

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ФЕРРОМАГНИТНОГО СЕРДЕЧНИКА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИНДУКЦИОННО-ДИНАМИЧЕСКОГО ДВИГАТЕЛЯ

Розроблена математична модель загальмованого індукційно-динамічного двигуна з ферромагнітним осердям. Запропонований критерій ефективності, який враховує комплекс силових та масогабаритних показників двигуна. Проведено математичне моделювання процесів в двигуні при різних параметрах ферромагнітного осердя. Показано, що при певних параметрах осердя підвищує ефективність двигуна на 30-40%. Встановлені геометричні параметри осердя, при яких ефективність максимальна. Проведені експериментальні дослідження двигуна.

Разработана математическая модель заторможенного индукционно-динамического двигателя с ферромагнитным сердечником. Предложен критерий эффективности, учитывающий комплекс силовых и массогабаритных показателей двигателя. Проведено математическое моделирование процессов в двигателе при различных параметрах ферромагнитного сердечника. Показано, что при определенных параметрах сердечник повышает эффективность двигателя на 30-40%. Установлены геометрические параметры сердечника, при которых эффективность максимальна. Проведены экспериментальные исследования двигателя.

ВСТУПЛЕНИЕ

Индукционно-динамические двигатели (ИДД), предназначенные для создания значительных динамических усилий при незначительном перемещении якоря с ударным элементом, применяются в научных исследованиях, промышленности и сферах безопасности, где используются электромеханические системы ударно-импульсного действия [1-4].

Традиционные ИДД выполняются, как правило, без ферромагнитного сердечника (ФС), что обусловлено, в основном, быстродействием рабочих процессов, значительным уровнем возбуждаемых электромагнитных полей и ограничениями по массогабаритным показателям [5-7].

Однако ФС при определенных параметрах может существенно перераспределять магнитные поля в ИДД, снижая поля рассеяния в окружающее пространство и увеличивая поля в активной зоне [8]. Тем самым, могут улучшаться электромагнитная совместимость с близко расположенными электронными устройствами и экологическая чистота для окружающего персонала и повышаться силовые показатели 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, 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. [9-14]. Эти и другие упрощения существенно искажают реальную действительность быстропротекающих рабочих процессов в ИДД.

Поскольку максимальные электродинамические силы в ИДД возникают при отсутствии зазора между якорем и индуктором, что имеет место в начальный момент, интерес представляет режим работы двигателя с заторможенным якорем (при отсутствии перемещения якоря), что позволит оценить возможности ФС.

Целью статьи является оценка эффективности ИДД с заторможенным якорем при учете его силовых и массо-габаритных показателей от конструкции, конфигурации и геометрических параметров ФС.

КОНСТРУКТИВНАЯ СХЕМА БАЗОВОГО ВАРИАНТА ИДД

В качестве базового варианта используем ИДД коаксиальной конфигурации без ФС [15]. На рис. 1,а показано схематическое устройство ИДД с указанием геометрических параметров и распределением магнитного поля в момент максимума электродинамических усилий, а на рис. 1,б – общий вид исследуемого образца.

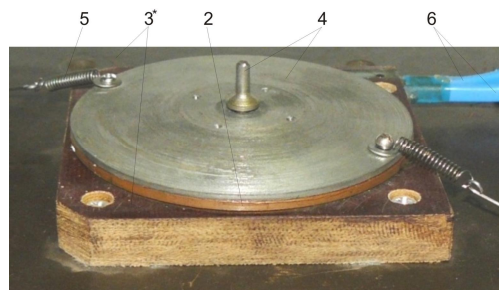
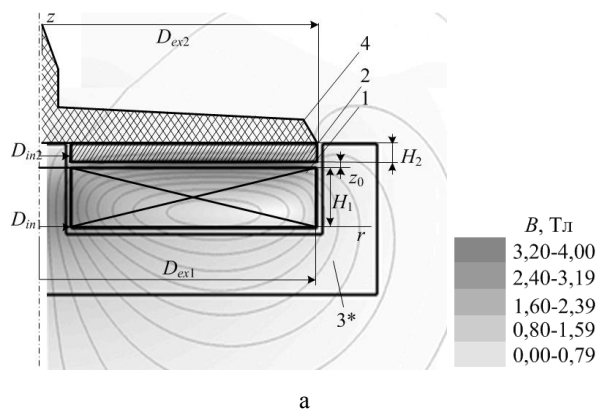


Рис. 1

Магнитное поле представлено в виде силовых линий и распределения индукции B в виде оттенков серого цвета. Шкала индукции, представленная на рис. 1,а будет общей для всех последующих рисунков.

ИДД состоит из многовиткового дискового индуктора 1, который возбуждается от емкостного накопителя энергии (ЕНЭ) сформированным апериодическим импульсом (индуктор шунтирован обратным диодом), и массивного (одновиткового) электропроводящего якоря 2. Индуктор выполнен монолитным (пропитан эпоксидной смолой внутри стеклотекстолитового каркаса 3*), а к якорю присоединен силовой элемент 4 (опорный диск с бойком). Возвратные пружины 5 обеспечивают неподвижность якоря с силовым элементом, а шины 6 – связь индуктора с ЕНЭ. Токпроводящие элементы индуктора и якоря выполнены из меди. Основные размеры и параметры базового варианта ИДД приведены в табл. 1.

Таблица 1

| 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 | 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. 2 показано изменение плотности тока в индукторе j_1 , усредненная по сечению плотность тока в якоря j_2 , величина f_z и импульс F_z электродинамической силы, которая действует на якорь базового ИДД.

