

В.Ф. БОЛЮХ, д-р техн. наук, проф., НТУ "ХПИ"

С.В. ОЛЕКСЕНКО, аспирант, НТУ "ХПИ"

И.С. ЩУКИН, ООО Фирма "ТЭТРА, Ltd"

ВЛИЯНИЯ ФОРМЫ И РАСПОЛОЖЕНИЯ ЯКОРЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИНДУКЦИОННО-ДИНАМИЧЕСКОГО ДВИГАТЕЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ 3D МОДЕЛИ

Разработана трехмерная математическая модель индукционно-динамического двигателя, учитывающая взаимосвязанные электромагнитные, механические и тепловые процессы. Исследовано влияние формы якоря, расположение и количество крепежных отверстий в круглом якоре, его наклон по отношению к индуктору на силовые показатели двигателя. Проведены экспериментальные исследования электрических и механических процессов в индукционно-динамическом двигателе, которые подтвердили основные расчетные результаты и теоретические положения.

Ключевые слова: индукционно-динамический двигатель, якорь, трехмерная математическая модель, форма якоря, наклон якоря по отношению к индуктору, экспериментальные исследования.

Введение. Индукционно-динамические двигатели (ИДД) широко используются в промышленных системах и научных исследованиях, где необходимы импульсные ударные механические нагрузки при незначительных перемещениях исполнительного элемента, например бойка [1].

Ударные устройства, в которых уже применяются или перспективны ИДД, охватывают различные сферы промышленности. В строительной индустрии применяются различные электромагнитные молоты, вибраторы, перфораторы и устройства для погружения свай. В горно-рудной промышленности используются бутобой различной мощности и разделители пород, в геологоразведке – сейсмоисточники различной возмущающей силы; в машиностроении – молоты с большим диапазоном энергии удара. Ударные устройства применяются в быстродействующей клапанной и коммутационной аппаратуре, в испытательных комплексах для проверки ответственных изделий на ударные нагрузки и др. Для прессования порошков, очистки вагонов, трюмов и иных емкостей от остатков продуктов и налипания материалов и др. применяются различные технологические ударные устройства [2-8].

В ИДД возбуждаемый от емкостного накопителя энергии (ЕНЭ) индуктор в массивном (сплошном) электропроводящем якоре индукци-

© В.Ф. Болух, С.В. Олексенко, И.С. Щукин, 2013

рует ток, обуславливающий возникновение электродинамических усилий (ЭДУ), передаваемых от якоря к исполнительному элементу. Наиболее распространена коаксиальная конфигурация ИДД, при которой индуктор и якорь выполняются в виде идеально круглых дисков, которые расположены строго коаксиально [9]. Однако на практике форма якоря может быть иной, например, прямоугольной, а его расположение не быть строго коаксиальным по отношению к индуктору. Для увеличения жесткости якоря, выполненного в виде тонкого медного диска, к нему крепится стальная силовая пластина. Для взаимного крепления стальной пластины с медным диском применяются винты, что обуславливает выполнение в медном диске крепежных отверстий. Все указанные обстоятельства влияют на распределение индуцированных токов в якоря, а значит и на силовые показатели ИДД.

Однако до настоящего времени в расчетах в основном использовалась 2D математическая модель, которая позволяла рассматривать лишь идеально коаксиальную конфигурацию ИДД [10].

Целью статьи является исследование влияния формы якоря, расположение и количество крепежных отверстий в круглом якоря, его наклон по отношению к индуктору на силовые показатели ИДД с использованием 3D математической модели.

Математическая модель ИДД. Для расчета распределенного по объему медного якоря, к которому присоединенная стальная силовая пластина, индуцированного тока используется уравнение:

$$\sigma \cdot \left(\frac{\partial \bar{A}}{\partial t} - \bar{v} \times \{ \nabla \times \bar{A} \} \right) + \frac{1}{\mu_0} \cdot \nabla \times \left(\frac{1}{\mu_\gamma} \cdot \nabla \times \bar{A} \right) = 0; \quad (1)$$

где σ – электропроводимость якоря; \bar{A} – векторный магнитный потенциал; \bar{v} – скорость движения якоря; μ_0 – магнитная постоянная; μ_γ – относительная магнитная проницаемость силовой пластины.

В многовитковом индукторе плотность тока определяется сторонними источниками:

$$\frac{1}{\mu_0} \cdot \nabla \times (\nabla \times \bar{A}) = \frac{i \cdot w}{S}; \quad (2)$$

где i – ток в индукторе; w – число витков индуктора; S – сечение витка индуктора.

ЭДУ f_z , действующие на якорь, находятся с использованием тензора натяжения Максвелла:

$$\overline{f_z} = \frac{1}{2} \cdot \int_S (\overline{H} \cdot \{\overline{B} \cdot \overline{n}\} + \overline{B} \cdot \{\overline{H} \cdot \overline{n}\} + \overline{n} \cdot \{\overline{B} \cdot \overline{H}\}) \cdot dS; \quad (3)$$

где \overline{n} – вектор внешней нормали к поверхности интегрирования dS .

Плотность тока сторонних источников, может быть определена с использованием уравнения электрической цепи для многovitкового индуктора:

$$u + e = (R_e + R) \cdot i + L_e \cdot \frac{di}{dt}; \quad (4)$$

где u – напряжение источника; e – противоЭДС; R_e – активное сопротивление внешней цепи; R – активное сопротивление индуктора; i – ток индуктора; L_e – индуктивность внешней цепи.

В качестве источника напряжения используется предварительно заряженный ЕНЭ:

$$u = U_0 - \frac{1}{C} \cdot \int_t i \cdot dt; \quad (5)$$

где U_0 – начальное напряжение ЕНЭ; C – емкость ЕНЭ.

