

УДК 621.3.04: 621.316

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕГО ПРИВОДА АВТОМАТИЧЕСКОГО ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ С ИНДУКЦИОННО-ДИНАМИЧЕСКИМ И БИСТАБИЛЬНЫМ МЕХАНИЗМОМ

БАЙДА Е.И.

канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электрических аппаратов Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина, e-mail: baida.kpi@gmail.com;

ВОЛКОВА О.Г.

канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры теоретической и общей электротехники Запорожского национального университета, Запорожье, Украина, e-mail: volkova@zntu.edu.ua;

Цель работы. Разработка математической модели индукционно-динамического привода выключателя с двумя катушками, работающего с бистабильным механизмом, обеспечивающим фиксацию индукционно-динамического механизма (ИДМ) в крайних положениях траектории движения контактной системы.

Методы исследования. Решение поставленных в работе задач выполнялось с использованием методов расчёта электромагнитного поля, конечных элементов, теоретической механики и решения дифференциальных уравнений.

Полученные результаты. Разработана математическая модель быстродействующего привода на базе индукционно-динамического и бистабильного механизма, которая базировалась на уравнениях электромагнитного поля электрической цепи и кинематики движения механизма переключения. Преимуществом данной модели является возможность динамического расчёта привода выключателя на основании данных по контактному нажатию, ходу и провалу контактов.

Исходными данными построения модели являлись: индуктивность внешней цепи; активные сопротивления катушек, рассчитанные исходя из сечения проводника и геометрии катушек. Начальные условия удовлетворяли условиям Дирихле. Система уравнений математической модели решалась в цилиндрической системе координат. Решение задачи проводилось в системе Comsol Multiphysics. Движение подвижной части ИДМ моделировалось деформацией расчетной сетки.

На основании исходных данных о контактном нажатии, а также ходе и провале контактов, определялась жесткость пружины и усилия в конструкции бистабильного механизма. По расчетным данным представлены графики, позволяющие проанализировать выбор упругих элементов и внести необходимые корректировки на стадии проектирования и отладки конструкции.

Рассчитаны параметры работы механизма в стадии включения и отключения ИДМ. Представлены графические значения хода и скорости движения якоря выключателя, токи ускоряющей и тормозящей катушки, значение суммарной электромагнитной силы и суммарной противодействующей силы.

Научная новизна. Разработана математическая модель быстродействующего привода на основе ИДМ и бистабильного механизма, который включает в себя уравнения электромагнитного поля электрической цепи и уравнения движения. Модель корректно описывает физические процессы и может быть использована для разработки и изучения конструкций высокоскоростных приводов.

Практическая ценность. На основании вариационных расчетов можно решать задачи, по поиску требуемых параметров привода ставя целью получить: а) малое время замыкания контактов и избежать «дребезг» при включении; б) высокую начальную скорость и общее малое время (менее 1 мс) размыкания контактов, уменьшить динамические нагрузки на элементы привода и контактную систему.

Ключевые слова: коммутация силовых цепей; быстродействующий привод выключателя; индукционно-динамический механизм; бистабильный механизм

1. ВВЕДЕНИЕ

Для коммутации силовых цепей в электрифицированном транспорте, на подстанциях и в высоковольтных цепях постоянного и переменного тока использование вакуумных выключателей является перспективным [1]–[3]. Вакуумные выключатели обладают рядом преимуществ: высокая диэлектрическая прочность среды и, как следствие, быстрое гашение электрической дуги; пожаро- и взрывобезопасность;

долговечность и т. д. Как правило, для силовых коммутаций постоянного тока используются вакуумные выключатели с противотоком или гибридные аппараты, у которых параллельно главным контактам включены управляемые полупроводниковые приборы [4]–[6]. Такие разработки ведутся в Японии и Швейцарии. Одним из ключевых параметров работы таких выключателей является быстродействие. Высокая скорость движения подвижной части устройства по-

звolyет оперативно управлять выключателем и отключать аварийные сверхтоки до достижения ими своего установившегося значения, так как коммутация больших постоянных токов представляет собой достаточно сложную задачу.

В настоящее время, индукционно-динамические механизмы (ИДМ), известные в иностранной литературе как *Thomson-drive*, широко применяются в качестве быстродействующего привода в электрических аппаратах. Простота и надежность конструкции, высокое быстродействие позволяют этим устройствам успешно конкурировать с традиционными электромагнитными приводами.

Необходимо отметить, что ИДМ имеют ряд недостатков: 1) высокая скорость движения на начальном участке приводит к значительной ударной нагрузке в конце траектории движения; 2) для нормальной работы ИДМ необходима фиксация его положений в начальной и конечной точках траектории движения.

Решение первой проблемы заключается либо в использовании демфирующих устройств [7], либо при помощи оптимального управления движением – подключением тормозящей катушки.

Вторая проблема решается за счет применения механических фиксаторов или специальных механических бистабильных механизмов (что является более предпочтительным).

II. КРАТКИЙ ОБЗОР ПУБЛИКАЦИЙ ПО ДАННОЙ ТЕМАТИКЕ

Расчету и анализу работы ИДМ посвящено достаточно большое число статей, которые были опубликованы на протяжении целого ряда лет, например, [10], [12]–[17]. Однако эти работы не учитывают специфики работы привода электрических аппаратов: изменение движущейся массы в момент замыкания-размыкания контактов; скачкообразное изменение противодействующей силы и т. д. В работах не рассматривается бистабильный механизм. В [18] разработана модель ИДМ привода и решено уравнение движения тела с переменной массой, что позволяет более точно описать физические процессы, происходящие в автоматическом выключателе. В работе [19] описана совместная работа ИДМ, бистабильного механизма и магнитного демфера. Основное внимание в работе уделено расчетам ИДМ, силовому расчету и демферу, состоящему из постоянных магнитов, движущихся внутри проводящего цилиндра. Проведены оптимизационные расчеты. В работе не рассматриваются вопросы снижения скорости соударения контактов при рассматриваемых скоростях движения (2 - 16) м/с. Наиболее полно данная проблема рассмотрена в [18]. В работе рассмотрена конструкция быстродействующего привода на основе ИДМ с двумя катушками (ускоряющая и тормозящая катушки, которые в процессе работы "меняются функциями" в зависимости от коммутационной опера-

ции) и бистабильным механизмом. Проведены расчеты, подобрано оптимальное время включения тормозящей катушки, рассчитаны параметры бистабильного механизма, проведены экспериментальные исследования. Расчет ИДМ проводится на основании взаимодействия элементарных проводящих контуров, на которые "разбиты" катушка и подвижный диск (т. е. расчет проводится на основании уравнения электрической цепи с взаимной индуктивностью). В работах [17]–[18] не учитывается изменение массы подвижных частей в процессе работы привода (судя по приведенным уравнениям движения), что является неточностью.