Указанные параметры рассчитаны по методике изложенной в [16]. Как видно, через 1,3 мс после начала работы индуцированный ток якоря меняет полярность, вследствие чего изменяется характер силового воздействия: отталкивание сменяется притяжением. Вследствие этого снижается импульс силы F_z .

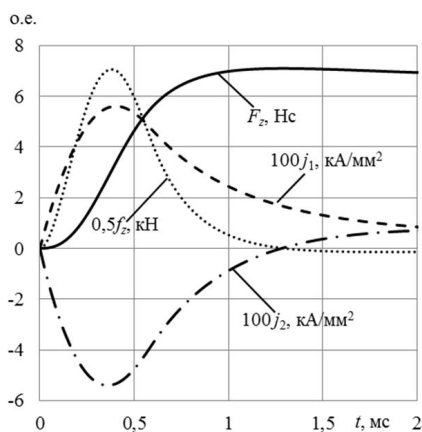


Рис. 2

На рис. 3 представлены распределения аксиальных электродинамических сил по сечению якоря в различные моменты времени. Наибольшие силы действуют через 0,4 мс после начала рабочего процесса

на внутренние участки якоря, обращенные к индуктору, и уменьшаются в аксиальном направлении. Эти силы носят отталкивающий характер. Однако со временем эти силы существенно уменьшаются, что приводит к появлению области минимальных сил внутри якоря. А через 1,6 мс после начала рабочего процесса силы принимают притягивающий характер. При этом силы притяжения меньше сил отталкивания.

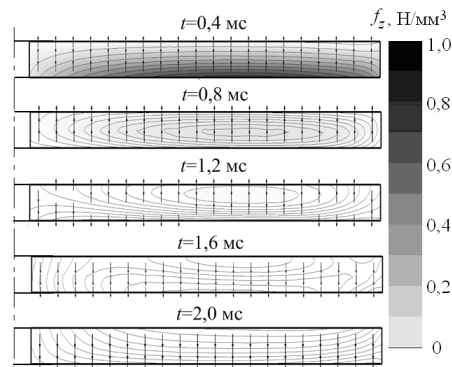


Рис. 3

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 расчете с различными численными решателями. На рис. 4 показан фрагмент программы с исходными данными.

Векторный магнитный потенциал A рассчитывается с использованием условия Дирихле на внешних границах расчетной области:

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

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

Составляющие вектора магнитной индукции находятся по известным соотношениям:

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

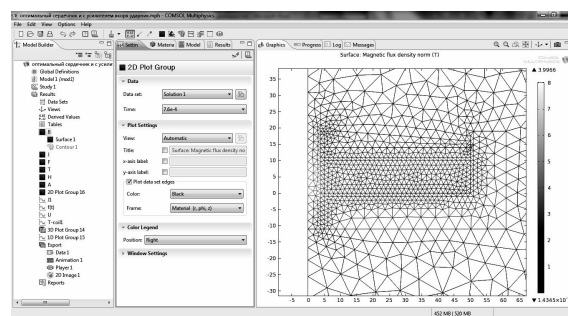


Рис. 4

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

Плотность тока в конечных элементах якоря определяется по известному выражению

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

Сила, действующая на якорь, рассчитывается следующим образом:

$$f_z = 0,5 \oint (H(B \cdot n)) + B(H \cdot n) - n(H \cdot B) dS,$$

где H – напряженность магнитного поля в объеме, охватывающего якорь.

Для ферромагнитных материалов сердечника используется нелинейная кривая намагничивания $B=f(H)$ Импульс электродинамической силы, действующий на якорь, определяется выражением:

$$F_z = \int_0^t f_z dt.$$

При расчете рабочих электромагнитных, электродинамических и тепловых процессов в ИДД предполагаем отсутствие механических перемещений и деформаций элементов ИДД и учитываем пространственное распределение индуцированного тока в якорь на каждом временном шаге.

ВЛИЯНИЕ ФС НА ПОКАЗАТЕЛИ ИДД

Рассмотрим ФС, выполненный из стали Ст.10. Коаксиальный ФС 3 комбинированной формы можно представить состоящим из дискового основания 3а, охватывающего индуктор 1 снизу, наружной обечайки 3б и внутреннего цилиндра 3с (рис. 5). На рис. 5,а показано схематическое устройство ИДД без силового элемента 4 (см. рис. 1) с указанием геометрических параметров ФС и распределением магнитного поля в момент максимума электродинамической силы, а на рис.5б – общий вид ИДД с ФС. Указанный стальной сердечник, представляемый совокупностью i -ых цилиндрических участков, где $i=\{a, b, c\}$, можно описать следующими геометрическими параметрами: внешним диаметром D_{ex3i} , внутренним диаметром D_{in3i} и высотой H_{3i} каждого участка. Расстояние между смежно расположенными сторонами индуктора и ФС заполнено изоляцией и равно $\delta=1$ мм.

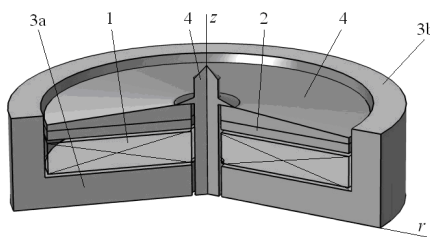
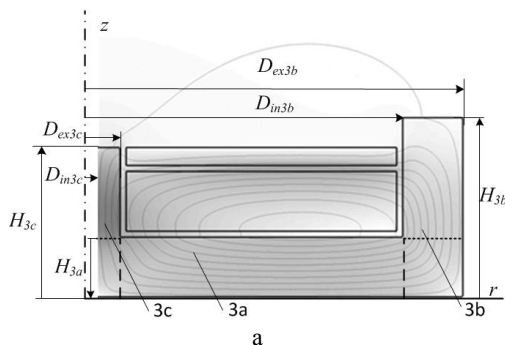