Значение противоЭДС можно представить следующим образом:

$$e = -\frac{w}{S} \iiint_V \frac{d(\overline{A})_f}{dt} \cdot dV; \quad (6)$$

где w – число витков индуктора; S – площадь поперечного сечения индуктора, пронизываемая магнитным потоком; $(\overline{A})_f$ – проекция векторного магнитного потенциала на направление обхода контура; V – объем индуктора.

Окончательно уравнение для электрической цепи представляется в виде:

$$U = (R_e + R) \cdot i + L_e \cdot \frac{di}{dt} - \frac{w}{S} \iiint_V \frac{d(\overline{A})_f}{dt} \cdot dV; \quad (7)$$

Механические процессы ИДД можно описать системой уравнений

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dm(z)}{dz} \cdot v^2 + m(z) \cdot \frac{d(v)}{dt} = f_z(z) - P(z); \\ \frac{d(z)}{dt} = v; \\ z(0) = 0_{xyz}, v(0) = 0; \end{array} \right. \quad (8)$$

где z – перемещение якоря; v – скорость якоря; $m(z)$ – масса движущихся частей, приведенная к якорю; $P(z)$ – противодействующая сила, приведенная к якорю.

Полученные уравнения (1)-(8) представляют собой систему уравнений, которые описывают рабочие процессы в ИДД. Решение данной системы может быть получено с использованием метода конечных элементов для интегрирования по пространственным переменным и усовершенствованного метода Гира для интегрирования по времени. Поскольку метод конечных элементов плохо адаптирован для решения нестационарных задач с пространственным изменением элементов, то для расчета используется "деформируемая" сетка. При изменении положения элемента координаты его границ деформируются в соответствии с заданным законом движения (8). Поскольку размер и форма ячеек сетки существенно влияют на точность расчетов, то при движении области на каждом временном шаге проверяется "качество" перестраиваемой сетки.

Электромагнитные процессы в ИДД с дисковым якорем. На рис.1 схематично показан ИДД, у которого многовитковый индуктор 1 коаксиально расположен относительно электропроводящего якоря 2, выполненного в форме круглого диска. Индуктор 1 возбуждается от ЕНЭ аперiodическим импульсом тока, для чего индуктор шунтирован обратным диодом. На рис.1 показано распределение индукции магнитного поля в зоне индуктора и якоря в момент максимума ЭДУ.

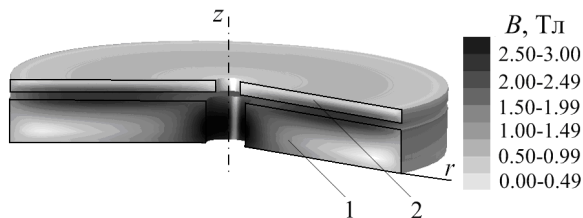


Рис.1 – Распределение индукции: 1 – индуктор ИДД; 2 – якорь ИДД.

Неподвижный индуктор состоит из двухслойной плотно намотанной круглой обмотки, замониченной эпоксидной смолой в стеклотекстолитовом прямоугольном корпусе (рис. 2,а). Обмотка индуктора и якорь выполнены из технической меди.

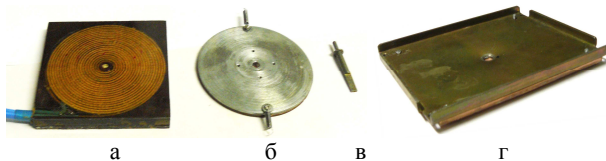


Рис. 2 – Элементы ИДД: а – индуктор; б – круглый якорь; в – боек; г – прямоугольный якорь

Рассмотрим две конструкции якоря, обеспечивающие разгон бойка (рис. 2,в). Боек проходит через центральные отверстия индуктора и якоря. Круглый якорь состоит из соединенных между собой медного и силового (стального) дисков с двумя возвратными пружинами (рис. 2,б). Четыре крепежных отверстия крепежных отверстия равномерно расположены на расстоянии $d=0,125D_{ex2}$ от центра, где D_{ex2} – внешний диаметр якоря.

Прямоугольный якорь состоит из медной пластины, которая прикреплена к силовой пластине с отогнутыми направляющими краями. Крепежные отверстия расположены в углах якоря (рис. 2,г). На рис. 2,б и 2,г показаны якоря со стороны силовой пластины. Силовые пластины позволяют передавать механический импульс от медного диска якоря исполнительному элементу ИДД – бойку (рис. 2,в).

В качестве базового варианта используем ИДД, якорь которого выполнен в форме круглого сплошного диска, коаксиально расположенного относительно индуктора. Основные параметры этого двигателя представлены в табл.

Таблица – Основные параметры двигателя.

Параметр	Обозначение	Величина
Внешний диаметр индуктора	D_{ex1}	100 мм
Внутренний диаметр индуктора	D_{in1}	10 мм
Высота индуктора	H_1	10 мм
Внешний диаметр якоря	D_{ex2}	100 мм
Внутренний диаметр якоря	D_{in2}	6 мм
Высота якоря	H_2	3 мм
Расстояние между индуктором и якорем	δ	1 мм
Количество витков индуктора	N_1	46 шт
Сечение шины индуктора	$a \times b$	$1,8 \times 4,8 \text{ мм}^2$
Емкость ЕНЭ	C	2850 мкФ
Зарядное напряжение ЕНЭ	U_0	400 В

На рис. 3 показаны временные характеристики базового варианта ИДД: плотность тока в индукторе j_1 , усредненная по сечению плотность тока в якоре j_2 , величина f_z и импульс F_z ЭДУ, действующие на якорь в аксиальном направлении.

