

*Є.І. БАЙДА***ВПЛИВ ГЕОМЕТРІЇ МАТЕРІАЛУ КОТУШКИ НА ПАРАМЕТРИ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СИЛИ ІНДУКЦІЙНО-ДИНАМІЧНОГО МЕХАНІЗМУ**

У статті досліджено математичну модель швидкодіючого індукційно-динамічного механізму в циліндричній системі координат, котушка якого у вигляді ряду концентричних кілець математично представлена як спіраль Архімеда. Метою статті є перевірка математичної моделі і дослідження роботи індукційно-динамічного механізму в залежності від геометричних розмірів мідної стрічки, якою намотана котушка та числа витків. Проведені розрахунки показують, що одним з основних чинників, що впливає на роботу індукційно-динамічного механізму є перетин стрічки, який має бути не менше певного значення. Причому, висота стрічки, в певних межах, мало впливає на швидкодію індукційно-динамічного механізму. В процесі моделювання було встановлено, що для кожного певного перетину мідної шини існує оптимальна кількість рядів намотування, при якому значення імпульсу сили максимально.

**Ключові слова:** індукційно-динамічний механізм.

*Е.И. БАЙДА***ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ МАТЕРИАЛА КАТУШКИ НА ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СИЛЫ ИНДУКЦИОННО-ДИНАМИЧЕСКОГО МЕХАНИЗМА**

В статье исследована математическая модель быстродействующего индукционно-динамического механизма в цилиндрической системе координат, катушка которого в виде ряд концентрических колец математически представлена спиралью Архимеда. Целью статьи является проверка математической модели и исследование работы индукционно-динамического механизма в зависимости от геометрических размеров медной ленты, которой намотана катушка и числа витков. Проведенные расчеты показывают, что одним из основных факторов, влияющих на работу индукционно-динамического механизма, является сечение ленты, которое не должно быть меньше определенного значения. Причем, высота ленты, в определенных пределах, слабо влияет на быстродействие индукционно-динамического механизма. В процессе моделирования было установлено, что для каждого определенного сечения медной шины существует оптимальное количество рядов намотки, при котором значение импульса силы максимально.

**Ключевые слова:** индукционно-динамический механизм.

*E.I. BAIDA***INFLUENCE OF COIL MATERIAL GEOMETRY ON THE PARAMETERS OF THE ELECTROMAGNETIC FORCE OF THE INDUCTION-DYNAMIC MECHANISM**

The article investigates the mathematical model of a high-speed induction-dynamic mechanism in a cylindrical coordinate system, the coil of which in the form of a series of concentric rings is mathematically represented as an Archimedes spiral. The purpose of the article is to verify the mathematical model and study the operation of the induction-dynamic mechanism depending on the geometric dimensions of the copper tape that wraps the coil and the number of turns. The calculations show that one of the main factors affecting the operation of the induction-dynamic mechanism is the section of the tape, which should not be less than a certain value. Moreover, the height of the tape, within certain limits, weakly affects the speed of the induction-dynamic mechanism. During the simulation, it was found that for each specific section of the copper bus bar there is an optimal number of winding rows at which the value of the force impulse is maximum.

**Keywords:** induction-dynamic mechanism.

**Введение.** Известно, что индукционно-динамические механизмы (ИДМ) широко используются в различных электротехнических устройствах [1-5]. Они простоты по конструкции, надежны и обладают высоким быстродействием.

Катушка ИДМ выполняется цилиндрической, а в качестве намоточного материала чаще всего применяется либо провод, либо медная лента, высота которой на порядок больше её толщины. Причем геометрия намоточного материала имеет большое значение для работы ИДМ. Катушка, намотанная круглым проводом с поперечным сечением  $1 \text{ мм}^2$ , будет создавать значения электромагнитной силы отличающиеся от значений получаемых при намотке катушки лентой такого же сечения, с тем же количеством витков.

Необходимо отметить, что, несмотря на значительное количество статей по расчету ИДМ, (или как его ещё называют линейный импульсно-индукционный электромеханический преобразователь) вопрос влияния геометрии намоточного материала на силы и токи в устройстве отражен недостаточно.

**Новизна.** К научной новизне данной статьи можно отнести исследование влияния высоты и количества витков медной ленты на параметры ИДМ, рассчитанные в цилиндрической системе координат. При этом витки ленты, изображаемые на расчетной модели в виде отдельных концентрических колец, математически представлены спиралью Архимеда.

**Целью статьи** является проверка математической модели и определение основных расчетных параметров

© Е.И. Байда, 2020

ИДМ (силы, токов, импульса силы) в функции высоты намоточной ленты и количества витков.

