УДК 621.3.04: 621.316 **doi: 10.20998/2074-272X.2020.1.01**

Е.И. Байда, В.В. Литвиненко, А.А. Чепелюк

ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕГО ИНДУКЦИОННО-ДИНАМИЧЕСКОГО ПРИВОДА С БИСТАБИЛЬНЫМ ФИКСАТОРОМ ПОЛОЖЕНИЯ КОНТАКТОВ ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ НА БАЗЕ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

У статті досліджено оригінальну математичну модель швидкодіючого індукційно-динамічного приводу вимикача з бістабільним фіксатором з двома котушками на базі постійних магнітів. Індукційно-динамічні механізми, відомі в іноземній літературі як Thomson-drive, використовуються в якості приводу вимикачів постійного струму завдяки високій швидкодії, простоті і надійності конструкції. Метою статті є аналіз принципової можливості створення комутаційного апарату з індукційно-динамічним приводом на базі математичної моделі, що дозволяє підвищити надійність роботи всього механізму і істотно спростити конструкцію. Розглядається можливість створення пропонованого комбінованого приводного механізму і визначення основних напрямків подальших досліджень з метою отримання дослідних зразків. Конструкція досліджуваного індукційно-динамічного приводу раніше в літературі не розглядалась. Вирішувана задача є мультифізичною, що включає розрахунок: статичного магнітного поля; електричного кола з урахуванням зміни напруги на конденсаторі і наведеної в котушках проти-ЕРС; динаміки руху якорів бістабільного фіксатора і привода з урахуванням зміни маси; нестаціонарного електромагнітного поля в неоднорідному нелінійному середовищі з урахуванням постійних магнітів і руху струмопровідних тіл в електромагнітному полі. Напрямки подальших досліджень представляються у вигляді оптимізації геометрії, параметрів котушок привода і конденсаторів, геометрії бістабільного фіксатора, об'єму і залишкової індукції постійних магнітів для забезпечення необхідних значень швидкодії, контактного натискання і габаритів апарата. Бібл. 11, табл. 1, рис. 13.

Ключові слова: **індукційно-динамічний привод, бістабільний фіксатор, постійні магніти.**

В статье исследована оригинальная математическая модель быстродействующего индукционно-динамического привода выключателя с бистабильным фиксатором с двумя катушками на базе постоянных магнитов. Индукционно-динамические механизмы, известные в иностранной литературе как Thomson-drive, применяются в качестве привода выключателей постоянного тока благодаря высокому быстродействию, простоте и надежности конструкции. Целью статьи является анализ принципиальной возможности создания коммутационного аппарата с индукционно-динамическим приводом на базе математической модели, что позволяет повысить надежность работы всего механизма и существенно упростить конструкцию. Рассматривается возможность создания предлагаемого комбинированного приводного механизма и определение основных направлений дальнейших исследований с целью получения опытных образцов. Конструкция исследуемого индукционно-динамического привода ранее в литературе не рассматривалась. Решаемая задача является мультифизической, включающей расчет: статического магнитного поля; электрической цепи с учетом изменения напряжения на конденсаторе и наведенной в катушках противо-ЭДС; динамики движения якорей бистабильного фиксатора и привода с учетом изменения массы; нестационарного электромагнитного поля в неоднородной нелинейной среде с учетом постоянных магнитов и движения проводящих тел в электромагнитном поле. Направления дальнейших исследований представляются в виде оптимизации геометрии, параметров катушек привода и конденсаторов, геометрии бистабильного механизма, объема и остаточной индукции постоянных магнитов для обеспечения требуемых значений быстродействия, контактного нажатия и габаритов аппарата. Библ. 11, табл. 1, рис. 13.

Ключевые слова: **индукционно-динамический привод, бистабильный фиксатор, постоянные магниты.**

Введение. В последнее время в литературе достаточно часто исследуются и разрабатываются индукционно-динамические механизмы (ИДМ), известные в иностранной литературе как *Thomson-drive*, применяемые в качестве привода различных электротехнических устройств [1-4]. Простота и надежность конструкции, высокое быстродействие делают такие устройства незаменимыми в электрических аппаратах, установленных в сетях постоянного тока, в которых аварийные сверхтоки не ограничены реактивным сопротивлением и могут достигать десятков килоампер.

Несмотря на очевидные преимущества, такие устройства имеют ряд существенных недостатков: значительная ударная нагрузка на элементы конструкции; необходимость фиксации положения механизма в начальной и конечной точках траектории движения с возможностью возврата в исходное положение. Решение первой проблемы заключается либо в использовании демпфирующих устройств на конечном этапе движения, либо при помощи оптимального управления движением - подключением тормозящей катушки. Вторая проблема решается за счет применения бистабильных механических фиксаторов, известных достаточно давно [3-5]. Математическая модель привода с оптимальным управлением скоростью движения якоря ИДМ и механическим бистабильным фиксатором была рассмотрена в [4] и исследована в [6], где показаны основные недостатки такой модели. В [7] рассмотрен движитель Томпсона, а в качестве фиксатора положения используется электромагнитный фиксатор. Но, по мнению авторов, наиболее перспективными конструкциями привода быстродействующих выключателей являются приводы, сочетающие быстродействие индукционно-динамических систем и надежность магнитных систем с постоянными магнитами [8, 9]. Так в [8] расчет такого привода состоит из двух частей: статического расчета потока и электромагнитной силы; расчет динамики – на основании ОДУ движения и электрической цепи. Такой подход не является новым [10] и имеет ряд существенных недостатков, связанных

© Е.И. Байда, В.В. Литвиненко, А.А. Чепелюк

с определением тормозящего действия вихревых токов в системе, особенно в быстродействующих системах. Помимо этого, система достаточно сложна: две катушки ИДМ расположены внутри двух магнитопроводов; актуатор также имеет две катушки и состоит из двух магнитопроводов с постоянными магнитами.