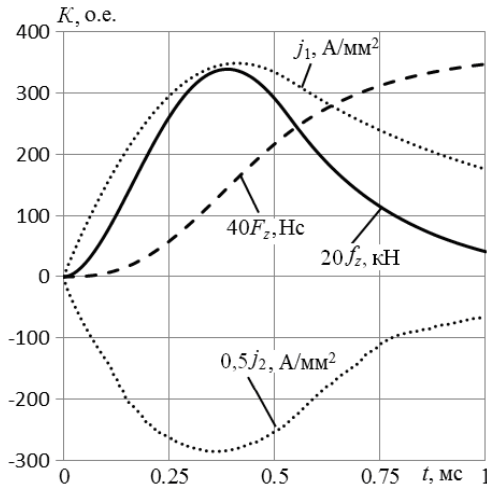


Рис. 3. Временные характеристики ИДД.

Разрядный ток в индукторе, индуцированный ток в якоре и ЭДУ имеют характер полярных импульсов. В результате сохранения полярности величины ЭДУ f_z происходит увеличение аксиального импульса ЭДУ

$$F_z = \int f_z dt, \quad (9)$$

в начале рабочего процесса с последующим насыщением к концу. Однако помимо изменения указанных рабочих показателей во времени наблюдается пространственная неравномерность электромеханических процессов.

На рис. 1 показано 2D распределение магнитной индукции в активных элементах ИДД в момент максимума ЭДУ (0,37 мс). В последующем все распределения параметров будем рассматривать при максимуме ЭДУ, действующих на якорь. Можно отметить существенную неравномерность распределения индукции магнитного поля, как в радиальном, так и в аксиальном направлениях в активных элементах ИДД. Наибольшая индукция возникает в центральной области индук-

тора и в зоне между индуктором и якорем, а наименьшая – внутри индуктора.

Кроме того, наблюдается и пространственная неравномерность распределения индуцированного тока по сечению якоря. На рис. 4 представлено распределение средней плотности тока по сечению якоря базового варианта ИДД в радиальном направлении в разные моменты времени. Наименьшая плотность тока наблюдается на внутреннем радиусе якоря. Расположение области с максимальной плотностью индуцированного тока не является постоянной: в начальный момент (до 0,2 мс) она находится на наружной поверхности, а со временем (после 0,3 мс) перемещается во внутреннюю область якоря.

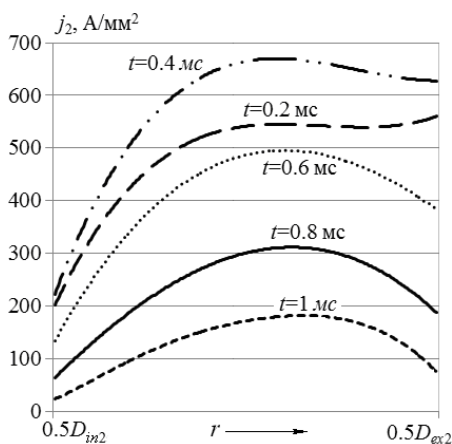


Рис. 4 – Распределение средней плотности тока якоря в радиальном направлении в разные моменты времени.

Таким образом, в ИДД наблюдаются существенные пространственно-временные неравномерности распределения индукции магнитного поля и индуцированного тока по сечению якоря. В базовом варианте ИДД, имеющего осевую симметрию индуктора и якоря, пространственные распределения электромагнитных параметров описываются 2D математической моделью.

Влияние оверстий в круглом якоре на силовые показатели ИДД. Поскольку медный диск якоря не имеет достаточной механической жесткости, то к нему при помощи крепежных элементов присоединяется силовой диск. Возникающие при этом цилиндрические крепежные отверстия в медном диске якоря нарушают 2D распределение

индуцированных токов. Рассмотрим влияние количества и места расположения крепежных отверстий (диаметр 4 мм) в медном диске якоря, которые симметрично расположены относительно оси якоря.

На рис. 5 представлен общий вид индуктора и якоря с четырьмя крепежными отверстиями, в котором показано распределение индуцированного тока в момент максимума ЭДУ. На рис. 6 представлены якоря с различным количеством и расположением крепежных отверстий и распределением плотности индуцированного тока на прилегающей к индуктору поверхности. Расположение отверстий и их количество влияют на распределение индуцированной плотности тока, но в основном вблизи отверстий.

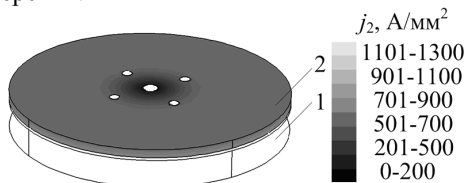


Рис. 5 – Общий вид индуктора 1 и якоря 2 с распределением тока в якоре.

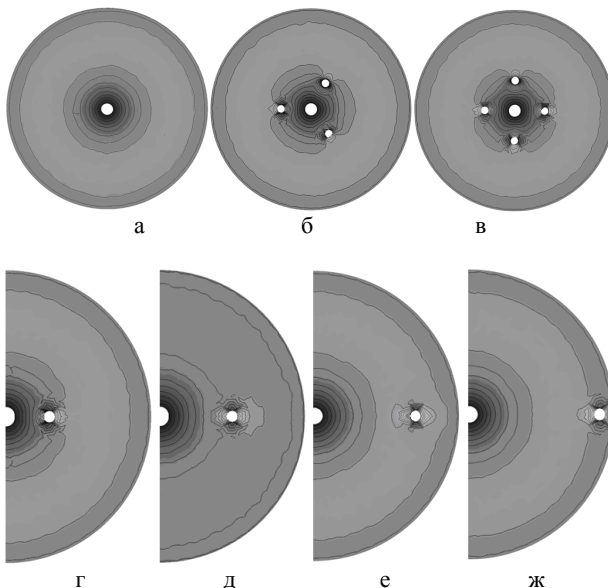


Рис. 6 – Распределение плотности индуцированного тока в якорях с различными отверстиями.

