

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНДУКЦИОННО-ДИНАМИЧЕСКОГО ДВИГАТЕЛЯ, ВОЗБУЖДАЕМОГО ОТ НИЗКОВОЛЬТНОГО ЕМКОСТНОГО НАКОПИТЕЛЯ

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

Запропоновані критерії оцінки ефективності індукційно-динамічного двигуна при роботі в різних режимах. Досліджена робота двигуна при збудженні від ємнісного накопичувача, що забезпечує різну форму імпульсу струму індуктора. Визначено, що використання низьковольтного джерела значної ємності доцільно при малій кількості витків індуктора і значному поперечному перетину його струмопровідної шини. Виготовлена і експериментально випробувана конструкція двигуна, що призначений для пробивання жорстких магнітних дисків.

Предложены критерии оценки эффективности индукционно-динамического двигателя при работе в различных режимах. Исследована работа двигателя при возбуждении от емкостного накопителя, обеспечивающего различную форму импульса тока индуктора. Установлено, что использование низковольтного источника значительной емкости целесообразно при малом числе витков индуктора и большом сечении его токопроводящей шины. Изготовлена и экспериментально испытана конструкция двигателя, предназначенного для пробивания жестких магнитных дисков.

ВВЕДЕНИЕ

В современной электромеханике наблюдается тенденция создания специализированных электродвигателей и электромеханических устройств, выполняющие возложенные на них функции в особых условиях с максимальной эффективностью. Одним из таких функциональных устройств является индукционно-динамический двигатель (ИДД), который обеспечивает максимальную кинетическую энергию для линейно перемещаемого исполнительного элемента на коротком рабочем участке или максимальное ударное электродинамическое воздействие на исследуемый объект [1, 2].

Особенностями ИДД являются:

- импульсный режим работы со значительной скважностью рабочих импульсов;
- кратковременный рабочий период с высокими электромагнитными и динамическими нагрузками;
- существенное изменение магнитной связи между неподвижным индуктором и ускоряемым якорем в процессе рабочего периода;
- отсутствие специального магнитопровода, наружного экрана и др.

КПД традиционных ИДД при рабочем периоде, как правило, не превышает 10-15%, что требует выбора соответствующих параметров для гармоничного сочетания быстродействующих электрических, магнитных, механических и тепловых характеристик. Традиционные индукционно-динамические двигатели возбуждаются, как правило, от импульсного емкостного накопителя, характеризующегося относительно малой емкостью C (~100 мкФ) и высоким напряжением U_0 (~5...10 кВ и выше) [3]. Однако в целом ряде технических систем прикладного назначения такие высокие напряжения нежелательны.

Рассмотрим эффективность электродвигателя, предназначенного для пробивания отверстий в исследуемом объекте, от низковольтного (менее 0,4 кВ) накопителя значительной емкости при различных формах импульса тока индуктора.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИДД

ИДД включает неподвижный индуктор 1, намотанный из медной шины и закрепленный на неметаллическом основании 2, и подвижный якорь 3, выполненный в виде массивного медного диска, который соединен с немагнитным ударным элементом 4 (рис.1). Последний взаимодействует с бойком 5, который соединен с центральным направляющим штырем 6 и установлен напротив деформируемого объекта 7. Упругие элементы 8 обеспечивают исходное состояние якоря 3 – плотное прижатие к индуктору 1.

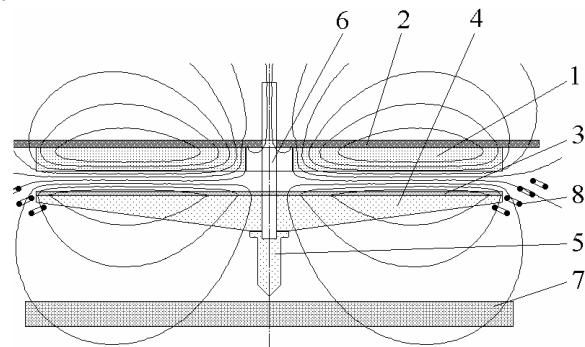


Рис.1

Поскольку при работе электродвигателя в массивном (одновитковом) якорю 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:

$$R_0(T_0) \cdot i_0 + L_0 \cdot \frac{di_0}{dt} + \frac{1}{C} \cdot \int_0^t i_0 \cdot dt + M_{01}(z) \cdot \frac{di_1}{dt} + \dots + M_{0k}(z) \times \frac{di_k}{dt} + V(t) \cdot \left(i_1 \cdot \frac{dM_{01}}{dz} + \dots + i_k \cdot \frac{dM_{0k}}{dz} \right) = U_0 ;$$

