

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
"ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

БАЙДА ЄВГЕН ІВАНОВИЧ

УДК 621.313:536.2.24:539.2

ДИСЕРТАЦІЯ

МУЛЬТИФІЗИЧНІ МОДЕЛІ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ВАКУУМНИХ
ВИМИКАЧІВ З БІСТАБІЛЬНИМИ ПОЛЯРИЗОВАНИМИ
АКТУАТОРАМИ В ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМАХ

05.09.01 – електричні машини і апарати

141 – електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Подається на здобуття наукового ступеня доктор технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і тестів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ Байда Є.І.

Науковий консультант Клименко Борис Володимирович, д. т. н., професор

Харків – 2018

АНОТАЦІЯ

Байда Є.І. Мультифізичні моделі високовольтних вакуумних вимикачів з бістабільними поляризованими актуаторами в динамічних режимах. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктор технічних наук за спеціальністю 05.09.01 "Електричні машини і апарати" (141 – електрична інженерія). – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, 2018 р.

У дисертаційній роботі розглянуто проблеми створення мультифізичних моделей, що використовуються при дослідженні і проектуванні вакуумних вимикачів високої напруги.

Об'єкт дослідження – нестационарні електромагнітні процеси в неоднорідному, нелінійному, рухомому середовищі, що проводить електричний струм і включає в себе висококоерцитивні постійні магніти; процеси, що пов'язані з теорією пружності, механікою твердого тіла, явищами в нестационарних теплових полях і теорією механіки суцільних середовищ.

Предмет дослідження – вакуумні вимикачі з бістабільними поляризованими актуаторами та закономірності їхньої роботи в динамічних режимах; закономірності та механізм статичної і динамічної деформації контактної системи вимикача під впливом актуатора; здатність вимикача до вмикання та його термічна стійкість під дією аварійних надструмів; рідинні демпфери; електричні схеми керування актуатором.

Методи дослідження – дослідження електромагнітних, механічних, теплових процесів і процесів течії рідини базуються на аналітичних і чисельних математичних моделях, які враховують найбільш суттєві лінійні та нелінійні взаємозв'язки між явищами. Чисельне розв'язання диференціальних рівнянь в

приватних похідних проводиться в спеціальних прикладних пакетах програм, достовірність результатів яких багаторазово перевірена і не викликає сумнівів, а також у програмах, написаних здобувачем, результати яких були перевірені експериментально.

В роботі отримані такі наукові результати.

Вперше розроблена мультифізична модель динаміки поляризованого бістабільного актуатора з постійними магнітами, що базується на розрахунках нестационарного електромагнітного поля в нелінійному неоднорідному середовищі, що проводить електричний струм та містить постійні магніти. Модель також враховує рух частин актуатора у взаємодії з нелійними рівняннями електричного кола і руху. Розраховані параметри форсованого підключення актуаторів та надано рекомендації щодо конструкції та вибору параметрів актуаторів.

Розроблено мультифізичні моделі дослідження впливу параметрів актуаторів на статичні і динамічні механічні напруження в сильфоні вакуумної камери, отримані рекомендації з вибору оптимальної конструкції сильфона і його довговічності, розрахована його втомна витривалість. Розроблено мультифізичну модель впливу параметрів актуаторів на динамічні механічні напруження в контактній системі та механізмі вимикача, що базується на теорії пружності, завдяки чому була розрахована геометрія приводного вала, вибрано його матеріал та підшипники.

Вперше розроблено мультифізичні моделі, що дозволяють визначити вплив динамічних характеристик актуатора на здатність вимикача до вмикання аварійного надструму: визначена динаміка зіткнення і час вібрації контактів; вирішена теплова задача Стефана з урахуванням теплоти фазових переходів і визначена можлива сила зварювання контактів; надано рекомендації щодо зниження швидкості зіткнення контактів за рахунок застосування рідинного демпфера, які засновані на рівняннях Нав'є – Стокса і динаміки руху актуатора;

розроблена модель нагріву і деформації контактної поверхні і на її основі надані рекомендації щодо розрахунків необхідної сили контактного натискання і геометрії контактів за умов термічної стійкості.

Досліджено та проаналізовано оригінальні моделі схем підключення котушок актуатора до різних джерел електричної енергії, надано рекомендації щодо їх практичної реалізації.

Результати дослідження були перевірені на макетах та дослідних зразках які підтвердили отримані рекомендації та висновки і використовувались при розробці вакуумних вимикачів.