При этом необходимо отметить, что идея использования устройств типа ИДМ совместно с бистабильным механизмом не нова, например, [19].

Как правило, основным недостатком всех работ является то, что в них приведены конечные результаты исследования без расчетных формул и ссылок на программное обеспечение, поэтому, когда возникает необходимость в изменении начальных условий расчета или параметров модели, все проведенные ранее расчеты оказываются бесполезными. По сути, для новых начальных условий и параметров необходимо проделать работу заново. Именно с такой ситуацией и столкнулись авторы данной статьи, что и послужило поводом написания данной работы.

III. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Разработка математической модели индукционно-динамического привода выключателя с двумя катушками, работающего с бистабильным механизмом, обеспечивающим фиксацию ИДМ в крайних положениях траектории.

IV. БИСТАБИЛЬНЫЙ МЕХАНИЗМ

Одним из способов фиксации положения привода в конечных точках может быть применение бистабильного механизма, показанного на рис. 1 и состоящего из упругих элементов и рычагов, поворачивающихся в шарнирах.

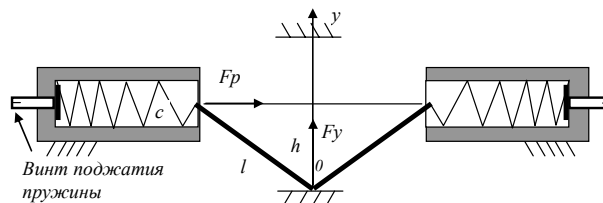


Рисунок 1. Бистабильный механизм, где h – половина полного хода; F_p – сила сжатия пружины; F_y – вертикальная сила

Работа механизма проста, изменение положения т.о. меняет направление действия силы F_y .

Можно показать, что при выбранном положительном направлении оси y значение противодействующей силы будет

$$F_y = \frac{2 \cdot c}{l} \cdot \left(\sqrt{l^2 - h^2 + 2 \cdot h \cdot y - y^2} - \sqrt{l^2 - h^2} + a_0 \right) \cdot \sqrt{1 - \frac{(h-y)^2}{l^2}} \cdot (-h+y) \quad (1)$$

где F_y – сила; a_0 – начальная затяжка пружины; c – жесткость пружины; y – ход; l , h – геометрия механизма.

Задачей расчета является определение геометрии механизма и жесткости пружины в соответствии с параметрами контактного нажатия, хода и провала контактов.

Предположим, что ход контактов до соударения равен 5 мм, провал – 2 мм, а сила контактного нажатия постоянна и равна 100 Н. В этом случае целесообразно (с учетом конечного нажатия механизма) принять значение $h = 4$ мм (суммарный максимальный ход – 8 мм, ход механизма – 7 мм).

Задавшись значением хода $y = 7$ мм и силой механизма при этом ходе большей, чем величина контактного нажатия, например 150 Н (50% запас), можно построить график значений жесткости пружины в функции длины рычагов l (рис. 2).

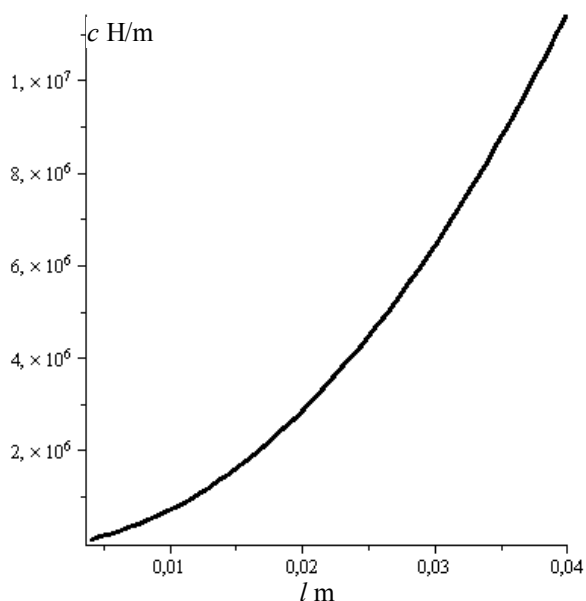


Рисунок 2. Жесткость пружины в функции длины рычага

Выбрав жесткость пружины равной $3 \cdot 10^6$ Н/м, получим значение длины рычага $l = 20,5$ мм, что полностью определяет параметры в (1).

Формулой (1) пользоваться затруднительно, поэтому она была аппроксимирована соотношением:

$$F_y \approx -178 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{2 \cdot h} \cdot y\right) \quad (2)$$

На рис.3. показаны значения оригинальной и аппроксимирующей функции. Из рисунка видно, что характер кривых 1 и 2 с достаточной для инженерных расчетов точностью совпадают.

