

УДК 621.313:536.2.24:539.2

Болюх В.Ф., Олексенко С.В.

### ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ФЕРРОМАГНИТНОГО СЕРДЕЧНИКА НА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ИНДУКЦИОННО-ДИНАМИЧЕСКОГО ДВИГАТЕЛЯ

**Введение.** Индукционно-динамические двигатели (ИДД), предназначенные для обеспечения кинетических импульсов при перемещении якоря с исполнительным ударным элементом и применяются в различных областях научных исследований, промышленности, технологии и сферах безопасности, где используются электромеханические системы ударно-импульсного действия [4].

Как правило, большинство ИДД выполняются без ферромагнитного сердечника (ФС), что обусловлено быстродействием протекающего рабочего процесса, значительным уровнем возбуждаемых электромагнитных полей и ограничениями по массогабаритным показателям [5].

Однако применение ФС при определенных геометрических параметрах может существенно повлиять на распределение магнитных полей в ИДД, снижая рассеяние в окружающее пространство и увеличивая в активной зоне между неподвижным индуктором и подвижным электропроводящим якорем [8]. Как следствие, могут быть улучшены показатели электромагнитной совместимости с близко расположенными электронными устройствами и экологическая чистота для окружающего персонала, при одновременном повышении кинетических показателей ИДД.

Одним из факторов, сдерживающих применение ФС в ИДД, является отсутствие эффективных математических моделей и соответствующего программного обеспечения. Из-за этого затруднительно обеспечить выбор эффективных конфигураций, геометрических параметров и конструктивных элементов ФС, которые в максимальной степени удовлетворяющих ряду противоречивых факторов. Известные математические модели ИДД используют постоянство магнитной проницаемости, линейность кривой намагничивания и отсутствие насыщения стали ФС, равномерность индуцированного тока по сечению якоря, пренебрежение нагрева электропроводящих элементов ИДД током и не учитывают в полной мере физику сопротивления среды при движении якоря с исполнительным элементом [1-2]. Эти и другие упрощения существенно искажают реальную действительность быстропротекающих рабочих процессов ИДД.

Целью статьи является установление зависимости эффективности ИДД, работающего в двигательном режиме, от геометрических параметров ФС при учете комплекса кинетических, силовых и массогабаритных показателей.

**Конструктивная схема базового ИДД.** В качестве базового варианта используем ИДД коаксиальной конфигурации без ФС, общий вид которого представлен на рис. 1

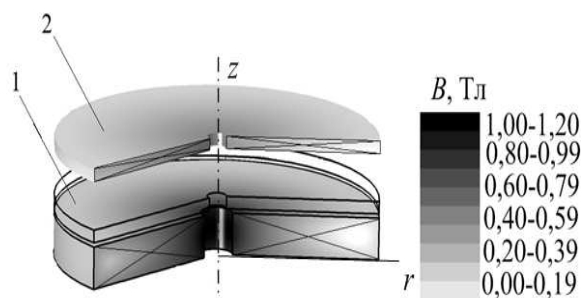


Рисунок 1 – Базовый вариант ИДД

ИДД состоит из многовиткового дискового индуктора 1, который возбуждается от емкостного накопителя энергии (ЕНЭ) сформированном аperiodическим однополярным импульсом (индуктор шунтирован обратным диодом) и массивного (одновиткового) электропроводящего якоря 2. Индуктор выполнен монолитным (пропитан эпоксидной смолой внутри стеклотекстолитового каркаса). Токопроводящие элементы индуктора и якоря выполнены из технической меди. Основные размеры и параметры базового варианта ИДД приведены в табл. 1.

На рис. 2 показано электромеханические показатели рабочего процесса базового ИДД в двигательном режиме: плотность тока в индукторе  $j_1$ , усредненная по сечению плотность тока в якоря  $j_2$ , величина  $f_z$  и импульс  $F_z$  электродинамических усилий (ЭДУ), которые действуют на якорь, перемещаемый на расстояние  $z$  относительно индуктора со скоростью  $V_z$ .

Указанные показатели рассчитаны по методике изложенной в [6]. Через 1,2 мс после начала работы индуцированный ток якоря меняет полярность, что изменяет характер его силового воздействия: начальное отталкивание сменяется последующим притяжением. Вследствие этого импульс силы  $F_z$  и скорость якоря  $V_z$  с исполнительным элементом незначительно снижаются.

