

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Король Олена Геннадіївна

УДК 621.316+621.316.53

ДИСЕРТАЦІЯ
УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ ФОРСОВАНОГО КЕРУВАННЯ
ЕЛЕКТРОМАГНІТА ВАКУУМНОГО КОНТАКТОРА ЗА ДОПОМОГОЮ
ЕЛЕКТРОННОЇ СИСТЕМИ

05.09.01 – електричні машини й апарати

14 – електрична інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

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

*Ідентичність за вмістом
з першим примірником
дисертації засвідчую.
Учений секретар
спеціалізованої
вченої ради № 64.050.08*

Юрєва О.Ю.
27.08.20

О.Г. Король

Науковий керівник

Клименко Борис Володимирович

доктор технічних наук, професор

кафедри електричних апаратів НТУ «ХП»

Харків – 2020

АНОТАЦІЯ

Король О.Г. Удосконалення системи форсованого керування електромагніта вакуумного контактора за допомогою електронної системи. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.01 « Електричні машини й апарати» (14 – Електрична інженерія) – Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", м. Харків, 2020 р.

Дисертаційна робота присвячена удосконаленню системи форсованого керування моностабільного електромагніта вакуумного контактора низької напруги за допомогою електронної системи для підвищення надійності (безвідмовності) роботи і терміну служби пристрою при експлуатації та на удосконалення конструкцій газорозподільних клапанів ракет-носіїв в умовах форсованих режимів за рахунок обґрунтованих технічних рішень та рекомендацій.

Для досягнення зазначеної мети були поставлені задачі:

- провести огляд та аналіз конструкцій вакуумних контакторів низької напруги та їх систем форсованого керування з пусковими та утримуючими шунтовими обмотками;
- провести огляд та аналіз конструкцій газорозподільних клапанів ракет-носіїв;
- провести експериментальні дослідження процесів у базовому електромеханічному пристрої (системі) форсованого керування з пусковими та утримуючими шунтовими обмотками моностабільним електромагнітом вакуумного контактора;
- дослідити і удосконалити математичну модель динаміки форсованої електромагнітної системи вакуумних контакторів;

– дослідити і удосконалити математичну модель стаціонарного нагріву шунтових обмоток вакуумних контакторів;

– дослідити і удосконалити математичну модель форсованого нагріву шунтової обмотки газорозподільних клапанів ракет-носіїв;

– удосконалити пристрій для форсованого керування з пусковими та утримуючими шунтовими обмотками моностабільним електромагнітом вакуумного контактора та провести експериментальні дослідження процесів в ньому.

Об'єкт дослідження – електромагнітні, теплові стаціонарні і нестаціонарні процеси у колах шунтових обмоток моностабільних електромагнітів та колах пристрою форсованого керування цими обмотками.

Предмет дослідження – пристрій для форсованого керування моностабільним електромагнітом вакуумними контакторами; моностабільний електромагніт газорозподільних клапанів ракет-носіїв.

Методи дослідження. Комп'ютерне математичне моделювання перехідних електромагнітних механічних та теплових процесів у моностабільному електромагніті вакуумних контакторів та в шунтових обмотках газорозподільних клапанів ракет-носіїв з урахуванням особливостей їх роботи проводиться із застосуванням математичного пакету Maple, що дозволяє прискорити процес моделювання, виконувати громіздкі перетворення та отримати результати комп'ютерного моделювання в зручній табличній і / або графічній формі. Чисельне розв'язання диференційних рівнянь в часткових похідних проводиться у програмах, написаних здобувачем, результати яких були перевірені експериментально.

В роботі отримані такі наукові результати.

У дисертаційній роботі вирішено науково-практичну задачу з удосконалення системи форсованого керування моностабільного електромагніта вакуумного контактора низької напруги за допомогою електронної системи для підвищення надійності (безвідмовності) роботи і

терміну служби пристрою при експлуатації та на удосконалення конструкцій газорозподільних клапанів ракет-носіїв в умовах форсованих режимів за рахунок обґрунтованих технічних рішень та рекомендацій.

Проведено аналіз існуючих конструкцій вакуумних контакторів низьких напруг. Виявлено, що для зменшення їхніх розмірів, споживаної потужності, й для підвищення швидкодії та надійності у контакторах застосовують системи форсованого керування з пусковими та утримуючими шунтовими обмотками, а також ряд недоліків таких систем керування.

Досліджена та проаналізована найбільш поширена (базова) система форсованого керування з пусковими та утримуючими шунтовими обмотками вакуумними контакторами за умови живлення від різних джерел електричної енергії, а також надано рекомендації щодо удосконалення цієї системи з метою усунення недоліків, які виникають під час роботи.

Удосконалено математичну модель динаміки електромагніта у складі системи форсованого керування вакуумними контакторами, яка представляє собою систему диференціальних рівнянь для нестационарних процесів у механічній системі, а також у магнітному та електричному колах форсованої електромагнітної системи. Застосування моделі дозволило враховувати взаємодію електромагніта з пристроєм керування під час спрацьовування вакуумного контактора, визначити необхідні параметри системи, встановити взаємозв'язок і вплив параметрів приводу та актуатора на динамічні характеристики системи, встановити час спрацьовування електромагніта та інтервал часу роботи таймера.

Науково обґрунтовано характер протікання динамічних процесів у форсованій електромагнітній системі під час спрацьовування вакуумного контактора, що дало можливість підвищити ефективність його роботи.