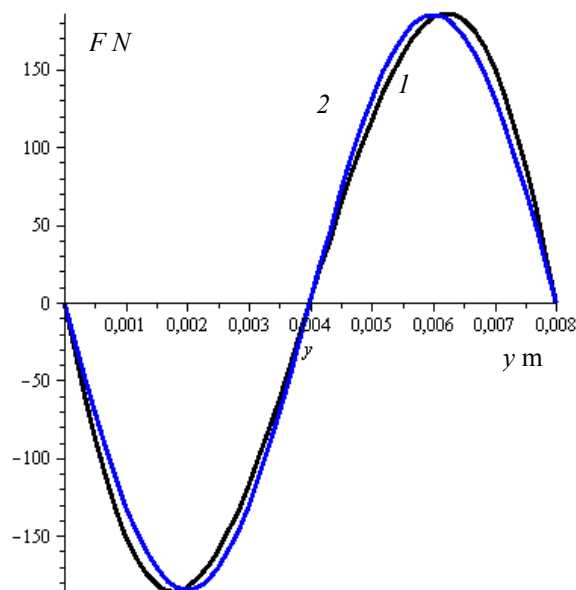


Рисунок 3. Силы в бистабильном механизме: 1 – формула (1); 2 – формула (2)

Суммарная сила с учетом контактного нажатия показана на рис. 4.

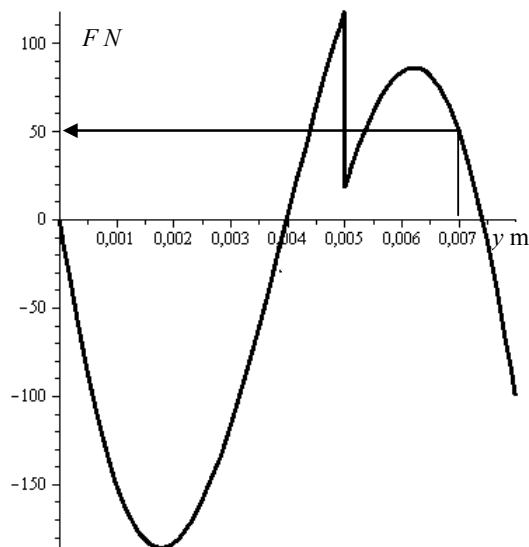


Рисунок 4. Суммарная сила бистабильного механизма и контактного нажатия

Конечный ход бистабильного механизма (7 мм) фиксируется упором (рис. 4). Кривая на рисунке дает общее представление о значении суммарной силы, полученной только на основании анализа механической системы бистабильного механизма. В общем виде, график уравнения (1) существенно зависит от предварительного натяжения пружин и может приме-

нять вид как синусоидальной, так и практически, прямолинейной зависимости. В нашем случае предварительно задавалось натяжение пружины 2 мм, а рабочий ход – 4 мм.

V. ИНДУКЦИОННО-ДИНАМИЧЕСКИЙ МЕХАНИЗМ И КОНТАКТНАЯ СИСТЕМА ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ

Схематическое изображение ИДМ с двумя катушками показано на рис. 5.

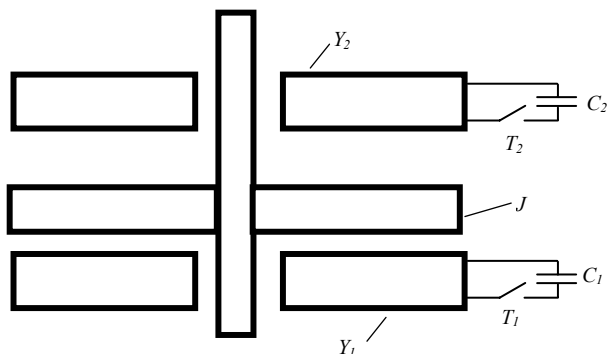


Рисунок 5. Схематическое изображение ИДМ, где Y_1, Y_2 – катушки; C_1, C_2 – конденсаторы; T_1, T_2 – тиристоры; J – подвижная часть (якорь)

При включении, ускоряющей катушкой является Y_1 , а тормозящей катушкой – Y_2 . При отключении, катушки меняются функциями. Подвижная часть ИДМ связана через пружину контактного нажатия с контактной системой выключателя, рис. 6.

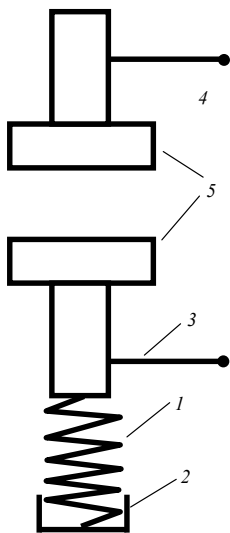


Рисунок 6. Контактная система, где 1 – пружина; 2 – толкатель; 3, 4 – выводы; 5 – контакты

Полная схема привода показана на рис. 7.

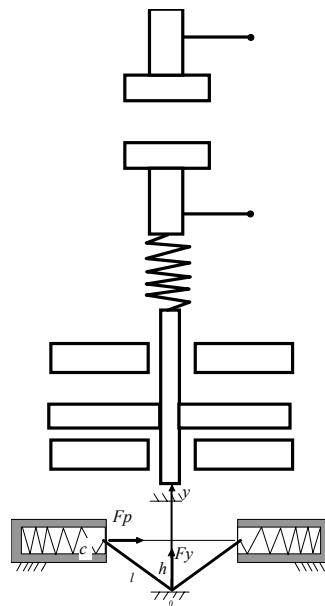


Рисунок 7. Схема привода

VI. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИДМ С БИСТАБИЛЬНЫМ МЕХАНИЗМОМ

Модель является мультифизической моделью, включающая уравнения электромагнитного поля электрической цепи и уравнения движения. Вид уравнений

$$\sigma_i \cdot \frac{\partial \vec{A}_i}{\partial t} + \frac{1}{\mu} \cdot \nabla \times \nabla \times \vec{A}_i - \sigma_i \cdot \vec{v} \cdot \nabla \times \vec{A}_i = \vec{\delta}_i \quad (3)$$

σ – проводимость материала; $\vec{A}$ – векторный магнитный потенциал; $\vec{v}$ – скорость движения диска; $\vec{\delta} = \frac{i \cdot w}{S} \cdot \vec{e}_\varphi$ – плотность тока стороннего источника; w – число витков катушки; S – площадь катушки.