Впровадження основних наукових і практичних результатів дисертаційної роботи знайшло відображення: в договірній роботі з ТОВ "АВМ Ампер" м. Кременчук (договір № 33 / 98-12 між НТУ "ХП" та ТОВ "АВМ Ампер") "Вплив параметрів бістабільного поляризованого актуатора вакуумного вимикача на його здатність до вмикання", науково-дослідної та дослідно-конструкторської роботи виконаної на замовлення ТОВ НВП "Укренергокомплекс-2", м. Харків "Бістабільні актуатори в установках контролю і розподілу потоків рідини" та навчальному процесі. Акти впровадження додаються.

Ключові слова: вакуумний вимикач, актуатор, мультифізична модель, вібрація контактів, здатність до вмикання, термічна стійкість, схеми підключення котушок.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

1. Байда Е.И. О проектировании броневых электромагнитов постоянного тока на базе расчета магнитного поля методом конечных элементов/ Е.И. Байда, Б.В. Клименко // Електротехніка і електромеханіка. – Харьков: НТУ “ХПІ”, 2003. – №1. – С . 4 – 8.
2. Байда Е.И. Расчет электромагнитных систем с поперечным движением якоря и ферромагнитными шунтами/ Е.И. Байда, А.А. Чепелюк // Електротехніка і електромеханіка. – Харьков: НТУ “ХПІ”, 20003. – №3. – С. 7 – 11.
3. Байда Е.И. Сравнительный расчет электромагнитов постоянного тока/ Е.И. Байда // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2003. – №11. – С. 8 – 13.
4. Байда Е.И. Расчет динамики электромагнита постоянного тока по данным статического расчета потокосцепления и силы методом конечных элементов/ Е.И. Байда // Електротехніка і електромеханіка. – Харьков: НТУ “ХПІ”, 2004. – №1. – С. 5 – 7.
5. Байда Е.И. О термическом действии токов коротких замыканий в электрических сетях средних напряжений, защищаемых вакуумными выключателями / Е.И.Байда, Б.В.Клименко, А.М.Гречко, С.А. Боев // Електротехніка і електромеханіка. – Харьков: НТУ “ХПІ”, 2007. – №1. – С. 30 – 33.
6. Байда Е.И. Расчет переходных процессов в электромагнитном механизме на основании уравнений электромагнитного поля / Е.И.Байда // Електротехніка і електромеханіка. – Харьков: НТУ “ХПІ”, 2008, – №5. – С. 39 – 43.

7. Байда Е.И. Влияние проводимости материала на динамические характеристики электромагнитных механизмов постоянного тока / Е.И.Байда // *Електротехніка і електромеханіка*. – Харьков: НТУ “ХПІ”, 2010. – №1. – С. 3 – 5.

8. Байда Е.И. Моделирование динамических характеристик электромагнитных механизмов постоянного тока с магнитной защёлкой/ Е.И.Байда // *Електротехніка і електромеханіка*. – Харьков: НТУ “ХПІ”, 2010. – №2. – С. 3 – 5.

9. Байда Е.И. Моделирование процесса отключения электромагнита постоянного тока с магнитной защёлкой/ Е.И.Байда // *Електротехніка і електромеханіка*. – Харьков: НТУ “ХПІ”, 2010. – №3. – С. 6 – 9.

10. Байда Е.И. Расчет динамики двухпозиционного электромагнита постоянного тока с магнитной защёлкой/ Е.И.Байда // *Електротехніка і електромеханіка*. – Харьков: НТУ “ХПІ”, 2010. – №4. – С. 10 – 12.

11. Байда Е.И. Влияние формы напряжения источника питания на динамические характеристики электромагнита постоянного тока/ Е.И.Байда // *Електротехніка і електромеханіка*. – Харьков: НТУ “ХПІ”, 2010. – №5. – С.3 – 4.

12. Байда Е.И. Снижение энерговыделения на поверхностях силовоточных разрывных контактов при коммутации/ Е.И.Байда, О.Г.Волкова, В.С.Лупиков // *Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”*. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2011. – №12. – С. 26 – 35.

13. Байда Е.И. Влияние формы поперечного сечения магнитопровода электромагнита постоянного тока на его быстродействие/ Е.И.Байда // *Електротехніка і електромеханіка*. – Харьков: НТУ “ХПІ”, 2011. – №3. С. 15 – 17.

14. Байда Е.И. Влияние добавочного сопротивления на время трогания двухпозиционного электромагнита с магнитной защёлкой вакуумного выключателя среднего напряжения/ Е.И. Байда // *Електротехніка і електромеханіка*. – Харьков: НТУ “ХПІ”, 2011. – №4. – С. 13 – 15.