$$R_1(T_1) \cdot i_1 + L_1 \cdot \frac{di_1}{dt} + M_{01}(z) \cdot \frac{di_0}{dt} + M_{12} \cdot \frac{di_2}{dt} + \dots + M_{1k} \cdot \frac{di_k}{dt} + V(t) \left(i_0 \cdot \frac{dM_{01}}{dz} + i_2 \cdot \frac{dM_{12}}{dz} + \dots + i_k \cdot \frac{dM_{1k}}{dz} \right) = 0;$$

$$R_k(T_k) \cdot i_k + L_k \cdot \frac{di_k}{dt} + M_{0k}(z) \cdot \frac{di_0}{dt} + M_{1k} \cdot \frac{di_1}{dt} + \dots + M_{k-1k} \times \times \frac{di_{k-1}}{dt} + V(t) \left(i_0 \cdot \frac{dM_{0k}}{dz} + i_1 \cdot \frac{dM_{1k}}{dz} + \dots + i_{k-1} \cdot \frac{dM_{k-1k}}{dz} \right) = 0,$$

где i_0, L_0, R_0 – соответственно ток, индуктивность и сопротивление индуктора; $i_{1..k}, L_{1..k}, R_{1..k}$ – соответственно ток, индуктивность и сопротивление элементарного короткозамкнутого $1...k$ -го контура массивного якоря, перемещающегося со скоростью $V(t)$ вдоль оси z относительно индуктора; M_{kp} – взаимная индуктивность между соответствующими токовыми элементами двигателя ($k \neq p$); $T_0...T_k$ – температура $0...k$ -го активного элемента; C, U_0 – емкость и зарядное напряжение емкостного накопителя.

Скорость якоря с исполнительным элементом (ударный элемент с бойком) можно представить в виде рекуррентного соотношения:

$$V(t_{n+1}) = V(t_n) + \frac{t_{n+1} - t_n}{P + m_2} \cdot i_0(t_n) \cdot \sum_k i_k(t_n) \cdot \frac{dM_{0k}}{dz} - K_P \times \times \Delta Z(t_n) - K_T \cdot V(t_n) - 0,125 \cdot \pi \cdot \gamma_a \cdot \beta_a \cdot D_{2m}^2 \cdot V^2(t_n),$$

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

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

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.

КРИТЕРИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИДД

Эффективность работы ИДД оценим при помощи:

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

$$\eta_1(t) = \frac{(m_2 + P) \cdot V^2(t)}{(m_2 + P) \cdot V^2(t) + 2 \sum_{n=1}^2 \int_0^{t_p} \sum_k i_k^2(t) \cdot R_k(T_k) dt},$$

- критерия, учитывающего энергию источника и кинетическую энергию:

$$\eta_2(t) = (m_2 + P) \cdot C^{-1} \cdot V^2(t) \cdot U_0^{-2},$$

- импульса аксиальной составляющей электродинамической силы, действующей на подвижный якорь:

$$\gamma_f = \int_0^{t_p} f_z(t) \cdot dt,$$

где $f_z(t) = i_0(t_n) \cdot \sum_k i_k(t_n) \cdot \frac{dM_{0k}}{dz}$ – величина электродинамической силы.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИДД ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ФОРМАХ ИМПУЛЬСА ТОКА ВОЗБУЖДЕНИЯ

Рассмотрим индукционно-динамический электродвигатель, возбуждаемый от низковольтного ($U_0=390$ В) емкостного накопителя при значительной его емкости ($C=4000$ мкФ). Индуктор двигателя намотан в один ряд из медной шины сечением 5×2 мм², якорь выполнен в виде медного диска толщиной 1 мм. Наружный диаметр активных элементов двигателя составляет 100 мм.

Низкое напряжение и высокую емкость источника обеспечивают компактные электролитические (полярные) конденсаторы, где в последнее время наблюдается значительный прогресс. Так, например, конденсаторы ULTRACAP фирмы EPCOS при напряжении 56 В обеспечивают емкость 210 Ф [4]. Отметим также, что электролитические конденсаторы значительно компактнее соответствующих импульсных конденсаторов, что позволяет уменьшить размеры ИДД в целом. Поскольку электролитические конденсаторы не допускают изменения полярности напряжения, то возбуждение индуктора ИДД должно осуществляться однополярным аperiodическим импульсом. Однако эффективность работы двигателя при таком режиме возбуждения не очевидна и требует дополнительного рассмотрения.