**Обоснование принятой модели, основные допущения, схема подключения катушки и задача расчета.** На рис. 1 приведена упрощенная расчетная схема в цилиндрической системе координат, в которой катушка представлена в виде отдельных не связанных между собой проводящих концентрических колец.

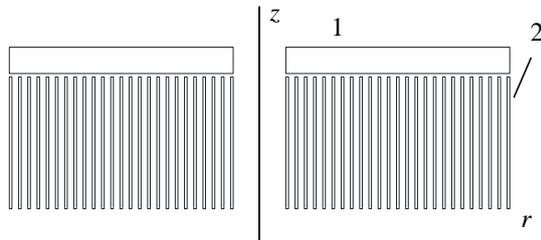


Рис. 1. Расчетная схема индукционно-динамического механизма: 1 – якорь (подвижный диск); 2 – катушка, представленная в цилиндрической системе координат в виде проводящих концентрических колец

Более корректной (но не более точной) была бы трехмерная модель ИДМ. Но расчёт эффектов взаимного влияния токов в витках катушки в 3Д постановке приводит к необходимости сгущения расчетной сетки в области каждого витка и на его границах. А с учетом необходимости расчета поля в окружающем пространстве, количество расчетных подобластей может достигать нескольких сот тысяч, что в свою очередь, требует значительных объёмов оперативной памяти и быстродействия ЭВМ. Аппроксимация переменных в подобластях функциями более высокого порядка, чем первый, не спасает положения, так как основная масса расчетных подобластей сосредоточена в сечении витков катушки и на их границах.

В этой связи и была выбрана расчетная модель, показанная на рис.1, позволяющая свести объёмную задачу к плоской задаче с осевой симметрией (токи катушки и диска не зависят от угловой координаты). Геометрия модели (рис. 1) выбрана с учетом возможностей ЭВМ и временных затрат на решение задачи.

Однако такая модель имеет существенный недостаток. Проблема заключается в том, что витки катушки на рис.1 представляют собой концентрические кольца, ток в которых зависит от радиуса кольца и его геометрии. Дело в том, что напряженность электрического поля (а, следовательно, и ток витка) определяется как сторонней напряженностью поля, так и наведенной напряженностью электрического поля в витке [6]:

$$\vec{E}_k = -\frac{\partial \vec{A}_k}{\partial t} + \vec{E}_{stk}, \quad (1)$$

где  $\vec{E}_k$  – напряженность электрического поля в витке;  $-\frac{\partial \vec{A}_k}{\partial t}$  – наведенная напряженность электрического поля;  $\vec{E}_{stk}$  – сторонняя напряженность электрического поля.

Очевидно, что с учетом поверхностного эффекта и

за счет взаимного влияния магнитных полей, наведенная напряженность электрического поля будет существенно отличаться от витка к витку. Неодинаковой будет и сторонняя напряженность электрического поля, зависящая от радиуса витка. Поэтому, если не принять специальные меры, то токи в каждом из витков катушек будут существенно различаться.

Схема подключения ИДМ к источнику энергии показана на рис. 2.

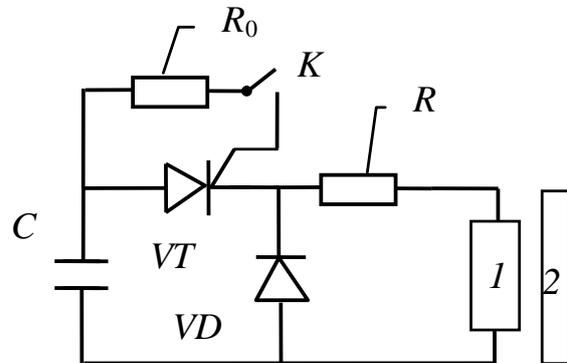


Рис. 2. Электрическая схема подключения ИДМ: где  $C$  – накопительный конденсатор;  $R$  – сопротивление проводов; 1 – катушка; 2 – диск

При замыкании ключа  $K$  конденсатор разряжается на катушку. При нулевом напряжении на конденсаторе диод открывается, обеспечивая рассеяние энергии, накопленной в катушке и не давая конденсатору перезарядиться. Такая схема обеспечивает наиболее полное использование энергии электролитического конденсатора, не допуская его перезаряда. Так как катушка состоит из относительно небольшого числа витков и намотана лентой достаточно большого сечения, то расчетная модель (рис. 2) должна учитывать сопротивление проводов, которое в расчетах было неизменным и равным 10 мОм.

Кроме того, так как максимальное значение электромагнитной силы, действующей на диск, соответствует незначительным (менее 1 мм) перемещениям диска, то в процессе исследования движением диска можно пренебречь.