15. Байда Е.И. Расчет статической деформации сиффона вакуумных выключателей среднего напряжения/ Е.И.Байда // Электротехніка і електромеханіка. – Харьков: НТУ “ХП”, 2011. – №6. – С. 15 – 16.

16. Байда Е.И. Расчет динамики деформации сиффона вакуумных выключателей среднего напряжения/ Е.И.Байда // Электротехніка і електромеханіка. - Харьков: НТУ “ХП”, 2012. – №1. – С. 15 – 18.

17. Байда Е.И. Теоретический расчет сил сваривания контактов при замыкании их на аварийные сверхтоки/ Е.И.Байда // Электротехніка і електромеханіка. - Харьков: НТУ “ХП”, 2012. – №3. – С. 11 – 13.

18. Байда Е.И. Исследование влияния усилия сжатия на переходное сопротивление разрывных электрических контактов/ Е.И.Байда, О.Г.Волкова, В.С.Лупиков // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. – Харків: НТУ “ХП”, 2012. – №28. – С. 12 – 21.

19. Байда Е.И. Математические модели подключения бистабильных поляризованных актуаторов к источникам энергии/ Е.И.Байда // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут.” – Харків: НТУ “ХП”, 2012. – №49. – С. 3– 8.

20. Байда Е.И. Динамика нечеткого срабатывания бистабильного электромагнитного актуатора на базе высококоэрцитивных постоянных магнитов/ Е.И.Байда // Электротехніка і електромеханіка. – Харьков: НТУ “ХП”, 2012. – №5. – С. 18 – 20.

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

22. Байда Е.И. Теоретическая оценка температуры контактной поверхности вакуумного выключателя средних напряжений при протекании по ним токов

короткого замыкания/ Е.И.Байда // Журнал научных публикаций аспирантов и докторантов. – Курск, 2013. – №3. – С. 174 – 179.

23. Байда Е.И. Один из путей снижения скорости движения контактов вакуумных выключателей / Е.И.Байда // Электрика, изд-во «Наука и технология». – Москва, 2013. – №4. – С. 4 – 7.

24. Байда Е.И. Влияние магнитной проницаемости и удельного сопротивления магнитопровода бистабильных поляризованных актуаторов на время трогания/ Е.И.Байда // Електротехніка і електромеханіка. – Харьков: НТУ “ХП”, 2013. – №3. – С. 18 – 20.

25. Байда Е.И. Моделирование процесса отключения моностабильного электромагнитного актуатора с постоянными магнитами материалов/ Е.И.Байда // Журнал научных публикаций аспирантов и докторантов. – Курск, 2013. – №6. – С. 209 – 213.

26. Baida E. I. Influence of the form of the applied voltage on the switching parameters of a polarized bistable actuator / Russian Electrical Engineering. July 2013, Volume 84, Issue 7 Pages 353–356. [Scopus]

Байда Е. И. Влияние формы приложенного напряжения на параметры срабатывания бистабильного актуатора / Е. И. Байда// Электротехника – Москва: 2013. – №7. С.–2 - 5. [Scopus]

27. Байда Е.И. Влияние гидравлического демпфера на динамику двухпозиционного поляризованного актуатора / Е.И. Байда // Електротехніка і електромеханіка. – Харьков: НТУ “ХП”, 2013. – №5. – С. 15 – 19.

28. Bayda, Ye. I. Characteristic of monostable actuator starting/ Ye. I. Bayda, , S.V. Vyrovets //Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. Issue 6, 2014, Pages 72 – 77. [Scopus]

Байда Е. И. Характеристики трогания моностабильного актуатора/ Е.И. Байда, С. В. Выровец // Науковий вісник Національного гірничого університету. науково-технічний журнал, 2013. – №6 (138). – С. 72 – 77. [Scopus]

29. Baida E. I. Peculiarities of calculation of magnetic systems with short-circuited secondary windings in in-plane formulation/ E. I. Baida //ELECTRICAL ENGINEERING & ELECTROMECHANICS. Issue 5. Pages: 18 – 22. Published: 2015. [Web of science]

Байда Е. И. Особенности расчета магнитных систем с короткозамкнутыми вторичными обмотками в плоскопараллельной постановке/ Е. И. Байда // Електротехніка і електромеханіка. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2015. – №5. С. – 18 - 22. [Web of science]

