

in question. The correlation between the operational mode's parameters and the drive's thermal state, and dependencies between the drive's overload capacity and the mechanism's duty cycle were theoretically grounded and verified experimentally. The variation of cooling intensity due to speed regulation was taken into account.

Findings. The dependencies of maximal motor nodes' temperatures and the load duty cycle were obtained. We have proved that the motors with self-cooling systems have parabolic dependency meanwhile the motors with independent cooling have linear dependency. The regularities estimated can be used to employ the special maximal productivity strategy for the variable frequency drives with various cooling systems.

Originality. New dependencies between the operational mode's parameters (load rate, duty cycle), parameters of thermal model and load capacity of the variable frequency electric drive have been obtained.

Practical value. The dependencies obtained can be used for preliminary dimensioning of induction motor with corresponding cooling type and frequency drive for the mechanisms with S3 load pattern (variable load).

Keywords: *variable frequency drive, electric drives' thermal model, maximal overload for electric drive, limit curves*

*Рекомендовано до публікації докт. техн. наук
В.С. Хіловим. Дата надходження рукопису 21.03.13.*

УДК 621.318

**Е.И. Байда, канд. техн. наук, доц.,
С.В. Выровец**

Национальный технический Университет Украины „Харьковский политехнический институт“, г. Харьков, Украина, e-mail: baida_kpi@i.ua; vsv_2007@ukr.net

ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРОГАНИЯ МОНОСТАБИЛЬНОГО АКТУАТОРА

**Ye.I. Bayda, Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor,
S.V. Vyrovets**

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Senior Instructor of the Department of Electrical Apparatus, Kharkov, Ukraine, e-mail: baida_kpi@i.ua, vsv_2007@ukr.net

CHARACTERISTIC OF MONOSTABLE ACTUATOR STARTING

Цель. Апробация математической модели по расчету нестационарного электромагнитного поля в нелинейной, неоднородной, проводящей среде с учетом движения якоря поляризованного моностабильного актуатора с постоянными магнитами, а также исследование параметров трогания поляризованного моностабильного актуатора в зависимости от величины напряжения накопительного конденсатора.

Методика. Математическое моделирование электромагнитного поля в неоднородной, нелинейной, проводящей, движущейся среде с учетом уравнений электрического поля катушки и динамики движения подвижных элементов, а также сопоставление результатов расчетов с экспериментальными данными, полученными на макетном образце поляризованного моностабильного актуатора.

Результаты. Разработана математическая модель расчета нестационарного электромагнитного поля в поляризованном бистабильном актуаторе с учетом уравнения электрической цепи катушек включения-отключения и уравнения движения приведенной массы якоря, получены динамические характеристики моностабильного актуатора вакуумного выключателя среднего напряжения, позволяющие на базе полученной математической модели исследовать параметры срабатывания выключателя и проектировать актуаторы в соответствии с техническим заданием, а также выбирать оптимальные параметры конструкции и существенно уменьшить время и расходы на создание макетных образцов.

Научная новизна. Впервые осуществлено комплексное исследование моностабильного актуатора с постоянными магнитами на основе расчета системы уравнений электромагнитного поля в неоднородной, нелинейной проводящей среде с учетом перемещения якоря, уравнений электрической цепи, а также уравнения движения.

Практическая значимость. На основании проведенных расчетов были изготовлены макетные образцы актуатора и проведены экспериментальные исследования, подтвердившие адекватность математической модели, что позволяет проектировать подобные актуаторы для новых конструкций выключателей и модернизировать имеющиеся.

Ключевые слова: *поляризованный актуатор, математическая модель, высококоэрцитивный постоянный магнит, время трогания, вихревой ток, динамическая характеристика актуатора*

Постановка проблемы. В настоящее время одним из наиболее перспективных видов актуаторов

являются поляризованные актуаторы на базе высококоэрцитивных постоянных магнитов [1–7]. Такие актуаторы характеризуются: значительными электромагнитными силами в стабильных состояниях; минимальными затратами энергии (стабильные состоя-

ния обеспечиваются постоянными магнитами); высокой надежностью за счет малого количества механических деталей и отсутствия механических защелок. К недостаткам данных актуаторов можно отнести сложность их проектирования. Это связано с необходимостью проведения динамических расчетов магнитных, электрических и механических параметров в неоднородных, нелинейных, проводящих движущихся средах с учетом постоянных магнитов. Такой анализ возможен только на базе математических моделей, осуществляющих решения системы уравнений Максвелла, электрической цепи и механики движения тела с переменной массой. Такая математическая модель описана в [8–10].