Таблиця 1 – Основные размеры и параметры базового варианта ИДД

Показатель	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	$D_{in2}$	10 мм
Высота якоря	$H_2$	3 мм
Расстояние между индуктором и якорем	$\delta$	1 мм
Количество витков индуктора	$N_1$	46 шт
Сечение шины индуктора	$a \times b$	1,8×4,8 мм <sup>2</sup>
Емкость ЕНЭ	$C$	2850 мкФ
Зарядное напряжение ЕНЭ	$U_0$	400 В

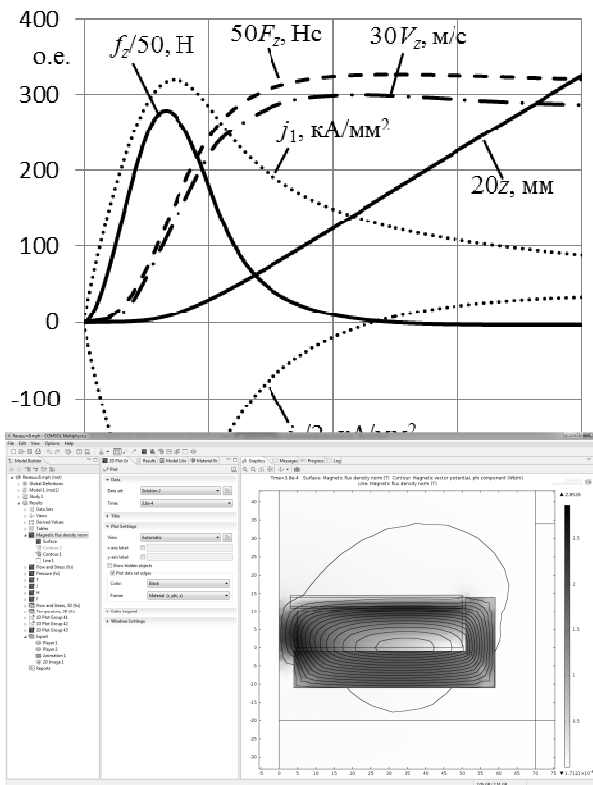


Рисунок 3. Среда моделирования

**Математическая модель ИДД с ФС.** Для исследования ИДД с ФС было проведено компьютерное моделирование в программном пакете *COMSOL Multiphysics 4.3*, основанное на дифференциальных уравнениях в частных производных, в основу которого заложен метод конечных элементов. Программное обеспечение позволяет осуществлять адаптивное построение сетки и контроль ошибок при работе с различными численными решателями. На рис.3 показан фрагмент программы с исходными данными и рассчитанным распределением магнитных полей в момент максимума ЭДУ.

Рассчитывается векторный магнитный потенциал  $A$  с использованием условия Дирихле на внешних границах расчетной области

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r\mu(B)} \frac{\partial(rA)}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{1}{\mu(B)} \frac{\partial A}{\partial z} \right) - \gamma \frac{\partial A}{\partial t} = 0, (1)$$

где  $\mu(B)$  – магнитная проницаемость, зависящая от индукции магнитного поля для материала ФС;  $\gamma$  – электропроводность ФС.

Составляющие вектора магнитной индукции находятся по известным соотношениям

$$B_z = \frac{1}{r} \frac{d(rA)}{dr}; B_r = -\frac{dA}{dz}. (2)$$

Граничными условиями системы является  $n \times A = 0$ , где  $n$  – единичный вектор внешней нормали к поверхности.

Плотность тока в конечных элементах якоря определяется по известному выражению

$$j = -\gamma \frac{\partial A}{\partial t}. (3)$$

Сила, действующая на тело, заключенные в заданный объем рассчитывается следующим образом

$$f_z = 0,5 \int \left[ (H(B \cdot n)) + B(H \cdot n) - n(H \cdot B) \right] dS . \quad (4)$$

Для материала ФС используется нелинейная кривая намагничивания  $B = f(H)$ . Импульс ЭДУ, действующий на якорь, определяется выражением:

$$F_z = \int_0^t f_z dt. \quad (5)$$

При расчете переходных электромагнитных, электродинамических и тепловых процессов ИДД предполагаем отсутствие механических перемещений (отдачи) индуктора и деформации элементов ИДД и учитываем пространственное распределение индуцированного тока в якоре на каждом временном шаге.

**Влияние ФС на показатели ИДД.** Рассмотрим ФС, выполненный из стали (Ст.10-1010). Коаксиальный ФС 3 комбинированной формы можно представить состоящим из дискового основания 3а, охватывающего индуктор 1 снизу, наружной обечайки 3б (рис. 4). На рис. 4а показано схематическое устройство ИДД с указанием геометрических параметров ФС и распределением магнитного поля в момент максимума ЭДУ, (шкала значений индукции которого представлена на рис. 5, и будет общей для всех последующих рисунков), на рис. 4б представлен общий вид ИДД с ФС. Указанный ферромагнитный сердечник, представляемый совокупностью  $i$ -ых цилиндрических участков, где  $i=\{a, b\}$ , можно описать следующими геометрическими параметрами: внешним диаметром  $D_{ex3i}$ , внутренним диаметром  $D_{in3i}$  и высотой  $H_{3i}$  каждого участка. Начальное расстояние между смежно расположенными сторонами индуктора и ФС занимает изоляцией и равно  $\delta = 1$  мм.