С использованием расчетной методики [5] оценим работу ИДД по предложенным критериям при возбуждении от емкостного накопителя, обеспечивающего аperiodический импульс, по отношению к режиму 1 (однополупериодный однополярный импульс тока с изменением полярности напряжения источника) и режиму 2 (полный разряд источника на индуктор, при котором возникает колебательно-затухающий процесс), реализуемых с использованием импульсных конденсаторов.

Так как эффективность ИДД во многом зависит от приложенной нагрузки (массы исполнительного элемента), рассмотрим три варианта нагрузки: малая ($P_1=0,15$ кг), средняя ($P_2=1,0$ кг) и высокая ($P_3 \gg P_2$). В последнем варианте двигатель работает практически в заторможенном режиме.

На рис.2 показан характер изменения плотности тока в проводнике неподвижного индуктора j_1 и усредненной по сечению плотности тока в якоря j_2 при малой нагрузке (а) и большой нагрузке (б).

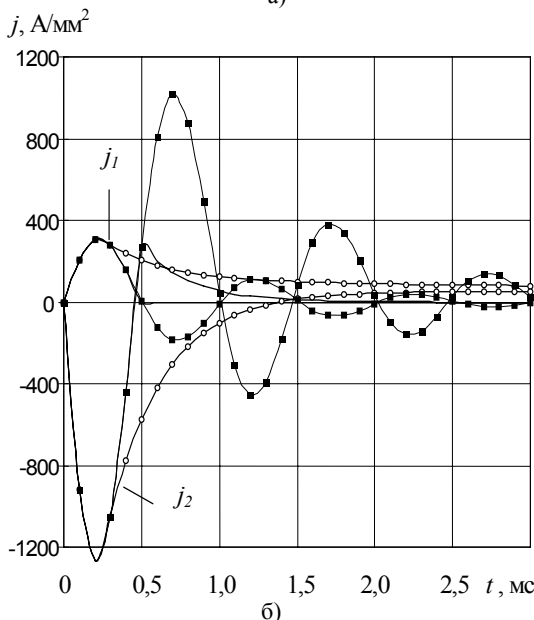
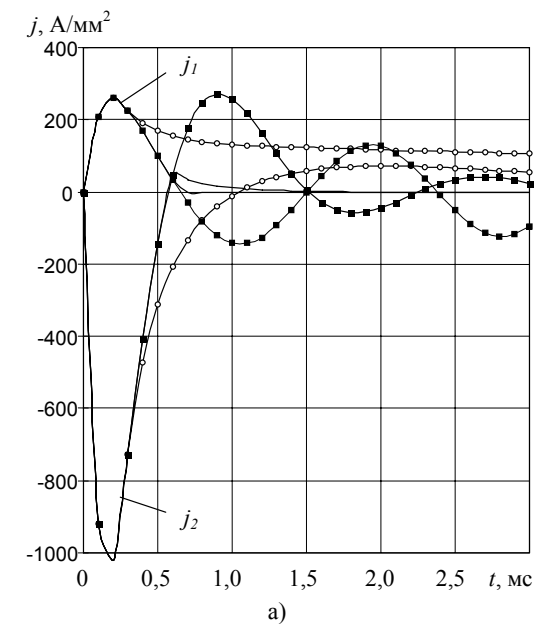


Рис.2

Здесь линиями без меток показаны параметры в режиме 1, линиями с квадратными метками - в режиме 2 и линиями с круглыми полыми метками - при возбуждении аперiodическими импульсами (режим 3).

На основании представленных данных можно отметить, что в зависимости от нагрузки и режима возбуждения существенно меняются величина и характер токов индуктора и якоря. С увеличением ускоряемой нагрузки возрастает амплитуда первичного и индуцированного токов. Особенно возрастает амплитуда второго и последующего импульсов индуцированного тока в якоре.

Однако из-за неравномерности распределения индуцированного тока по сечению якоря подвергается неравномерной силовой нагрузке. На рис.3 показаны распределения аксиальной f_z и радиальной f_r составляющих электродинамических сил, действующих на заторможенный якорь с наружным радиусом r_{ex} в различные моменты времени.