Решение поставленной задачи. На рис. 1 показано схематическое изображение актуатора в цилиндрической системе координат, а также расчетная модель с указанием граничных условий, имитирующих бесконечность пространства на внешней границе расчетной области.

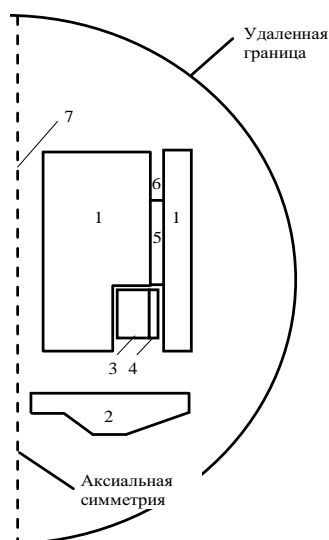


Рис. 1. Конструкция актуатора: 1 – магнитопровод; 2 – якорь; 3 – катушка включения; 4 – отключающая катушка; 5 – постоянный магнит; 6 – воздушный шунт; 7 – ось аксиальной симметрии

Расчетные уравнения низкочастотного электромагнитного поля.

1. Неподвижная часть магнитопровода

$$\sigma \cdot \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \frac{1}{\mu_0} \cdot \nabla \times \left(\frac{1}{\mu_r} \cdot \nabla \times \vec{A} \right) = 0, \quad (1)$$

где σ – проводимость; \vec{A} – векторный магнитный потенциал; $\mu_r = \mu_r(|B|)$ – относительная магнитная проницаемость, является нелинейной функцией, зависящей от магнитной индукции.

2. Движущаяся часть магнитопровода (якорь)

$$\sigma \cdot \left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \vec{v} \times (\nabla \times \vec{A}) \right) + \frac{1}{\mu_0} \cdot \nabla \times \left(\frac{1}{\mu_r} \cdot \nabla \times \vec{A} \right) = 0, \quad (2)$$

где \vec{v} – скорость движения якоря актуатора, определяемая на основании решения уравнений движения.

3. Катушки электромагнита можно считать „плотным“ немагнитным проводником с равномерно распределенной по сечению плотностью тока, определяемого сторонними источниками

$$\sigma \cdot \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \frac{1}{\mu_0} \cdot \nabla \times (\nabla \times \vec{A}) = \frac{i \cdot w}{S}, \quad (3)$$

где i – ток катушки; w – число витков катушки; S – сечение катушки.

Проводимость, для устранения сингулярности матрицы, должна быть малой, но не нулевой величиной.

4. Область постоянного магнита можно представить как проводящую неподвижную среду, имеющую априори заданную намагниченность, тогда

$$\vec{H} = \frac{\vec{B} - \vec{B}_r}{\mu_0 \cdot \mu_r}, \quad (4)$$

где \vec{B}_r – остаточная магнитная индукция.

В этом случае

$$\sigma \cdot \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \nabla \times \left(\frac{1}{\mu_0 \cdot \mu_r} \cdot (\nabla \times \vec{A} - B_r) \right) = 0. \quad (5)$$

5. Уравнение для среды, окружающей магнит

$$\sigma \cdot \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \frac{1}{\mu_0} \cdot \nabla \times (\nabla \times \vec{A}) = 0. \quad (6)$$

В расчетах электромагнитных систем достаточно часто значение поля не является целью расчета. Как правило, необходимо определить значение электромагнитных сил, действующих на одну из частей системы. Для этого необходимо воспользоваться наиболее универсальной формулой – тензором натяжения Максвелла

$$\vec{Q} = \frac{1}{2} \cdot \int_S (\vec{H} \cdot (\vec{B} \cdot \vec{n}) + \vec{B} \cdot (\vec{H} \cdot \vec{n}) - (\vec{H} \cdot \vec{B}) \cdot \vec{n}) \cdot dS, \quad (7)$$

где \vec{Q} – значение электромагнитной силы; \vec{n} – вектор внешней нормали к поверхности интегрирования dS .

Система уравнений (1–7) должна быть дополнена начальным и граничными условиями (рис. 1).

