

**В.В. ЛИТВИНЕНКО**, ассистент, НТУ "ХПИ", Харьков  
**В.С. ЛУПИКОВ**, д-р техн. наук, проф., зав. каф., НТУ "ХПИ", Харьков  
**А.Г. СЕРЕДА**, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПИ", Харьков

## **КАЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ФЕРРОМАГНИТНОГО СЕРДЕЧНИКА НА ВЕЛИЧИНУ СИЛЫ ИНДУКЦИОННО-ДИНАМИЧЕСКОГО ПРИВОДА**

Приведено результати теоретичних та експериментальних досліджень впливу ферромагнітного осердя на величину сили електромагніту індукційно-динамічного приводу. Запропоновано рекомендації з удосконалення конструкції індукційно-динамічного розчеплювача для швидкодіючого автоматичного вимикача.

Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований влияния ферромагнитного сердечника на величину силы электромагнитна индукционно-динамического привода. Предложены рекомендации по усовершенствованию конструкции индукционно-динамического расцепителя для быстродействующего автоматического выключателя.

**Введение.** Индукционно-динамические приводы (ИДП) в настоящее время широко используются в быстродействующих автоматических выключателях (БАВ). Конструктивно ИДП состоит из катушки, диска, конденсаторная батарея (конденсатор) и системы управления. Основные достоинства таких ИДП:

- обеспечение быстрого отключения контактов БАВ в режиме короткого замыкания с помощью малогабаритных устройств за счет непосредственного воздействия на размыкаемые контакты;
- возможность обеспечения высоких рабочих усилий независимо от величины тока главной цепи.

Недостатки существующих ИДП:

- низкий КПД преобразования электромагнитной энергии в механическую (кинетическую) энергию;
- необходимость расположения блока конденсатора вблизи размыкаемых контактов и, как следствие, ограниченные габариты блока.

Результаты исследований показывают, что величина силы, обеспечивающей быстрое размыкание контактов, зависит от величины разрядного тока конденсатора [1]:

$$F = i_1 i_2 \cdot \frac{dM}{dx}, \quad (1)$$

где  $i_1$  – разрядный ток конденсатора, протекающий по катушке ИДП;  $i_2$  – ток в диске ИДП;  $dM/dx$  – динамическая взаимная индуктивность катушки и диска.

Ток катушки  $i_1$  является функцией разрядного тока конденсатора, т.е. зависит от величины емкости, характера процесса разряда (апериодический, периодический) и сопротивления катушки.

Величина тока диска  $i_2$  в основном определяется сопротивлением диска и схемы управления этим током. Полное активное сопротивление диска зависит от ряда параметров, включая геометрические параметры (площадь сечения диска), электрические параметры (электрическая проводимость материала), магнитные параметры, характеризующие магнитную связь катушки и диска ИДП (магнитное сопротивление, коэффициент взаимной индуктивности). Динамическая взаимная индуктивность  $dM/dx$  определяется характером движения: менее массивные диски характеризуются большей величиной  $dM/dx$ .

Одним из направлений увеличения силы отброса диска ИДП является введение ферромагнитного сердечника (ФС) в катушку [2]. Точный расчет параметров процесса разряда конденсаторной батареи, движения диска и развиваемой ИДП силы очень сложно выполнить из-за того, что требуется точное значение исходных параметров (с учетом технологических отклонений изготовления конструктивных элементов), учет нелинейных характеристик магнитного материала и динамики движения.

**Цель работы** – качественный анализ влияния ФС на величину силы электромагнита ИДП.

#### **Физическая модель ИДП с ферромагнитным сердечником.**

Для проведения экспериментальных исследований нами изготовлен физический макет ИДП с ФС, внешний вид которого показан на рис. 1. Для математического моделирования использовалась упрощенная схема, представленная на рис. 2.

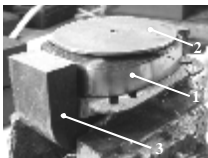


Рис. 1.