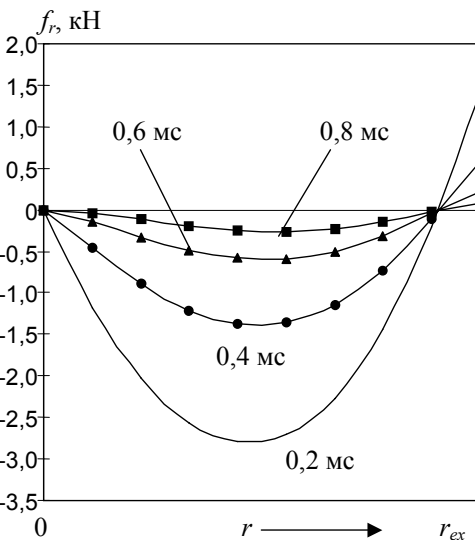
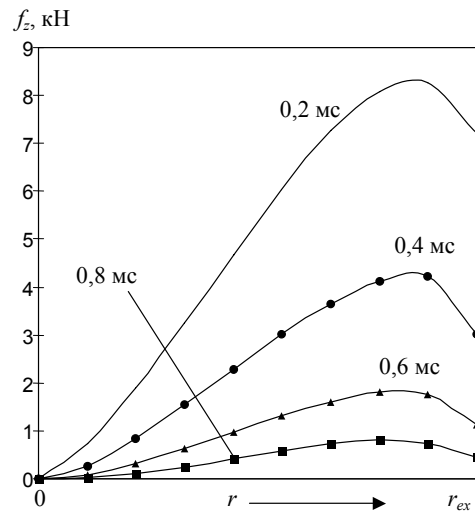


Рис.3

Аксиальные электродинамические силы значительно превосходят радиальные, причем максимальная их величина приходится на внешние участки якоря. Такое соотношение объясняется и характером результирующего магнитного поля в активной зоне ИДД (на рис.1 показано распределения поля в момент максимума электродинамических сил, действующих на ускоряемый якорь).

Величины и характер аксиальных электродинамических усилий, обеспечивающих полезную работу ИДД, во многом зависят от режима возбуждения и ускоряемой нагрузки. На рис.4 показаны эти силы, действующие на якорь при небольшой (кривые 1) и высокой (кривые 2) нагрузках и работе ИДД в режиме 2 (жирные линии) и режиме 3 (тонкие линии).

На основании представленных зависимостей можно сделать вывод о целесообразности работы ИДД в режиме 2 при высокой нагрузке (незначительное перемещение якоря) и в режиме 1 – при малой нагрузке (значительное перемещение якоря в течение рабочего цикла).

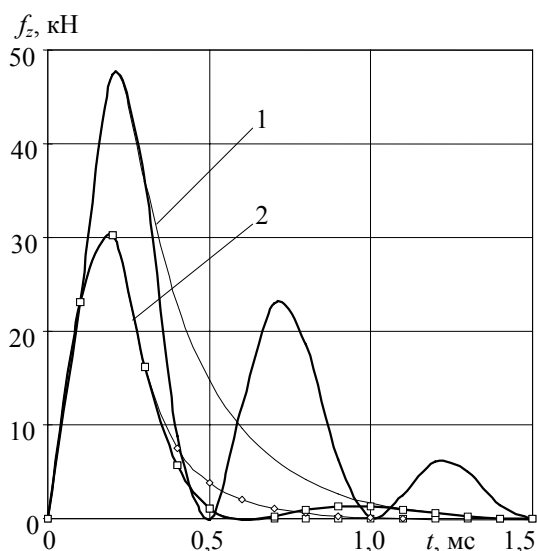


Рис.4

Однако, исходя из характера изменения аксиальных электродинамических сил, сложно сделать заключение о целесообразности работы двигателя в *режиме 3* с аperiodическими импульсами возбуждения.

Показать особенности работы ИДД при различных режимах возбуждения позволяет динамика изменения критериев эффективности при работе с малой (P_1) и средней (P_2) ускоряемыми нагрузками (рис.5). Ориентируясь на значение критерия η_1 , учитывающего кинетическую энергию и потери в активных элементах к концу рабочего периода, можно сделать вывод о целесообразности работы ИДД в *режиме 1* (жирные линии) при малой нагрузке и в *режиме 2* (крестообразные метки) при повышенной нагрузке. Работа ИДД в *режиме 3* (круглые метки) при этом самая неэффективная.