Расчетные уравнения электрической цепи.

В уравнении (3) присутствует плотность тока сторонних источников, которая определяется уравнением электрической цепи. Уравнение электрической цепи для катушки электромагнита

$$U + e = (R_e + R_k) \cdot i + L_e \cdot \frac{di}{dt}, \quad (8)$$

где U – напряжение источника; e – противоЭДС, наводимая в катушке; R_e – активное сопротивление внеш-

ней цепи; R_k – активное сопротивление катушки; i – ток катушки; L_e – индуктивность внешней цепи.

Источником напряжения в данной задаче был предварительно заряженный конденсатор. Поэтому

$$U = U_{c0} - \frac{1}{C} \cdot \int_t i \cdot dt, \quad (9)$$

где U_{c0} – начальное напряжение на конденсаторе; C – емкость конденсатора.

Что касается значения противоЭДС, то, в соответствии с законом Фарадея и теоремой Стокса,

$$e = -\frac{w}{S} \iiint_V \frac{d(\vec{A})_l}{dt} \cdot dV, \quad (10)$$

где w – число витков катушки; S – площадь поперечного сечения катушки; $(\vec{A})_l$ – проекция векторного магнитного потенциала на направление обхода контура; V – объем катушки.

Окончательно расчетное уравнение для электрической цепи будет иметь вид

$$U = (R_e + R_k) \cdot i + L_e \cdot \frac{di}{dt} + \frac{w}{S} \iiint_V \frac{d(\vec{A})_l}{dt} \cdot dV. \quad (11)$$

Начальные условия для уравнения (11) нулевые.

Уравнения механической цепи.

Конструкция привода вакуумного выключателя представляет собой многозвенный механизм, при расчетах которого необходимо учитывать инерционность всех движущихся частей. Основным является одномерное уравнение движения якоря электромагнита

$$\begin{cases} \frac{d(m(z) \cdot v)}{dt} = Q(z) - P(z) \\ \frac{d(z)}{dt} = v \\ z(0) = 0, v(0) = 0 \end{cases}, \quad (12)$$

где z – перемещение якоря; v – скорость якоря; $m(z)$ – масса движущихся частей, приведенная к якорю; v – скорость якоря; $Q(z)$ – электромагнитная сила; $P(z)$ – противодействующая сила, приведенная к якорю.

Приведение массы подвижных частей выключателя осуществлялось на основании кинематической схемы привода выключателя, исходя из равенства кинетической энергии реальной и приведенной систем,

$$\frac{m(z) \cdot v^2}{2} = \sum \frac{m_i \cdot v_i^2}{2}, \quad (13)$$

где m_i , v_i – масса и скорости „приводимых“ к якорю элементов привода.

Уравнение (12) представляет собой уравнение одномерного движения с переменной массой (уравнение Мещерского). Для удобства расчетов оно может быть переписано в виде

$$\begin{cases} \frac{dm(z)}{dz} \cdot v^2 + m(z) \cdot \frac{d(v)}{dt} = Q(z) - P(z) \\ \frac{d(z)}{dt} = v \\ z(0) = 0, v(0) = 0 \end{cases}. \quad (14)$$

Полученные уравнения (1–14) представляют собой систему взаимосвязанных уравнений и являются математической моделью динамики рассматриваемых актуаторов.

Получить решение уравнений (1–14) достаточно сложно, так как возникают проблемы с точностью, сходимостью и устойчивостью системы.

Решения системы (1–14) было получено с использованием метода конечных элементов для интегрирования по пространственным переменным и усовершенствованного метода Гира, называемого BDF (Backward Differentiation Formula), по времени. При интегрировании системы необходимо избегать скачкообразного изменения параметров (например, изменение приведенной массы при замыкании главных контактов). В этом случае необходима аппроксимация перехода непрерывной гладкой (вплоть до второй производной) функцией, при использовании которой скачок функции „размывается“ на определенном пространственном либо временном интервале.

В расчетах в качестве постоянного магнита использовался магнит NdFeB, обладающий уникальными магнитными свойствами, которые позволяют удерживать якорь в притянутом положении без затрат энергии извне. Противодействующая механическая характеристика механизма, приведенная к якорю, показана на рис. 2 и является заданной в соответствии с ТЗ.