Вид системы уравнений (3) определяется расчетной областью (воздух, катушки, проводящий диск).

Уравнения электрической цепи

$$\begin{aligned} L_1 \cdot \frac{di_1}{dt} + R_1 \cdot i_1 + E_1 &= \\ &= \left(E_{c01} - \frac{1}{C_1} \cdot \int i_1 \cdot dt \right) \cdot \eta, \\ L_2 \cdot \frac{di_2}{dt} + (R_2 + R_d \cdot \eta_1) \cdot i_2 + E_2 &= \\ &= \left(-E_{c02} - \frac{1}{C_2} \cdot \int i_2 \cdot dt \right) \cdot \eta, \end{aligned} \quad (4)$$

где $L_{1,2}$ – внешняя индуктивность; $R_{1,2}$ – активные сопротивления катушек ИДМ, зависящие от сечения провода (учитывается и сопротивление внешней цепи); $E_{1,2} = \frac{w}{S} \cdot \int \frac{\partial A_\varphi}{\partial t} \cdot dV$ – наводимая ЭДС катушек;

V – объём катушки; E_{c0} – начальная ЭДС на емкости; $i_{1,2}$ – токи катушек; Rd – добавочное сопротивление.

$$\eta = \begin{cases} 1, U_c > 0 \\ 0, U_c < 0 \end{cases} \quad \eta_1 = \begin{cases} 1, x < xd \\ 0, x \geq xd \end{cases} \quad (5)$$

где xd – ход, при котором начинается процесс торможения.

Функция имитирует катушку с диодом, включенным параллельно во избежание колебательного разряда конденсатора.

Уравнения движения

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \cdot (m(y(t)) \cdot v(t)) = [F_{em} - P \cdot \eta_3 + F(y(t))] \cdot \eta_2 \\ \frac{dy(t)}{dt} = v(t) \end{cases} \quad (6)$$

где $m(y(t))$ – изменяющаяся масса системы; $v(t)$ – скорость; $F_{em} - P \cdot \eta_3 + F(y(t))$ – суммарная сила; η_2 – функция, запрещающая движение за допустимые пределы (упоры); η_3 – определяет начало соударения контактов и начало действия силы контактного нажатия.

Уравнение (6), уравнение движения с переменной массой. Система уравнений (3) – (6) с учетом (1), (2) и есть математическая модель ИДМ с бистабильным механизмом.

VII. НАЧАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Решение системы уравнений осуществлялось при нулевых начальных условиях. В качестве исходных данных были заданы массы, движущиеся вместе с диском и масса контакта. Сам момент удара "размыт" по времени на протяжении 0,3 мс. Производная массы по координате подбиралась исходя из закона сохранения импульса. Графики показаны на рис. 8.

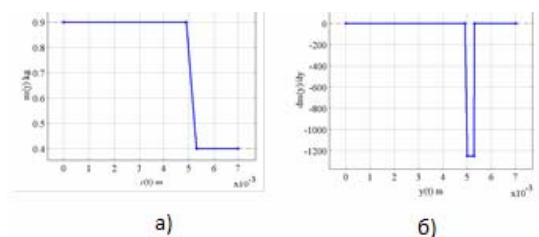


Рисунок 8. График изменения массы, а) и её производной б)

Исходными данными являлись: индуктивность внешней цепи; активные сопротивления катушек, рассчитанные исходя из сечения проводника и геометрии катушек.

Так как каждая из катушек может быть, как ускоряющей, так и тормозящей, то значения начального

напряжения и ёмкости конденсаторов были выбраны одинаковыми – 400 В, 600 мкФ. Размеры катушек и диска: радиус – 40 мм; высота катушек – 10 мм; высота диска – 5 мм; число витков катушек – 100.

Ход, при котором конденсатор начинает разряжаться на тормозящий диск, был подобран и равен 3,5 мм. Начальные условия – условия Дирихле.

Система (3) решалась в цилиндрической системе координат. Решение задачи проводилось в системе Comsol Multiphysics. Движение подвижной части ИДМ моделировалось деформацией расчетной сетки.

VIII. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ВКЛЮЧЕНИЯ

На рис.9 показан результат расчета хода в миллиметрах и скорости в метрах в секунду якоря ИДМ.

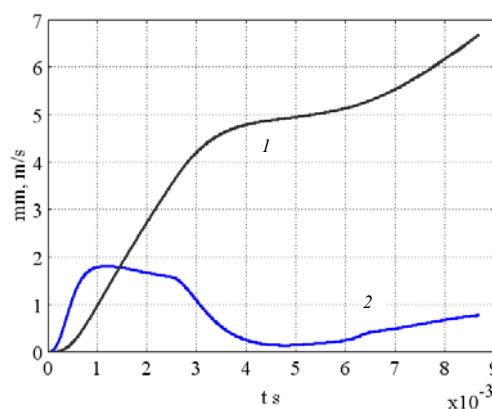


Рисунок 9. Ход и скорость якоря ИДМ, 1 – ход в мм; 2 – скорость м/с

На рисунке согласно модели показан процесс торможения якоря ИДМ. Примерно через 0,0027 с от момента срабатывания, скорость движения контактов резко снижается (≈ 2 мм/с). Такая скорость замыкания контактов практически исключает их дребезг при включении, что существенно повышает коммутационную способность выключателя, в том числе и при включении на аварийные сверхтоки.

На рис.10 показаны токи ускоряющей и тормозящей катушки.

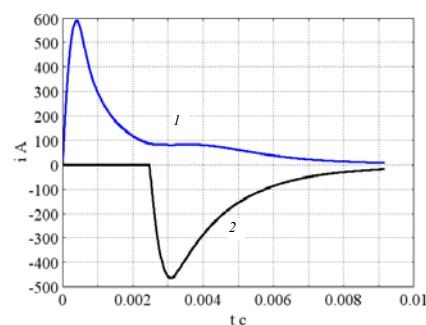


Рисунок 10. Ток ускоряющей 1) и тормозящей 2) катушек

На рис. 10 виден аperiodический характер раз-

ряда, что и требовалось по расчету. Причем, работа тормозящей катушки начинается до момента исчезновения тока в ускоряющей катушке.