Следовательно, задача расчета может быть сформулирована следующим образом. Определить значение электромагнитной силы, действующей на неподвижный диск в зависимости от геометрии материала, которым намотана катушка ИДМ при апериодической форме разряда конденсатора и с учётом последовательного подключения витков в катушке.

**Расчетные соотношения.** Основным расчетным соотношением является система уравнений нестационарного электромагнитного поля (вид которой зависит от параметров расчетной области), определенных через векторный магнитный потенциал при условии отсутствия поля на внешней границе расчетной области и симметрии поля по оси  $z$

$$\sigma_{jk} \cdot \frac{\partial \vec{A}_j}{\partial t} + \frac{1}{\mu_0} \cdot \nabla \times (\nabla \times \vec{A}_{jk}) = \vec{\delta}_{stjk}, \quad (2)$$

где  $\sigma_{jk}$  – удельная электропроводность материала;  $\vec{A}_{jk}$  – векторный магнитный потенциал;  $\mu_0$  –

магнитная проницаемость;  $\bar{\delta}_{st, jk} = (i/S_k)$  – сторонняя плотность тока в витке катушки;  $i$  – ток в катушке;  $k=1..N$  – число витков ленты;  $S_k$  – площадь поперечного сечения витка ленты;  $j$  – номер расчетной области.

Система уравнений (2) будет различаться для каждой из расчетных областей (воздух, витки катушки, диск).

Для определенности, система уравнений (2) должна быть дополнена уравнением электрической цепи

$$R \cdot \frac{dq}{dt} + U = \left( U_{c0} - \frac{q}{C} \right) \cdot \text{delta}; \quad (3)$$

$$\frac{dq}{dt} = i,$$

где  $R$  – активное сопротивление проводов;  $i$  – ток катушки;  $U_{c0}$  – начальное напряжение на конденсаторе;  $U$  – напряжение на катушке;  $q$  – электрический заряд;  $\text{delta}$  – ступенчатая функция, моделирующая аperiодический разряд конденсатора

$$\text{delta} = \begin{cases} 1, & Uc > 0 \\ 0, & Uc \leq 0 \end{cases} \quad (5)$$

Напряжение на катушке

$$U = \sum_{k=1}^N \frac{1}{S_k \cdot \sigma_k} \cdot \int_{V_k} \delta_k \cdot dV_k, \quad (4)$$

где  $V_k$  – объём витка ленты, которой намотана катушка;  $N$  – число витков ленты;  $\sigma$  – проводимость.

Для моделирования последовательного подключения концентрических витков (имитация катушки в цилиндрической системе координат) необходимо выполнение условий

$$\int_{S_k} \bar{\delta}_k \cdot d\bar{S}_k = i, \quad k = 1..N,$$

$$\left( U_{c0} - \frac{1}{C} \cdot \int_0^t i \cdot dt \right) \cdot \text{delta} - R \cdot i = \sum_{k=1}^N U_k, \quad (6)$$

где  $\sum_{k=1}^N U_k$  – сумма падений напряжения на всех витках катушки.

**Начальные условия.** Геометрические размеры модели: – толщина ленты – 0,2 мм; высота ленты изменялась от 10 мм до 0,25 мм; расстояние между витками – от 0,5 мм до 0,05 мм в зависимости от числа витков; число витков – 25, 38, 49, 68; толщина диска – 2 мм; радиус диска – 19 мм. Начальное количество витков равнялось 25.

Электрические параметры модели:  $R$  – сопротивление проводов равно 10 мОм;  $U_{c0}$  – начальное напряжение заряда конденсатора 400 В;  $C$  – ёмкость конденсатора 400 мкФ.

При изменении высоты ленты и числа витков неизменными оставался воздушный зазор между диском и катушкой, радиус катушки был примерно равен радиусу диска.

**Результаты расчетов при изменении высоты намоточной ленты.** Вначале были проведены расчеты по определению тока, который должен быть одинаковым во всех витках катушки. На рис. 3 показан

результат такого расчета, где на одном рисунке приведены четыре графика: тока, рассчитанного по уравнениям (3) и токов, как результат интегрирования плотности тока в первом, среднем и последнем витках катушки. Как видно из рис. 3, все токи совпадают, что подтверждает правильность предположений и расчетов по замене концентрических колец на последовательно подключённые витки.

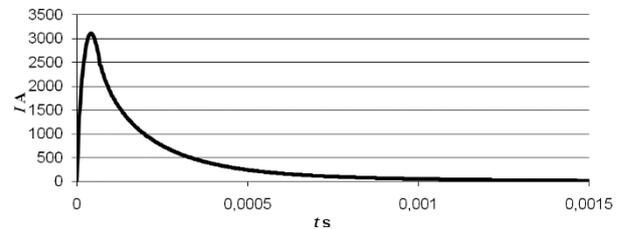


Рис. 3. Токи в первом, среднем и последнем витках катушки

Далее расчеты проводились для следующих значений высоты намоточной ленты: 10; 5; 2,5; 0,25 мм при неизменных остальных параметрах катушки. На рис. 4 показан результат расчета электромагнитной силы, действующей на неподвижный диск.