Геометрические параметры ФС будем описывать следующими безразмерными параметрами

$$\chi = \frac{H_{3a}}{H_1}; \quad \varepsilon = \frac{H_{3b}}{H_1}; \quad \theta = \frac{D_{ex3b}}{D_{ex1}}. \quad (6)$$

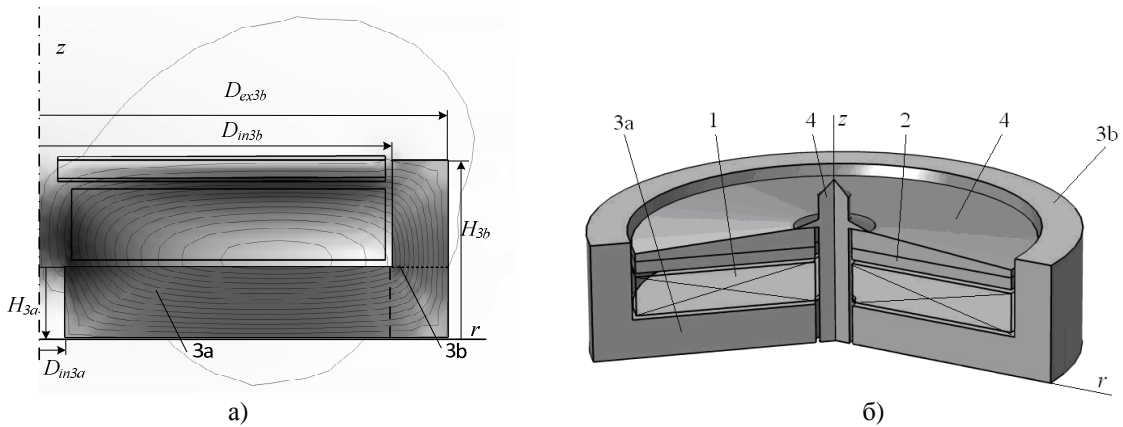


Рисунок 4 – Схематическое устройство ИДД с ФС

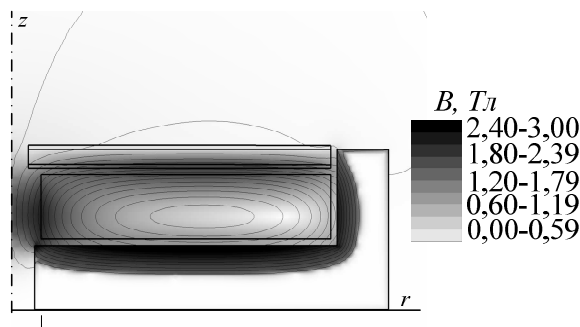


Рисунок 5 – ИДД с массивным ФС

При выполнении ФС массивным (нешихтованным), возникающие в нем вихревые токи экранируют проникновение магнитного поля в глубь сердечника (рис. 5). Кроме того, вихревые токи в ФС при взаимодействии с током индуктора снижают силовые показатели ИДД (при данных расчетах ИДД использовалась электропроводность стали Ст.10). Таким образом, для того, чтобы сердечник эффективно проводил магнитный поток и не уменьшал силовое воздействие на якорь, его электропроводность для вихревых токов должна быть минимально возможной. Это достигается путем радиальных разрезов или выполнения ФС шихтованным. В последующее будем рассматривать идеализированный сердечник, в котором вихревые токи полностью устранены, т.е. его электропроводность равна нулю.

Введение ФС изменяет амплитудные и временные показатели рабочего процесса ИДД. На рис. 6 представлены электромеханические характеристики для варианта ФС, представленного на рис 4а.

На рис. 7 показаны пространственные распределения магнитных полей рассматриваемого ИДД в различные моменты времени, откуда следует, что ФС существенно уменьшает поля рассеяния, выталкивая их в зону подвижного якоря.