Значение суммарной электромагнитной силы и суммарной противодействующей силы, увеличенной в 10 раз, показано на рис. 11.

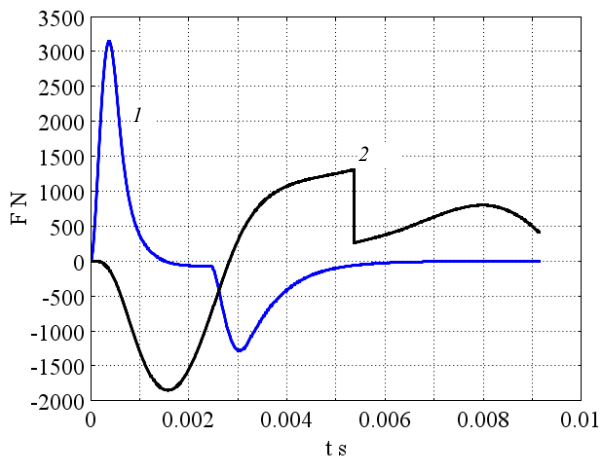


Рисунок 11. Сила, действующая на диск: 1) – электромагнитная сила; 2) – суммарная противодействующая, увеличенная в 10 раз

IX. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ОТКЛЮЧЕНИЯ

На рис. 12 показан график хода и скорости движения якоря ИДМ (аналог рис. 9), только для стадии отключения контактов.

На рис. 12 отчетливо виден скачок скорости от 0 до 3,5 м/с в момент размыкания контактов за время менее 1 мс. Реальный характер значений, полученных на электромагнитной модели индукционно-динамического привода, позволит наметить пути исследования и оптимизации работы выключателя.

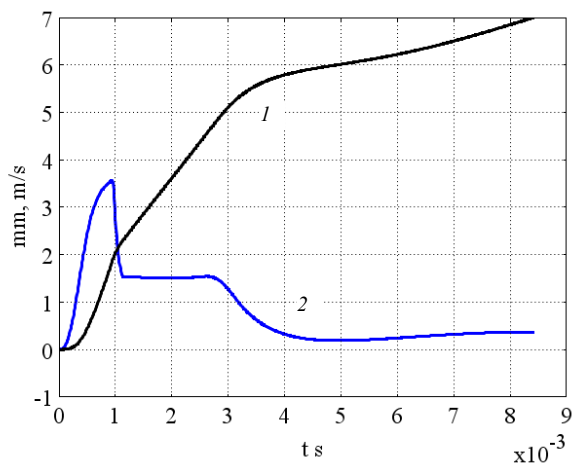


Рисунок 12. Ход и скорость якоря ИДМ, 1 – ход в мм; 2 – скорость м/с

Сравнивая значения сил действующих на кон-

такты рис 4 и рис.14 следует отметить, что электромагнитные силы в катушках привода больше чем на порядок превышают силы контактного нажатия бистабильного механизма, что указывает на их доминирование для этой конструкции выключателя.

Предложенная модель позволяет рассчитывать динамику и выбирать параметры привода в зависимости от величины исходных данных – контактного нажатия, хода и провала контактов. В качестве примера на рис.15 показана временная зависимость параметров движения якоря ИДМ в сторону размыкания контактов выключателя при силе контактного нажатия 2000 Н, что потребовало изменение исходных данных: напряжения на конденсаторе; емкости конденсатора; параметров пружин; времени начала разряда конденсаторов на тормозящие катушки.

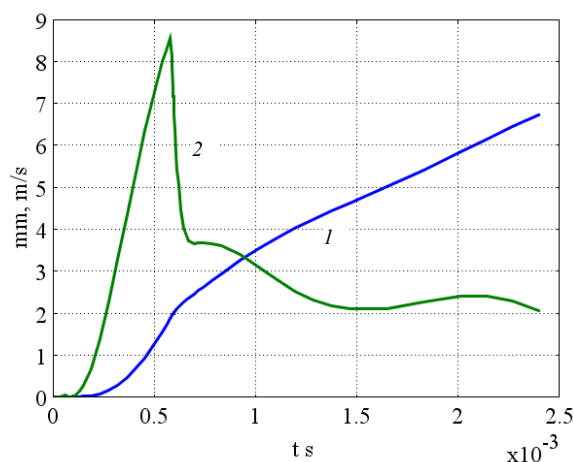


Рисунок 13. Ход и скорость якоря ИДМ при силе контактного нажатия 2000 Н, 1 – ход в мм; 2 – скорость м/с

На рис. 15 явно виден момент начала размыкания контактов – скачкообразное уменьшение скорости с последующим ее снижением за счет тормозящего действия второй катушки. Очевидно, что соответствующим подбором входных значений системы можно добиться требуемых динамических выходных параметров.

X. ВЫВОДЫ

1. Разработана математическая модель быстродействующего привода на базе ИДМ и бистабильного механизма, базирующаяся на уравнениях электромагнитного поля, электрической цепи, уравнениях движения. Модель позволяет на основании исходных данных рассчитать динамические параметры привода.

2. Описан метод расчета параметров бистабильного механизма на основании исходных данных о контактном нажатии, ходе и провале контактов.

3. На основании вариантных расчетов можно получить требуемые параметры привода: а) малое время замыкания контактов при малой скорости их соударения, что исключает дребезг при включении; б)

высокую скорость и малое время (менее 1 мс) размыкания контактов, что позволяет избежать отключения больших аварийных сверхтоков при незначительной динамической нагрузке в конечных точках траектории.

4. К недостаткам такой системы можно отнести необходимость точного позиционирования положения якоря, которое определяет начало разряда конденсатора на тормозящую катушку.

5. Необходимо отметить, что большое влияние на скорость якоря ИДМ оказывает направление тока в тормозящей катушке. По полученным данным наибольший тормозящий эффект получается если направление тока в тормозящей катушке встречно направлению тока в разгоняющей катушке.