Рис. 5

Геометрические параметры ФС будем описывать следующими безразмерными параметрами:

$$\chi = \frac{H_{3a}}{H_1}; \varepsilon = \frac{H_{3b}}{H_1}; \vartheta = \frac{H_{3c}}{H_1}; \zeta = \frac{D_{in3c}}{D_{in1}}; \theta = \frac{D_{ex3b}}{D_{ex1}}.$$

Если ФС выполнен массивным (нешихтованным), то возникающие в нем вихревые токи экранируют проникновение магнитного поля вглубь сердечника (рис. 6). Кроме того, вихревые токи в ФС при взаимодействии с током индуктора снижают силовые показатели ИДД по сравнению с базовым вариантом: максимальная величина силы f_{zm} уменьшается на 17 %, импульс силы F_z – на 21%. При этом время рабочего процесса t^* , при котором электродинамические силы изменяют направление действия, возрастает на 20%, а максимальная плотность тока индуктора возрастает незначительно – на 2,1%. 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 дальнейшем будем рассматривать идеализированный сердечник, в котором вихревые токи полностью устранены, т.е. его электропроводность равна нулю.

На рис. 7 представлены варианты ИДД, включающие индуктор 1, якорь 2 и ФС 3 различных конфигураций. В варианте I якорь в направлении оси z выполнен с возможностью свободного движения без охвата ферромагнетиком; в варианте II – якорь охвачен ФС с зазором в направлении движения; в варианте III – якорь соединен с утолщенной силовой ферромагнитной пластиной; в варианте IV – якорь соединен с утонченной силовой ферромагнитной пластиной; в варианте V – силовая ферромагнитная пластина и центральный боек выполнены с профильными конфигурациями наружных поверхностей; в варианте VI – имеются силовая ферромагнитная пластина и центральный боек, но отсутствует основание ФС.

В табл. 2 приведены параметры указанных ИДД, откуда следует, что наибольшие силовые показатели развивает ИДД, у которого в направлении движения якоря отсутствует ферромагнетик (вариант I), либо он расположен на определенном расстоянии от якоря (вариант II). Именно в этих вариантах наблюдается наибольшее возрастание времени рабочего процесса t^* . Под вариантом 0 выступает базовый вариант ИДД, силовые показатели которого хуже, чем у ИДД с ФС.

Таблица 2

| Вариант ИДД | D_{ex3c} , мм | H_m , мм | F_{zm} , Нс | f_{zm} , кН | j_{1m} , кА/мм ² | t^* , мс |
|-------------|-----------------|------------|---------------|---------------|-------------------------------|------------|
| 0 | 100 | 14 | 7,09 | 14,12 | 561 | 1,28 |
| I | 120 | 30 | 10,56 | 16,85 | 573 | 1,68 |
| II | 120 | 45 | 10,76 | 17,10 | 475 | 1,94 |
| III | 120 | 30 | 8,85 | 16,64 | 464 | 1,04 |
| IV | 120 | 30 | 9,47 | 16,71 | 464 | 1,14 |
| V | 120 | 30 | 10,03 | 17,09 | 469 | 1,28 |
| VI | 100 | 30 | 7,11 | 14,37 | 561 | 1,18 |

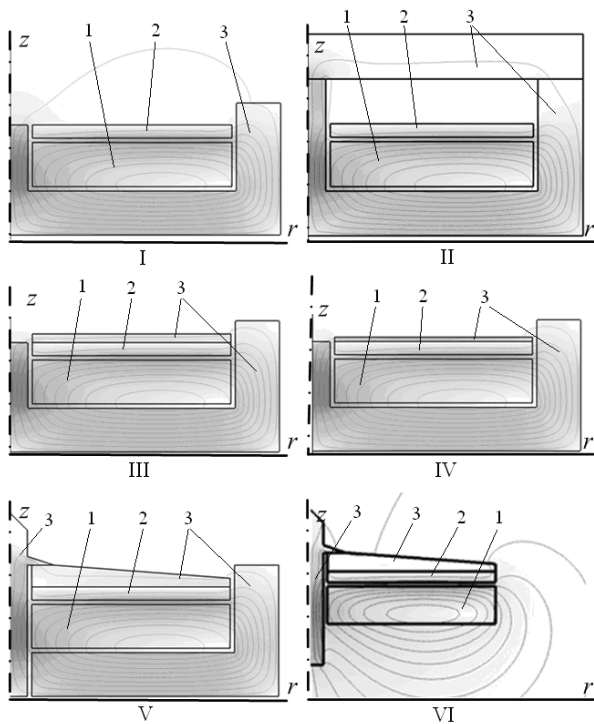


Рис. 7

Наличие ферромагнитных пластин, присоединенных к якорю (варианты III и IV), неоправданно, поскольку действующая на них электромагнитная сила притяжения уменьшает электродинамическую силу, действующую на якорь.

При профильной конфигурации бойка и наружной поверхности силовой пластины удастся повысить силовые показатели ИДД (вариант V), что и было реализовано на практике (см. рис. 1). Однако если отсутствует основание ФС (вариант VI), то силовые показатели ИДД существенно ухудшаются.

В вариантах I – V ИДД, у которых присутствует основание ФС, его толщина выбрана такой, что магнитные поля концентрируются внутри сердечника и не выходят на его наружную поверхность. Тем самым обеспечивается уменьшение полей рассеяния.

Введение ФС изменяет амплитудные и временные показатели рабочего процесса ИДД. На рис. 8 представлены характеристики для варианта I, у которого якорь выполнен с возможностью свободного движения.