Однако если исходить из критерия η_2 , учитывающего отношение кинетической энергии к электрической энергии источника, то при ускорении легкой нагрузки *режим 3* является наиболее предпочтительным. Наименьшую эффективность ИДД при любой нагрузке в соответствии с этим критерием демонстрирует *режим 1*.

Фактически критерии η_1 и η_2 характеризуют различные стороны энергетических процессов, возникающих в ИДД при его работе. Демонстрацией этого может служить рис.6, где представлены энергетические диаграммы электродвигателей, работающий в *режимах 1* и *3* с малой и средней нагрузками, к концу рабочего цикла (3 мс). На диаграммах показаны: 1 – кинетическая энергия W_{kin} ; 2 – остаточная энергия в емкостном накопителе W_c ; 3 – энергия потерь в индукторе W_1 ; 4 – энергия потерь в якоре W_2 ; 5 – энергия магнитного поля W_{mag} .

При работе в *режиме 3* с малой (а) и средней (в) ускоряемыми нагрузками значительная часть энергии сохраняется в виде магнитного поля, вызванного наличием токов в индукторе и якоре.

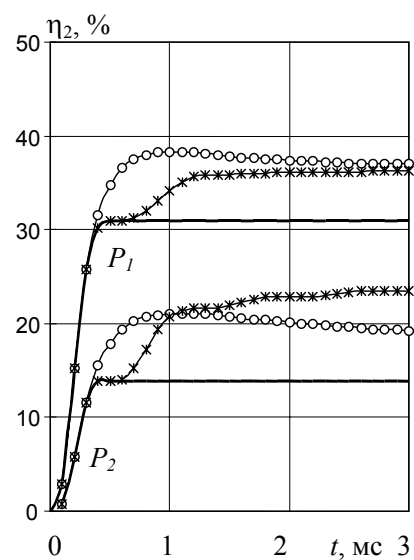
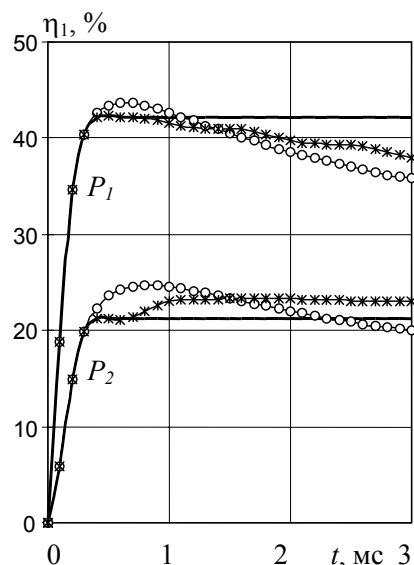


Рис.5

При работе в *режиме 2* с малой (б) и средней (г) нагрузками значительная часть энергии расходуется в виде потерь якоря, вызывая его повышенный нагрев.

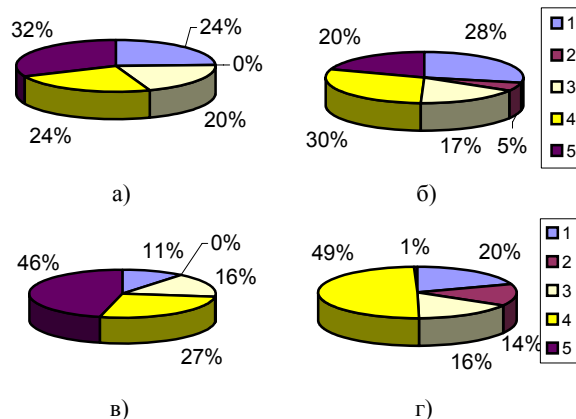


Рис.6

Более полно оценить эффективность работы ИДД с аperiodическими импульсами возбуждения позволяют данные табл.1, где представлены относительные параметры двигателя в *режиме 3* по отноше-

нию к аналогичным данным, полученным при работе в режимах 1 и 2. Здесь θ_1, θ_2 – усредненные превышения температуры, соответственно индуктора и якоря, в конце рабочего периода.

Таблица 1

Параметр	По отношению к режиму 1			По отношению к режиму 2		
	Нагрузка			Нагрузка		
	P_1	P_2	P_3	P_1	P_2	P_3
V^*	1,09	1,17	-	1,01	0,90	-
θ_1^*	2,90	2,52	2,46	1,42	1,47	1,55
θ_2^*	1,10	1,18	1,25	0,98	0,82	0,65
γ_f^*	1,09	1,17	1,42	1,01	0,90	0,81
η_1^*	0,85	0,94	-	0,94	0,87	-
η_2^*	1,19	1,39	-	1,02	0,82	-

В целом, на основе проведенных исследований можно сделать вывод о целесообразности работы ИДД при аperiodических импульсах возбуждения при малом напряжении и высокой емкости источника.

ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ИДД

Для того чтобы сделать вывод о целесообразности работы индукционно-динамического двигателя при пониженном напряжении и высокой емкости источника при аperiodических импульсах возбуждения, необходимо выбрать оптимальные параметры индуктора. Рассмотрим ИДД, у которого индуктор намотан в один ряд плоской медной шиной. Исследуем влияние числа витков N_1 медной шины, а значит и ее толщины h_1 , и емкости C источника одинаковой энергии ($W_0=500$ Дж), а значит и различного напряжения U_0 , используя предложенные выше критерии эффективности ИДД.

На рис.7 показаны распределения критериев эффективности ИДД при работе со средней (P_2) нагрузкой в диапазоне изменяемых параметров:

$$500 \leq C \leq 5500 \text{ мкФ}, \quad 1414 \leq U_0 \leq 426 \text{ В};$$

$$10 \leq N_1 \leq 20 \text{ шт}, \quad 4,3 \leq h_1 \leq 2,0 \text{ мм}.$$

На основе представленных результатов можно сделать следующий вывод: использование низковольтного источника значительной емкости целесообразно только при соответствующих параметрах индуктора – малом числе витков индуктора и большом сечении его токопроводящей шины. Так, при малом числе витков ($N_1=10$) индуктора для рассматриваемого ИДД при понижении напряжения и соответствующего увеличении емкости источника критерии эффективности возрастают, а при большом числе витков ($N_1=20$) эта тенденция меняется на противоположную. При этом для ИДД с числом витков, находящимся в указанном диапазоне, существует максимум критериев, расположенные внутри указанных диапазонов параметров емкостного накопителя. Необходимо также отметить важное свойство ИДД: распределения всех рассматриваемых критериев практически идентичны и имеют одинаковые тенденции изменения от параметров индуктора и емкостного накопителя, что важно при конструировании электродвигателя.

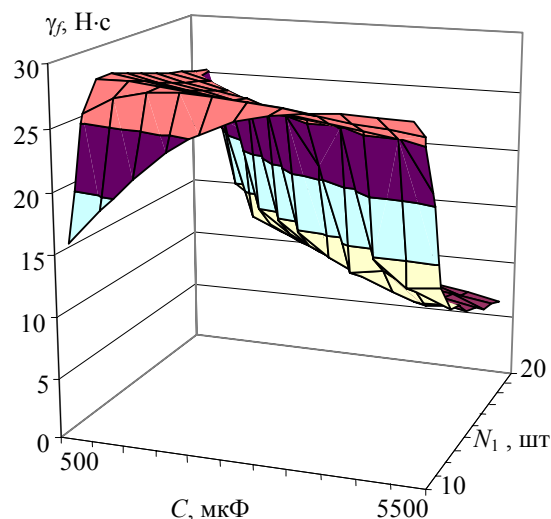
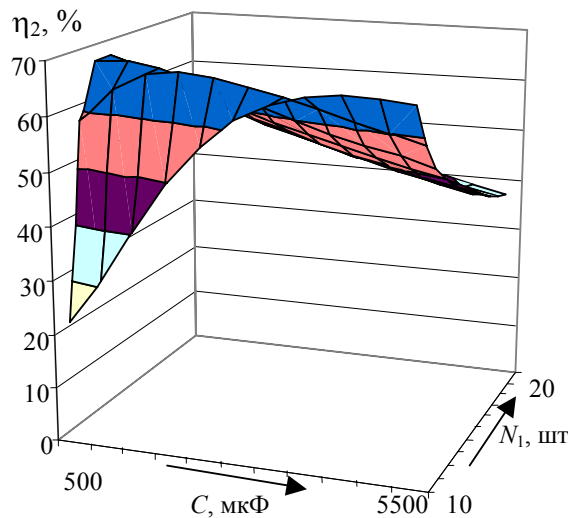
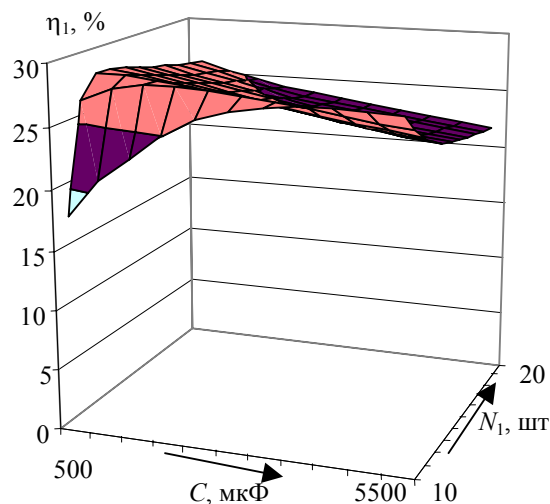