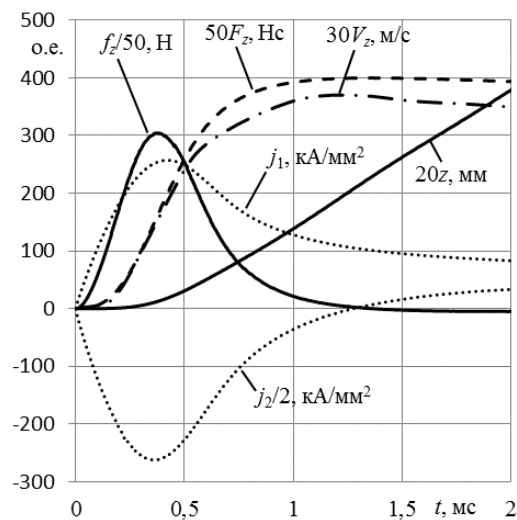


Рисунок 6 – Амплитудные и временные показатели рабочего процесса ИДД с ФС

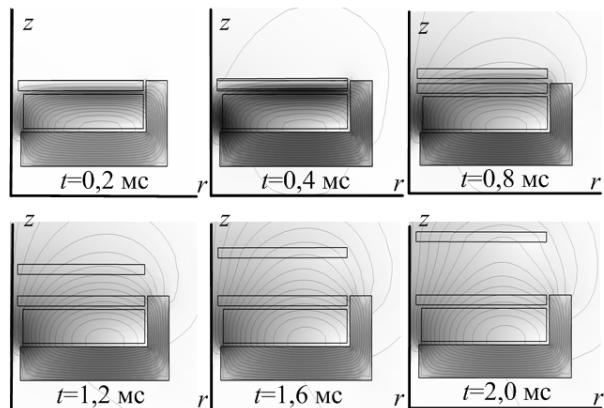


Рисунок 7 – Пространственные распределения магнитных полей ИДД с ФС для различных моментов времени

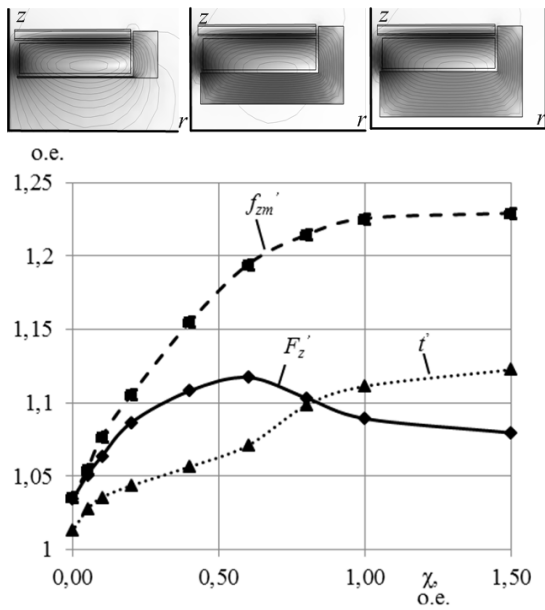
Таким образом, ФС существенно влияет на силовые и кинетические показатели ИДД, амплитуду тока индуктора, длительность рабочих процессов и электромагнитную совместимость. Однако при этом ФС увеличивает массогабаритные показатели двигателя, что требует комплексного рассмотрения вопроса с учетом различных факторов.

**Влияние геометрических параметров ФС на эффективность ИДД.** Рассмотрим влияние толщины дисковой части ФС на эффективность ИДД. Остальные безразмерные геометрические параметры ФС при этом неизменны и равны:  $\theta = 1,0$ ;  $\varepsilon = 2,5$ .

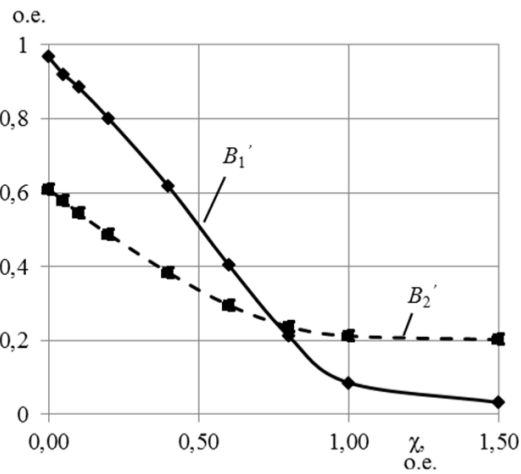
Увеличение толщины дисковой части ферромагнитного сердечника  $H_{3a}$ , представленного на рис. 8 в виде безразмерного геометрического параметра  $\chi$ , существенно влияет на показатели ИДД. Дисковая часть ферромагнитного сердечника при определенной величине параметра  $\chi$  увеличивает максимальный импульс силы  $F_z$  на 13 % (при  $\chi=1$ ). При этом происходит затягивание рабочего процесса на 11 %, рост максимальной силы  $f_{zm}$  на 23 % и скорости  $V_{max}$  на 27 %, которые сопровождаются увеличением массы и габаритных параметров ИДД. Значение  $\chi=1$  является оптимальным, поскольку большая часть силовых линий магнитного поля замыкаются через ФС. Дальнейший рост геометрического параметра  $\chi$  ФС не приводит к существенному улучшению эффективности ИДД, а лишь ухудшает массо-габаритные параметры. Значение  $\chi = 1$  является оптимальным, поскольку большая часть силовых линий магнитного поля замыкаются через ФС. Дальнейший рост геометрического параметра  $\chi$  ФС не приводит к существенному улучшению эффективности ИДД, а лишь ухудшает массо-габаритные параметры.

