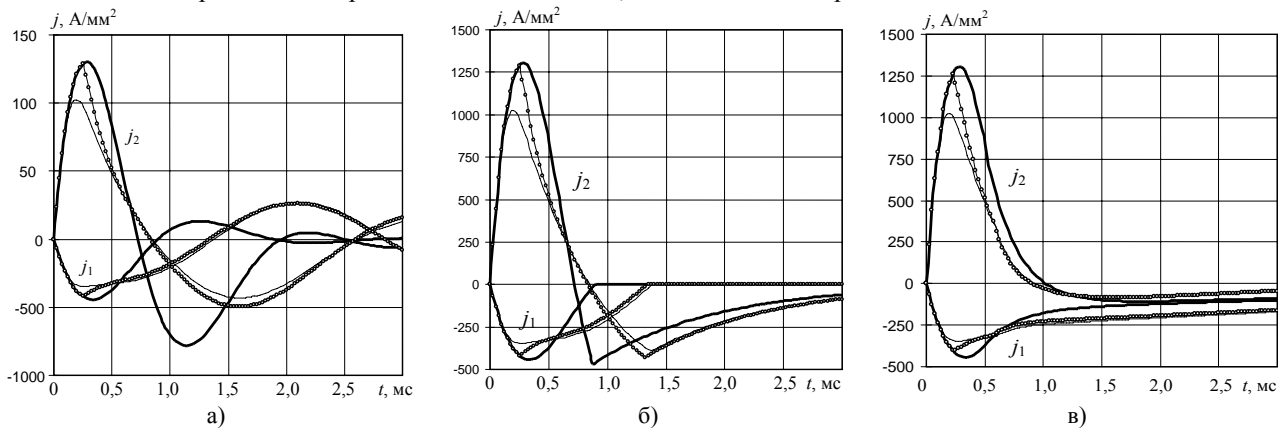


Рис. 3

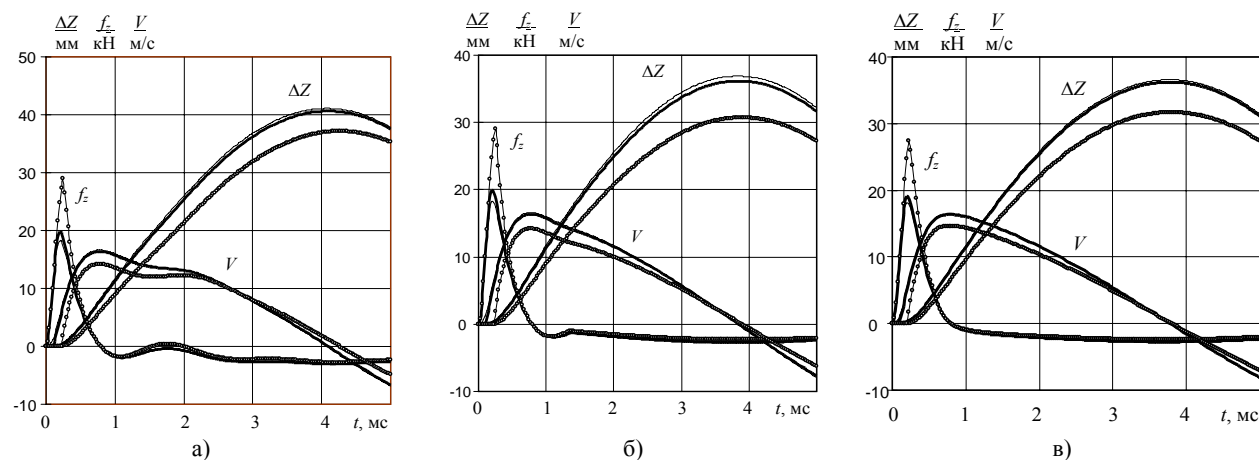


Рис. 4

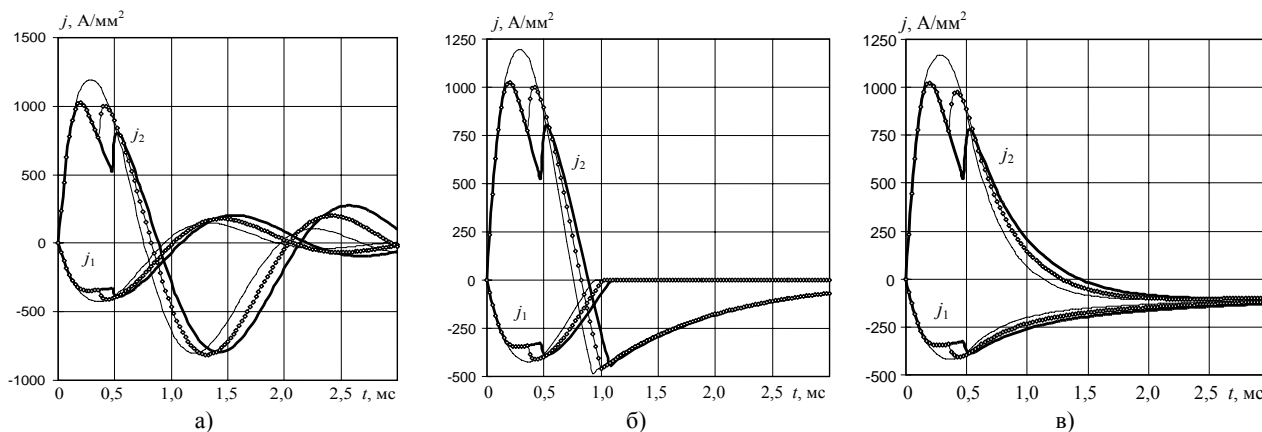
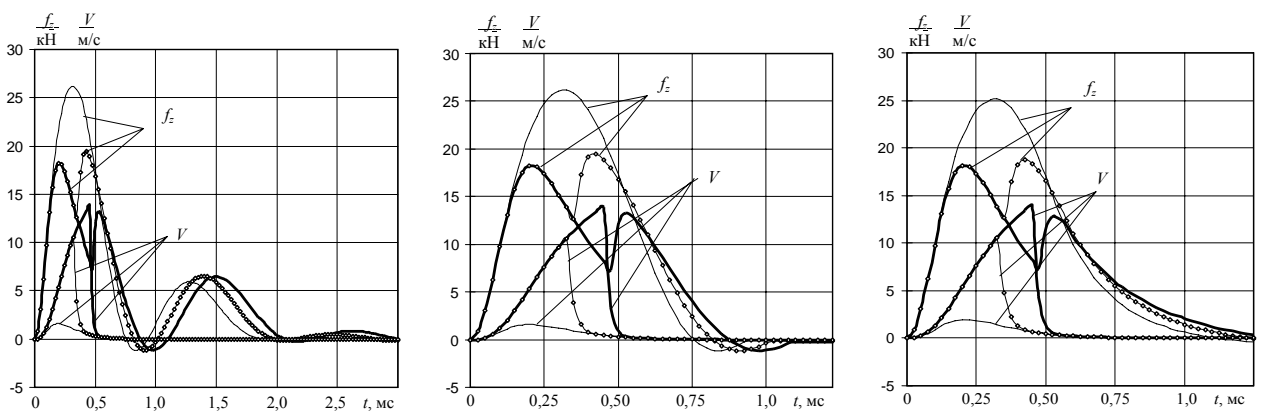


Рис. 5



а)

Таким образом, неравномерный характер движения якоря существенно влияет на его электромеханические характеристики. Для оценки эффективности исследуемого электродвигателя необходимы критерии, учитывающие различные аспекты его работы.

КРИТЕРИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИДД

Эффективность работы ИДД оценим при помощи:

- критериев, учитывающих энергию источника и кинетическую энергию:

$$\eta_1(t) = (m_1 + m_2) \cdot C^{-1} V^2(t) U_0^{-2};$$

$$\eta_1^*(t) = (m_1 + m_2) \cdot C^{-1} V^2(t) \cdot (U_0^2 - U_1^2)^{-1},$$

где U_1 – остаточное напряжение емкостного накопителя после рабочего цикла;

- критерия, учитывающего кинетическую энергию и потери в активных элементах:

$$\eta_2(t) = \frac{(m_1 + m_2) \cdot V^2(t) + K_P \Delta Z^2}{(m_1 + m_2) \cdot V^2(t) + 2 \sum_{n=1}^2 \int \sum_k i_k^2(t) R_k(T_k) dt + K_P \Delta Z^2};$$

- критериев, учитывающих импульс аксиальной составляющей электродинамической силы:

$$\eta_3(t) = \frac{\left(\int_0^{t_p} i_0(t) \sum_k i_k(t) \frac{dM_{0k}}{dz} dt \right)^2}{C U_0^2 (m_1 + m_2)};$$

$$\eta_3^*(t) = \frac{\left(\int_0^{t_p} i_0(t) \sum_k i_k(t) \frac{dM_{0k}}{dz} dt \right)^2}{C (m_1 + m_2) (U_0^2 - U_1^2)}.$$

Рассмотрим зависимость этих критериев и основных параметров от величины начальной силы удержания f_0 при возбуждении индуктора колебательно-затухающим (индекс *a*), однополупериодным (индекс *b*) и аperiodическим (индекс *c*) импульсами.

На рис. 7 представлены следующие параметры ИДД: максимальная величина f_m и импульс

$$F(t) = \int_0^t i_0(t_n) \cdot \sum_k i_k(t_n) \frac{dM_{0k}}{dz} dt$$

электродинамической силы, максимальная величина перемещения якоря с исполнительным элементом при удаленном массивном объекте ΔZ .

С увеличением силы удержания f_0 наблюдается увеличение всех силовых показателей. Наибольшая величина интеграла силы возникает при возбуждении индуктора колебательно-затухающим импульсом, а наименьшая – при возбуждении аperiodическим импульсом. Однако максимальное перемещение якоря, ограничиваемое возвратной пружиной, при увеличении силы удержания уменьшается. При использовании для возбуждения индуктора колебательно-затухающего импульса перемещение якоря наибольшее, а при иных формах возбуждающего импульса перемещение практически одинаково.

б)
Рис. 6

в)

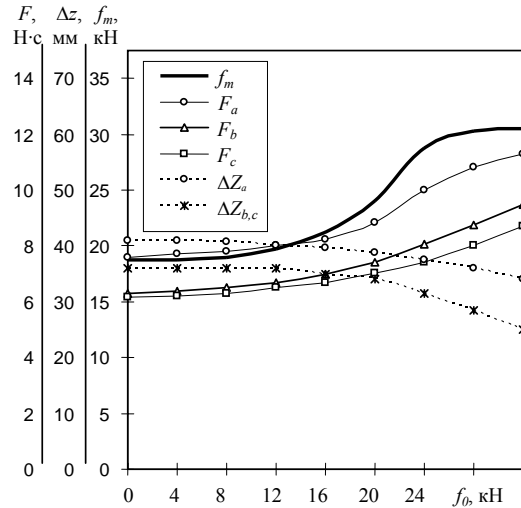
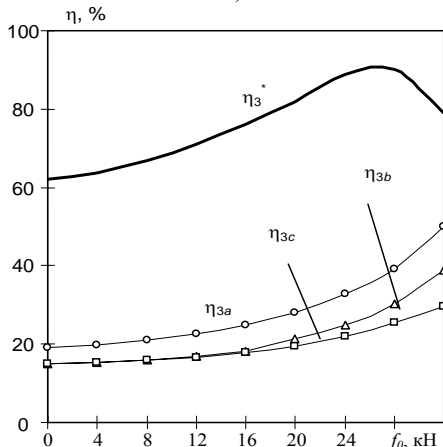
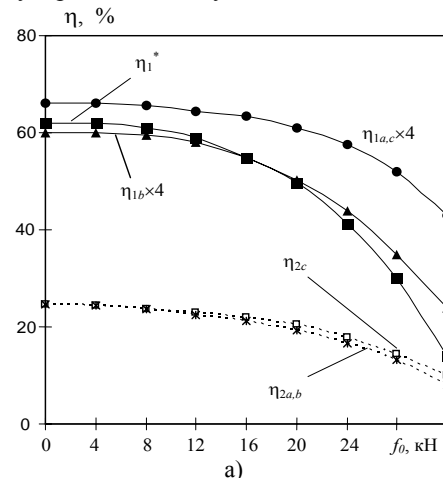