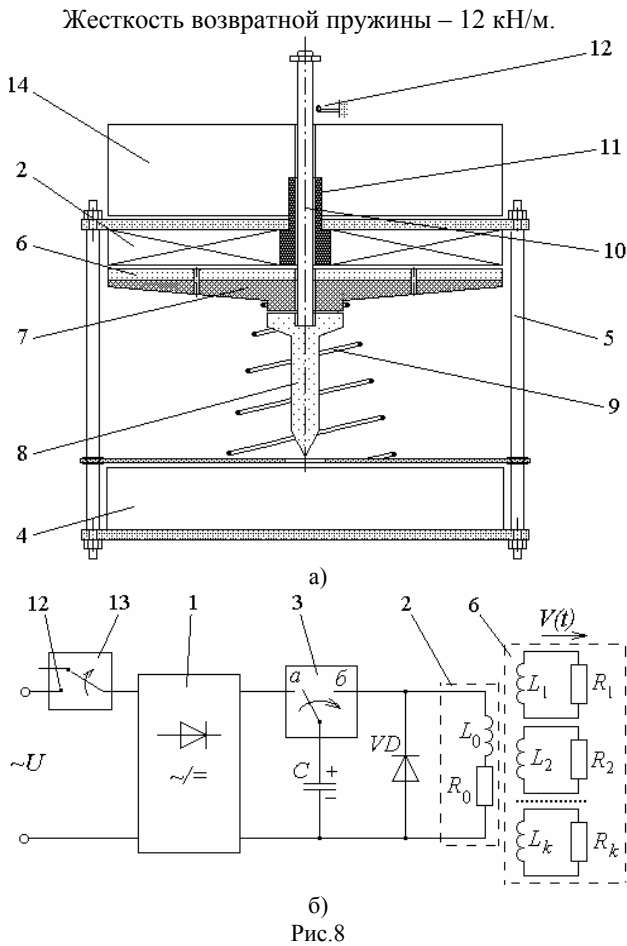
Рис.7

ПАРАМЕТРЫ И КОНСТРУКЦИЯ ИДД

На основе проведенных исследований с учетом конструктивных особенностей был разработан и экспериментально исследован ИДД, параметры которого представлены в табл.2, схематическое устройство – на рис.8,а, а электрическая схема замещения – на рис.8,б.

Таблица 2

Индуктор	
Наружный диаметр	– 100 мм
Внутренний диаметр	– 10 мм
Высота	– 10 мм
Число витков	– 46 (2 ряда)
Провод медный сечением	– 4,8×1,8 мм ²
Пропитка	– вакуумная на основе эпоксидного компаунда
Намотка	– в 2 ряда с двумя внешними выводами
Якорь	
Наружный диаметр	– 100 мм
Внутренний диаметр	– 4 мм
Высота	– 2,2 мм
Емкостной накопитель	
Емкость	– 3000 мкФ
Зарядное напряжение	– 390 В



ИДД содержит источник постоянного напряжения 1, индуктор 2, с активным сопротивлением R_0 и индуктивностью L_0 , электронный двухпозиционный ключ 3 и батарею полярных конденсаторов C , подключаемой двухпозиционным ключом попеременно к источнику постоянного напряжения (положение а) и к индуктору (положение б). Объект деформирования 4 и индуктор 2 жестко соединены между собой силовым каркасом 5. Якорь 6 жестко прикреплен к ударному элементу 7, который взаимодействует с под-

вижным бойком 8 и возвратной пружиной 9. Боек 8 соединен с направляющим штырем 10 при помощи резьбового соединения.

На конце направляющего штыря 10, выходящим из направляющего выступа 11 каркаса индуктора, размещены контакты 12 конечного переключателя 13, связывающего источник постоянного напряжения 1 с сетью питания $\sim U$. Концевой переключатель отключает двигатель от сети при перемещении бойка на заданную величину в глубь объекта 4. Батарея конденсаторов C шунтирована обратным диодом VD .