Рассмотрим влияние толщины  $D_{ex3b}$  ( $\theta$ ) внешнего цилиндра ФС на эффективность ИДД. При этом остальные безразмерные геометрические параметры ФС считаем неизменными:  $\chi = 1,0$ ;  $\varepsilon = 2,5$  (рис. 9).

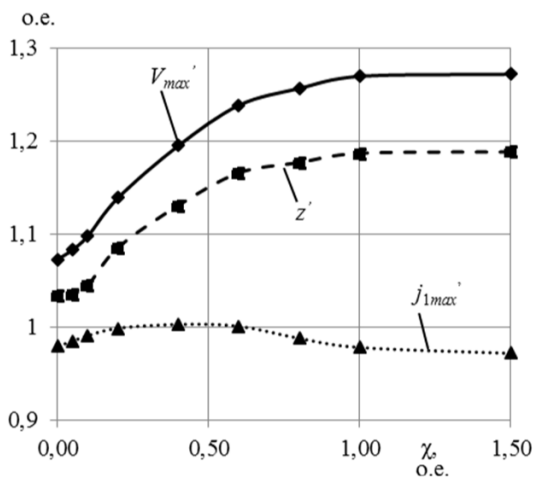
С ростом геометрического параметра  $\theta$  увеличивается импульс силы  $F_z$  на 9 %, происходит затягивание рабочего процесса на 109 %, увеличивается максимальная сила  $f_{zm}$  на 22 %, при увеличении скорости  $V_{max}$  на 27 %. Значение параметра  $\theta = 0,8$  является оптимальным.



а)

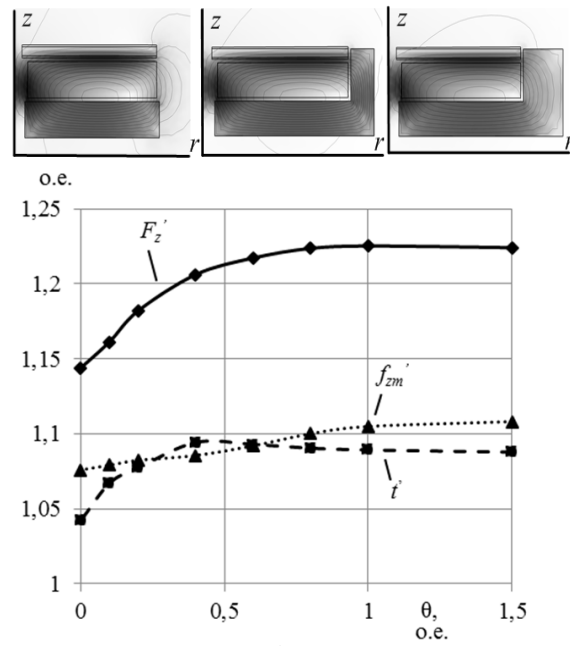


б)

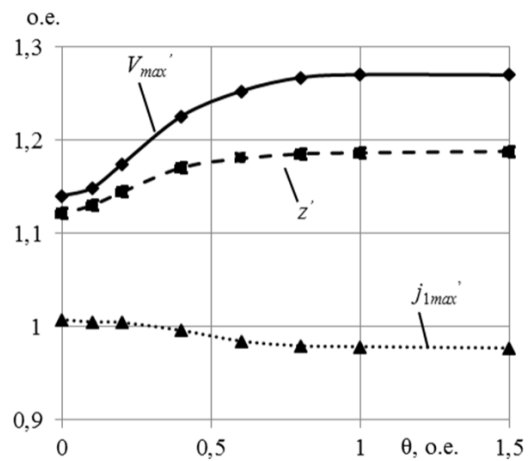


в)

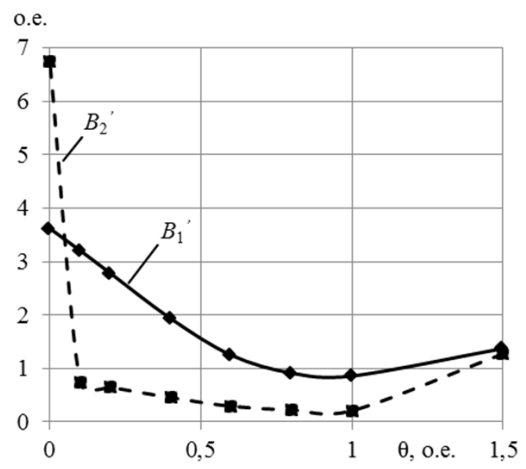
Рисунок 8 – Влияние толщины дисковой части ФС За на эффективность ИДД



а)



б)



в)

Рисунок 9 – Влияние толщины внешнего цилиндра ФС на эффективность ИДД

Рассмотрим влияние высоты  $H_{ex3b}$  внешнего цилиндра ФС на эффективность ИДД. При этом остальные безразмерные геометрические параметры ФС равны:  $\chi = 1,0$ ;  $\theta = 0,8$  (рис. 10).