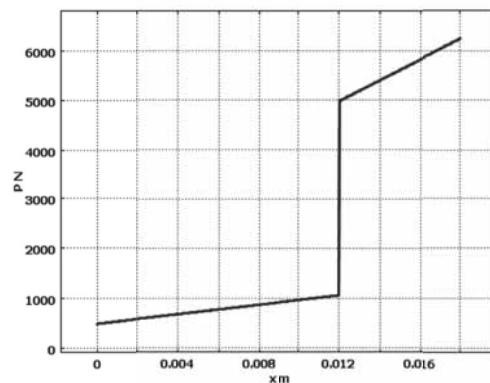


Рис. 2. Механическая противодействующая характеристика: x – ход якоря; P – противодействующая сила

Результаты расчетов динамических характеристик трогания показаны на рис. 3, где показана временная зависимость суммарной силы, действующей на якорь, от начального напряжения на конденсаторе.

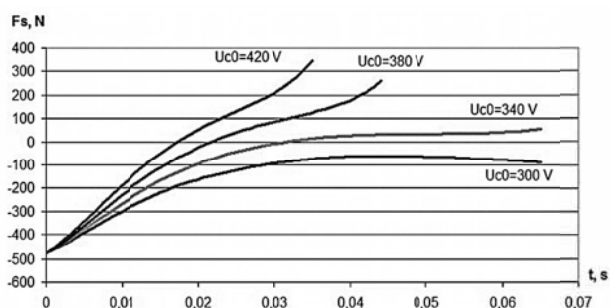


Рис. 3. Значение суммарной силы, приложенной к якорю актуатора

Как видно на рис. 3, минимальное напряжение включения на емкости должно быть не ниже 340 В. В противном случае движущей электромагнитной силы недостаточно для начала движения системы. Другой важной характеристикой актуатора являются значения токов в катушке включения, которые показаны на рис. 4 в функции времени и в зависимости от начального напряжения на конденсаторе.

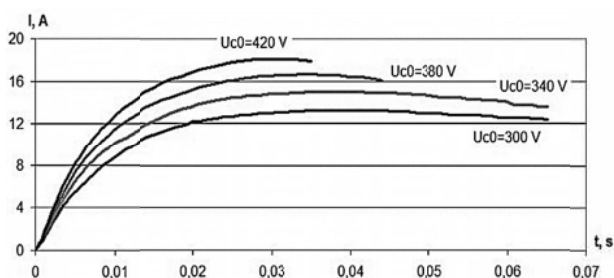


Рис. 4. Значения токов катушки трогания

На рис. 5 показана характеристика времени трогания актуатора в зависимости от напряжения на конденсаторе, построенная по данным рис. 3.

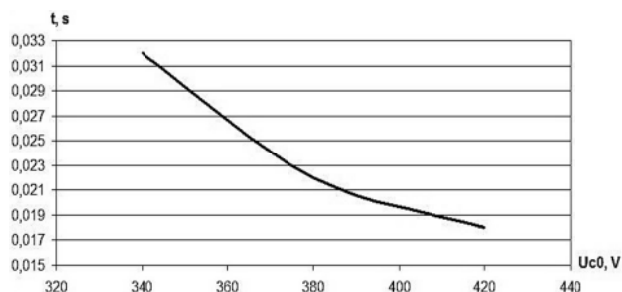


Рис. 5. Зависимость времени трогания от напряжения заряда конденсатора

Как видно на рис. 5, время трогания с ростом напряжения уменьшается, однако уменьшается и

скорость его изменения. Из этого следует, что чрезмерное увеличение напряжения заряда емкости приносит меньший, чем ожидалось, эффект. В то же время увеличение напряжения на конденсаторе до значения большего, чем можно получить от сети переменного тока 220 В, требует установки преобразователей, что усложняет и удорожает схему управления.

Разработанная математическая модель динамики дает возможность глубже разобраться в физике процессов, происходящих при включении актуатора (рис. 6).