Источник постоянного напряжения 1, двухпозиционный ключ 3, концевой переключатель 13, батарея конденсаторов C и обратный диод VD размещены в компактном корпусе 14, размещенном над индуктором 2.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ ИДД

Вариант индукционно-динамического двигателя, предназначенного для пробивания жестких магнитных дисков, показан на рис.9 спереди (а) и сзади (б). Первый вариант соответствует исходному состоянию ИДД до включения в сеть, а второй вариант – состоянию после работы, при котором боек пробил отверстие в магнитном диске.

На рис.10 показаны токи индуктора в режиме холостого хода при отсутствии якоря (ХХ), в режиме нагрузки - ускорения якоря с исполнительным элементом (Н) и в режиме механического торможения якоря (МТ). В режиме ускорения осуществляется перемещение якоря на расстояние 20 мм. Рассчитанные (жирные линии) и измененные (тонкие линии) токи индуктора в целом имеют удовлетворительное совпадение, что подтверждает достоверность расчетной модели ИДД.

На основе расчетно-экспериментальных исследований установлены основные рабочие параметры ИДД, которые представлены в табл.3.

Таблица 3

Параметр	Режим работы ИДД		
	ХХ	Н	МТ
$i_{0\max}$, кА	2,3	2,5	3,2
$f_{z\max}$, кН	-	12,4	19,7
γ_f , Н·с	-	4,4	6,7
V , м/с	-	19,0	-
θ_1 , К	1,7	1,1	1,0
θ_2 , К	-	1,7	3,2

В рабочем режиме частота следования импульсов составляет 1,5 с при потреблении тока из сети менее 1 А. В зависимости от типа жестких магнитных дисков их пробивание осуществляется за 2-5 рабочих циклов, что во многом зависит от материала и конструкции наконечника бойка.



а)



б)

Рис.9

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана математическая модель и предложены критерии оценки эффективности ИДД при работе в различных режимах.
2. Исследована работа ИДД при возбуждении от емкостного накопителя, обеспечивающего в индукто-

ре аperiodический импульс тока, однополупериодный импульс тока с изменением полярности напряжения источника и при полном разряде источника, при котором реализуется колебательно-затухающий процесс. Показаны преимущества и недостатки электродвигателей при таких режимах возбуждения.

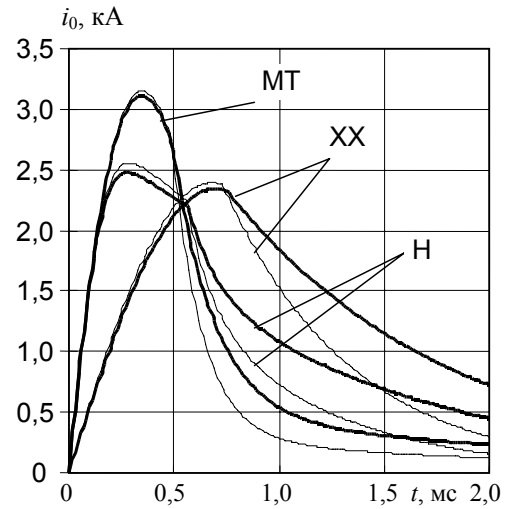


Рис.10

3. Установлено, что использование низковольтного источника значительной емкости целесообразно только при соответствующих параметрах индуктора – малом числе витков индуктора и большом сечении его токопроводящей шины. При этом предпочтительно использовать недорогие и компактные полярные электролитические конденсаторы.
4. Изготовлена и экспериментально испытана конструкция ИДД, предназначенного для пробивания жестких магнитных дисков.

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] Гальетов В.П., Иванов Е.П. Повышение эффективности электромагнитного индукционного ускорителя проводников // *Журнал прикладной механики и техн. физики*. – 1979. – № 4. – С. 105-108.
- [4] Полярные конденсаторы компании EPCOS. Меньше, прочнее, мощнее // *Chip News Украина*. – 2004. – № 10 (40). – С. 22-24.
- [5] Болнох В.Ф., Марков А.М., Лучук В.Ф., Шукин И.С. Инженерная методика расчета рабочих характеристик электромеханических импульсных преобразователей индукционного типа // *Электротехніка і Електромеханіка*. – 2003. – № 4. – С. 5-10.

Поступила 08.07.2005