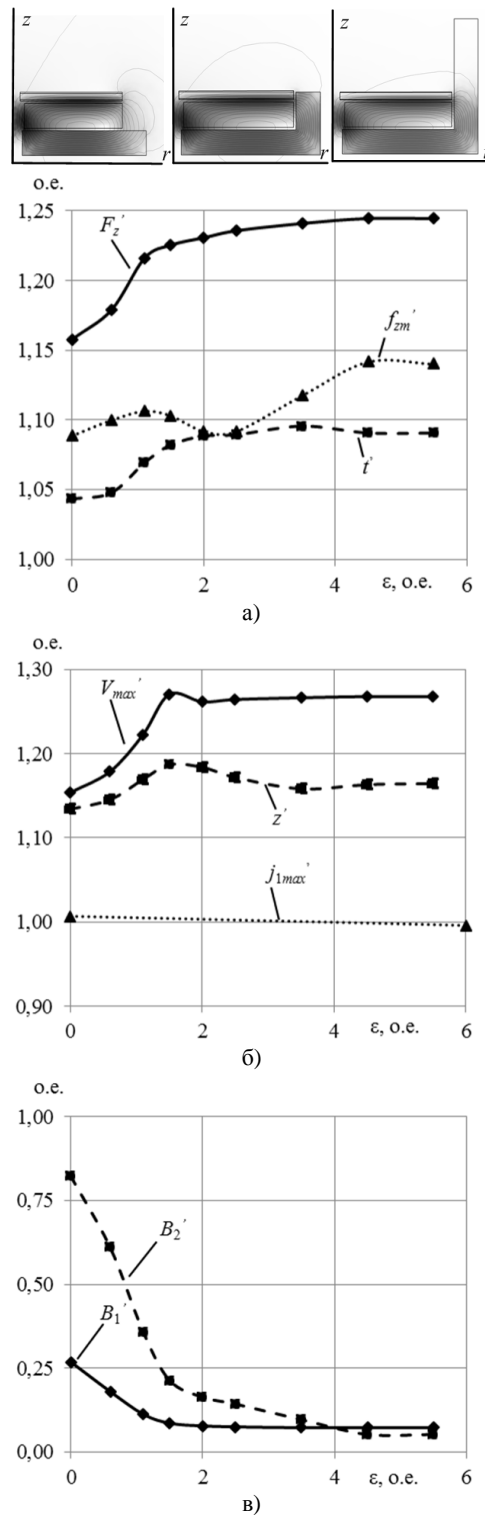


Рисунок 10 – Влияние высоты внешнего цилиндра ФС на эффективность ИДД

С ростом геометрического параметра  $\epsilon$  увеличивается импульс силы  $F_z'$  на 24 %, происходит затягивание рабочего процесса на 10 %, возрастает максимум силы  $f_{zm}'$  на 14 %, приводящие к росту скорости

$V_{max}$  на 28 %. При значенні  $\epsilon \geq 1,8$  рост практично всіх параметрів стає незначительним, і всі значення в діапазоні  $\epsilon = x\{1,8; 2,5\}$  можна вважати оптимальними.

Удалення ФС від сусідніх плоскостей індуктора має отрицательное влияние на всі параметри ІДД (рис. 11), при цьому при збільшенні значення геометричного параметра  $\delta$  більш, ніж на 12 мм (безрозмірний параметр  $\delta \geq 1,2$  -  $\delta$  к высоте індуктора  $H_1$ ) приводить к падению ефективності ІДД нижче рівня базового варіанта. При цьому відбувається зростання середнього значення магнітної індукції на досліджуваній границі на 200 % по порівнянню з первинним розташуванням ФС.