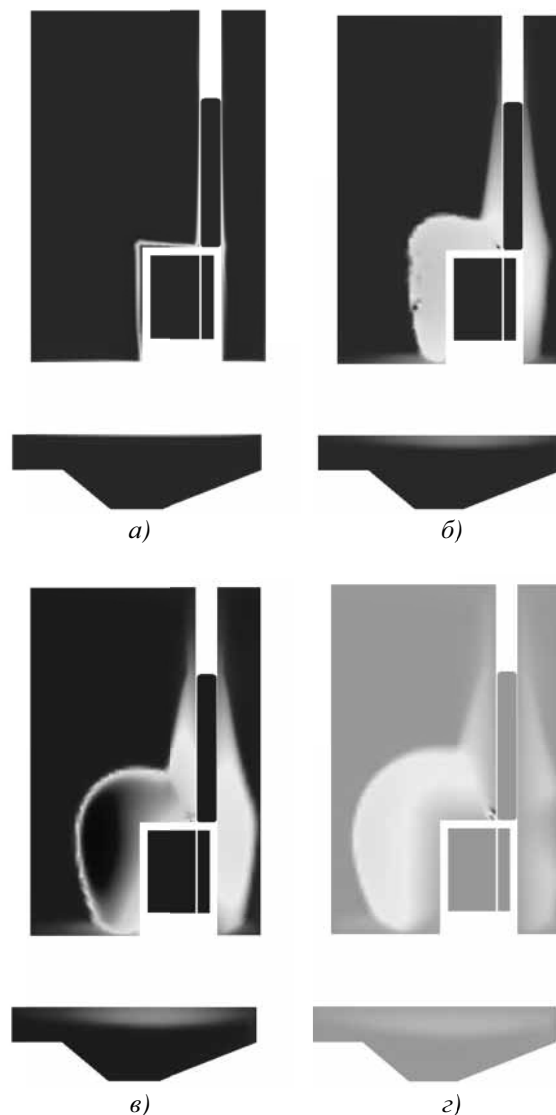


Рис. 6. Распределения вихревых токов в корпусе актуатора в моменты времени: а) 1 мс; б) 10 мс; в) 20 мс; з) 40 мс

На рис. 7 показана временная зависимость вихревого тока в якорь актуатора при подключении катушек к накопительному конденсатору в начальные моменты времени, что дает возможность оценить потери энергии и в дальнейшем провести тепловой расчет актуатора.

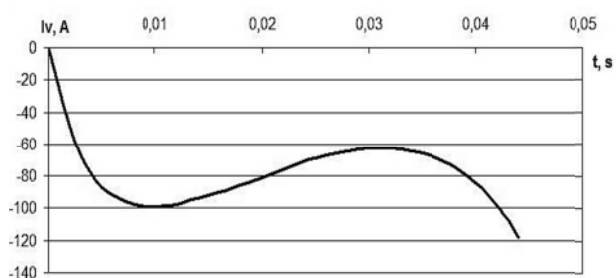


Рис. 7. Распределение вихревых токов в якоре

На рис. 8, в качестве примера, показано изменение скорости движения якоря в начальные моменты времени движения, что влияет на характер и значения вихревого тока в корпусе актуатора.

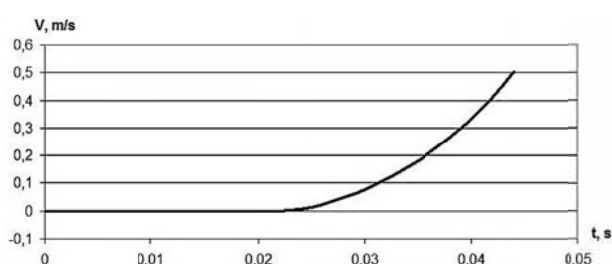


Рис. 8. Изменение скорости движения якоря в начальные моменты времени его движения

Выводы. Анализ динамики работы актуатора возможен только на базе соответствующей математической модели, позволяющей учесть с максимальной возможной точностью все основные физические процессы. Определено минимальное напряжение заряда конденсатора, необходимое для трогания актуатора. Определена зависимость времени трогания в функции напряжения на емкости. На основании проведенных расчетов были проведены эксперименты, показавшие удовлетворительное совпадение экспериментальных и теоретических данных (расхождение данных по минимальному напряжению трогания составило 5%).

Следовательно, разработанная математическая модель расчета динамики поляризованного моностабильного актуатора адекватно отражает реальные физические процессы и может с успехом использоваться как для проектирования новых, так и для модернизации имеющихся конструкций приводных элементов вакуумных выключателей средних напряжений.