6. Одной из проблем такого привода является выбор упругих элементов бистабильного механизма. Как следует из рис. 2, длина рычагов l пропорциональна жесткости (более длинные рычаги требуют большей жесткости). Из конструктивных соображений длина рычагов l должна быть достаточно велика (20..50) мм, не меньше. Такие длины требуют значительной жесткости пружин, тогда как сам ход пружины мал ($\approx 0,4$ мм). Это, в свою очередь, создаёт значительную силу $F_p \approx 1200$ Н, что составляет $\approx 7 \cdot F_y$. Частично проблему можно решить, увеличивая значение начальной затяжки пружин. Однако значение сил, действующих на рычаги и корпус аппарата (F_p) в любом случае в несколько раз больше вертикальной силы F_y . Поэтому в дальнейшем, планируется исследование фиксирующих механизмов на базе иных конструкций.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Евсин, Д.В. Отключение постоянного тока вакуумным коммутационным аппаратом с аксиально-симметричным поперечным магнитным полем. Дисс. канд. техн. наук. – Москва, 2009. – 142 с.
- [2] Клименко, Б. В. Електричні апарати. Електромеханічна апаратура комутації, керування захисту. Загальний курс: навчальний посібник. – Харків: Точка, 2012. – 340 с.
- [3] Клименко, Б. В. Опытный образец двухпозиционного электромагнитного привода вакуумного выключателя среднего напряжения [Текст] / Б. В. Клименко, А. М. Гречко, В. М. Бугайчук // Электротехника и Электромеханика, – 2017. – № 5. – С. 23-27.
- [4] Алферов, Д.Ф. Вакуумный выключатель постоянного тока / Д. Ф. Алферов, А. И. Будовский, Д.В. Евсин // Электро, - 2008.- №3. -С. 25 - 28.
- [5] Glinkowski, M. Capacitance switching with vacuum circuit-breakers. A comparative-evaluation [Text] / M. Glinkowski, A. Greenwood, J. Hill, R. Mauro, V. Varnekes // IEEE Trans. Power Deliv, - 1991. – № 6. – P. 1088–1095.
- [6] Barnes, M. Design and experimental tests on a superconducting hybrid DC circuit breaker [Text] / M. Barnes // IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2018. – v. 28 (3). DOI:10.1109/TASC.2018.2793226.
- [7] Байда, Е. И. Влияние гидравлического демпфера на динамику двухпозиционного поляризованного актуатора [Текст] / Е. И. Байда // Електротехніка і електромеханіка, -2013. - №5. - С. 15-19.
- [8] Болух, В.Ф. Исследование тепловых процессов в линейном импульсно-индукционном электро-механическом преобразователе циклического типа [Текст] / В.Ф. Болух, И. С. Щукін // Електротехніка і електромеханіка, -2017. - №5. -С. 14-22.
- [9] Байда, Е.И. Математические модели подключения бистабильных поляризованных актуаторов к источникам энергии [Текст] / Е.И. Байда // Вісник НТУ "ХП", 2012. - № 49 (955). - С. 3-8.
- [10] Байда, Е.И. Математическая модель расчета динамики двухпозиционных электромагнитных актуаторов вакуумных выключателей среднего напряжения [Текст] / Е.И. Байда // Журнал научных публикаций аспирантов и докторантов, 2013. - №1 (79). -С. 136 - 141.
- [11] Байда, Е.И. Математическое моделирование индукционно-динамических систем [Текст] / Е.И. Байда // Електротехніка і електромеханіка, 2009. - №5. -С. 13-16.
- [12] Bissal, A. Licentiate thesis on the design of ultra-fast electromechanical [Text] / A. Bissal. - Stockholm, Sweden. 2013. - 120 p.
- [13] Дивчук, Т. Е. Подход к определению токов холостого хода силовых трехфазных трансформаторов с плоскими стержневыми магнитными системами / Т.Е. Дивчук, Д. С. Ярымбаш, С. Т. Ярымбаш, И. М. Килимник, М. И. Коцур, Ю. С. Безверхняя // Электротехника и электроэнергетика. – 2017. – N 2. – С. 56-66. – Режим доступа: DOI : 10.15588/1607-6761-2017-2-6.
- [14] Ярымбаш, Д. С. Особенности трехмерного моделирования электромагнитных полей асинхронного двигателя / Д. С. Ярымбаш, М. И. Коцур, С. Т. Ярымбаш, И. М. Коцур // Электротехника и электроэнергетика. – 2016. – N 2. – С. 43-50. – Режим доступа: DOI: 10.15588/1607-6761-2016-2-5.
- [15] Ярымбаш, Д. С. Особенности определения параметров схемы замещения асинхронного двигателя для режима короткого замыкания / Д. С. Ярымбаш, М. И. Коцур, С. Т. Ярымбаш, И. М. Коцур // Электротехника и электроэнергетика. – 2017. – N 1. – С. 24-30. – Режим доступа : DOI : 10.15588/1607-6761-2017-1-4.
- [16] Ярымбаш, Д. С. Особенности определения параметров короткого замыкания силовых трансформаторов средствами полевого моделирования / Д.

- С. Ярымбаш, С. Т. Ярымбаш, Т. Е. Дивчук, И. М. Килимник // Электротехника и электроэнергетика. – 2016. – N 1. – С. 12-17. – Режим доступа: DOI: 10.15588/1607-6761-2016-1-2.
- [17] Коцур, М.И. Определение оптимальной частоты коммутации вентилей преобразователя по схеме частотно-токового асинхронно-вентильного каскада / М.И. Коцур, И.М. Коцур, А.А. Андриенко, Д.С. Андриенко // Электротехника и электроэнергетика. – 2016. – N 1. – С. 5-11. – Режим доступа: DOI: 10.15588/1607-6761-2016-1-1.
- [18] Weijie, Wen Research on Operating Mechanism for Ultra-fast 40.5kV Vacuum Switches [Text] / Weijie Wen, Yulong Huang, Mohmmad Al-Dweikat // IEEE Power&Energy Society. - 24 March. - 2015. - P. 2553 – 2560. DOI: 10.1109/TPWRD.2015.2409122
- [19] 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.