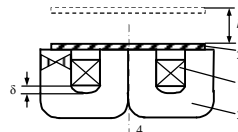


Рис. 2.

На рис. 1 и 2 использованы следующие обозначения: 1 – катушка; 2 – диск, изготовленный из меди; 3 – ферромагнитный сердечник. Высота  $h$  соответствует расстоянию, на которое перемещается диск при срабатывании ИДП.

Диск 2 имеет цилиндрическую форму и выполнен сплошным. Ферромагнитный сердечник 3 состоит из двух частей. Каждая из частей имеет  $U$ -образную форму прямоугольного сечения (рис. 1), выполнена шихтованной из листовой электротехнической стали и расположена симметрично относительно оси 4 диска, без зазора. Внутренние поверхности сердечника 3 примыкают к боковым поверхностям цилиндрической катушки. Нижняя часть сердечника с внутренней стороны образует некоторый зазор ( $\delta$ ) между сердечником и нижним торцом катушки. Этот зазор менялся в процессе экспериментальных исследований для определения оптимального положения катушки при выборе конструкции электромагнита ИДП. Предельная величина этого зазора выбиралась из условия, что верхние торцы ФС и катушки находятся в одной плоскости (рис. 3).

Форма сердечника выбрана исходя из возможности его установки в существующей конструкции быстродействующего автоматического выключателя серии А3790. При разработке новых выключателей конструкция ИДП с ФС может быть и другой. Но и в этом случае данные качественного анализа могут быть использованы.

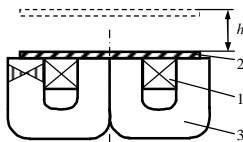


Рис. 3.

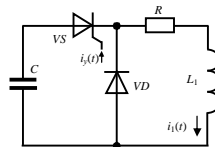


Рис. 4.

Геометрические размеры катушки и сердечника:

- высота катушки – 10 мм;
- толщина катушки – 10 мм;
- толщина ленты катушки – 0,1 мм;
- количество витков катушки – 45;
- сечение сердечника –  $12 \times 25$  мм;
- размер внутреннего окна сердечника – 15 мм;
- высота сердечника (рис. 2 и 3) – 35 мм;
- минимальный размер зазора  $\delta$  – 5 мм.

Геометрические размеры диска:

– толщина диска – 1,5 мм;

– диаметр диска – 50 мм

Электрическая схема подключения ЕНЭ к обмотке ИДП показана на рис. 4. Ускорение подвижного элемента ИДП происходит под действием электродинамических сил, создаваемых энергией сильного импульсного магнитного поля тока, получаемого при разряде емкостного накопителя энергии (ЕНЭ) на катушку [3].

На рис. 4 обозначено:  $C$  – емкостной накопитель энергии (батарея конденсаторов);  $VS$  – электронный ключ (тиристор, оптотиристор);  $VD$  – шунтирующий диод;  $i_{\delta}(t)$  – ток управления;  $R$  – суммарное сопротивление токоограничивающего резистора и шунта;  $L_1$  – обмотка распечатителя;  $i_1(t)$  – ток разряда.

**Описание эксперимента.** Целью эксперимента было получение качественной оценки влияния ФС на величину силы, развиваемой электромагнитом и определение оптимального положения ФС внутри катушки.

При оценке влияния ФС проводилось два опыта: первый опыт – при наличии сердечника; второй – при отсутствии сердечника. Влияние положения сердечника экспериментально исследовалось для двух его положений (рис. 2 и 3): нижнее положение, соответствующее минимальному зазору  $\delta$  между нижним торцом обмотки и внутренней поверхностью сердечника; верхнее положение сердечника, при котором он соприкасается с плоскостью, образованной верхним торцом катушки.

Конденсаторная батарея емкостью 660 мкФ, предварительно заряженная до напряжения 270 В, разряжалась на катушку  $L_1$  при подаче импульса  $i_{\delta}(t)$  на управляющий вывод тиристора  $VS$ . Момент разряда регулировался с помощью тиристорного ключа в схеме на рис. 4. Под действием разрядного тока на диск действует электродинамическая сила и он начинает двигаться вверх, поднимаясь на определенную высоту, после чего падает. При этом контролировалось время полета диска до верхней точки и высота этой точки от поверхности катушки. Результаты замеров высоты  $h$  и времени полета  $t$  проводились для десяти одинаковых опытов и средние значения приведены в табл. 1.