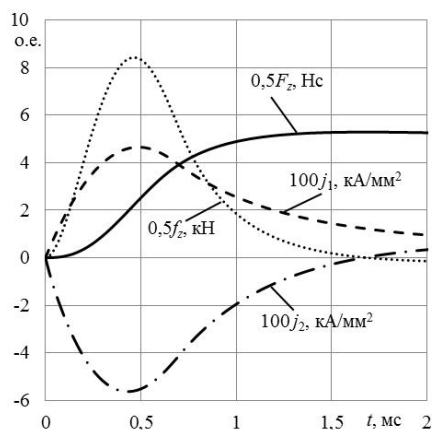


Рис. 8

По сравнению с базовым вариантом наблюдается рост максимальной величины f_{zm} и импульса F_z электродинамической силы, происходит затягивание времени переходного процесса (t^* возрастает на 27 %). Кроме того, ФС уменьшает максимальное значение плотности тока в индукторе, что важно для электронной системы управления ИДД.

На рис. 9 представлены распределения аксиальных электродинамических сил по сечению якоря в различные моменты времени ИДД с ФС. Здесь, как и в варианте с отсутствием ФС (см. рис. 3), наибольшие силы отталкивания действуют через 0,4 мс после начала рабочего процесса на внутренние участки якоря, обращенные к индуктору, и уменьшаются в аксиальном направлении. Однако при этом происходит выравнивание сил в радиальном направлении. Через 0,8 мс после начала рабочего процесса величина рассматриваемых сил остается довольно большой, причем максимальные силы концентрируются внутри якоря ближе к наружному радиусу. А через 2 мс после начала процесса силы меняют направление воздействия.

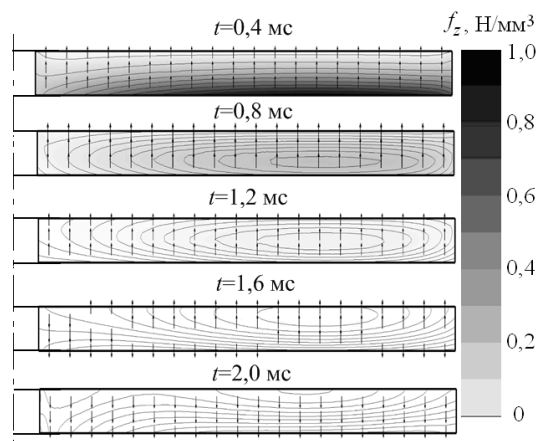


Рис. 9

Таким образом, ФС влияет на силовые показатели ИДД, амплитуду тока индуктора, длительности рабочих процессов. Однако при этом ФС увеличивает массогабаритные показатели двигателя, что требует комплексного рассмотрения проблемы с учетом различных факторов.

КРИТЕРИЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИДД

Для анализа влияния ФС на работу ИДД используем критерий эффективности

$$\eta^* = \sum_{n=1}^5 K_n,$$

который учитывает относительные, нормированные к базовому варианту, показатели:

$$K_1 = \beta_1 (1 - F_{zm}^* / F_{zm}); \quad K_2 = \beta_2 (1 - f_{zm}^* / f_{zm});$$

$$K_3 = \beta_3 j_{1m}^* / j_{1m}; \quad K_4 = \beta_4 \frac{m^*}{m^* + m_3};$$

$$K_5 = \beta_5 \left(0,4 \frac{D_{ex3b}}{D_{ex1}} + 0,6 \frac{H_{3m}}{H_1} \right),$$

где $H_{3m} = \max\{H_{3b}, H_{3c}, (H_1 + \delta + H_2)\}$; масса ФС, $i = \{a, b, c\}$:

$$m_3 = 0,25\pi\gamma \left(\sum_{i=1}^3 (D_{ex3i}^2 - D_{in3i}^2) H_{3i} - \sum_{i=2}^3 (D_{ex3i}^2 - D_{in3i}^2) H_{3a} \right);$$

F_{zm} – максимальное значение импульса электродинамической силы; f_{zm} – максимальное значение величины электродинамической силы; j_{1m} – максимальная плотность тока в индукторе; m^* – масса базового ИДД без каркаса; γ – плотность материала ФС; β_i – весовые коэффициенты показателей эффективности, удовлетворяющие соотношению:

$$\sum_{i=1}^5 \beta_i = 1.$$

Звездочками в показателях помечены соответствующие параметры базового варианта ИДД.

Показатель K_1 оценивает влияние ФС по максимальному импульсу силы, K_2 – по максимальной величине силы, K_3 – по наименьшей величине максимальной плотности тока в индукторе, K_4 – по наименьшей массе, а K_5 – по габаритам.

На основании экспертных оценок для последующих расчетов используем следующие значения весовых коэффициентов: $\beta_1=0,4$; $\beta_2=0,1$; $\beta_3=0,05$; $\beta_4=0,2$; $\beta_5=0,2$.

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ФС НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИДД

Рассмотрим влияние толщины дисковой части ФС 3_a на эффективность ИДД. Остальные безразмерные геометрические параметры ФС при этом неизменны и равны: $\zeta=0,8$; $\theta=1,18$; $\vartheta=2,5$; $\varepsilon=3,0$.

Увеличение толщины дисковой части ферромагнитного сердечника H_{3a} , представленного на рис. 10 в виде безразмерного геометрического параметра χ , существенно влияет на показатели ИДД.