Стаття надійшла до редакції 05.04.2018

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ШВИДКОДІЮЧОГО ПРИВОДА АВТОМАТИЧНОГО ВІДМИКАЧА З ІНДУКЦІЙНО-ДИНАМІЧНИМ ТА БІСТАБІЛЬНИМ МЕХАНІЗМОМ

БАЙДА Є.І.

канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електричних апаратів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: baida.kpi@gmail.com;

ВОЛКОВА О.Г.

канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри теоретичної і загальної електротехніки Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна, e-mail: volkova@zntu.edu.ua;

Мета роботи. Розробка математичної моделі індукційно-динамічного привода відмикача з двома катушками, працюючого з бістабільним механізмом, що забезпечує фіксацію індукційно-динамічного механізму (ІДМ) у крайніх положеннях траєкторії руху контактної системи.

Методи дослідження. Рішення поставлених в роботі задач виконувалося з використанням методів розрахунку електромагнітного поля, кінцевих елементів, теоретичної механіки і рішення диференціальних рівнянь.

Отримані результати. Розроблена математична модель швидкодіючого привода на базі індукційно-динамічного та бістабільного механізму, яка заснована на рівняннях електромагнітного поля електричного кола і кінематики руху механізму перемикачів. Перевагою даної моделі є можливість динамічного розрахунку привода відмикача на основі даних по контактному натисканню, ходу і провалу контактів.

Вхідними даними побудови моделі були: індуктивність зовнішнього кола; активний опір катушок, розраховані за перерізом провідника та геометрії катушок. Початкові умови відповідали умовам Дирихле. Система рівнянь математичної моделі вирішувалась у циліндричній системі координат. Рішення задачі проводилось у системі Comsol Multiphysics. Рух рухомої частини ІДМ моделювався за допомоги деформації розрахункової сітки.

На основі вхідних даних о контактним натисканні, а також ході та провалу контактів визначалась жорсткість пружини і зусилля у конструкції бістабільного механізму. За розрахунковими даними представлені графіки, що дозволяють проаналізувати вибір пружних елементів та внести необхідні корективи та стадії проектування і налагодження конструкції.

Розраховані параметри роботи механізму в стадії включення та відключення ІДМ. Представлені графічні значення ходу та швидкості руху якоря відмикача, струмоприскорюючої та гальмуючої котушки, значення сумарної електромагнітної сили і сумарної протидіючої сили.

Наукова новизна. Розроблена математична модель швидкодіючого привода на основі ІДМ і бістабільного механізму, яка включає рівняння електромагнітного поля електричного кола та рівняння руху. Модель коректно описує фізичні процеси та може бути використана для розробки та вивчення конструкції високошвидкісних проводів.

Практична цінність. На основі варіативних розрахунків можна вирішувати задачі по пошуку необхідних параметрів привода маючи на меті отримати: а) мале значення часу замикачів та уникати «брязкіт» при включенні; б) високу початкову швидкість та загальне мале значення часу (менше за 1 мс) розмикання контактів, зменшити динамічні навантаження та елементи привода і контактну систему.

Ключові слова: комутація силових кіл; швидкодіючий привод відмикача; індукційно-динамічний механізм; бістабільний механізм

MATHEMATICAL MODEL OF A QUICK-DRIVING ACTUATOR OF AN AUTOMATIC SWITCH WITH AN INSTANT-DYNAMIC AND BISTABLE MECHANISM

BAIDA E.I.

Ph.D, Associate professor, Associate professor of the electrical apparatus department of the National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine,
e-mail: baida.kpi@gmail.com;

VOLKOVA O.G.

Ph.D, Associate professor, Associate professor of the theoretical and general electrical engineering department of the Zaporozhye National University, Zaporozhye, Ukraine,
e-mail: volkova@zntu.edu.ua.

Purpose. Development of a mathematical model of an induction-dynamic drive of a switch with two coils, working with a bistable mechanism, which ensures the fixation of the instant-dynamic mechanism (IDM) in trajectory extreme positions of the contact system.

Methodology. The solution of the problems posed in the work was carried out using methods for calculating the electromagnetic field, finite elements, theoretical mechanics, and solving differential equations.

Findings. The mathematical model of quick-driving actuator as part of instant-dynamic and bistable mechanism was developed. It was based on electrical circuit's electromagnetic equations and kinematic movements of the switching mechanism. Advantage of the given model is possibility of a breaker drive dynamic analysis basing on data of a contact pressure, pretravel and snatch gap.

Initial data of the model formulation were outer circuit inductance, resistance of coils, which calculated on conductor cross-section and coils configuration. Initial conditions corresponded by Dirichlet conditions. Mathematical model equations system was calculated in cylindrical coordinate system. Problem was solved with the help ComsolMultiphysics system. Motion of the IDM movement part was modeled by deformation of a computational grid.

Spring force and stress in a bistable mechanism construction were determined by initial data of a contact pressure, pretravel and snatch gap. Graphs by calculation data are shown, which allow to analyze of springing elements chose and make necessary adjustments on design stage and debugging construction.

Operation parameters of mechanism work on IDM switch on and switch off stages were calculated. Value of movement, motion speed of armature breaker, currents of accelerating and retarding coils, summed electromagnetic and opposite force were figured.

Originality. The mathematical model of quick-driving actuator as part of instant-dynamic and bistable mechanism was developed. The model contains equations of electromagnetic field and motion equation. The mathematical model describes properly of physical process and can be used for development and research a design of quick-driving actuator.

Practical value.

It follows from the calculations that with the help of variants of calculations it is possible to obtain the required drive parameters: a) short switching-on time which allows avoiding contact bounce during switching; b) high initial speed, hole short time (less than 1 ms) of contacts opening and reduce dynamic force on actuator elements and contact system.