На рис. 7 показана зависимость импульса ЭДУ от диаметра d окружности, на котором расположены два отверстия якоря (рис. 6,г-д).

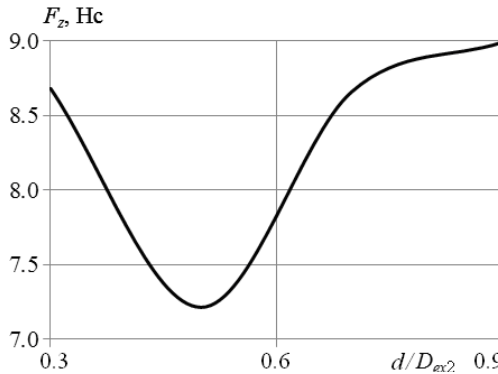


Рис.7 – Зависимость импульса ЭДУ от относительного диаметра d окружности, на котором расположены два отверстия якоря.

Как показывают расчеты, если отверстия расположены вблизи центрального отверстия якоря, то они мало влияют на эффективность ИДД. В наибольшей степени эффективность ИДД снижается при расположении отверстий вблизи среднего радиуса якоря ($d=0,5D_{ex2}$). Это можно объяснить тем, что в этой области якоря индуцируется ток с наибольшей плотностью. Если отверстия расположены вблизи наружного диаметра якоря, то происходит даже некоторое повышение эффективности ИДД, что можно пояснить выталкиванием индуцированного тока в среднюю часть якоря, где плотность тока максимальна (рис. 4).

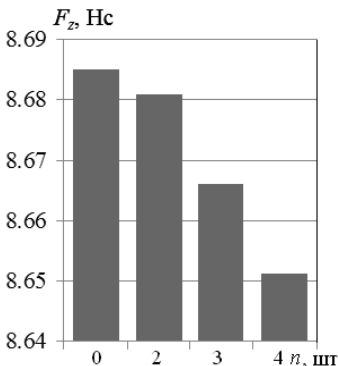


Рис. 8 – Зависимость импульса ЭДУ от количества отверстий.

На рис. 8 показана зависимость импульса ЭДУ от количества отверстий n , расположенных на одном расстоянии от центра ($d=0,3D_{ex2}$). Как показывают расчеты, с увеличением количества отверстий происходит снижение величины импульса ЭДУ. Это можно объяснить тем, что каждое отверстие локально перераспределяет индуцированный ток якоря так, что в тангенциальном направлении плотность тока уменьшается, а в радиальном направлении уве-

личивается. При этом уменьшение плотности тока в тангенциальном направлении происходит в большей степени, чем увеличение в радиальном направлении. Однако в целом, влияние количества отверстий n , расположенных на окружности одного радиуса, на величину импульса ЭДУ незначительно и находится на уровне до 1 %.

Исходя из проведенных расчетов при учете симметричности конструкции и надежности крепления силового диска с медным якорем, выбрано четыре крепежных элемента.

На рис. 9 показаны распределения плотностей индуцированного тока в радиальных сечениях якоря в момент максимума ЭДУ при наличии четырех отверстий, расположенных на одном расстоянии от центра ($d=0,3D_{ex2}$).

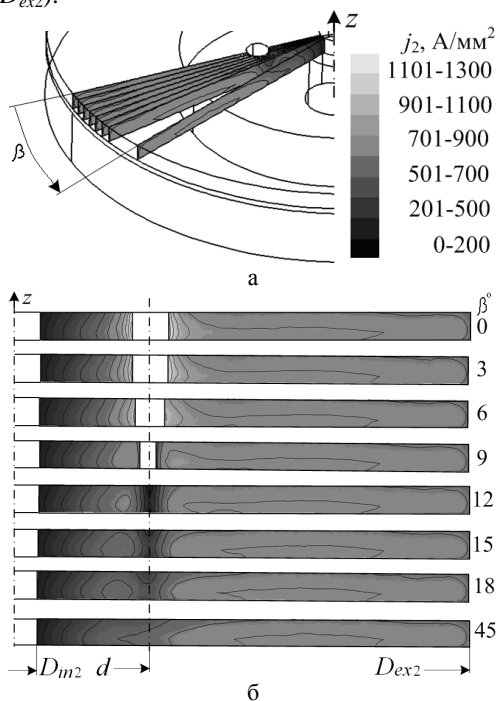


Рис. 9 – Распределения плотностей индуцированного тока в радиальных сечениях якоря: а – схема расположения сечений якоря; б – распределения в них плотностей тока.

При угле $\beta=0^\circ$ сечение проходит через центр отверстия, а при $\beta=45^\circ$ сечение расположено на равном расстоянии от двух смежных

отверстий. Как следует из представленных распределений, изменение плотности тока по сечению якоря происходит в основном вблизи отверстия. Уже на расстоянии, равном 2-3 диаметра отверстия индуцированный ток практически не меняется. Представленные распределения подтверждают, что вблизи отверстия происходит увеличение плотности индуцированного тока в радиальном направлении и уменьшение – в тангенциальном направлении.

На рис. 10 показано изменение средней плотности тока якоря в радиальном направлении в крайних сечениях при $\beta=0^\circ$ и при $\beta=45^\circ$. Наличие отверстия приводит к резкому увеличению плотности тока на его краях. Но по мере удаления от отверстия плотность тока приближается к плотности тока базового варианта якоря (без отверстий).