Сравнительный анализ показывает, что токи катушки при изменении высоты ленты от 10 мм до 2,5 мм определяются реактивным сопротивлением катушки (активное сопротивление увеличилось в четыре раза, а ток уменьшился на 30%). При высоте ленты 0,25 мм характер тока имеет вид разряда конденсатора на активное сопротивление.

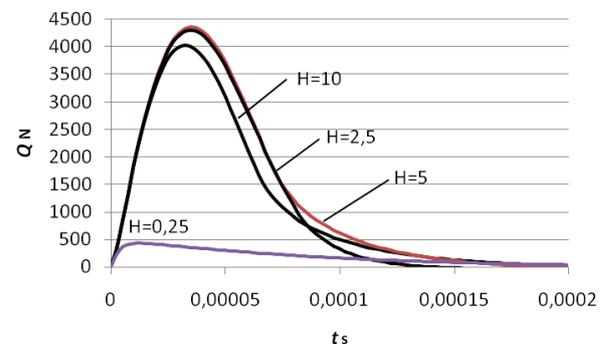


Рис. 4. Значение электромагнитной силы в зависимости от высоты намоточной ленты от 0,25 до 10 мм

Как видно из рис. 4 разница между значениями сил не существенна при изменении высоты ленты от 10 до 2,5 мм. Оптимальная высота ленты 2,5 – 5 мм. Уменьшение в 40 раз высоты намоточной ленты приводит к уменьшению электромагнитной силы примерно в 9 раз, что можно объяснить значительным увеличением активного сопротивления катушки. На рис. 5 показаны графики тока в катушке.

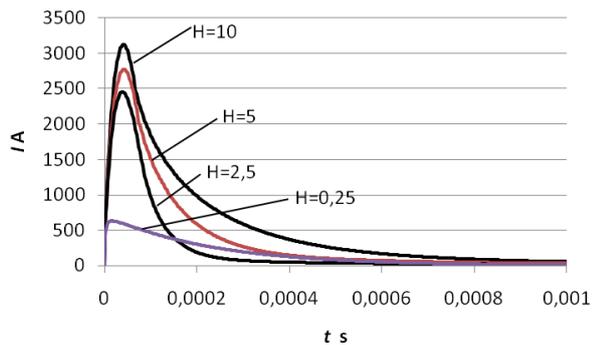


Рис. 5. Токи в катушке в зависимости от высоты ленты – 0,25 до 10 мм

На рис. 6 показаны токи, наводимые в неподвижном (по условиям задачи) диске, которые мало зависят от высоты ленты в диапазоне 2,5...10 мм.

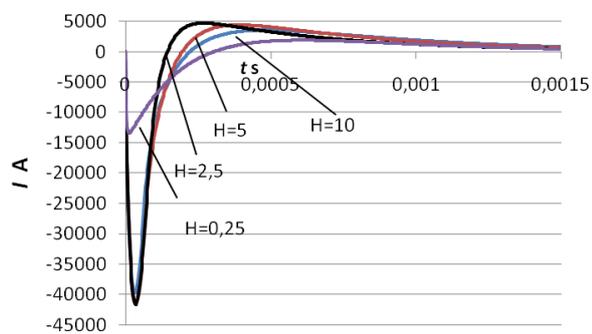


Рис. 6. Значения токов в неподвижном диске

На рис. 7 показано распределение плотности тока по сечению ленты в момент времени достижения силой своего максимума

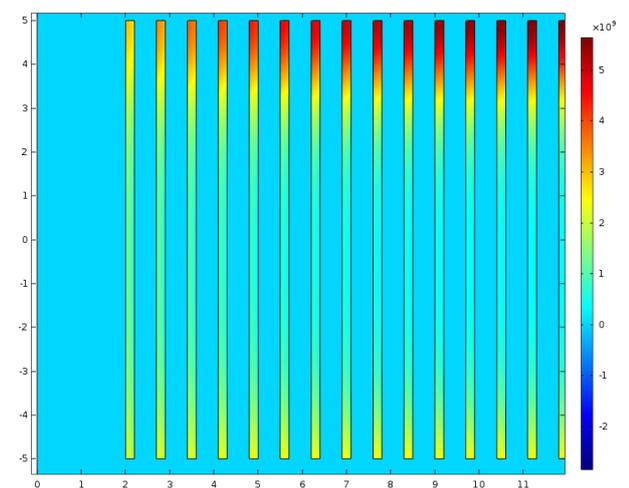


Рис. 7. Распределение плотности тока в момент времени максимума электромагнитной силы

Как следует из рис. 7, неравномерность распределения плотности тока по высоте ленты и радиусу катушки существенна, часть общего тока ленты находится на значительном расстоянии от диска.