Keywords: power circuit commutation; high-speed switch drive; induction-dynamic mechanism; bistable mechanism

REFERENCES

- [1] Evsin, D.V. (2009). Otkluhenie postojannogo toka vakuumnim kommutacionim apparatom s aksialnosimmetrichnim poperechnim magnitnim polem. Diss. kand. tech. nauk [Disconnection of direct current by a vacuum switching device with an axially symmetric transverse magnetic field. Cand. tech. sci. diss.]. Moskov, 142. [in Russian].
- [2] Klymenko, B.V. (2012). Elektrychni aparaty. Elektromehanichna aparatura komutacii, keruvannja ta zahystu. Zagal'nyj kurs: navchal'nyj posibnyk. H: Tochka, 340.
- [3] Klymenko, B. V., Grechko, A. M., Bugajchuk, V. M. (2017). Opytnyj obrazec dvuhpozicionnogo elektro-
- [4] Alferov, D.F., Budovskiy, A.I., Evsin, D.V., Ivanov, V.P. Sidorov, V.A., Neugodnikov, I. P. (2008). Vakuumnyj vykljuchatel' postojannogo toka [Vacuum switch of a direct current]. *Electro*, 3, 25-28. [in Russian].
- [5] Glinkowski, M., Greenwood A., Hill, J., Mauro, R., Varnekes, V. (1991) Capacitance switching with vacuum circuit-breakers. *A comparative-evaluation. IEEE Trans. Power Deliv*, 6, 1088–1095.

- [6] Barnes, M. (2018). Design and experimental tests on a superconducting hybrid DC circuit breaker. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 28 (3). DOI:10.1109/TASC.2018.2793226.
- [7] Baida, E.I. (2013). Vliyanie gidravlicheskogo dempfera na dinamiku dvuhpozitsionnogo poljarizovannogo aktuatora [Influence of the hydraulic damper on the dynamics of a two-position polarized actuator]. *Electrical engineering & electromechanics*, 5, 15-19. [in Russian]
- [8] Bolux, V.F., Shukin, I.S. (2017). Issledovanie teplovyykh processov v lineynom impul'sno-indukcionnom elektrome-hanicheskom preobrazovateley ciklicheskogo tipa [Investigation of thermal processes in a linear pulse-induction electromechanical converter of the cyclic type]. *Electrical engineering & electromechanics*, 5, 14-22. [in Russian].
- [9] Baida, E.I. (2012). Matematicheskie modeli podkljuchenija bistabil'nykh poljarizovannykh aktuatorov k istochnikam energii [Power connection mathematical models of polarized bistable actuators to a source of electric power]. *Visnyk NTU "HPI"*, 49 (955), 3-8. (in Russian).
- [10] Baida, E.I. (2013). Matematicheskaja model' rascheta dinamiki dvuhpozitsionnykh jelektromagnitnykh aktuatorov vakuumnykh vykljuchatelej srednego naprjazhenija [Mathematical model of two-position electromagnetic actuator dynamics calculation for MV vacuum circuit-breaker]. *Zhurnal nauchnykh publikacij aspirantov i doktorantov*, 1 (79), 136 - 141. [in Russian].
- [11] Baida, E.I. (2009). Matematicheskoe modelirovaniindukcionno-dinamicheskikh sistem [Mathematical modeling of induction-dynamic systems]. *Electrical engineering & electromechanics*, 5, 13-16. [in Russian].
- [12] Bissal, A. (2013). Licentiate thesis on the design of ultra-fast electromechanical. Stockholm, Sweden, 120.
- [13] Divchuk, T., Yarymbash, D., Yarymbash, S., Kylymnyk, I., Kotsur, M., & Bezverkhnia, Y. (2018). Approach to determination of no load current of three-phase power transformers with plane rods magnetic systems. *Electrical Engineering And Power Engineering*, 2, 56-66. DOI:http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2017-2-6 [in Russian]
- [14] Yarymbash, D., Kotsur, M., Yarymbash, S., Kotsur, I. (2016). Features of three-dimensional simulation of the electromagnetic fields of the asynchronous motors. *Electrical Engineering And Power Engineering*, 2, 43-50. DOI:http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2016-2-5 [in Russian]
- [15] Yarymbash, D., Kotsur, M., Yarymbash, S., & Kotsur, I. (2017). Features of parameter determination of the induction motor substitution circuit for short-circuit mode. *Electrical Engineering And Power Engineering*, 1, 24-30. DOI:http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2017-1-4 [in Russian]
- [16] Yarymbash, D., Yarymbash, S., Divchuk, T., & Kylymnik, I. (2016). Determination features of the power transformer short circuit parameters through field modeling. *Electrical Engineering And Power Engineering*, 1, 12-17. DOI: http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2016-1-2 [in Russian]
- [1] Kotsur, M., Kotsur, I., Andrienko, A., Andrienko, D. (2016). Opredelenie optimalnoy chastoty kommutatsii ventiley preobrazovatelja po sheme chastotnotokovogo asinhronnogo-ventilnogo kaskada [Determination of the optimal switching frequency of the power switches of the frequency-current asynchronous-gate cascade converters]. *Electrical Engineering And Power Engineering*, 1, 5-11. DOI: http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2016-1-1 [in Russian]
- [17] 15. Weijie Wen, Yulong Huang, Member, Mohmmad Al-Dweikat, Zu'an Zhang, Tiehao Cheng, Shutong Gao and Weidong Liu. (2015). Research on Operating Mechanism for Ultra-fast 40.5kV Vacuum Switches. *IEEE Power & Energy Society*, 2553 – 2560. DOI: 10.1109/TPWRD.2015.2409122
- [18] Aleksandrov, G.N., Borisov, V.V., Ivanov, V.A. i dr. (1985). Teoriya elektricheskikh apparatov. Uchebnik-dla vuzov po specialnosti "Elektricheskie apparati". M. Vysshaya shkola, 312. [in Russian].