В этой же таблице приведены результаты второго опыта, при отсутствии ФС в электромагните. Схема эксперимента приведена на рис. 5.

Таблица 1 – Высота и время полета диска физической модели ИДП,

Номер опыта	Положение ФС	Высота полета диска, мм	Время полета диска $t$ , с
первый	нижнее	420	2,98
	верхнее	1800	6,02
второй	без ФС	620	3,58

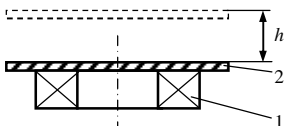


Рис. 5.

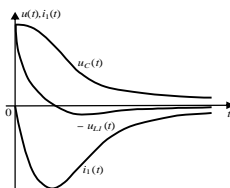


Рис. 6.

Анализ данных табл. 1 показывает, что при наличии ФС максимальная высота полета диска почти в три раза больше по сравнению с электромагнитом без ФС. Максимальная величина достигается в верхнем положении ФС относительно торца катушки. В нижнем положении высота полета диска оказалась даже меньше, чем при отсутствии ФС. Это можно объяснить тем, что магнитные потоки рассеяния в этом случае тормозят диск.

В рассматриваемой схеме разряда конденсатора присутствует тиристорный ключ, который является нелинейным сопротивлением с точки зрения компоненты электрической схемы замещения, и шунтирующий диод. Как известно [4, 5], переходный процесс разряда конденсатора в контуре с линейными параметрами может быть периодическим либо аperiodическим, что определяется соотношением его параметров. В математическом плане это выражается в том, что характеристическое уравнение дифференциального уравнения второго порядка для переходного процесса в этом контуре, может иметь пару комплексных либо действительных корней [4]. Наличие же нелинейного элемента приводит к тому, что характер этого процесса всегда аperiodический. Это можно объяснить тем, что при смене знака напряжения на индуктивности активное сопротивление тиристора в идеале стремится к бесконечности и условия аperiodического разряда всегда выполняется:

$$R > 2\sqrt{L_1/C} . \quad (2)$$

На рис. 6 приведены графики экспериментальных зависимостей  $u_C(t)$ ,  $u_{L1}(t)$ ,  $i_1(t)$ , соответствующих напряжениям на конденсаторной батарее и катушке и току катушки. Как видно на рис. 6, вид этих зависимостей соответствует классическим зависимостям для аperiodического процесса в этом контуре [4].

**Оценка величины силы.** В данной работе проведена приближенная оценка величины силы, действующей на диск ИДП с ФС и сравнение ее с силой при отсутствии ФС. Допущения, принятые при оценке величины силы, следующие:

1. Движение диска строго вертикальное, т.е. вектор силы имеет только одну, вертикальную составляющую.
2. Время подъема диска принято равным времени падения диска до уровня, соответствующего положению торца катушки.
3. Диск рассматривается как точка, не испытывающая деформации и вибрации.

Первое допущение на практике удастся обеспечить за счет расположения центров диска и катушки вдоль вертикальной оси. Это допущение позволяет считать, что выделившаяся энергия магнитного поля полностью преобразуется в кинетическую энергию движения диска из состояния покоя. Второе допущение позволяет упростить расчетные соотношения для определения величины силы. Третье допущение оправдано тем, что в данной работе проводится приближенная оценка. Кроме того, в экспериментах было зафиксировано отсутствие деформации диска, что косвенно подтверждает правомочность этого допущения.

При расчете силы можно воспользоваться известным соотношением для силы, создаваемой при свободном падении тела известной массы [6]:

$$F = mg, \quad (2)$$

где  $F$  – сила, действующая на диск в конце падения;  $m$  – масса подвижного элемента (диска);  $g$  – ускорение свободного падения.