Рис. 7

На рис. 8 представлены зависимости критериев эффективности от величины начальной силы удержания f_0 . Значения критериев эффективности, учитывающих кинетическую энергию ускоряемых масс, с увеличением силы f_0 , снижаются (рис. 8, а). С учетом данных критериев наиболее целесообразным является возбуждение индуктора аperiodическим импульсом, а менее предпочтительно – возбуждение однополупериодным импульсом.



б)
Рис. 8

Однако с точки зрения критерия η_3 , учитывающего импульс электродинамической силы, воздействующей на якорь, целесообразно увеличивать силу начального торможения f_0 (рис. 8, б). Причем в этом случае наиболее предпочтительным представляется возбуждение индуктора колебательно-затухающим импульсом, а наименее целесообразно – аperiodическим импульсом.

Можно отметить, что при учете сохраненной энергии в емкостном накопителе величины критериев эффективности η_1^* и η_3^* находятся на уровне 60-90%, что существенно, чем у аналогичных двигателей.

На основе проведенных исследований с учетом конструктивных функциональных особенностей был разработан и экспериментально исследован компактный линейный ИДД, параметры которого представлены в табл. 2. На рис. 9 показан вариант ИДД, предназначенного для защиты информации при попытке несанкционированного доступа путем пробивания жесткого магнитного диска персонального компьютера. Этот двигатель состоит из силового исполнительного устройства и удаленного электронного блока. Проведенные экспериментальные испытания электродвигателя в целом подтвердили основные теоретические положения и результаты математического моделирования.

Таблица 2

Напряжение питания	12 В DC
Мощность в импульсе	10 кВт
Энергия удара	30 Дж
Величина импульса тока индуктора	2,4 кА
Максимальная скорость якоря	13,6 м/с
Продолжительность включения	0,5 %
Частота работы	20 мин ⁻¹
Вес двигателя	1,5 кг
Диаметр бойка	5 мм
Ход бойка	15 мм



Рис. 9

ЛИТЕРАТУРА

- [1] J.A.Andrews, J.R.Devine, "Armature design for coaxial induction launchers", *IEEE Trans. Magnetics*, vol. 27, № 1, pp. 639-643, 1991.
- [2] Чемерис В.Т., Васьковский Ю.Н., Петровский В.П. и др. Физическое моделирование особенностей ускорения якоря в импульсном электромеханическом преобразователе индукционного типа // *Техн. электродинамика*. – 1986. - № 3. – С. 66-68.
- [3] Борткевич С.П., Кравец И.А., Матвиенко О.В. Численно-аналитическое моделирование процессов в магнитно-импульсных установках с плоским индуктором и движущимся диском // *Техн. электродинамика*. - 1995. - № 3. - С. 6-8.
- [4] Гальетов В.П., Иванов Е.П. Повышение эффективности электромагнитного индукционного ускорителя проводников // *Журнал прикладной механики и техн. физики*. – 1979. - № 4. – С. 105-108.
- [5] Боллох В.Ф., Марков А.М., Лучук В.Ф., Щукин И.С. Инженерная методика расчета рабочих характеристик электромеханических импульсных преобразователей индукционного типа // *Электротехніка і електромеханіка*. – 2003. - № 4. – С. 5-10.
- [6] Боллох В.Ф., Марков А.М., Лучук В.Ф., Щукин И.С. Теоретические и экспериментальные исследования индукционно-динамического двигателя, возбуждаемого от полярного емкостного накопителя // *Техн. электродинаміка. Тем. випуск: Проблеми сучасної електротехніки*. - 2006. - Ч. 2. - С. 65-70.

Поступила 18.08.2006