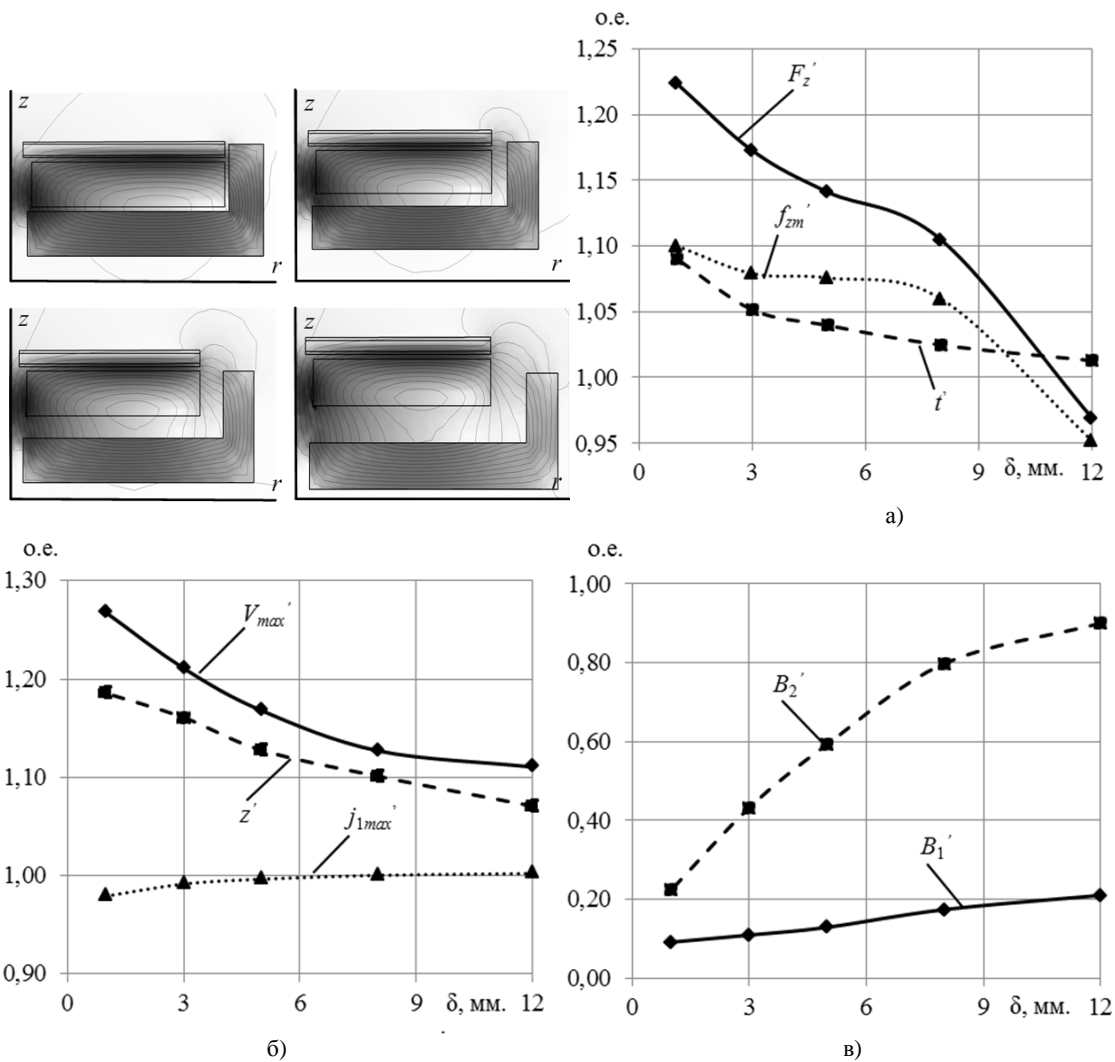


Рисунок 11 – Влияние удаления ФС от соседних плоскостей индуктора на эффективность ИДД

Таким образом, ФС должен располагаться максимально близко к индуктору, а толщина занимаемая изоляцией  $\delta$  должна быть минимально возможной

**Выводы.** Разработана математическая модель ИДД с ФС в двигательном режиме. Получены зависимости силовых, массо-габаритных, экологических и технических параметров эффективности ИДД в зависимости от геометрических размеров ФС.

Проведено математическое моделирование ИДД для различных вариаций геометрии ФС. Показано, что при определенных параметрах ФС повышает эффективность ИДД на 20–25 % в большей степени за счет повышения силовых показателей. Установлены оптимальные безразмерные геометрические параметры ФС, равные:  $\chi = 1,0$ ,  $\theta = 0,8$ ,  $\epsilon = 2,5$ , при которых параметры эффективности ИДД получают существенный рост с учетом незначительного изменения массо-габаритных значений ИДД.

## Литература

1. Болюх В.Ф., Олексенко С.В., Щукин И.С. Влияние параметров ферромагнитного сердечника на эффективность индукционно-динамического двигателя // *Электротехника і електромеханіка*. – 2012. – №6. – С. 20–27.
2. Болюх В.Ф., Олексенко С.В. Влияние конфигурации якоря на эффективность линейного электро-механического преобразователя // *Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2012.– № 49. – С. 18–26.
3. 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.
4. Кузнецов П.В., Толмачев Н.С., Харитонов В.Д. и др. Индукционно-динамическая система очистки сушильного оборудования // *Молочная промышленность*. – 1989. – № 1. – С. 25–26.
5. Анисимов Г.И. Импульсные способы зачистки остатков смерзшихся грузов // *Промышленный транспорт*. – 1988. – № 2. – С. 22–25.
6. Walls W.A., Weldon W.F., Pratap S.P. et al. Application of electromagnetic guns to future naval platforms // *IEEE Transactions on Magnetics*. – 1999. – Vol. 35, № 1. – P. 262–267.