При увеличении параметра χ от 0,05 до 1,5 максимальный импульс силы F_{zm} возрастает на 35,1%, в то время как максимальная величина силы f_{zm} возрастает в меньшей степени – на 12,3%. Увеличение импульса силы в большей степени, чем ее максимальной величины, объясняется возрастанием длительности переходного процесса t^* на 23,5%, при котором сила сохраняет отталкивающий характер. К недостаткам увеличения толщины дисковой части ФС можно отнести увеличение габаритов и массы ИДД. В результате увеличения толщины дисковой части ФС критерий эффективности η^* возрастает на 26,1% и магнитное поле не выходит за пределы ФС. Существенный рост критерия эффективности η^* происходит при увеличении геометрического параметра χ от 0,05 до 1,0. Именно последнее значение можно считать оптимальным и оно будет использоваться в последующих расчетах.

Рассмотрим влияние высоты внутреннего цилиндра ФС 3_c на показатели работы ИДД. Увеличение высоты внутреннего цилиндра ФС H_{3c} , представленного на рис. 11 в виде безразмерного геометрического параметра ϑ , несущественно влияет на показатели ИДД.

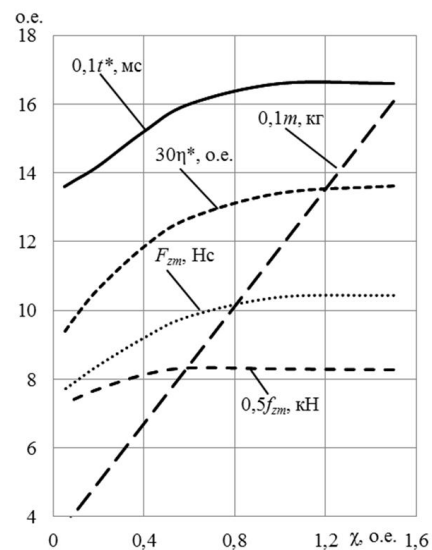
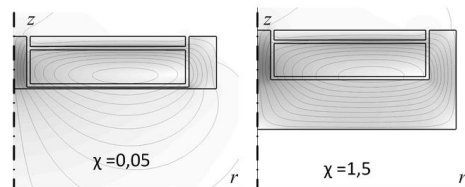


Рис. 10

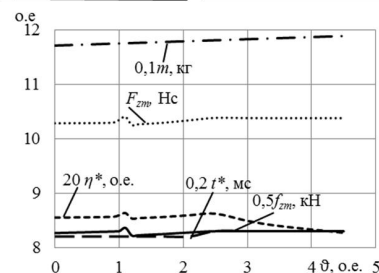
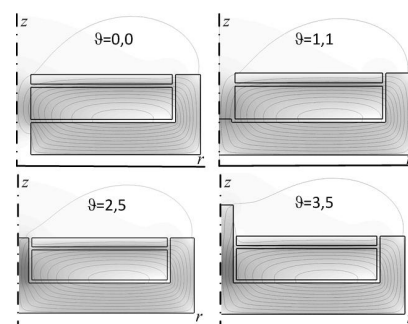


Рис. 11

Незначительные увеличения импульса F_{zm} и максимальной величины f_{zm} электродинамической силы и связанное с этим увеличение критерия эффективности проявляется при $\vartheta=1,1$, при котором высота H_{3c} совпадает с нижней поверхностью индуктора. Увеличение высоты внутреннего цилиндра свыше определенного значения ($\vartheta=2,5$) приводит к уменьшению критерия эффективности η^* , что связано в основном с увеличением массогабаритных показателей ИДД. Таким образом, высота внутреннего цилиндра ФС H_{3c} должна совпадать с наружной поверхностью якоря, т.е. геометрический параметр ϑ должен быть равным 2,5.

Рассмотрим влияние высоты наружной обечайки $3b$ ФС при неизменном ее наружном диаметре. Увеличение высоты наружной обечайки ФС H_{3b} , представленного на рис. 12 в виде безразмерного геометрического параметра ε , заметно влияет на показатели ИДД. Наружная обечайка любой высоты по сравнению с вариантом с ее отсутствием ($\varepsilon=0$) приводит к увеличению эффективности ИДД. Однако увеличение высоты обечайки неравномерно изменяет показатели ИДД. Так, при значении $\varepsilon=2,15$ наблюдается локальный максимум (высота обечайки совпадает с наружной поверхностью индуктора). При $\varepsilon=2,5$ возникает локальный минимум (высота обечайки совпадает с наружной поверхностью якоря). Глобальный максимум возникает при $\varepsilon=3,0$. В этом случае импульс силы F_{zm} возрастает на 18,5%, максимальная величина силы f_{zm} – на 10,5, длительность процесса t^* – на 9,2% и эффективность η^* – на 22,5%. Последующее увеличение высоты обечайки нецелесообразно.

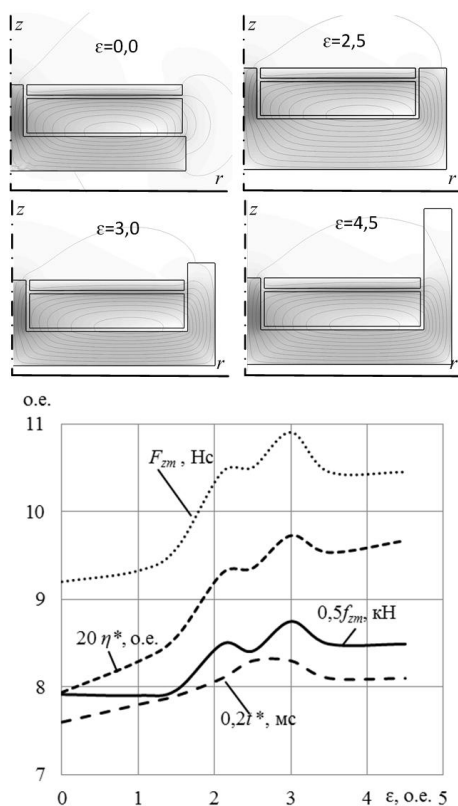


Рис. 12

Рассмотрим влияние диаметра D_{ex3b} наружной обечайки $3b$ ФС при неизменной ее высоте. Увеличение диаметра наружной обечайки ФС, представленного на рис. 13 в виде безразмерного геометрического параметра θ , повышает показатели ИДД.