30. Baida E. I. A refined mathematical model of multiphysics processes for magnetic pulse treatment of materials/ E. I. Baida // ELECTRICAL ENGINEERING & ELECTROMECHANICS. Issue 2. Pages: 41 – 47. Published: 2015. [Web of science]

Байда Е. И. Уточненная математическая модель процессов магнитно-импульсной обработки материалов/ Е. И. Байда // Електротехніка і електромеханіка. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2015. – №2. С. – 41 – 47. 22. [Web of science]

31. Baida E. I. Investigation of mechanical stresses in the drive shaft of mv vacuum circuit breaker/ E. I. Baida, B. V. Klymenko // ELECTRICAL ENGINEERING & ELECTROMECHANICS. Issue 1. Pages: 10 – 15. Published: 2017. [Web of science]

Байда Е. И. Исследование механических напряжений в приводном валу вакуумного выключателя средних напряжений/ Е. И. Байда, Б. В. Клименко// Електротехніка і електромеханіка. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2017. – №1. С. – 10 - 15. 22. [Web of science]

ABSTRACT

Baida Ye. I. Multiphysical models of high voltage vacuum circuit breakers with bistable polarized actuators in dynamic modes. – Qualifying scientific work on the rights of manuscripts.

Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences in specialty 05.09.01 "Electric Machines and Apparatus" (141 – Electrical Engineering). – National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", Kharkov, 2018

In the dissertation work the problems of creation of multiphysical models used in the research and designing of medium voltage vacuum switching devices are considered.

The object of the study is transient electromagnetic processes in a heterogeneous, nonlinear, moving medium conducting electric current and including high-coercive permanent magnets; processes related to the theory of elasticity, solid state mechanics, phenomena in non-stationary thermal fields, and the theory of continuum mechanics.

Subject of research – vacuum switches with bistable polarized actuators and regularities of their operation in dynamic modes; regularities and mechanism of static and dynamic deformation of the contact system of the switch under the influence of the actuator; the ability of the switch to switch on and its thermal stability under the influence of emergency superstructures; liquid dampers; electric actuator control circuits.

Research methods – the investigations of electromagnetic, mechanical, thermal processes and fluid flow processes are based on analytical and numerical mathematical models that take into account the most significant linear and nonlinear interconnections between phenomena. Numerical solutions of partial differential equations are carried out using special application software packages, the reliability of which is repeatedly confirmed and does not cause doubts, as well as codes written by the applicant.

The following scientific results have been obtained in the work.

For the first time a model of dynamics of a polarized bistable actuator with

permanent magnets has been developed based on calculations of transient electromagnetic field in a nonlinear non-uniform medium conducting electric current and containing permanent magnets taking into account the motion of parts of the actuator in conjunction with nonlinear equations of electric circuit and motion. The parameters of forced switching on of actuators are calculated and recommendations on the design and parameters of actuators are given.

The multiphysical models of studying the influence of actuator parameters on static and dynamic mechanical stresses in a vacuum chamber bellows have been developed, recommendations have been obtained for choosing the optimal structure of a bellows and its durability, its fatigue endurance is calculated. A model of the influence of actuator parameters on dynamic mechanical stresses in the contact system and the switching mechanism based on the theory of elasticity was developed, due to which the geometry of the drive shaft was calculated and its material was chosen.

For the first time, multiphysical models have been developed to determine the effect of the actuator's dynamic characteristics on the ability of the circuit breaker to activate the emergency overloads: shock dynamics and contact vibration time are defined; the Stefan thermal problem solved, the heat of phase transitions is taken into account, and the possible strength of contact welding is determined; recommendations for reducing the contact collision rate due to the use of a liquid damper based on the Navies-Stokes equation and dynamics of the actuator are given; the model of heating and deformation of the contact surface was developed and on its basis recommendations were given regarding calculations of the required force of contact pressure and the geometry of the contacts in the conditions of thermal stability.

The original models of circuits connecting actuator coils to different sources of electric energy have been investigated and analyzed, and recommendations on their practical implementation have been given.

The results of the study were checked on layouts, prototypes and used in the development of vacuum circuit breakers, tests of which models were confirmed by the

obtained recommendations and conclusions.

Implementation of the main scientific and practical results of the dissertation work was reflected: in agreement with "ABM Ampere", Kremenchug (agreement No. 33/98-12 between NTU "KhPI" and "ABM Ampere" LLC) "Influence of the parameters of a bistable polarized vacuum actuator of the circuit breaker on its ability to switch on", research and development work performed by order of Ukrenergokompleksy-2 LLC, Kharkov "Bistable actuators in control plants and distribution of liquid flows", the acts of implementation are added.