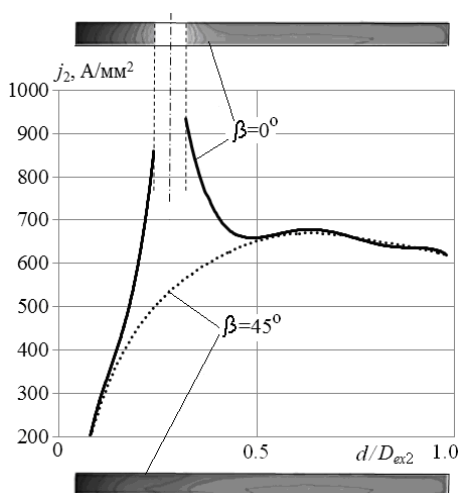


Рис.10 – Средняя плотность тока якоря в радиальном направлении в сечениях, соответствующим углам $\beta=0^\circ$ и $\beta=45^\circ$.

На рис. 11 представлены распределения плотностей индуцированного тока на отдаленной и прилежащей наружных сторонах якоря относительно индуктора. При сохранении общей картины распределения наблюдается меньшая плотность тока на отдаленной стороне якоря по отношению к прилегающей к индуктору стороне.

Наличие отверстий приводит к перераспределению магнитных полей в окружающем их пространстве. На рис. 12 представлено распределение индукции магнитного поля в радиальном сечении ИДД, якорь которого имеет 4 отверстия. Отверстие уменьшает магнитное

поле в области между якорем и индуктором непосредственно под отверстием. При этом наблюдается концентрация поля на краях отверстия, обращенных к индуктору.

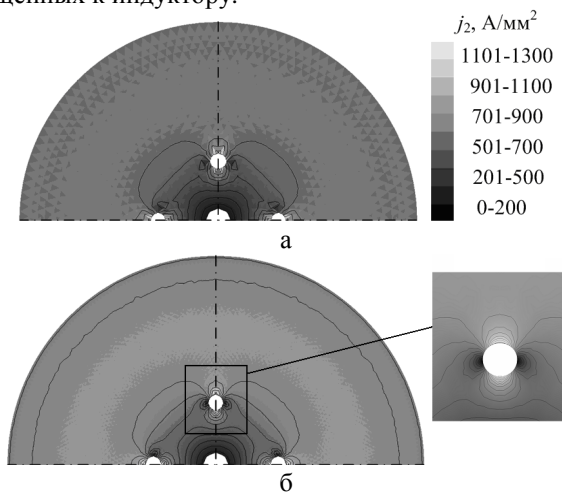


Рис.11 – Распределения плотностей тока относительно индуктора: а – на отдаленной стороне якоря; б – на прилежащей стороне якоря.

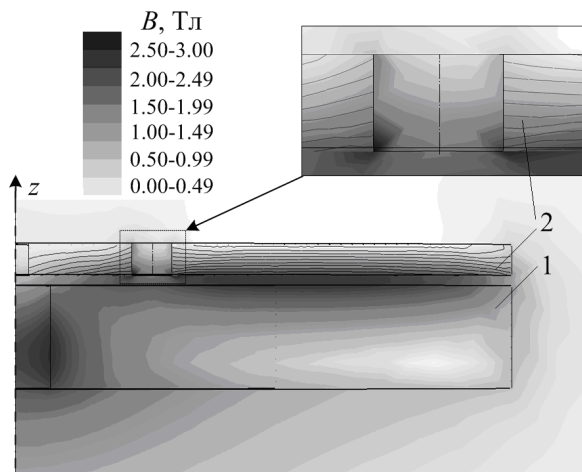


Рис. 12 – Распределение индукции магнитного поля в ИДД с выделением зоны отверстия якоря: 1 – индуктор; 2 – якорь.

Влияние прямоугольного якоря на силовые процессы ИДД.

Прямоугольный якорь (рис. 2,г) имеет ряд конструктивных преимуществ по сравнению с круглым якорем при использовании в автономных устройствах с высокими удельными показателями. При этом возникает вопрос о влиянии такой формы на характер распределения индуцированного тока в якоря, в то время, как индуктор имеет круглую форму. На рис. 13,а показан общий вид ИДД, у которого прямоугольный якорь выполнен с центральным отверстием и с четырьмя крепежными отверстиями, расположенными в углах. Ширина прямоугольного якоря $B=100$ мм, длина $A=120$ мм и высота $H_2=3$ мм. На рис. 13,б показано распределение индуцированного тока в якоря. Вблизи центральной оси распределение тока практически симметрично относительно оси, а основные отличия возникают на концах прямоугольного якоря. На участках якоря, расположенных вне индуктора (в углах и концах длинной стороны) плотности индуцированного тока здесь минимальны, что показывает целесообразность расположения здесь крепежных отверстий.

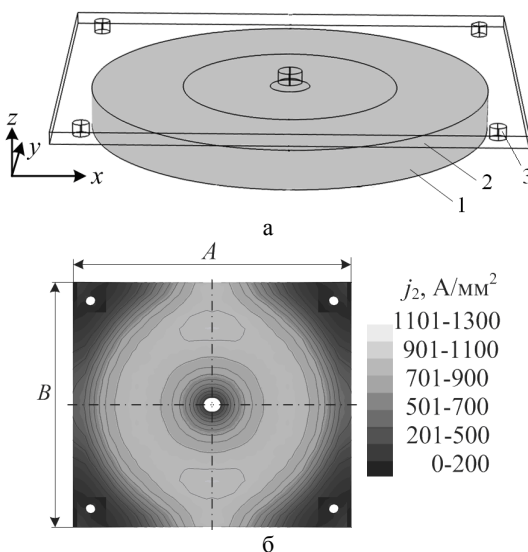


Рис. 13 – Общий вид ИДД: а – с прямоугольным якорем; б – распределение плотности тока в якоря; 1 – индуктор; 2 – якорь; 3 – крепежное отверстие.