Наиболее сильный рост показателей происходит в диапазоне параметра θ от 1,02 до 1,1. Дальнейшее увеличение диаметра D_{ex3b} практически не изменяет максимальную величину силы f_{zm} . Но за счет увеличения длительности рабочего процесса t^* увеличивается импульс силы F_{zm} , что вызывает соответствующий рост критерия эффективности η^* .

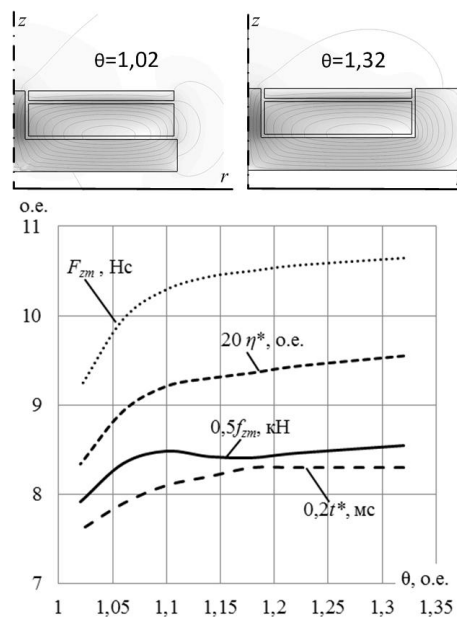


Рис. 13

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИДД

Для проведения экспериментальных исследований ИДД использовался индуктор с тонкостенным (1,2 мм) стальным массивным ФС, выполненным в виде наружной обечайки с нижним диском.

На рис. 14 показаны общий вид (а) и силовые линии магнитного поля при максимальной электродинамической силе (б). Здесь приняты следующие обозначения: 1 – индуктор, 2 – якорь, 3 – ФС, 4 – токовводы индуктора.

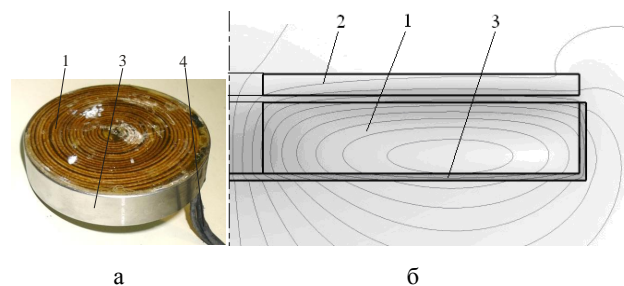


Рис. 14

Как видно из распределения магнитного поля, указанный ФС насыщается и пропускает основное магнитное поле наружу. В сравнении с ИДД без ФС (рис. 1,а) в варианте с тонкостенным ФС распределение магнитного поля изменяется незначительно. Вследствие этого незначительно возрастают и показатели электродинамической силы, представленные на рис. 15 для ИДД без ФС (пунктирные линии) и для ИДД с ФС (сплошные линии). Также наблюдается и увеличение длительности переходного процесса.

Для проведения испытаний использовалась экспериментальная установка, представленная на рис. 16, содержащая акселерометр (виброакустический датчик) 1, установленный на силовой плите 2, которая при помощи регулируемых упоров 3 прижимается к силовому элементу 4.

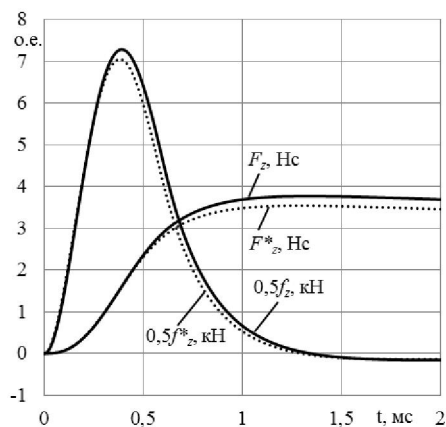
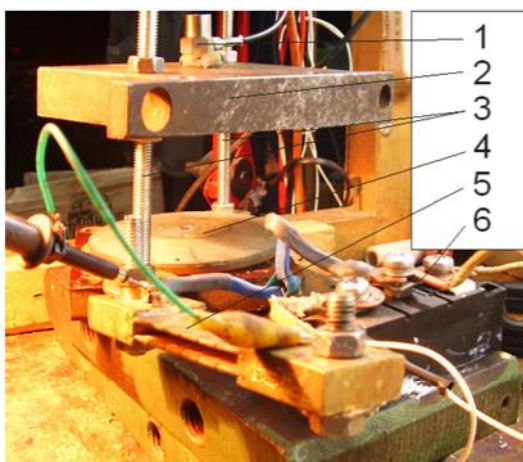
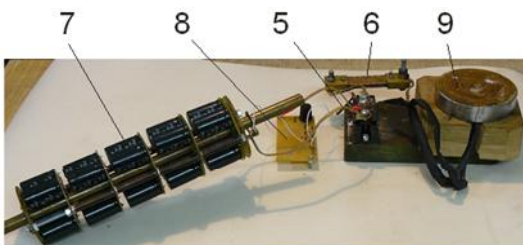