Key words: vacuum circuit breaker, actuator, multihysical model, contact vibration, switching ability, thermal stability, coil connection circuits.

LIST OF PUBLICATIONS OF THE APPLICANT

1. Baida E.I. O proektirovanii bronevykh elektromagnitov postoiannogo toka na baze rascheta magnitnogo polia metodom konechnykh elementov/ E.I. Baida, B.V. Klimenko // Elektrotehnika i elektromekhanika. – Khar'kov: NTU “KhPI”, 2003. – №1. – P. 4 – 8.
2. Baida E.I. Raschet elektromagnitnykh sistem s poperechnym dvizheniem iakoria i ferromagnitnymi shuntami/ E.I. Baida, A.A. Chepeliuk // Elektrotehnika i elektromekhanika. – Khar'kov: NTU “KhPI”, 2003. – №3. – P. 7 – 11.
3. Baida E.I. Sravnitel'nyi raschet elektromagnitov postoiannogo toka/ E.I. Baida // Visnik Natsional'nogo tekhnichnogo universitetu “Kharkivs'kii politekhnichnii institut”. Zbirnik naukovikh prats'. Tematichnii vipusk: Problemi udoskonalennia elektrichnykh mashin i aparativ. Teoriia i praktika. – Kharkiv: NTU “KhPI”, 2003. – №11. – P. 8 – 13.
4. Baida E.I. Raschet dinamiki elektromagnita postoiannogo toka po dannym staticheskogo rascheta potokostsepleniiia i sily metodom konechnykh elementov/ E.I. Baida // Elektrotehnika i elektromekhanika. – Khar'kov: NTU “KhPI”, 2004. – №1. – P. 5 – 7.
5. Baida E.I. O termicheskom deistvii tokov korotkikh zamykanii v elektricheskikh setiakh srednikh napriazhenii, zashchishchaemykh vakuumnymi vykliuchateliami / E.I.Baida, B.V.Klimenko, A.M.Grechko, S.A. Boev // Elektrotehnika i elektromekhanika. – Khar'kov: NTU “KhPI”, 2007. – №1. – P. 30 – 33.
6. Baida E.I. Raschet perekhodnykh protsessov v elektromagnitnom mekhanizme na osnovanii uravnenii elektromagnitnogo polia / E.I.Baida // Elektrotehnika i elektromekhanika. – Khar'kov: NTU “KhPI”, 2008, – №5. – P. 39 – 43.
7. Baida E.I. Vliianie provodimosti materiala na dinamicheskie kharakteristiki elektromagnitnykh mekhanizmov postoiannogo toka / E.I.Baida // Elektrotehnika i

elektromekhanika. – Khar'kov: NTU “KhPI”, 2010. – №1. – P. 3 – 5.

8. Baida E.I. Modelirovanie dinamicheskikh kharakteristik elektromagnitnykh mekhanizmov postoiannogo toka s magnitnoi zashchelkoi/ E.I.Baida // Elektrotekhnika i elektromekhanika. – Khar'kov: NTU “KhPI”, 2010. – №2. – P. 3 – 5.

9. Baida E.I. Modelirovanie protsessa otkliucheniia elektromagnita postoiannogo toka s magnitnoi zashchelkoi/ E.I.Baida // Elektrotekhnika i elektromekhanika. – Khar'kov: NTU “KhPI”, 2010. – №3. – P. 6 – 9.

10. Baida E.I. Raschet dinamiki dvukhpozitsionnogo elektromagnita postoiannogo toka s magnitnoi zashchelkoi/ E.I.Baida // Elektrotekhnika i elektromekhanika. – Khar'kov: NTU “KhPI”, 2010. – №4. – P. 10 – 12.

11. Baida E.I. Vliianie formy napriazheniia istochnika pitaniia na dinamicheskie kharakteristiki elektromagnita postoiannogo tok/ E.I.Baida // Elektrotekhnika i elektromekhanika. – Khar'kov: NTU “KhPI”, 2010. – №5. – P. 3 – 4.

12. Baida E.I. Snizhenie energovydeleniia na poverkhnostiakh sil'notochnykh razryvnykh kontaktov pri kommutatsii/ E.I.Baida, O.G.Volkova, V.S.Lupikov // Visnik Natsional'nogo tekhnichnogo universitetu “Kharkivs'kii politekhnichnii institut”. – Kharkiv: NTU “KhPI”, 2011. – №12. – P. 26 – 35.