Для того чтобы оценить «отталкивающее» действие катушки, одного расчета электромагнитной силы недостаточно. Очевидно, что изменение геометрии ленты, числа витков изменяет активное и реак-

тивное сопротивление катушки, что в свою очередь, приводит к изменению токов системы и, следовательно, к изменению значения электромагнитной силы. Но изменение параметров катушки приводит и к изменению длительности воздействия силы на диск. Поэтому, для оценки влияния параметров катушки на диск использовалась величина импульса силы, которая определяет динамические характеристики системы, так как квадрат импульса силы пропорционален кинетической энергии диска.

График импульса силы в функции высоты ленты показан на рис. 8.

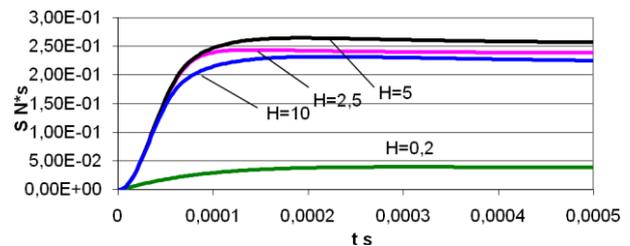


Рис. 8. Импульс силы в функции высоты ленты

Как следует из рис. 8, при принятом количестве витков (25) наиболее оптимальной будет высота ленты равная 5 мм.

**Результаты расчетов при изменении числа витков катушки.** Одним из параметров, влияющих на значение электромагнитной силы в ИДМ, является число витков, которыми намотана катушка.

В качестве базовой была принята следующая конструкция: толщина ленты – 0,2 мм, высота ленты – 10 мм. Количество витков подбиралось из условия примерного равенства радиусов катушки и диска при неизменной толщине намоточной ленты 0,2 мм и расстоянии между витками от 0,5 мм до 0,05 мм.

На рис. 8 показаны значения электромагнитной силы в функции числа витков.

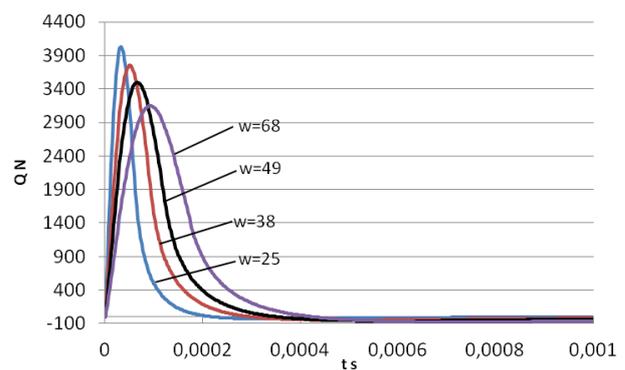


Рис. 8. Зависимость электромагнитной силы в функции числа витков

На рис. 9 Показы значения импульса силы в функции числа витков.

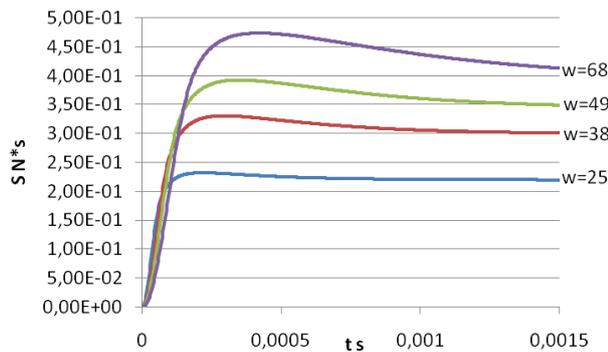


Рис. 9. Значение импульса силы в функции числа витков

Из рис. 9 следует, что увеличение числа витков 2,7 раза увеличивает значение импульса в 2,0 раза при уменьшении электромагнитной силы в 1,28 раза.

**Влияние толщины медной ленты на параметры ИДМ.** Как правило, толщина ленты, которой намотана катушка, равна 0...0,2 мм. Расчеты катушки при толщине ленты 0,2 мм были проделаны ранее. Поэтому, было рассмотрено два варианта намоточных параметров катушки: высота – 10 мм; толщина ленты – 0,1 мм; толщина межвитковой изоляции изменялась от 0,05 мм до 0,1 мм, что при неизменном радиусе катушки приводит к изменению числа витков катушки от 113 до 85. Результаты расчета показаны на рис. 10-13.