Недостатки конструкции ИДМ, выявленные в процессе проведенного обзора, существенно влияют на надежность работы коммутационного аппарата. Один из путей решения проблемы – возможность создания приводного механизма с бистабильным фиксатором положения на базе постоянных магнитов.

Целью статьи является анализ принципиальной возможности создания коммутационного аппарата с индукционно-динамическим приводом на базе математической модели, что позволяет повысить надежность работы всего механизма и существенно упростить конструкцию.

Предмет исследования. В данной статье проводится комплексное исследование движителя Томпсона с оптимальным управлением скоростью замыкания электрических контактов, у которого в качестве бистабильного фиксатора подвижной системы аппарата в начальном и конечном положениях используется магнитное устройство, состоящее из магнитной системы, якоря с немагнитным штоком и постоянных магнитов.

Математическая модель исследуемого механизма решается путем деформирования расчетной сетки. Деформация сетки зависит от хода и скорости якорей, которые, в свою очередь, определяют параметры системы (электромагнитные силы, воздушные зазоры и т.д.). Данная задача является мультифизической, т.е. задачей последовательно-параллельного решения нескольких различных по своей природе задач: расчет статического магнитного поля; расчет электрической цепи с учетом изменения напряжения на конденсаторе и учетом наведенной в катушках противо-ЭДС; расчет динамики движения якорей бистабильного фиксатора и привода с учетом изменения массы; расчет нестационарного электромагнитного поля в неоднородной нелинейной среде с учетом постоянных магнитов и движения проводящих тел в электромагнитном поле. Алгоритм решения поставленной задачи заключается в том, что на начальном этапе выполняется расчет стационарного поля постоянных магнитов и полученные при этом результаты используются в качестве начальных условий для остальных параллельно решаемых задач.

Данная статья может быть отнесена к разряду дискуссионных, так как в ней исследуется сама возможность создания нового типа привода.

Основные расчетные соотношения и допущения. На рис. 1 приведена схема аппарата с приводной системой (в цилиндрической системе координат) и указаны габаритные размеры в мм. Катушки индукционно-динамического привода 1, 2 выполняют функцию включения и отключения устройства, а также функцию оптимального управления движением якорей привода и бистабильного фиксатора (уменьшение скорости контактов перед их замыканием).

Якорь индукционно-динамического привода 3, выполненный в виде диска, соединен с якорем бистабильного фиксатора 5 немагнитным штоком 4. Фиксация якорей 3 и 5 в крайних положениях (нижнем и верхнем) происходит за счет действия постоянных магнитов 6, закрепленных в корпусе. Такой приводной механизм потребляет энергию только во время срабатывания. Для уменьшения скорости замыкания контактов при включении, на обмотку катушки 2 подается напряжение обратной (по отношению к катушке 1) полярности, что замедляет скорость движения системы перед касанием штока с контактами 8.

При расчете принимались следующие допущения: равномерное распределение плотности тока по площади обмоточного пространства катушки (катушка намотана проводом, площадь поперечного сечения которого много меньше площади обмоточного пространства катушки); отсутствие гистерезиса у ферромагнетика.

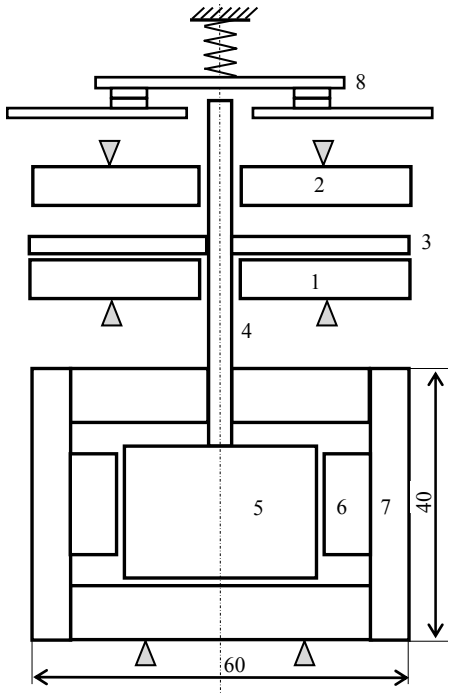


Рис. 1. Схема коммутационного аппарата с индукционно-динамическим приводом и бистабильным магнитным фиксатором: 1, 2 – катушки привода; 3– якорь привода (токопроводящий диск); 4 – немагнитный шток; 5 – якорь фиксатора, связанный немагнитным штоком с якорем привода; 6 – постоянные магниты, расположенные по периметру якоря фиксатора; 7 – неподвижная магнитная система; 8 – контактная система коммутационного аппарата