Список литературы / References

1. Клименко Б.В. Электромагнитные приводы вакуумных выключателей средних напряжений / Б.В. Клименко, В.М. Бугайчук, А.М. Гречко // Вестник НТУ „ХПИ“. – 2004. – № 42. – С. 73–80.
 Klimenko, B.V., Bugaychuk, V.M., Grechko, A.M. (2004), “Electromagnetic actuators of middle-voltage vacuum switches”, *Vestnik NTU KhPI*, no. 42, pp. 73–80

2. Лучшие инновации 2004 года [Электронный ресурс] / АББ Ревю. – 2005. – № 1. – 43 с. – Режим доступа: <http://abbreview.ru/archive/2005/1/p43.pdf>.
 ABB Revue (2005), “2004 The best innovation”, no. 1, p. 43, available at: <http://abbreview.ru/archive/2005/1/p43.pdf> (accessed January 2005)
 3. Назарычев А.Н. Совершенствование системы проведения ремонтов электрооборудования электростанций и преимущества и недостатки вакуумных выключателей. [Электронный ресурс] / Назарычев А.Н. // Энергетика, оборудование, документация. – Режим доступа: <http://forca.ru/spravka/vysokovoltnye-vyklyuchateli/preimuschestva-i-nedostatki-vakuumnyh-vyklyuchateley.html>
 Nazarychev, A.N., “Power plant electrical equipment repair system improvement and vacuum switches’ advantages and shortcomings”, *Energetika, oborudovaniye, dokumentatsyya*, available at: <http://forca.ru/spravka/vysokovoltnye-vyklyuchateli/preimuschestva-i-nedostatki-vakuumnyh-vyklyuchateley.html>
 4. Преимущества вакуумных выключателей. [Электронный ресурс] // Proektirovka.com. – Режим доступа: <http://proektirovka.com/elektricheskie-apparaty-napryazheniem-vyshe-1000-v/preimuschestva-vakuumnykh-vyklyuchateley/>.
 Proektirovka.com, “Vacuum switches’ advantages” available at: <http://proektirovka.com/elektricheskie-apparaty-napryazheniem-vyshe-1000-v/preimuschestva-vakuumnykh-vyklyuchateley/>.
 5. Евдокунин Г.А. Современная вакуумная коммутационная техника для сетей среднего напряжения / Г.А. Евдокунин, Г. Тилер. – СПб: Издательство Сизова М.П., 2000. – 114 с.
 Evdokunin, G.A. (2000), *Sovremennaya vakuumnaya kommutatsionnaya tekhnika dlya setey srednego napryazheniya* [Modern Vacuum Commutation Technics for Middle-Voltage Circuits], Publishing House Sizova M.P., St.-Petersburg, Russia.
 6. Назарычев А.Н. Анализ основных преимуществ вакуумных выключателей. [Электронный ресурс] / Назарычев А.Н. // БЭСТЕР Комплект. – Режим доступа: <http://www.bester54.ru/cms.php?type=page&id=22>.
 Nazarychev, A.N. *Analiz osnovnykh preimushchestv vakuumnykh vyklyuchateley* [Vacuum Switches’ Main Advantages Analysis] available at: <http://www.bester54.ru/cms.php?type=page&id=22>.
 7. Преимущества и недостатки вакуумных выключателей. [Электронный ресурс] // Энергетика, оборудование, документация. – Режим доступа: <http://forca.ru/spravka/vysokovoltnye-vyklyuchateli/preimuschestva-i-nedostatki-vakuumnyh-vyklyuchateley.html>
 “Vacuum Switches’ Advantages and Shortcomings”, *Energetika, oborudovaniye, dokumentatsyya*, available at: <http://forca.ru/spravka/vysokovoltnye-vyklyuchateli/preimuschestva-i-nedostatki-vakuumnyh-vyklyuchateley.html>
 8. Байда Е.И. Влияние проводимости материала на динамические характеристики электромагнитных механизмов постоянного тока / Е.И. Байда // Электротехника и электромеханика. – 2010. – № 1. – С. 3–5.

Bayda, Ye.I. (2010), "Material conductivity influence on the direct-current electromagnetic mechanism dynamic characteristic", *Elektrotehnika i elektromekhanika*, Kharkiv NTU "KhPI", no. 1, pp. 3–5.

9. Байда Е.И. Моделирование динамических характеристик электромагнитных механизмов постоянного тока с магнитной защёлкой / Е.И. Байда // *Электротехника и электромеханика*. – 2010. – № 2. – С. 3–5.