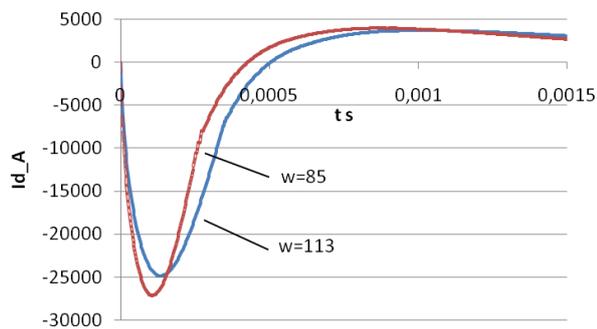


Рис. 10. Токи диска в функции числа витков при толщине ленты 0,1 мм

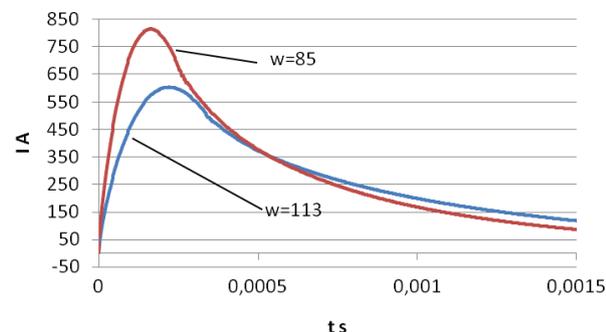


Рис. 11. Ток катушки в функции числа витков при толщине ленты 0,1 мм

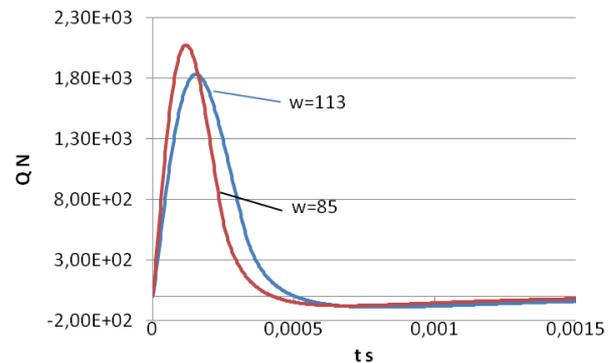


Рис. 12. Электромагнитная сила в функции числа витков при толщине ленты 0,1 мм

Сравнительный анализ рис. 9-13 показывает, что катушки с параметрами намотки, указанными в табл.1, имеют примерно одинаковое значение импульса силы.

Таблица 1. – Параметры намотки

$\Delta$ ленты мм	$\Delta$ изоляция мм	w	S H* $\mu$
0,2	0,05	68	0,47
0,1	0,05	113	0,44

Причем, в тепловом отношении оба варианта практически равнозначны, так как плотности тока в проводниках практически равны, а сама температура нагрева не превышает полутора градусов за время 0,015 с.

Можно заметить, что равенство импульса силы обеспечивается примерным равенством магнитодвижущей силы катушки, которая равна  $6,81 \cdot 10^4$  А и  $6,92 \cdot 10^4$  А соответственно.

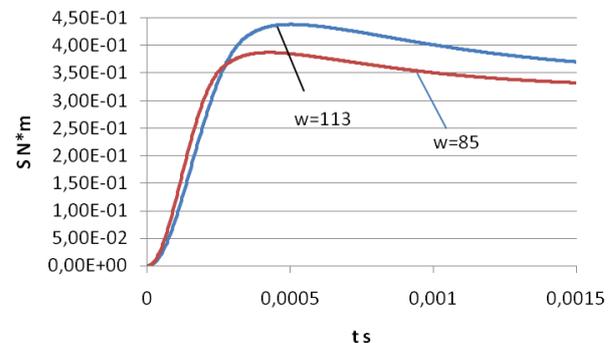


Рис. 13. Импульса в функции числа витков при толщине ленты 0,1 мм

**Распределение температуры в катушке.** Несмотря на то, что предварительные расчеты свидетельствуют о незначительном нагреве катушки, интерес представляет распределение температуры по высоте ленты и по радиусу катушки.

Расчетные уравнения в пределах каждого из витков представляют собой уравнения нестационарного нагрева твердого тела с внутренними источниками тепла в адиабатическом режиме.

Распределение температуры показано на рис. 14.