Основным расчетным соотношением является уравнение нестационарного электромагнитного поля, записанное через векторный магнитный потенциал [11] при условии отсутствия поля на внешней границе расчетной области

$$\sigma_k \cdot \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{A}_k}{\mathrm{d}t} + \cdot\nabla \times \left(\frac{1}{\mu_k} \cdot \left(\nabla \times \boldsymbol{A}_k - \boldsymbol{B}_{\mathrm{r}} \right) \right) = \boldsymbol{\delta}_k \,, \qquad (1)$$

где σ_k – удельная электропроводность материала; $\boldsymbol{A}_k$ – векторный магнитный потенциал; μ_k – абсолютная магнитная проницаемость; $\boldsymbol{B}_{\mathrm{r}}$ – остаточная магнитная индукция постоянного магнита; $\boldsymbol{\delta}_k = (i \cdot N/S) \cdot \mathbf{1}_\varphi$ – плотность тока стороннего источника; $\mathbf{1}_\varphi$– азимутальный орт – единичный вектор, направленный перпендикулярно

плоскости, в которой расположена область расчета; i – ток в обмотке катушки; N – число витков обмотки; S – площадь обмоточного пространства катушки.

Вид системы уравнений (1) определяется расчетной областью (воздух, катушки, проводящий диск, магнитопровод, постоянный магнит). В (1) указана полная производная по времени в случае расчета поля в движущейся области (якорях привода и бистабильного фиксатора).

Уравнения электрической цепи

$$L_1 \cdot \frac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t} + R_1 \cdot i_1 + E_1 = \left(E_{C01} - \frac{1}{C_1} \cdot \int_t i_1 \cdot \mathrm{d}t \right) \cdot \eta_1;$$

$$L_2 \cdot \frac{\mathrm{d}i_2}{\mathrm{d}t} + \left(R_2 + R_\mathrm{d} \cdot \eta_2 \right) \cdot i_2 + E_2 = \quad (2)$$

$$= \left(-E_{C02} - \frac{1}{C_2} \cdot \int_t i_2 \cdot \mathrm{d}t \right) \cdot \eta_1,$$

где L_1, L_2 – индуктивности рассеяния внешней цепи; R_1, R_2 – активные сопротивления обмоток катушек привода; $E_{1,2}$ – противо-ЭДС обмоток:

$$E_{1,2} = \frac{N}{S} \cdot \int_V \frac{\partial A_\varphi}{\partial t} \cdot \mathrm{d}V, \quad (3)$$

где V – объём обмотки катушки (1 или 2); E_{C0} – начальное напряжение на емкости; i_1, i_2 – токи в обмотках катушек; R_d – добавочное сопротивление; η_1, η_2 – единичные функции, моделирующие апериодический разряд конденсатора и начало разряда второй емкости на обмотку тормозящей катушки.

$$\eta_1 = \begin{cases} 1, U_c > 0 \\ 0, U_c < 0 \end{cases}, \quad \eta_2 = \begin{cases} 1, z(t) > z_1 \\ 0, z(t) \le z_1 \end{cases}. \quad (4)$$

Уравнения движения – это уравнения динамики тела с переменной массой, так как после замыкания контактов, приведенная к якорю ИДМ масса меняется

$$\begin{cases} \dfrac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} \cdot \left(m(z(t)) \cdot v(t) \right) = \left[F_\mathrm{em} - F_0 \cdot \eta_4 + F\left(z(t) \right) \right] \cdot \eta_3; \\ \dfrac{\mathrm{d}z(t)}{\mathrm{d}t} = v(t) \end{cases}, \quad (5)$$

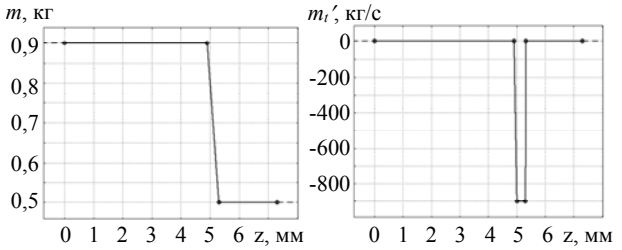
где $m(z(t))$ – изменяющаяся масса системы; $v(t)$ – скорость подвижной системы; $F_\mathrm{em} - F_0 \cdot \eta_4 + F\left(y(t) \right)$ – суммарная сила; η_3 – функция, запрещающая движение за допустимые пределы (упоры); η_4 – функция, определяющая начало соударения контактов и начало действия силы контактного нажатия F_0; $F\left(z(t) \right)$ – сила, действующая на якорь бистабильного фиксатора, приведенная к якорю привода.

Система уравнений (1) – (5) является математической моделью быстродействующего индукционно-динамического привода с бистабильным фиксатором с постоянными магнитами.

Начальные условия и исходные данные. В качестве исходных данных были заданы массы, движущиеся вместе с якорем привода и масса контактов. Момент удара растянут по времени на 0,3 мс, а проводная массы по координате подбиралась исходя из закона сохранения момента количества движения.

На основании геометрии катушек (рис. 1) и сечения намоточного провода определялись активные сопротивления обмоток и число витков с учетом коэффициента заполнения. Так как каждая из катушек может быть, как ускоряющей, так и тормозящей, то значения начального напряжения и ёмкости конденсаторов были выбраны одинаковыми – 600 В, 400 мкФ.