При изменении длины якоря A меняется распределение индуцированного тока якоря. В коротком якоря, длина которого меньше по-

ловины диаметра индуктора (рис. 14,а), максимальная плотность тока концентрируется на его краях.

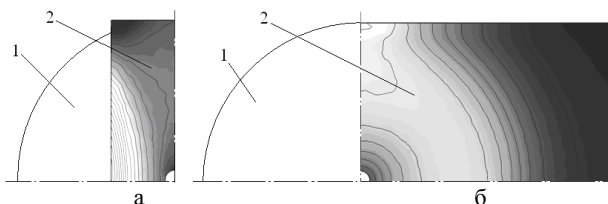


Рис. 14 – Распределение индуцированного тока в якоре длиной: а – $A=0,4B$; б – $A=1,6B$; 1 – индуктор; 2 – якорь.

В длинном якоре, длина A которого превышает диаметр индуктора (рис. 14,б), максимальная плотность имеет место в средней части, в то время как на краях ток минимален. На рис. 14 использована та же шкала плотности тока, что и на рис. 13.

Изменение длины прямоугольного якоря A и связанное этим перераспределение индуцированного тока влияет на величину импульса ЭДУ F_z (рис. 15). Однако зависимость эта нелинейная. Так при увеличении длины A в два раза от $0,4B$ до $0,8B$ импульс ЭДУ увеличивается более, чем в 2,5 раз. А при увеличении длины A от $0,8B$ до $1,2B$ импульс ЭДУ увеличивается лишь в 1,1 раз, а при дальнейшем увеличении длины якоря величина импульса ЭДУ F_z практически не меняется. Таким образом, наиболее целесообразно изготавливать якорь, длина которого примерно равна его ширине.

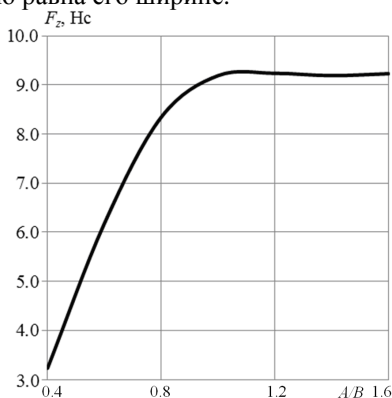


Рис.15 – Зависимость импульса ЭДУ от относительной длины A прямоугольного якоря.

Влияние наклона круглого якоря на силовые процессы ИДД.

Рассмотрим влияние угла наклона якоря α в исходном состоянии относительно индуктора на электромагнитные и электродинамические показатели ИДД (рис. 16,а). При наклоне якоря вдоль оси x наблюдается неравномерность распределения индуцированного тока и аксиальных ЭДУ. Максимальная плотность тока вдоль оси x наблюдается в области ниже и вблизи центральной оси, а минимальная – в нижней точке, прилегающей к индуктору (рис. 16,а). Выше центральной оси ближе к наружной поверхности наблюдается второй пик плотности тока, но его величина значительно ниже первого пика.

Однако распределение ЭДУ по поверхности наклоненного якоря совершенно иное (рис. 16,б). Максимальные ЭДУ действуют на нижний участок, прилегающий к индуктору и вдоль оси x уменьшаются. При этом в нижней части якоря недалеко от центрального отверстия существует область, в которой ЭДУ меняют знак на противоположный.

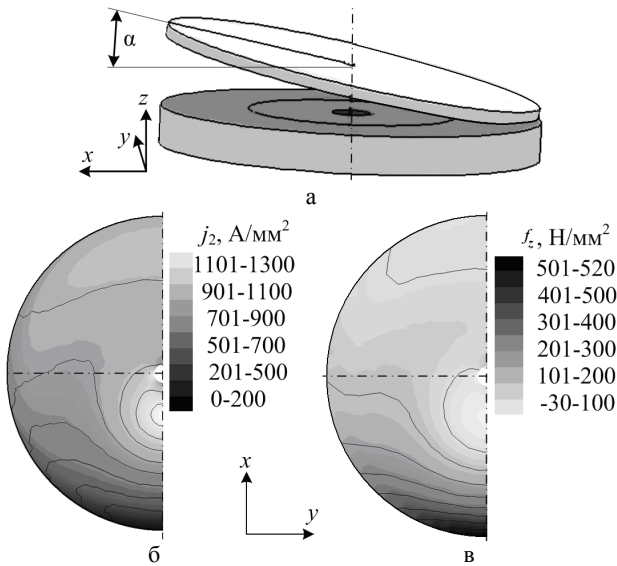


Рис.16 – ИДД: а – расположение якоря относительно индуктора; б – распределение плотности тока в якоря; в – распределение аксиальных ЭДУ в якоря при $\alpha=40^\circ$.

Если якорь и индуктор расположены аксиально, то существует симметрия магнитного поля относительно оси z (рис. 17,а). При наклоне якоря относительно индуктора магнитное поле не имеет указанной симметрии (рис. 17,б). Это поле усиливается в области между индуктором и прилегающей к нему нижней частью якоря. В области между индуктором и поднятой частью якоря поле ослабляется.