## Bibliography (transliterated)

1. Boljuh V.F., Oleksenko S.V., Shhukin I.S. Vlijanie parametrov ferromagnitnogo serdechnika na jeffektivnost' indukcionno-dinamicheskogo dvigatelja *Elektrotehnika i elektromehanika*. – 2012. – #6. – p. 20–27.
2. Boljuh V.F., Oleksenko S.V. Vlijanie konfiguracii jakorja na jeffektivnost' linejnogo jelektromehanicheskogo preobrazovatelja *Visnik NTU «HPI»*. Serija: Problemi udoskonalennja elektrichnih ma-shin i aparativ. Teorija i praktika. – Harkiv: NTU «HPI». – 2012.– # 49. – p. 18–26.
3. Mazurenko M.I., Petuhov V.A., Povedajlo V.A. i dr. Jelektrodinamicheskij impul'snyj klapan dlja poluchenija molekularnyh puchkov *Pribory i tehnika jeksperimenta*. – 2002. – # 2. – p. 152–155.
4. Kuznecov P.V., Tolmachev N.S., Haritonov V.D. i dr. Indukcionno-dinamicheskaja sistema ochistki suhil'nogo oborudovanija *Molochnaja promyshlennost'*. – 1989. – # 1. – p. 25–26.
5. Anisimov G.I. Impul'snye sposoby zachistki ostatkov smerzshihsjazhna gruzov *Promyshlennyj transport*. – 1988. – # 2. – p. 22–25.
6. Walls W.A., Weldon W.F., Pratap S.P. et al. Application of electromagnetic guns to future naval platforms *IEEE Transactions on Magnetics*. – 1999. – Vol. 35, # 1. – P. 262–267.

## Bibliography (transliterated)

1. Boljuh V.F., Oleksenko S.V., Shhukin I.S. Vlijanie parametrov ferromagnitnogo serdechnika na jeffektivnost' indukcionno-dinamicheskogo dvigatelja *Elektrotehnika i elektromehanika*. – 2012. – #6. – p. 20–27.
2. Boljuh V.F., Oleksenko S.V. Vlijanie konfiguracii jakorja na jeffektivnost' linejnogo jelektromehanicheskogo preobrazovatelja *Visnik NTU «HPI»*. Serija: Problemi udoskonalennja elektrichnih ma-shin i aparativ. Teorija i praktika. – Harkiv: NTU «HPI». – 2012.– # 49. – p. 18–26.
3. Mazurenko M.I., Petuhov V.A., Povedajlo V.A. i dr. Jelektrodinamicheskij impul'snyj klapan dlja poluchenija molekularnyh puchkov *Pribory i tehnika jeksperimenta*. – 2002. – # 2. – p. 152–155.
4. Kuznecov P.V., Tolmachev N.S., Haritonov V.D. i dr. Indukcionno-dinamicheskaja sistema ochistki suhil'nogo oborudovanija *Molochnaja promyshlennost'*. – 1989. – # 1. – p. 25–26.
5. Anisimov G.I. Impul'snye sposoby zachistki ostatkov smerzshihsjazhna gruzov *Promyshlennyj transport*. – 1988. – # 2. – p. 22–25.
6. Walls W.A., Weldon W.F., Pratap S.P. et al. Application of electromagnetic guns to future naval platforms *IEEE Transactions on Magnetics*. – 1999. – Vol. 35, # 1. – P. 262–267.

УДК 621.313:536.2.24:539.2

Болюх В.Ф., Олексенко С.В.

**ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ФЕРОМАГНІТНОГО ОСЕРДЯ  
НА ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ ПАРАМЕТРИ ІНДУКЦІЙНО-ДИНАМІЧНОГО ДВИГУНА**

Розроблена математична модель індукційно-динамічного двигуна з феромагнітним осердям при не обмеженому руху електропровідного якоря. Проведено математичне моделювання процесів двигуна при



різних параметрах феромагнітного осердя та виявлено основні залежності силових, масово-габаритних, екологічних параметрів. Показано, що при певних геометричних розмірах використання осердя підвищує ефективність індукційно-динамічного двигуна на 20–25 %. Встановлені геометричні параметри осердя, при яких ефективність максимальна.

Bolukh V.F., Oleksenko S.V.

**CORE IMPACT ON THE PARAMETERS FEROMAGNETNOGO ELECTRIC PARAMETERS  
INDUCTION-DYNAMIC ENGINE**

A mathematical model of induction-dynamic the motor with a ferromagnetic core with no restriction of movement of electro-conducting anchor. The mathematical modeling of the engine for different parameters of the ferromagnetic core and identified major dependence of power, weight and size, environmental parameters. It is shown that the use of the geometric dimensions of the core increases the efficiency of induction-dynamic engine of 20–25 %. Set geometric parameters of the core, at which efficiency is maximal.