Графики изменения массы и ее производной в процессе включения показаны на рис. 2.



а *б*

Рис. 2. График изменения массы (*а*) и ее производной (*б*)

Программа допускает оптимизационные расчеты с изменением сечения намоточного провода. Одним из основных задаваемых параметров является полный ход якорей системы равный 7 мм [6] и ход до касания контактов равный 5 мм. Сила контактного нажатия принималась постоянной и равной 200 Н, начальная масса – 0,9 кг (см. рис. 2).

Результаты. Расчеты статики. Эти расчеты необходимы по следующим причинам: 1) полученные результаты являются начальными значениями для расчета динамики; 2) они позволяют получить статическую силовую характеристику бистабильного фиксатора в функции индукции постоянного магнита. На рис. 3 показана картина магнитного поля в крайних положениях якоря бистабильного фиксатора.

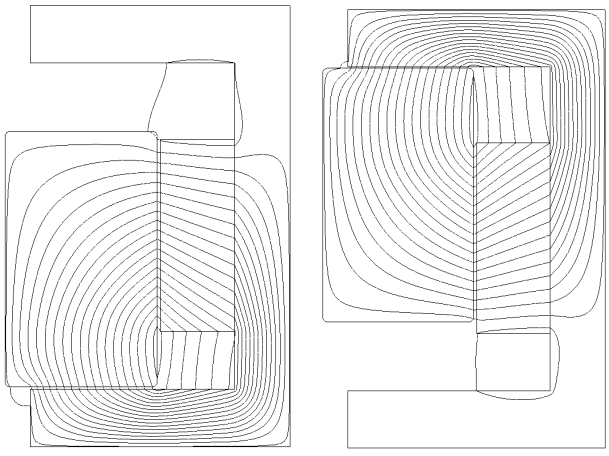


Рис. 3. Картина магнитного поля бистабильного фиксатора в крайних положениях якоря (в статике)

Очевидно, что перераспределение магнитного поля (рис. 3) приводит к изменению знака электромагнитной силы (рис. 4). Изменение знака электромагнитной силы фиксатора обеспечивает бистабильную работу привода.

Статическая тяговая характеристика бистабильного фиксатора в функции хода якоря приведена для значения остаточной индукции постоянного магнита $B_г$=0,5 Тл. Значения начальной силы в зависимости от значения остаточной индукции постоянного магнита приведены в табл. 1. Причем, при изменении значения остаточной индукции, вид характеристики не меняется, а меняются только значения силы.

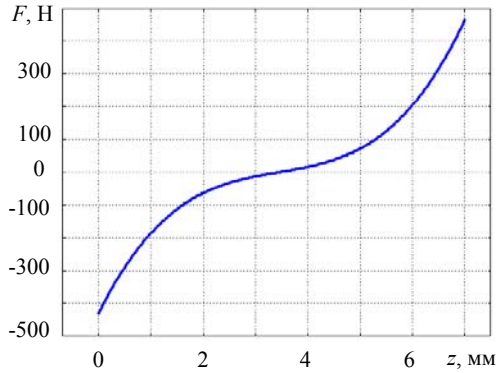


Рис. 4. Статическая тяговая характеристика бистабильного фиксатора в функции хода якоря

Табл. 1. Значения начальной силы в функции $B_г$

$B_г$, Тл	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$F(0)$, Н	429	571	689	776	844	899

Расчет динамики. Включение. Расчеты показывают, что поля катушек привода замыкаются через магнитопровод бистабильного фиксатора, что существенно влияет на процессы в нем. На рис. 5 приведены зависимости хода якоря бистабильного фиксатора в функции времени при различных типах магнитопровода – сплошном и шихтованном. В случае сплошного магнитопровода бистабильного фиксатора за счет размагничивающего действия вихревых токов, совпадающих по направлению с токами тормозящей катушки, наблюдается значительное снижение скорости и обратное движение якорей привода и бистабильного фиксатора, т.е. срабатывание отсутствует (кривая 1). Увеличение сопротивления вихревым токам, например, за счет применения в магнитопроводе стали с большим удельным сопротивлением, шихтовки магнитопровода или выполнения радиальных прорезов в нем, обеспечивает четкое срабатывание коммутационного аппарата (кривая 2).

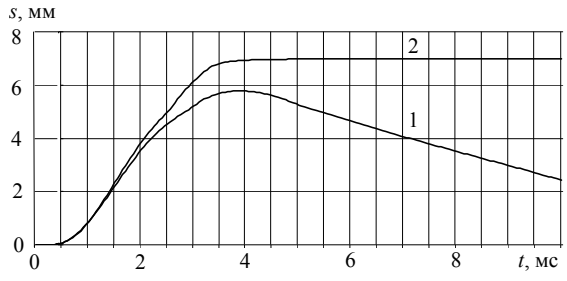


Рис. 5. Ход якоря при различных типах магнитопровода: 1 – сплошной; 2 – шихтованный

На рис. 6 показаны линии поля в момент максимума тока в «тормозящей» катушке индукционно-динамического привода. Как видно из рис. 6, при сплошном магнитопроводе поле постоянного магнита практически не проникает в верхнюю часть магнитопровода фиксатора (не происходит перераспределение потока и изменение знака силы) в отличие от шихтованного магнитопровода, где явно видно перераспределение потока постоянного магнита. Это подтверждается и расчетными значениями сил. В момент времени ≈1 мс (картина поля показана на рис. 6) сила, действующая на якорь бистабильного фиксатора в случае сплошного магнитопровода – минус 130 Н, шихтованного – плюс 10 Н (сила изменила знак).