Bayda, Ye.I. (2010), "Dynamic characteristic design of direct-current electromagnetic mechanism with magnetic latch", *Elektrotehnika i elektromekhanika*, Kharkiv NTU "KhPI", no. 2, pp. 3–5.

10. Байда Е.И. Расчет динамики двухпозиционного электромагнита постоянного тока с магнитной защёлкой / Е.И. Байда // *Электротехника и электромеханика*. – 2010. – № 4. – С. 10–12.

Bayda Ye.I. (2010), "Direct-current two-position electromagnet with magnetic latch dynamic calculation", *Elektrotehnika i elektromekhanika*, Kharkiv NTU "KhPI", no. 4, pp. 10–12.

Мета. Апробація математичної моделі розрахунку нестационарного електромагнітного поля в нелінійному, неоднорідному, провідному середовищі з урахуванням руху якоря поляризованого моностабільного актуатора з постійними магнітами, а також дослідження параметрів трогання поляризованого моностабільного актуатора залежно від величини напруги накопичувального конденсатора.

Методика. Математичне моделювання електромагнітного поля в неоднорідному, нелінійному, провідному, рухомому середовищі з урахуванням рівнянь електричного поля котушки та динаміки руху рухомих елементів, а також зіставлення результатів розрахунків з експериментальними даними, отриманими на макетному зразку поляризованого моностабільного актуатора.

Результати. Розроблена математична модель розрахунку нестационарного електромагнітного поля в поляризованому бістабільному актуаторі з урахуванням рівняння електричного кола котушок включення-відключення та рівняння руху приведеної маси якоря, отримані динамічні характеристики моностабільного актуатора вакуумного вимикача середньої напруги, що дозволяють на базі отриманої математичної моделі дослідити параметри спрацьовування вимикача й проектувати актуатори відповідно до технічного завдання, а так само вибирати оптимальні параметри конструкції та суттєво зменшити час і витрати на створення макетних зразків.

Наукова новизна. Уперше здійснено комплексне дослідження моностабільного актуатора з постійними магнітами на основі розрахунку системи рівнянь електромагнітного поля в неоднорідному, нелінійному провідному середовищі з урахуванням переміщення якоря, рівнянь електричного кола, а також рівняння руху.

Практична значимість. На підставі проведених розрахунків були виготовлені макетні зразки актуатора та проведені експериментальні дослідження, які підтвердили адекватність математичної моделі, що дозволяє проектувати подібні актуатори для нових конструкцій вимикачів і модернізувати наявні.

Ключові слова: *поляризований актуатор, математична модель, висококоерцитивний постійний магніт, час трогання, вихровий струм, динамічна характеристика актуатора*

Purpose. To approbate the mathematical model of nonstationary electromagnetic field calculation in nonlinear, non-uniform, conductive medium taking into account the rotor motions of the polarized monostable actuator with permanent magnets, and to determine the starting parameters depending on the storage capacitor's voltage value.

Methodology. We have applied the mathematical simulation of electromagnetic field in nonlinear, conductive, movable medium taking into account the equation of the electrical field of the coil and motion dynamics of the movable elements. We have correlated the simulated result with the experimental data obtained by means of the polarized monostable actuator model.

Findings. We have developed the mathematical model for calculation of the nonstationary electromagnetic field in the polarized bistationary actuator taking into account the equation on-off electric circuit coil and equation of motion of reduced mass armature. We have obtained the dynamic characteristics of the monostable actuator vacuum switch of medium voltage. This allows us to examine the parameters of the switch response based on the received mathematical model and to design actuators according to the specification, and to choose optimal parameters of construction and reduce substantially the time and expenses needed for the models.

Originality. For the first time, we have carried out the integrated research of the monostable actuator with permanent magnets based on the combined equation calculation of electromagnetic field in non-uniform, non-linear conductive medium taking into account the armature transfer, electric line equation and movement.

Practical value. We have manufactured the actuator models based on the performed calculation. The experimental studies have confirmed the adequacy of the model which allows designing such actuators for new construction of switches and upgrade the existing ones.

Keywords: *polarized actuator, mathematical model, high-coercivity permanent magnet, starting time, eddy current, actuator's dynamic characteristic*

Рекомендовано к публікації докт. техн. наук Б.В. Клименком. Дата надходження рукопису 11.03.13.