Рис. 15



а

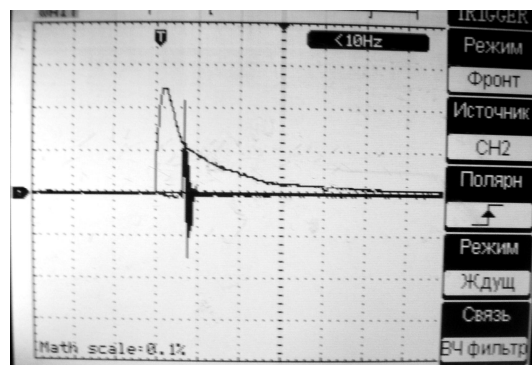


б

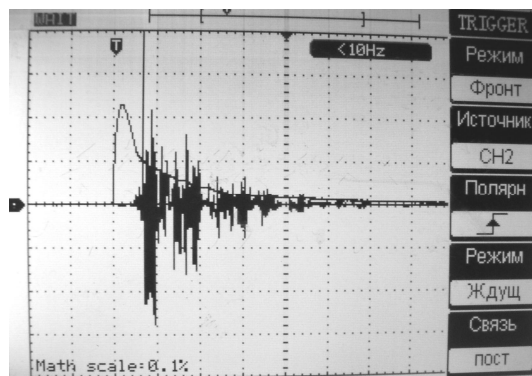
Рис. 16

Измерение токов производилось с использованием токового шунта 5. Транзисторно-диодный блок обеспечивал формирование аperiodического импульса тока в индукторе, возбуждение которого осуществлялось от ЕНЭ 7 емкостью $C=20 \times 330=6600$ мкФ с использованием электронной системы управления 8. Индуктор 9 с ФС взаимодействует с силовым элементом 4. На рис. 17 показаны осциллограммы аperiodического импульса тока и сигнала акселерометра для ИДД без ФС (рис. 17,а) и для ИДД с ФС (рис. 17,б).

Из полученных осциллограмм следует, что характер токовых импульсов удовлетворительно совпадает с теоретическими расчетами, а именно, ФС уменьшает величину и увеличивает длительность токового импульса. Кроме того, ФС увеличивает силовое воздействие, развиваемое ИДД. Таким образом, экспериментальные испытания подтверждают достоверность основных теоретических положений.



а



б

Рис. 17

ВЫВОДЫ

Разработана математическая модель заторможенного ИДД с ФС. Предложен критерий эффективности, учитывающий комплекс силовых и массогабаритных показателей ИДД.

Проведено математическое моделирование ИДД при различных параметрах ФС. Показано, что при определенных параметрах ФС повышает эффективность ИДД на 30-40% прежде всего за счет повышения силовых показателей. Установлены безразмерные геометрические параметры ФС, равные: $\chi=1,0$, $\zeta=0,8$, $\theta=1,18$, $\vartheta=2,5$ и $\varepsilon=3,0$, при которых критерий эффективности достигает максимального значения.

Проведенные экспериментальные исследования подтвердили основные теоретические положения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мазуренко М.И., Петухов В.А., Поведайло В.А. и др. Электродинамический импульсный клапан для получения молекулярных пучков // Приборы и техника эксперимента. – 2002. – № 2. – С. 152-155.
2. Кузнецов П.В., Толмачев Н.С., Харитонов В.Д. и др. Индукционно-динамическая система очистки сушильного оборудования // Молочная промышленность. – 1989. – № 1. – С. 25-26.
3. Анисимов Г.И. Импульсные способы зачистки остатков смерзшихся грузов // Промышленный транспорт. – 1988. – № 2. – С. 22-25.
4. 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.
5. Balıkcı A., Zabar Z., Birenbaum L. et al. Improved performance of linear induction launchers // IEEE Transactions on Magnetics. – 2005. – Vol. 41, № 1. – P. 171-175.
6. Цицикян Г.Н. Электромагнитное поле и силовые взаи-

моделирования цилиндрического индуктора с проводящей пластиной при импульсном токе // *Электричество*. – 1998. – № 9. – С. 52-58.

7. Чемерис В.Т., Васьяковский Ю.Н. Нелинейная диффузия электромагнитного поля в массивный якорь индукционного электромеханического преобразователя // *Техническая электродинамика*. – 1988. – № 2. – С. 101-104.

8. Милорадов И.А. К определению наружного диаметра цилиндрического ферромагнитного якоря импульсного индукционно-динамического преобразователя // *Электромагнитные машины ударного действия*. – Новосибирск: Ин-тут горного дела, Сиб. отд-ние АН СССР. – 1978. – С. 127-128.

9. Ивашин В.В., Карковский Л.И. Выбор рациональной геометрии магнитопровода индукционно-динамического двигателя с немагнитным якорем // *Электротехника*. – 1981. – № 8. – С. 30-33.

10. Воздвиженский В.А., Сидоров В.А. Характеристики электродинамического привода со стальным магнитопроводом // *Электротехника*. – 1979. – № 1. – С. 33-37.

11. Антонюк О.А., Бондалетов В.Н., Гусаров А.А. Исследование индукционно-динамических систем с магнитопроводом на ЭВМ // *Техническая электродинамика*. – 1982. – № 4. – С. 76-81.

12. Чемерис В.Т., Подольцев А.Д. Исследование магнитоимпульсного взаимодействия движущихся проводящих тел при наличии ферромагнитной среды ($\mu = \text{const}$) // *Техническая электродинамика*. – 1980. – № 1. – С. 16-21.

13. Ивашин В.В., Петунин Ю.П., Евдокимов В.А. Исследование индукционно-динамического двигателя, подмагничиваемого постоянным потоком // *Известия вузов. Электромеханика*. – 1984. – № 5. – С. 81-85.

14. Васьяковский Ю.Н. Математическое моделирование индукционно-динамического двигателя с учетом насыщения его магнитопровода // *Электричество*. – 1988. – № 11. – С. 60-65.