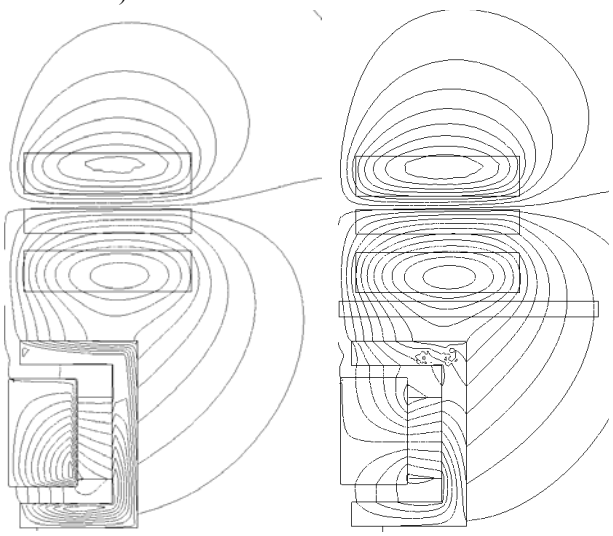


Рис. 6. Картина поля в момент максимума тока в «тормозящей» катушке: *а* – сплошной магнитопровод; *б* – шихтованный

Диаметр намоточного провода (при фиксированных размерах катушки) влияет на характер движения и в случае сплошного магнитопровода обратное движение якоря бистабильного фиксатора может отсутствовать. Однако, за счет действия вихревых токов магнитная сила бистабильного фиксатора со сплошным магнитопроводом в конечном положении якоря значительно меньше (примерно в два раза), чем у бистабильного фиксатора с шихтованным магнитопроводом.

Влияние сечения обмоточного провода катушек на скорость замыкания контактов показано на рис. 7. График скорости состоит из нескольких участков: разгон; торможение перед касанием контактов (момент касания помечен на графиках жирной точкой); увеличение скорости на провале за счет уменьшения общей движущейся массы (на значение массы контактов); останов. В рассмотренных примерах время до касания контактов отличается примерно на 30 % (от 2,3 до 3) мс.

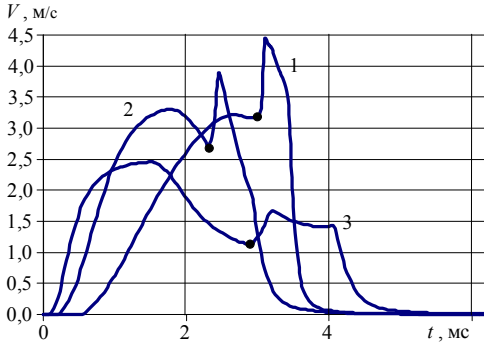


Рис. 7. Зависимость скорости замыкания контактов от сечения провода: 1 – 0,66 мм^2 (N = 550); 2 – 1 мм^2 (N = 240); 3 – 1,5 мм^2 (N = 106)

В результате расчетов было установлено, что ход, при котором начинается разряд конденсатора на катушку торможения при принятом пути и провале контактов влияет на время срабатывания привода (рис. 8).

Характеристика 1 соответствует началу разряда конденсатора на тормозящую катушку при пути якоря индукционно-динамического привода равном 0,5 мм (более раннее торможение). Характеристика 2 – более позднее торможение якоря (путь 2,5 мм).

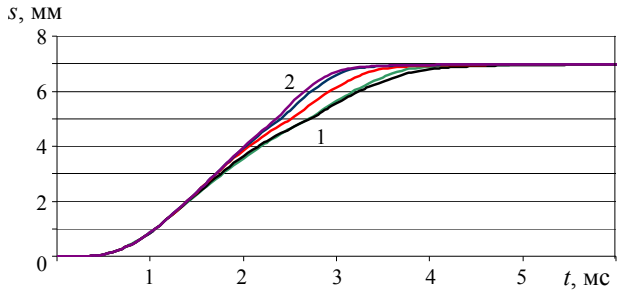


Рис. 8. Изменение значения хода якоря в функции начала подачи сигнала на тормозящую катушку (начало разряда конденсатора): 1 – при достижении якорем значения хода 0,5 мм; 2 – при достижении якорем значения хода 2,5 мм; остальные значения – промежуточные

Из графика (рис. 8) видно, что время срабатывания отличается примерно на 25 %, что свидетельствует о малом влиянии катушки торможения на движение якоря привода (влияние существенное при малых зазорах между якорем привода и катушкой).

В дальнейшем, все расчеты физических процессов рассчитаны для следующих значений: начало процесса торможения якоря привода соответствует ходу 0,5 мм при сечении провода катушки 1,5 мм^2 (N = 106).

На рис. 9 приведен график действующих сил. Как следует из рис. 9, сила, действующая на якорь привода, и магнитная сила бистабильного фиксатора меняют знак в зависимости от хода. Характеристика 1 меняет знак за счет разряда конденсатора на катушку торможения, характеристика 2 – за счет перераспределения потоков в магните.