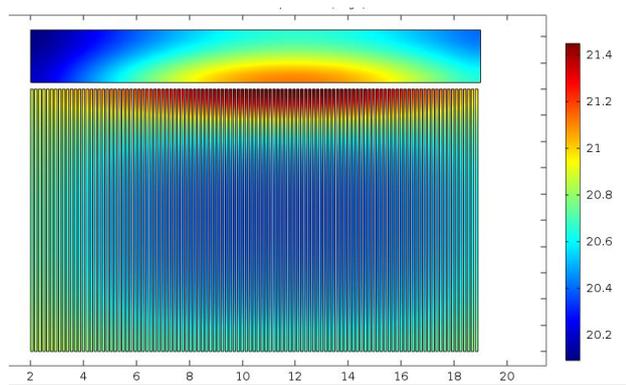


Рис. 14. Распределение температуры по виткам ленты

Из рис. 14 видно, что распределение температуры похоже на распределение плотности тока в витках ленты и неравномерно как по высоте, так и по радиусу катушки.

**Расчеты ИДМ в случае намотки катушки круглым проводом.** В том случае, когда катушка ИДМ намотана круглым проводом, равномерно распределенным по сечению, ее можно представить как однородное тело с малой проводимостью и суммарным током равным произведению тока катушки на число витков. Модель подробно описана в [2]. Расчеты проводились по следующей методике: при постоянной ширине катушки выбирался диаметр провода и число рядов намотки. Рассчитывались значения электромагнитной силы и импульса силы. Частично результаты приведено на рис. 15, а исходные данные показаны в табл.2.

Таблица 2 – Исходные данные

Диаметр мм	Число рядов/витки			
	1/31	3/92	5/153	7/214
0,5	1/31	3/92	5/153	7/214
1,0	1/15	3/46	5/77	7/107

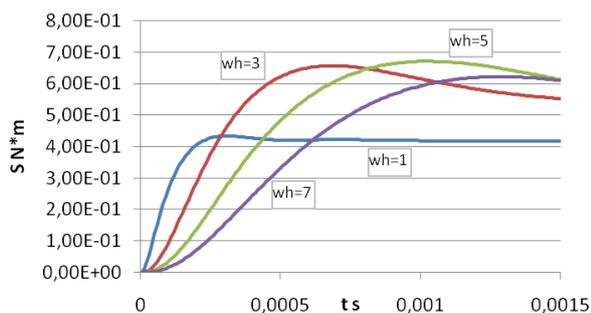


Рис. 15. Зависимость импульса силы при разном количестве рядов намотки и диаметре провода 0,5 мм

На рис. 15 прослеживается явный экстремум значения импульса, который обеспечивает наибольшую кинетическую энергию движения диска

$$W = \frac{S^2}{2 \cdot m}, (7)$$

где  $W$  – кинетическая энергия;  $S$  – импульс;  $m$  – масса.

На рис. 16 показана зависимость импульса от числа рядов намотки и диаметра провода.

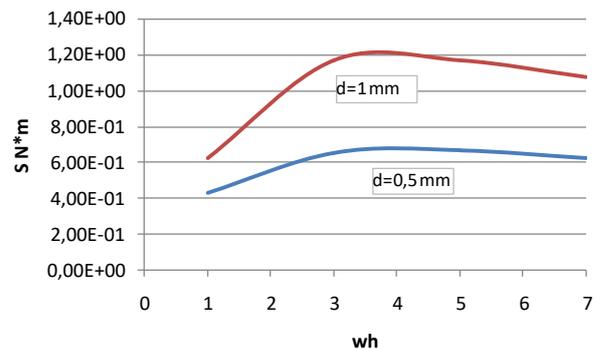


Рис. 15. Зависимость импульса от числа рядов при диаметре провода 0,5 мм и 1 мм

Необходимо отметить, что оптимальное число рядов слабо зависит от диаметра провода (при условии, что сечение провода не менее  $0,5 \text{ мм}^2$ ). Увеличение диаметра провода увеличивает значение импульса, но смещает его максимум в сторону меньших времен (при  $wh=5$  максимум приходится на время  $0,001 \text{ с}$  при диаметре провода  $0,5 \text{ мм}$  и на время  $0,00055 \text{ с}$  при диаметре провода  $1 \text{ мм}$ ).

#### Выводы.

1. Проверена модель, позволяющая математически представить ряд концентрических проводящих колец спиралью Архимеда, что даёт возможность проводить расчеты катушек, намотанных медными шинами и лентой в цилиндрической системе координат.

2. Высота ленты в диапазоне от  $2,5 \text{ мм}$  до  $10 \text{ мм}$  слабо влияет на параметры ИДМ.

3. Увеличение поперечного сечения проводника и уменьшение числа витков увеличивает значение импульса, но при этом его максимальное значение смещается в сторону меньших времен (ударная нагрузка). Что при достаточно большой инерционности диска отрицательно сказывается на динамических характеристиках системы.