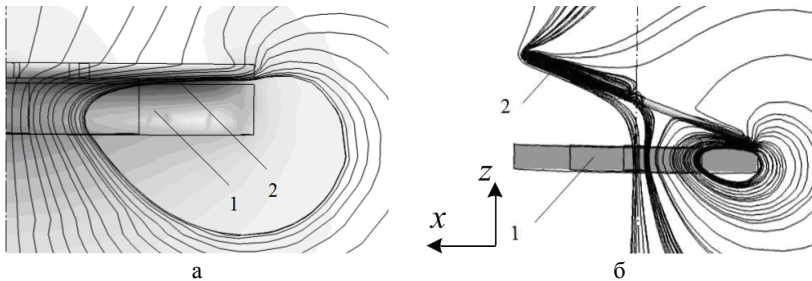


Рис. 17 – Распределение силовых линий магнитного поля: а – в поперечном сечении на половине ИДД при $\alpha=0^\circ$; б – по всему ИДД при $\alpha=40^\circ$.

Вследствие пространственного перераспределения магнитных полей и индуцированных токов в якоре, обусловленного его наклоном относительно индуктора, происходит изменение ЭДУ, действующих на якорь.

На рис. 18 показано изменение аксиального F_z и продольного F_x импульсов ЭДУ, действующих на якорь, от угла его наклона α относительно индуктора. При увеличении угла наклона на 5° аксиальный импульс силы F_z снижается на 31 %, а при наклоне на 10° F_z – на 64 %. При этом возникает продольный импульс ЭДУ F_x , направленный вдоль оси наклона. При этом если аксиальный импульс силы F_z с увеличением угла наклона падает, то продольный импульс F_x имеет более сложный характер изменения. При увеличении угла наклона α от 0° до 12° величина F_x возрастает, а при дальнейшем увеличении α указанный импульс ЭДУ снижается.

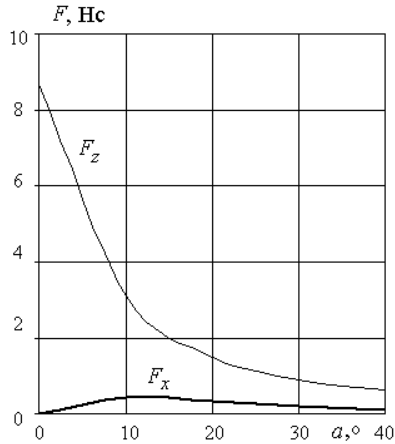


Рис. 18 – Зависимость величины импульсов ЭДУ от угла наклона якоря относительно индуктора.

Экспериментальные исследования. Для проведения испытаний использовалась экспериментальная установка, представленная на рис. 19, которая содержит силовую опору 1 в виде скобы, внутри которой установлен индуктор 2.

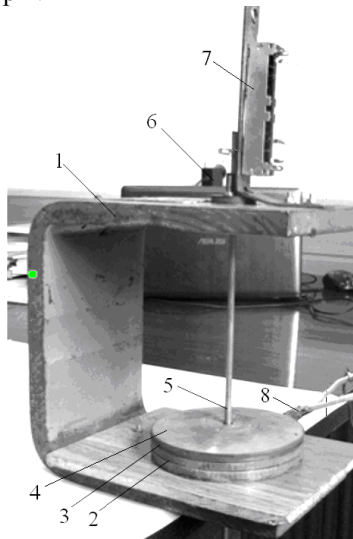


Рис. 19 – Общий вид экспериментальной установки.

На индукторе коаксиально расположен медный якорь 3, к которому присоединен силовой диск 4. С диском 4 соединен центральный направляющий штырь 5. Сверху на наружной поверхности силовой опоры 1 расположены датчик виброускорения датчик 6 и вертикальный резисторный датчик перемещения 7. Возбуждение индуктора 2 осуществлялось от ЕНЭ емкостью $C=1660$ мкФ и $U=300$ В, с использованием электронной системы, которая формировала полярный импульс тока, через токовводы 8.

На рис. 20 показаны медные якоря круглой и прямоугольной формы, которые были использованы в экспериментах. Якоря с силовыми пластинами соединены при помощи четырех крепежных элементов, расположенных симметрично в круглом якоре и в углах прямоугольного якоря.

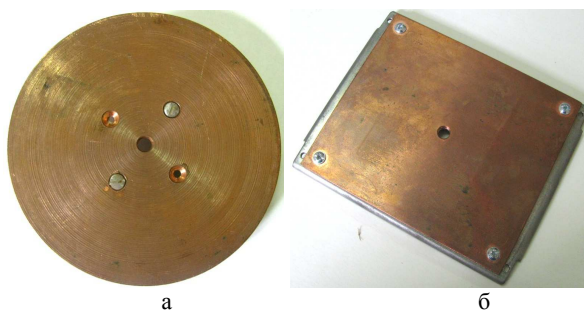


Рис. 20 – Экспериментальные образцы якоря; а – круглой формы; б – прямоугольной формы.

На рис. 21 показаны осциллограммы аperiодического импульса тока индуктора и датчика перемещений круглого якоря вертикально вверх. На рис. 22 представлены осциллограммы импульса тока и датчика виброускорения, полученные при использовании прямоугольного заторможенного якоря. Как следует из представленных осциллограмм, между началом импульса возбуждения индуктора и началом механических процессов якоря (перемещением или соударением бойка заторможенного якоря) имеется время задержки, равное примерно 1 мс.

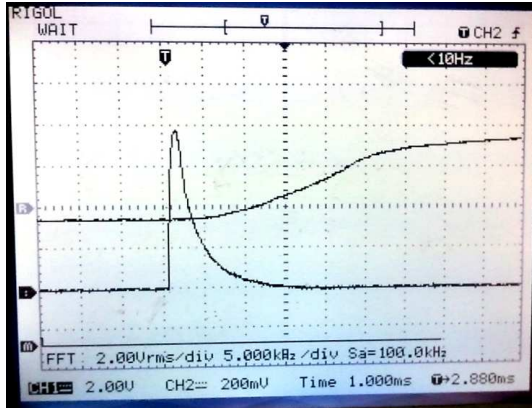


Рис. 21 – Осциллограммы аperiodического импульса тока индуктора (канал 1) и перемещения круглого якоря (канал 2).