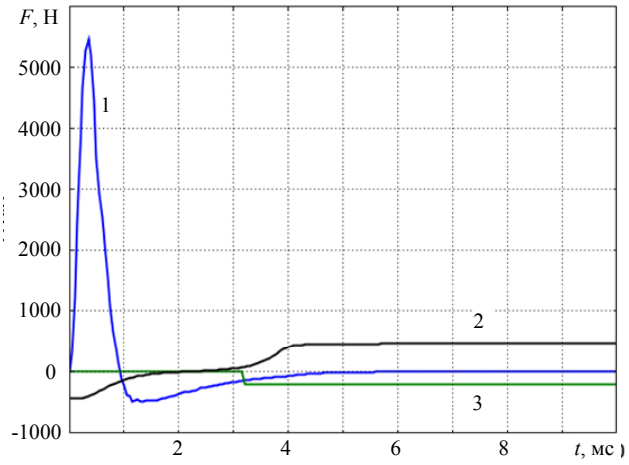


Рис. 9. График действующих сил: 1 – сила, действующая на якорь привода; 2 – магнитная сила бистабильного фиксатора; 3 – сила контактного нажатия

На рис. 10 показаны значения токов в катушках быстродействующего привода. Как показывают расчеты, токи катушек практически не оказывают влияния друг на друга. Апериодическая форма разряда (как наиболее оптимальная по использованию энергии емкостного накопителя и наиболее безопасная для электролитического конденсатора) обеспечивается диодами, включенными параллельно катушкам. Несмотря на идентичность параметров катушек и емкостных накопителей, токи различны по максимальным значениям и скорости спадания (рис. 10), что связано с положением якоря привода в межкатушечном пространстве (различна эквивалентная индуктивность электрических цепей первой и второй катушек).

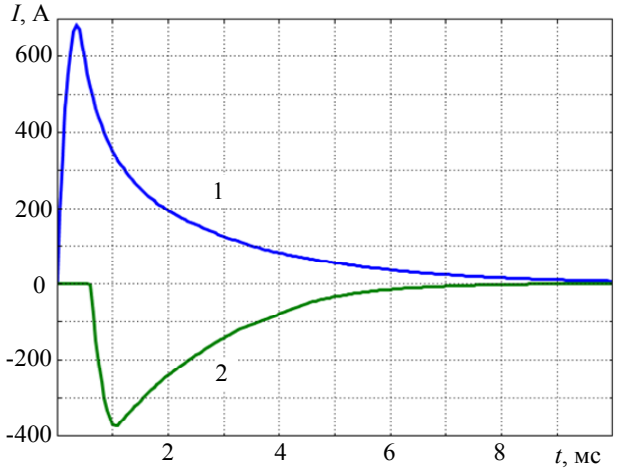


Рис. 10. Токи катушек: 1 – включения; 2 – тормозящей

На рис. 11 показаны зависимости хода и скорости якорей привода и бистабильного фиксатора в функции времени в процессе замыкания контактов.

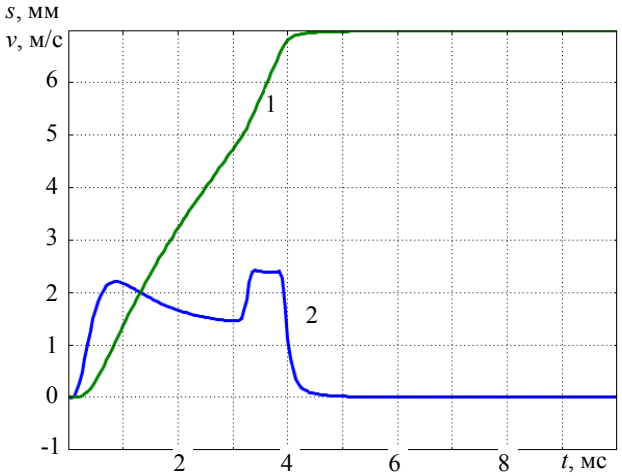


Рис. 11. Динамика привода в процессе замыкания контактов: 1 – путь; 2 – скорость

Динамика отключения. Для быстродействующих коммутационных устройств важным параметром является интервал времени от момента подачи сигнала на отключение до момента начала размыкания контактов. Так как катушки привода идентичны, то изменения в модели будут касаться уравнений, описывающих механику движения: – сила контактного нажатия на величине провала контактов будет не противодействующей, а движущей; – график изменения массы будет зеркальным по отношению к графику на

рис. 2,*а*, а производная от массы по перемещению (рис. 2,*б*) будет положительной.

На рис. 12 показана динамика отключения привода. Как следует из рис. 12, размыкание контактов происходит за время порядка 1 мс, что подтверждает его быстродействие.