13. Baida E.I. Vliianie formy poperechnogo secheniia magnitoprovoda elektromagnita postoiannogo toka na ego bystrodeistvie/ E.I.Baida // Elektrotekhnika i elektromekhanika. – Khar'kov: NTU “KhPI”, 2011. – №3. P. 15 – 17.

14. Baida E.I. Vliianie dobavochnoho soprotivleniia na vremia troganiia dvukhpozitsionnogo elektromagnita s magnitnoi zashchelkoi vakuumnogo vykliuchatelya srednego napriazheniia/ E.I. Baida // Elektrotekhnika i elektromekhanika. – Khar'kov: NTU “KhPI”, 2011. – №4. – P. 13 – 15.

15. Baida E.I. Raschet staticheskoi deformatsii sil'fona vakuumnykh vykliuchatelei srednego napriazheniia/ E.I.Baida // Elektrotekhnika i elektromekhanika. – Khar'kov: NTU “KhPI”, 2011. – №6. – P. 15 – 16.

16. Baida E.I. Raschet dinamiki deformatsii sil'fona vakuumnykh vykliuchatelei

srednego napriazheniia/ E.I.Baida // Elektrotehnika i elektromekhanika. - Khar'kov: NTU “KhPI”, 2012. – №1. – P. 15 – 18.

17. Baida E.I. Teoreticheskii raschet sil svarivaniia kontaktov pri zamykanii ikh na avariinye sverkh'toki/ E.I.Baida // Elektrotehnika i elektromekhanika. - Khar'kov: NTU “KhPI”, 2012. – №3. – P. 11 – 13.

18. Baida E.I. Issledovanie vliianiia usiliia szhatiia na perekhodnoe soprotivlenie razryvnykh elektricheskikh kontaktov/ E.I.Baida, O.G.Volkova, V.S.Lupikov // Visnik Natsional'nogo tekhnichnogo universitetu “Kharkivs'kii politekhnichnii institut”. – Kharkiv: NTU “KhPI”, 2012. – №28. – P. 12 – 21.

19. Baida E.I. Matematicheskie modeli podkliucheniia bistabil'nykh poliarizovannykh aktuatorov k istochnikam energii/ E.I.Baida // Visnik Natsional'nogo tekhnichnogo universitetu “Kharkivs'kii politekhnichnii institut.” – Kharkiv: NTU “KhPI”, 2012. – №49. – P. 3– 8.

20. Baida E.I. Dinamika nechetkogo srbatyvaniia bistabil'nogo elektromagnitnogo aktuatora na baze vysokokoertsitivnykh postoiannykh magnitov/ E.I.Baida // Elektrotehnika i elektromekhanika. – Khar'kov: NTU “KhPI”, 2012. – №5. – P. 18 – 20.

21. Baida E.I. Matematicheskaia model' rascheta dinamiki dvukhpozitsionnykh elektromagnitnykh aktuatorov vakuumnykh vykliuchatelei srednego napriazheniia/ E.I.Baida // Zhurnal nauchnykh publikatsii aspirantov i doktorantov. – Kursk, 2013. – №1. – P. 136 – 141.

22. Baida E.I. Teoreticheskaia otsenka temperatury kontaktnoi poverkhnosti vakuumnogo vykliuchatel'ia srednikh napriazhenii pri protekanii po nim tokov korotkogo zamykaniia/ E.I.Baida // Zhurnal nauchnykh publikatsii aspirantov i doktorantov. – Kursk, 2013. – №3. – P. 174 – 179.

23. Baida E.I. Odin iz putei snizheniia skorosti dvizheniia kontaktov vakuumnykh vykliuchatelei / E.I.Baida // Elektriika, izd-vo «Nauka i tekhnologiiia». – Moskva, 2013. – №4. – P. 4 – 7.

24. Baida E.I. Vliianie magnitnoi pronitsaemosti i udel'nogo soprotivleniia magnetoproroda bistabil'nykh poliarizovanykh aktuatorov na vremia troganiia/ E.I.Baida // Elektrotehnika i elektromekhanika. – Khar'kov: NTU “KhPI”, 2013. – №3. – P. 18 – 20.

25. Baida E.I. Modelirovanie protsessa otkliucheniia monostabil'nogo elektromagnitnogo aktuatora s postoiannymi magnitami materialov/ E.I.Baida // Zhurnal nauchnykh publikatsii aspirantov i loktorantov. – Kursk, 2013. – №6. – P. 209 – 213.