15. Болух В.Ф., Лучук В.Ф., Рассоха М.А., Щукин И.С. Высокоэффективный электромеханический преобразователь ударного действия // *Электротехника*. – 2011. – № 2. – С. 46-53.

16. Болух В.Ф., Марков А.М., Лучук В.Ф., Щукин И.С. Энергетические процессы и эффективность индукционно-динамического преобразователя ударного действия // *Электротехника і електромеханіка*. – 2009. – № 2. – С. 9-14.

Bibliography (transliterated): 1. Mazurenko M.I., Petuhov V.A., Povedajlo V.A. i dr. `Elektrodinamicheskij impul'snyj klapen dlya polucheniya molekulyarnyh puchkov // *Pribory i tehnika `eksperimenta*. - 2002. - № 2. - S. 152-155. 2. Kuznecov P.V., Tolmachev N.S., Hari-tonov V.D. i dr. Indukcionno-dinamicheskaya sistema ochestki sushi'nogo oborudovaniya // *Molochnaya promyshlennost'*. - 1989. - № 1. - S. 25-26. 3. Anisimov G.I. Impul'snye sposoby zachistki ostatkov smerzshihysya gruzov // *Promyshlennyj transport*. - 1988. - № 2. - S. 22-25. 4. 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. 5. Balicki A., Zabar Z., Birenbaum L. et al. Improved performance of linear induction launchers // *IEEE Transactions on Magnetics*. - 2005. - Vol. 41, № 1. - P. 171-175.

6. Cicikyan G.N. `Elektromagnitnoe pole i silovye vzaimodejstviya cilindricheskogo induktora s provodyaschej plastinoj pri impul'snom toke // `Elektrichestvo. - 1998. - № 9. - S. 52-58. 7. Chemeris V.T., Vas'kovskij Yu.N. Nelinejnaya diffuziya `elektromagnitnogo polya v massivnyj yakor' indukcionnogo `elektromechanicheskogo preobrazovatelya // *Tehnicheskaya `elektrodinamika*. - 1988. - № 2. - S. 101-104. 8. Miloradov I.A. K opredeleniyu naruzhnogo diametra cilindricheskogo ferromagnitnogo yakorya impul'snogo indukcionno-dinamicheskogo preobrazovatelya // `Elektromagnitnye mashiny udarnogo dejstviya. - Novosibirsk: In-tut gornogo dela, Sib. otd-nie AN SSSR. - 1978. - S. 127-128. 9. Ivashin V.V., Karkovskij L.I. Vybora racional'noj geometrii magnitoprovoda indukcionno-dinamicheskogo dvigatelya s nemagnitnym yakorem // `Elektrotehnika. - 1981. - № 8. - S. 30-33. 10. Vozdvizhenskij V.A., Sidorov V.A. Harakteristiki `elektrodinamicheskogo privoda so stal'nym magnitoprovodom // `Elektrotehnika. - 1979. - № 1. - S. 33-37. 11. Antonyuk O.A., Bondaletov V.N., Gusarov A.A. Issledovanie indukcionno-dinamicheskikh sistem s magnitoprovodom na `EVM // *Tehnicheskaya `elektrodinamika*. - 1982. - № 4. - S. 76-81. 12. Chemeris V.T., Podol'cev A.D. Issledovanie magnitopul'snogo vzaimodejstviya dvizhushchihysya provodyaschih tel pri nalichii ferromagnitnoj sredy ($\mu = \text{const}$) // *Tehnicheskaya `elektrodinamika*. - 1980. - № 1. - S. 16-21. 13. Ivashin V.V., Petunin Yu.P., Evdokimov V.A. Issledovanie indukcionno-dinamicheskogo dvigatelya, podmagnichivaemogo postoyannym potokom // *Izvestiya vuzov. `Elektromechanika*. - 1984. - № 5. - S. 81-85. 14. Vas'kovskij Yu.N. Matematicheskoe modelirovanie indukcionno-dinamicheskogo dvigatelya s uchetom nasyscheniya ego magnitoprovoda // `Elektrichestvo. - 1988. - № 11. - S. 60-65. 15. Bolyuh V.F., Luchuk V.F., Rassoha M.A., Schukin I.S. Vysoko`effektivnyj `elektromechanicheskij preobrazovatel' udarnogo dejstviya // `Elektrotehnika. - 2011. - № 2. - S. 46-53. 16. Bolyuh V.F., Markov A.M., Luchuk V.F., Schukin I.S. `Energeticheskie processy i `effektivnost' indukcionno-dinamicheskogo preobrazovatelya udarnogo dejstviya // *Elektrotehnika i elektromechanika*. - 2009. - № 2. - S. 9-14.

Поступила 29.10.2012

Болух Владимир Федорович, д.т.н., проф.,

Олексенко Сергей Владимирович,

Щукин Игорь Сергеевич, к.т.н., доц.

Национальный технический университет

"Харьковский политехнический институт"

ООО Фирма "ТЭТРА Ltd",

61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21

тел. (057) 7076427

e-mail: bolukh@kpi.kharkov.ua, tech@tetra.kharkiv.com

Bolyukh V.F., Oleksenko S.V., Schukin I.S.

Influence of ferromagnetic core parameters on induction-type dynamic motor efficiency.

A mathematical model of a locked induction-type dynamic motor with a ferromagnetic core is developed. A performance criterion allowing for a set of the motor's force and dimension indices is introduced. Mathematical modeling of the motor's processes under various parameters of the ferromagnetic core is carried out. It is shown that, under certain parameters, the core increases the electric motor efficiency by 30-40 %. The core's geometrical parameters resulting in the maximum efficiency are found. Experimental studies of the motor are made.

Key words – induction-type dynamic motor, mathematical model, ferromagnetic core.