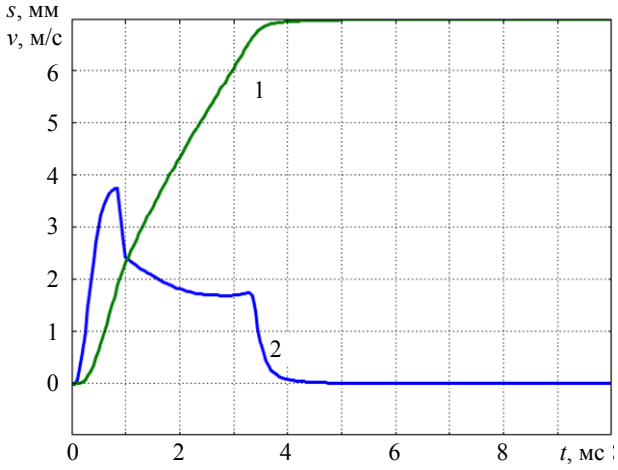


Рис. 12. Динамика отключения: 1 – путь; 2 – скорость

На рис. 13 приведен ток в якоре индукционно-динамического привода в процессе операции «отключение».

Несмотря на значение тока в 45 кА, температура якоря индукционно-динамического привода за время движения увеличивается незначительно (на 0,8 °С) за счет кратковременности его теплового действия.

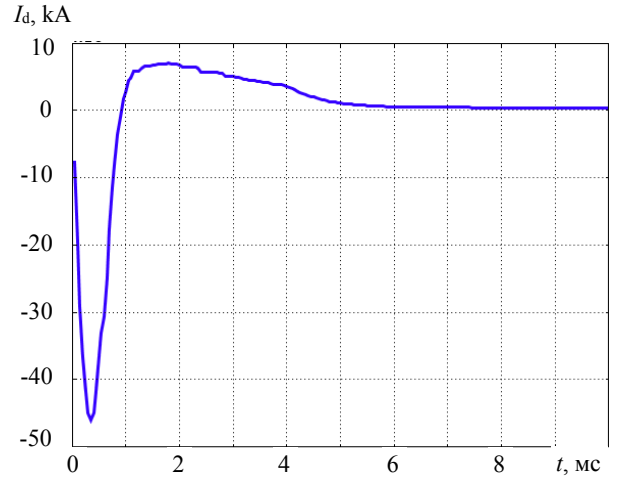


Рис. 13. Ток якоря привода в функции времени

Выводы.

1. Разработана и частично исследована математическая модель нового быстродействующего индукционно-динамического привода с бистабильным фиксатором на базе постоянных магнитов, базирующаяся на уравнениях электромагнитного поля, электрической цепи и уравнениях движения. Модель позволяет на основании исходных данных рассчитать динамические параметры привода.

2. Показана принципиальная возможность создания быстродействующего привода такого типа.

3. Направления дальнейших исследований представляются в виде оптимизации геометрии, параметров катушек привода и конденсаторов, геометрии бистабильного фиксатора, объема и остаточной индукции постоянных магнитов для обеспечения требуемых значений быстродействия, контактного нажатия и габаритов аппарата. Дальнейшим направлением исследования также может быть исследование процессов на контактах выключателя в зависимости от параметров привода и расчеты механических сил, возникающих в приводе в процессе трогания, движения и торможения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Болюх В.Ф., Щукин И.С. Исследование тепловых процессов в линейном импульсно-индукционном электромеханическом преобразователе циклического типа // Електротехніка і електромеханіка. – 2017. – №5. – С. 14-22. **doi: 10.20998/2074-272X.2017.5.02**.

2. Байда Е.И. Математическое моделирование индукционно-динамических систем // Електротехніка і електромеханіка. – 2009. - №5. – С. 13-16.

3. Bissal A. On the design of ultra-fast electromechanical Actuators. Licentiate thesis, monograph. – Electromagnetic Engineering School of Electrical Engineering, Stockholm, Sweden. – 2013. 68 p.

4. Wen W., Huang Y., Al-Dweikat M., Zhang Z., Cheng T., Gao S., Liu W. Research on operating mechanism for ultra-fast 40.5-kV vacuum switches // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2015. – vol.30. – no.6. – pp. 2553-2560. **doi: 10.1109/tpwrd.2015.2409122.**

5. Александров Г.Н., Борисов В.В., В Иванов.А. Теория электрических аппаратов. Учебник для втузов по спец. «Электрические аппараты». – М.: Высшая школа, 1985. 312 с.

6. Байда Е.И., Волкова О.Г. Математическая модель быстродействующего привода автоматического выключателя с индукционно-динамическим и бистабильным фиксатором // Електротехніка та електроенергетика. – 2018. – №1. – С. 30-39. **doi: 10.15588/1607-6761-2018-1-4.**

7. Meyer J.-M., Rufer A. A DC hybrid circuit breaker with ultra fast contact opening and integrated gate-commutated thyristors (IGCT) // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2006. – vol.21. – no.2. – pp. 646-651. **doi: 10.1109/tpwrd.2006.870981**.

8. Wang Z., Sun L., He S., Geng Y., Liu Z. A permanent magnetic actuator for 126 kV vacuum circuit breakers // IEEE Transactions on Magnetics. – 2014. – vol.50. – no.3. – pp. 129-135. **doi: 10.1109/tmag.2013.2284251**.

9. Young-woo Jeong, Seok-won Lee, Young-geun Kim, and Hyun-wook Lee. High-speed AC circuit breaker and high-speed OCR // 22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2013). Stockholm, 2013. pp. 1215-1218. **doi: 10.1049/cp.2013.0834**.

10. Клименко Б.В. Форсированные электромагнитные системы. – М.: Энергоатомиздат, 1989. 160 с.