26. Baida E. I. Influence of the form of the applied voltage on the switching parameters of a polarized bistable actuator / Russian Electrical Engineering. July 2013, Volume 84, Issue 7 Pages 353–356. [Scopus]

27. Baida E.I. Vliianie gidravlicheskogo dempfera na dinamiku dvukhpozitsionnogo poliarizovannogo aktuatora / E.I. Baida // Elektrotehnika i elektromekhanika. – Khar'kov: NTU “KhPI”, 2013. – №5. – S. 15 – 19.

28. Bayda, Ye. I. Characteristic of monostable actuator starting/ Ye. I. Bayda, , S.V. Vyrovets //Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. Issue 6, 2014, Pages 72 – 77. [Scopus]

29. Baida E. I. Peculiarities of calculation of magnetic systems with short-circuited secondary windings in in-plane formulation/ E. I. Baida //ELECTRICAL ENGINEERING & ELECTROMECHANICS. Issue 5. Pages: 18 – 22. Published: 2015. [Web of science]

30. Baida E. I. A refined mathematical model of multiphysics processes for magnetic pulse treatment of materials/ E. I. Baida // ELECTRICAL ENGINEERING & ELECTROMECHANICS. Issue 2. Pages: 41 – 47. Published: 2015. [Web of science]

31. Baida E. I. Investigation of mechanical stresses in the drive shaft of mv vacuum circuit breaker/ E. I. Baida, B. V. Klymenko // ELECTRICAL ENGINEERING & ELECTROMECHANICS. Issue 1. Pages: 10 – 15. Published: 2017. [Web of science]

	2
ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1	19
АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМИ	19
ВИБІР НАПРЯМКУ І ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕННЯ	19
1.1. Аналіз конструкцій вакуумних вимикачів середньої напруги	23
1.1.1. Вимикачі з пружинно-моторним і електромагнітним приводом, що використовують механічні защіпки.	24
1.1.2. Вимикачі з поляризованими бістабільними актуаторами	34
1.2. Вимоги, що пред'являються до конструкції електромагнітного приводу з поляризованими бістабільними актуаторами	39
1.3. Аналітичний огляд методів розрахунку динаміки вакуумних вимикачів	45
1.3.1. Огляд методів розрахунку динаміки бістабільних поляризованих актуаторів.	45
1.3.2. Огляд методів розрахунку на міцність сильфонів вакуумних дугогасильних камер і елементів конструкції вакуумного вимикача середніх напруг.	51
1.4. Висновки. Мета і задачі дослідження	54
РОЗДІЛ 2	
МОДЕЛЬ ПОЛЯРИЗОВАНОГО БІСТАБІЛЬНОГО АКТУАТОРА НА БАЗІ ВИСОКОКОЕРЦИТИВНИХ ПОСТІЙНИХ МАГНІТІВ,	
ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗРОБЛЕНОЇ МОДЕЛІ І	
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ	61
2.1. Вибір конструкції поляризованих бістабільних актуаторів і мультифізична модель динаміки	62
2.1.1. Вибір конструкції поляризованих бістабільних актуаторів.	62
2.1.2. Математична модель динаміки поляризованих бістабільних актуаторів.	64
2.2. Динаміка бістабільних поляризованих актуаторів	76

	3
2.2.1. Вхідні дані для розрахунку динаміки.....	79
2.2.2. Математична постановка задачі розрахунку динаміки.	87
2.3. Дослідження динаміки актуатора з двома зовнішніми якорями	88
2.3.1. Динаміка актуатора при розряді накопичувального конденсатора на котушку вмикання.....	91
2.3.2. Динаміка актуатора при одночасному підключенні його котушок до джерела постійної напруги і конденсатора.....	103
2.4. Бістабільний поляризований актуатор з внутрішнім якорем і визначення його параметрів на підставі статичних розрахунків	121
2.5. Динаміка бістабільного актуатора з внутрішнім якорем.....	129
2.5.1. Динаміка вмикання актуатора з внутрішнім якорем на мінімальну постійну напругу.	129
2.5.2. Динаміка вмикання актуатора при розряді на його котушки накопичувального конденсатора і вибір остаточних розрахункових варіантів.	132
2.5.3. Розрахунок динаміки відмикання бістабільного актуатора з внутрішнім якорем.	139
Наприкінці, наведені картини магнітного поля и вихрових струмів в розрахованому актуаторі.	144
2.5.4. Варіант несиметричної конструкції актуатора з внутрішнім якорем. ...	147
2.6. Експериментальна перевірка розрахункових даних по динаміці бістабільного актуатора з внутрішнім якорем.	150
2.6.1. Вмикання актуатора на випрямлену напругу.....	151
2.6.2. Вмикання актуатора на накопичувальний конденсатор.	153
2.6.3. Відключення актуатора при розряді на його котушки накопичувального конденсатора.	155
2.7. Висновки по другому розділу.....	156
РОЗДІЛ 3.....	