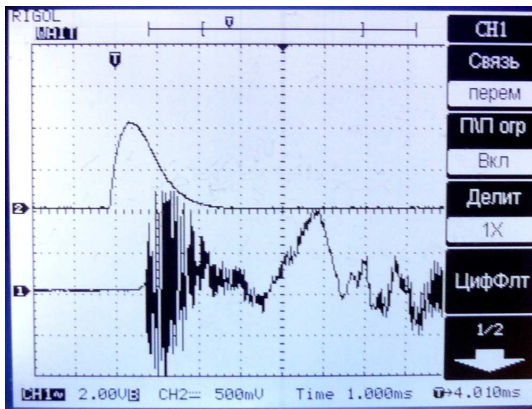


Рис. 22 – Осциллограммы аperiodического импульса тока индуктора (канал 2) и датчика виброускорения (канал 1).

Из полученных осциллограмм следует, что форма и величина импульсов тока в индукторе удовлетворительно (см. рис.3) совпадает с расчетными кривыми. Аналогичное утверждение можно сделать относительно механических процессов: динамики перемещения якоря и величины импульса ЭДУ, пропорциональной величине начального размаха виброускорений. Таким образом, можно отметить удовлетворительную сходимость экспериментальных и основных расчетных результатов.

Выводы.

Разработана 3D математическая модель ИДД, учитывающая взаимосвязанные электромагнитные, механические и тепловые процессы.

Исследовано влияние формы якоря, расположение и количество крепежных отверстий в круглом якоре, его наклон по отношению к индуктору на силовые показатели ИДД.

Проведенные экспериментальные исследования подтвердили основные результаты расчетов и теоретические положения.

Список литературы: 1. *Болюх В.Ф., Данько В.Г.* Лінійні електромеханічні перетворювачі імпульсної дії. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2006. – 260 с. 2. *Стрижаков Е.Л., Хахин Н.А., Бацамакин Д.С.* Автоматизированная установка для магнитно-импульсной сварки. Автоматическая сварка. – 2004. – № 2. – С. 53-55. 3. *Татмьшевский К.В., Семенович М.Л., Козлов С.А.* Магнитно-импульсные метательные установки для проведения ударных испытаний взрывательных устройств боеприпасов и средств бронезащиты. // Известия РАН. – 2005. – № 4. – С. 22-31. 4. *Мазуренко М.И., Петухов В.А., Поводайло В.А.* и др. Электродинамический импульсный клапан для получения молекулярных пучков // Приборы и техника эксперимента. – 2002. – № 2. – С. 152-155. 5. *Кузнецов П.В., Толмачев Н.С., Харитонов В.Д.* и др. Индукционно-динамическая система очистки сушильного оборудования // Молочная промышленность. – 1989. – № 1. – С. 25-26. 6. *Анисимов Г.И.* Импульсные способы зачистки остатков сmerzшихся грузов // Промышленный транспорт. – 1988. – № 2. – С. 22-25. 7. *Болюх В.Ф., Щукин И.С.* Индукционно-импульсное гашение скорости подвижного объекта // Электротехніка і електромеханіка. – 2012. – № 3. – С. 14-20. 8. *Болюх В.Ф., Винниченко А.И.* Концепция индукционно-динамической катапульты баллистического лазерного гравиметра // Измерительная техника. – 2013. – № 10. – С. 6-10. 9. *Болюх В.Ф., Олексенко С.В., Щукин И.С.* Влияние параметров ферромагнитного сердечника на эффективность индукционно-динамического двигателя // Электротехніка і електромеханіка. – 2012. – № 6. – С. 20-27. 10. *Болюх В.Ф., Бенаисса Омар, Олексенко С.В.* Методика выбора параметров индукционно-динамического двигателя с ферромагнитным сердечником // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2013. – № 51. – С. 3-15.

Поступила в редколлегию 17.12.2013

УДК 621.313:536.2.24:539.2

Влияния формы и расположения якоря на эффективность индукционно-динамического двигателя с использованием 3D модели / Болюх В.Ф., Олексенко С.В., Щукин И.С. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удо-

сконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПІ", 2013. – № 65 (1038). – С. 63-83. Бібліогр.: 10 назв.

Розроблена тримірна математична модель індукційно-динамічного двигуна, яка враховує взаємопов'язані електромагнітні, механічні та теплові процеси. Досліджено вплив форми якоря, розташування та кількості кріпильних отворів в круглому якорі, його нахил по відношенню до індуктора на силові показники двигуна. Проведені експериментальні дослідження електричних та механічних процесів в індукційно-динамічному двигуні, які підтвердили основні розрахункові результати та теоретичні положення.

Ключові слова: індукційно-динамічний двигун, якір, тривимірна математична модель, форма якоря, нахил якоря по відношенню до індуктора, експериментальні дослідження.

Developed a three-dimensional mathematical model of induction-dynamic engine, taking into account the related electromagnetic, mechanical, and thermal processes. The influence of the anchor form, location and number of mounting holes in the round anchor, its inclination with respect to the inductor on the power performance of the engine. Experimental studies of electrical and mechanical processes in induction-dynamic engine, which confirmed the main calculation results and theoretical positions.

Keywords: induction-dynamic engine, anchor, three-dimensional mathematical model, the shape of anchors, anchor inclination with respect to the inductor, and experimental investigations.