4. Наиболее оптимальным вариантом (при скоростях движения диска порядка  $5...7 \text{ м/с}$ ) представляется намотка катушки проводом диаметром  $0,7 \text{ мм}$  с числом витков порядка  $100...120$ . При этом якорь получает достаточную скорость, а ударная нагрузка уменьшается по сравнению с другими рассмотренными вариантами.

#### Список литературы

1. Болух В.Ф., Кашанский Ю.В., Шукин И.С. Влияние геометрических параметров индуктора и якоря на показатели линейного импульсного электромеханического преобразователя электродинамического типа. *Электротехника і електромеханіка*, –2019. – №3. –С. 11–17. doi: 10.20998/2074-272X.2019.3.02
2. Байда Е.И. Математическое моделирование индукционно-динамических систем. *Электротехніка і електромеханіка*, 2009. - №5. – С. 13–16.
3. Bissal A. Licentiate thesis on the design of ultra-fast electromechanical. Electromagnetic Engineering School of Electrical Engineering, KTH Stockholm, Sweden. 2013. 120 p. doi: 10.1109/INTMAG.2017.8008035.
4. Weijie Wen, Yulong Huang, Member, IEEE, Mohmmad Al-Dweikat, Zu'an Zhang, Tichan Cheng, Shutong Gao and Weidong Liu. Research on Operating Mechanism for Ultra-fast 40.5kV Vacuum Switches. *IEEE Power & Energy Soci-*

ety, 24 March 2015. P. 2553–2560. doi: 10.1109/TPWRD.2015.2409122.

5. Теория электрических аппаратов. Учебник для вузов по спец. "Электрические аппараты" / Г.Н. Александров, В.В. Борисов, В.А. Иванов и др. Под ред. проф. Г.Н. Александрова. – М.: Высшая школа, 1985. 312 с.
6. Рамо С., Уинерри Дж. Поля и волны в современной радиотехнике. Перевод с английского. Москва, ОГИЗ, 1948. 631 с.

#### References (transliterated)

1. Boliukh V.F., Kashanskiy Iu.V., Shchukin I.S. *Vlianiye geometricheskikh parametrov induktorov na kharakteristiki funktsionirovaniya liniy impulsnogo elektromekhanicheskogo preobrazovaniya elektrodinamicheskogo tipa*. [The influence of the geometric parameters of the inductor and the armature on the performance of a linear pulse electromechanical transducer of electrodynamic type] *Elektrotehnika i elektromekhanika*, –2019. – №3. – P. 11–17. doi: 10.20998/2074-272X.2019.3.02
2. Baida E.I. *Matematicheskoye modelirovaniye induktsionno-dinamicheskikh sistem*. [Mathematical modeling of induction-dynamic systems]. *Elektrotehnika i elektromekhanika*,

2009. №5, p.p. 13–16.

3. Bissal A. *Licentiate thesis on the design of ultra-fast electromechanical*. [Licentiate thesis on the design of ultra-fast electromechanical]. Electromagnetic Engineering School of Electrical Engineering, KTH Stockholm, Sweden. 2013. 120 p. doi: 10.1109/INTMAG.2017.8008035.
4. Weijie Wen, Yulong Huang, Member, IEEE, Mohmmad Al-Dweikat, Zu'an Zhang, Tichan Cheng, Shutong Gao and Weidong Liu. *Research on Operating Mechanism for Ultra-fast 40.5kV Vacuum Switches*. [Research on Operating Mechanism for Ultra-fast 40.5kV Vacuum Switches]. IEEE Power & Energy Society, 24 March 2015, p.p. 2553–2560. doi: 10.1109/TPWRD.2015.2409122.
5. *Teoriya elektricheskikh apparatov. Uchebnik dlia vtuzov po spets. "Elektricheskie apparaty"*. [Theory of electrical apparatus. Textbook for high schools on special. "Electrical apparatus"]. G.N. Aleksandrov, V.V. Borisov, V.A. Ivanov i dr. Pod red. prof. G.N. Aleksandrova. – Moscow: Vysshaya shkola, 1985. 312 p.
6. Ramo S., Uinerrri Dzh. *Polia i volny v sovremennoi radio-tekhnikе*. [Fields and waves in modern radio engineering]. Perevod s angliiskogo. Moscow, OGIZ, 1948. 631 p.

Поступила (received) 10.01.2020

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Байда Євген Іванович (Байда Евгений Иванович, Baida Evgen Ivanovich)** – доктор технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри електричних апаратів, м. Харків, тел/phone +38 096 187 77 07, e-mail: [baida.kpi@gmail.com](mailto:baida.kpi@gmail.com)