Время падения диска в теоретической механике может быть определено в общем случае по формуле [6]:

$$h = \frac{at^2}{2} + v_0t + l_0, \quad (3)$$

где  $h$  – расстояние падения диска;  $a$  – ускорение движения тела;  $t$  – время движения диска;  $v_0$  – начальная скорость диска;  $l_0$  – начальное расстояние между диском и катушкой.

Учитывая, что падение тела начинается с верхней точки, начальная скорость падения  $v_0 = 0$ , начальное расстояние падения  $l_0 = 0$  и ус-

корение движения равно  $g$ . С учетом этого определяется время  $t_2$  падения диска

$$t_2 = \sqrt{2hg}, \quad (4)$$

Время полета диска состоит из времени подъема  $t_1$  и падения  $t_2$  диска

$$t = t_1 + t_2. \quad (5)$$

Из (5) определяется время подъема диска

$$t_1 = t - t_2. \quad (6)$$

По формуле (3) при нулевых начальных условиях определяется начальное ускорение  $a$  диска

$$a = 2h/t_1^2. \quad (7)$$

С учетом (7) величина электродинамической силы отброса подвижного элемента (диска) от катушки ИДП равна

$$F = m \cdot a. \quad (8)$$

Таблица 2 – Величина электродинамической силы, действующей на диск ИДП

Номер опыта	Положение ФС	Сила, Н
первый опыт	нижнее	1,87
	верхнее	15,58
второй опыт	без ФС	4,00

Анализ данных табл. 2 показывает, что при наличии ФС в ИДП достигнуто увеличение силы в 3,9 раза, т.е. примерно в четыре раза по сравнению с ИДП без ФС. Кроме того, различие между максимальной и минимальной величиной силы для ИДП с ФС достигает 8,3 раза, что свидетельствует о необходимости оптимизации конструкции в каждом конкретном случае.

### **Выводы.**

1. Как показывают экспериментальные исследования наличие ферромагнитного сердечника в индукционно-динамическом приводе обеспечивает увеличение силы, развиваемой электромагнитом по сравнению с электромагнитом без сердечника, в четыре раза.

2. Определено оптимальное положение сердечника относительно катушки, обеспечивающее максимальную величину электродинамической силы отброса диска.

3. Задача оптимизации должна решаться отдельно для каждой конкретной конструкции электромагнита.

4. Для количественной оценки результатов эксперимента разработана методика расчета токов катушки, диска и электродинамического усилия с учетом нелинейной характеристики цепи разряда.

5. На основании качественной оценки влияния сердечника на величину силы индукционно-динамического привода рекомендуется выполнять с ферромагнитным сердечником.

**Список литературы:** 1. *Лядова Л.Л., Сивков А.П.* Математическая модель индукционно-динамического привода с емкостным накопителем // Изв. ВУЗов. Электромеханика. – 1973. – №9. – С. 950-958. 2 Индукционно-динамический привод: А.с. 1417056 СССР, Н 01 Н 3/28 / Р.Я. Кляйн, В.И. Попов, И.И. Пушкарев, В.А. Репрынцев, Ю.А. Хохлов. – №4099986/24-07; Заявлено 29.05.86. – Опубл. Бюл. № 30. – 1988. 3. *Кузнецов И.Ф., Цицикян Г.Н.* Электродинамические усилия в токоведущих частях электрических аппаратов и токопроводов. – Л.: Энергоатомиздат, 1989. – 176 с. 4. *Поливанов К.М.* Теоретические основы электротехники. Учебник для вузов. В трех т. – Т. 1. Линейные электрические цепи с сосредоточенными постоянными. – М.: Энергия, 1972. – 240 с. 5. *Могилевской Г.В.* Гибридные электрические аппараты низкого напряжения. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 232 с. 6. *Гернет М.М.* Курс теоретической механики. Изд. 3-е перераб. и доп. Учебник для вузов. – М.: Высшая школа, 1973. – 464 с.

*Поступила в редколлегию 18.06.2010*