11. Байда Е.И. Математическая модель расчета динамики двухпозиционных электромагнитных актуаторов вакуумных выключателей среднего напряжения // Журнал научных публикаций аспирантов и докторантов. – 2013. – №1. – С. 136-141.

REFERENCES

1. Bolyukh V.F., Schukin I.S. Investigation of thermal processes in a linear pulse-induction electromechanical converter of cyclic action. *Electrical engineering & electromechanics*, 2017, no.5, pp. 14-22. **doi: 10.20998/2074-272X.2017.5.02.**

2. Baida E.I. Mathematical modeling of induction-dynamic systems. *Electrical engineering & electromechanics*, 2009, no.5, pp. 13-16. (Rus).

3. Bissal A. *On the design of ultra-fast electromechanical Actuators. Licentiate thesis, monograph*. Electromagnetic Engineering School of Electrical Engineering, Stockholm, Sweden, 2013. 68 p.
4. Wen W., Huang Y., Al-Dweikat M., Zhang Z., Cheng T., Gao S., Liu W. Research on operating mechanism for ultra-fast 40.5-kV vacuum switches. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2015, vol.30, no.6, pp. 2553-2560. **doi: 10.1109/tpwrd.2015.2409122.**
5. Aleksandrov G.N., Borisov V.V., Ivanov V.A. *Teoriia elektricheskikh apparatov* [Theory of electrical apparatus]. Moscow, Vysshaia shkola Publ., 1985. 312 p. (Rus).
6. Baida E.I., Volkova O.G. Mathematical model of a quick-driving actuator of an automatic switch with an instant-dynamic and bistable mechanism. *Electrical Engineering and Power Engineering*, 2018, no.1, pp. 30-39. **doi: 10.15588/1607-6761-2018-1-4.**
7. Meyer J.-M., Rufer A. A DC hybrid circuit breaker with ultra fast contact opening and integrated gate-commutated thyristors (IGCT). *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2006, vol.21, no.2, pp. 646-651. **doi: 10.1109/tpwrd.2006.870981**.
8. Wang Z., Sun L., He S., Geng Y., Liu Z. A permanent magnetic actuator for 126 kV vacuum circuit breakers. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2014, vol.50, no.3, pp. 129-135. **doi: 10.1109/tmag.2013.2284251**.
9. Young-woo Jeong, Seok-won Lee, Young-geun Kim, and Hyun-wook Lee. High-speed AC circuit breaker and high-speed OCR. *22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2013)*. Stockholm, 2013. pp. 1215-1218. **doi: 10.1049/cp.2013.0834**.
10. Klymenko B.V. *Forsirovannye elektromagnitnye sistemy*. [Forced electromagnetic systems]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1989. 160 p. (Rus).
11. Baida E.I. A mathematical model of calculation the dynamics of two-position electromagnetic actuators of medium voltage vacuum circuit breakers. *Journal of scientific publications of graduate students and doctoral students*, 2013, no.1, pp. 136-141. (Rus).

Поступила (received) 15.04.2019

Байда Евгений Иванович[1]*, д.т.н., доц.,*
Литвиненко Виктория Владимировна[1]*, ст. преподаватель,*
Чепелюк Александр Александрович[1]*, к.т.н., доц.,*
[1] Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»,
61002, Харьков, ул. Кирпичева, 2,
e-mail: baida.kpi@gmail.com, vikalitv21082@gmail.com,
chep1@i.ua

E.I. Baida[1]*, V.V. Lytvynenko*[1]*, A.A. Chepeliuk*[1]
[1] National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,
2, Kyrpychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

Peculiarities of dynamics of a fast-driven induction-dynamic drive with a bistable latch of contacts position of a circuit breaker based on permanent magnets.

Introduction. *Recently, in the literature, inductive-dynamic mechanisms (IDMs), known in foreign literature as a Thomson-drive, as a drive for various electrical devices are often researched and developed. The simplicity and reliability of the design, high speed make such devices indispensable in high-speed electrical devices standing in DC networks, in which emergency overcorrects are not limited by the reactance and can reach significant values. The novelty of the proposed work consists in the development of a mathematical model and the study of the Thompson drive, in which a bistable two-position mechanism consisting of a magnetic system with permanent magnets, is used as the final position latches. The movement of objects is carried out by deforming the computational mesh. The problem is a multiphysical one, in which a parallel solution of several tasks of different nature is considered.* ***Purpose.*** *Analysis of the fundamental possibility of creating a switching device with an induction-dynamic drive on the basis of a mathematical model which allows to increase the reliability of the entire mechanism operation and significantly simplify the design.* ***Methods***. *The solution of the problem was carried out by the Finite Element Method in the COMSOL package in a cylindrical coordinate system.* ***Results***. *A mathematical model of a new fast-driven induction-dynamic drive with a bistable mechanism, based on the equations of the electromagnetic field, electric circuit, equations of motion, was developed and partially studied. The model allows to calculate the dynamic parameters of the drive based on the initial data.* ***Conclusions.*** *The principal possibility of creating a high-speed actuator of switching devices based on an induction-dynamic mechanism and a polarized bistable mechanism based on permanent magnets is demonstrated. The research directions of the model were determined for the subsequent implementation of the results in experimental samples.* References 11, table 1, figures 13.

Key words: **induction-dynamic drive, bistable latch, permanent magnets.**