МУЛЬТИФІЗИЧНІ МОДЕЛІ МЕХАНІЧНИХ ПРОЦЕСІВ	
У СИЛЬФОННІ ВАКУУМНИХ КАМЕР І КОНТАКТНІЙ	
СИСТЕМІ ВИМИКАЧА З УРАХУВАННЯМ ДИНАМІКИ АКТУАТОРА	158
3.1. Мультифізична модель механічних процесів і розрахунок внутрішньої механічного напруження в сильфоні вакуумних камер вимикача в статичних і динамічних режимах. Визначення втомної витривалості.	159
3.1.1. Дослідження впливу геометрії сильфона на його внутрішні механічні напруження при статичній деформації і визначення остаточного варіанту конструкції.	164
3.1.2. Дослідження статичних деформацій і внутрішніх механічних напружень пропонованої конструкції сильфона.	172
3.1.3. Вплив динаміки актуатора на деформацію сильфона вакуумних камер вимикача.	176
3.1.4. Визначення втомної витривалості сильфона вакуумних камер.	185
3.2. Вплив динамічних характеристик актуатора на внутрішні механічні напруження в контактній системі вимикача.	186
3.2.1. Динамічні переміщення контакт-деталей вакуумного вимикача.	188
3.2.2. Динамічні напруження в контакт-деталях вакуумного вимикача.	193
3.3. Дослідження механічних напружень в приводному валу вимикача середніх напруг в функції статичних і динамічних характеристик розроблених актуаторів.	199
3.3.1. Вплив статичних зусиль актуатора на механічні напруги в приводному валу і підшипниках вимикача.	201
3.3.2. Вплив динамічних зусиль актуатора на механічні напруги в приводному валу і підшипниках вимикача.	204
3.4. Висновки до третього розділу	213
РОЗДІЛ 4.....	
МУЛЬТИФІЗИЧНІ МОДЕЛІ ПРОЦЕСІВ ЗДАТНОСТІ ДО ВМИКАННЯ І	

	5
ТЕРМІЧНОЇ СТІЙКОСТІ ВИКУУМНИХ ВИМИКАЧІВ СЕРЕДНІХ НАПРУГ З УРАХУВАННЯМ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК АКТУАТОРА	215
4.1. Математична модель вібрації контактної системи вакуумного вимикача ...	218
4.2. Математична модель динаміки плавлення контактної поверхні при вібрації контактів і визначення можливої сили зварювання контактів при вмиканні.....	225
4.3. Застосування гідравлічних демпферів для зменшення швидкості зіткнення контактів.....	242
4.4. Теоретична оцінка температури контактної поверхні при наскрізному струмі короткого замикання	251
4.5. Експериментальна перевірка параметрів вібрації контактів при вмиканні..	263
4.6. Висновки до четвертого розділу	266
РОЗДІЛ 5.....	
ІМІТАЦІЙНІ МОДЕЛІ ЕЛЕКТРИЧНИХ СХЕМ КЕРУВАННЯ	
БІСТАБІЛЬНИМИ АКТУАТОРАМИ	269
5.1. Аналіз наявних електричних схем подачі напруги на котушки бістабільного актуатора в процесі комутації електричного кола вакуумним вимикачем	270
5.1.1. Робота схеми при підключенні до постійної напруги.	272
5.1.2. Робота схеми при підключенні до накопичувального конденсатору	275
5.2. Математичні моделі досліджуваних електричних схем форсованого підключення котушок бістабільного поляризованого актуатора	276
5.2.1. Робота схема форсування при підключенні до постійної напруги.....	279
5.2.2. Робота схема форсування при підключенні до накопичувального конденсатора.....	282
5.2.3. Дослідження інверторної схеми форсованого вмикання котушок.....	284
5.3. Дослідження можливості зниження швидкості замикання контактів вакуумного вимикача в процесі його вмикання за рахунок зміни часової залежності напруги на котушках актуатора.....	295
5.4. Висновки до п'ятого розділу	301

	6
ВИСНОВКИ	303
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	310
ДОДАТОК А	342
ДОДАТОК Б.....	355
ДОДАТОК В	367
ДОДАТОК Г.....	373