Удосконалено математичну модель стаціонарного нагріву шунтових обмоток електромагнітів в складних системах форсованого керування вакуумними контакторами. Вона враховує особливості теплообміну між

обмотками, теплопередачі від обмоток в магнітопровід і навколишнє середовище з урахуванням пульсацій струмів, та інших особливостей роботи електромагнітів в форсованих електромагнітних системах.

Розроблено алгоритм розрахунку стаціонарного нагріву шунтових обмоток електромагнітів, що працюють в форсованих електромагнітних системах вакуумних контакторів.

Удосконалено математичну модель і алгоритм розрахунку форсованого нагріву шунтової обмотки електромагнітів постійного струму газорозподільних клапанів ракет-носіїв та проаналізовано значні перепади температур в обмотці та вплив на нагрів об'єктів, що оточують обмотку.

Досліджена та проаналізована удосконалена напівпровідникова система форсованого керування з пусковими та утримуючими шунтовими обмотками вакуумними контакторами за умови живлення від різних джерел електричної енергії, а також надано рекомендації щодо практичної реалізації цієї системи.

Результати дослідження були апробовані на макетах та дослідних зразках, які підтвердили отримані рекомендації та висновки і в подальшому використовувались при розробці вакуумних контакторів КВТн-250/1.14 НВП «Електродинаміка» з напівпровідниковим пристроєм форсованого керування моностабільним електромагнітом.

Матеріали дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі НТУ "ХП" в дисципліні "Електричні апарати" для студентів спеціальності "141 – електроенергетика, електротехніка та електромеханіка" (спеціалізації 141.07 "Електричні апарати" та 141.08 "Електропобутова техніка"), курсових проектах, дипломному проектуванні та науково-дослідних роботах, що проводяться на кафедрі електричних апаратів.

Дисертаційна робота виконана на кафедрі електричних апаратів в рамках договору з ТОВ "АВМ Ампер", м. Кременчук, про науково-технічне співробітництво та наукове консультування за темою "Удосконалення вакуумних комутаційних апаратів" (№ 33/227-2019), а також ініціативної

науково-дослідної роботи Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" К3301 "Удосконалення вакуумних комутаційних апаратів" (ДР №0119U002552), де здобувач була виконавцем окремих розділів.

Ключові слова: вакуумний контактор, форсована електромагнітна система, електромагніт постійного струму, система форсованого керування, газорозподільний клапан, шунтові обмотки, форсований нагрів, динаміка електромагнітів.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

1. Король Е. Г. Анализ методов моделирования магнитных характеристик электромагнитов для компенсации магнитного поля электрооборудования / Е.Г. Король // Електротехніка і електромеханіка. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2007. – №2. – С. 31-34.

2. Король Е. Г. Анализ методов моделирования петли гистерезиса ферромагнитных материалов / Е.Г. Король // Електротехніка і електромеханіка. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2007. – №6. – С. 44-47.

3. Король Е. Г. Метод определения параметров петли гистерезиса по экспериментальным данным / Е. Г. Король, В. С. Лупиков // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ". – 2008. – № 25. – С. 47-53.

4. Bajda, Ye.I., Klymenko, V.V., Pantelyat, M.G., Korol, O.G. and Yelanskyi, Yu.A. (2018): Peculiarities of calculating forced electromagnets shunt windings heating in transient modes. Proceedings of the 18th International IGTE Symposium on Numerical Field Calculation in Electrical Engineering, Graz, Austria, September 16-19, 2018, p. 31-36.

5. Король О. Г. Дослідження перехідних процесів в пристрої форсованого керування моностабільним електромагнітом вакуумного контактора / О. Г.

Король, Б. В. Клименко, О. В. Єресько // Вісник НТУ "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ". – 2018. – № 32 (1308). – С. 34-40.

6. Король О. Г. Дослідження перехідних процесів в новому напівпровідниковому пристрої форсованого керування моностабільним електромагнітом вакуумного контактора / О. Г. Король, Б. В. Клименко, О. В. Єресько // Вісник НТУ "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ". – 2019. – № 1. – С. 18-24.

7. Король О.Г. Новий напівпровідниковий пристрій форсованого керування моностабільним електромагнітом вакуумного контактора / О.Г. Король, Б.В. Клименко, О.В. Єресько // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей ХХVII міжн. наук.-практична конф. (MicroCAD-2019), 15-17 травня: тези доп. / Харків: НТУ «ХПІ». – 2019. – С. 87.

8. Ye.I. Baida, M. Clemens, V.V. Klymenko, O.G. Korol, P.Ye. Pustovoitov Application of the computing environment maple to the calculation of the dynamics of the electromagnets in the complicated systems of forced control. – «Електротехніка і Електромеханіка». – 2019, №3. – С. 18 – 23. doi: 10.20998/2074-272X.2019.3.03.

9. Ye.I. Baida, M. Clemens, V.V. Klymenko, O.G. Korol, M.G. Pantelyat, P.Ye. Pustovoitov Peculiarities of calculating stationary heating of windings operating in complex forced control systems. – «Електротехніка і Електромеханіка». – 2019, №5. – С. 12 – 19. doi: 10.20998/2074-272X.2019.5.02.

10. Пат. 131531 Україна, МПК Н01F 7/18 (2006.01), Н01F 7/06 (2006.01), Н01Н 33/38 (2006.01). Пристрій для форсованого керування моностабільним електромагнітом / Бугайчук В.М., Клименко Б.В., Єресько О.В., Король О.Г.– № u201805507; заявл. 18.05.2018; опубл. 25.01.2019, Бюл. № 2.

ABSTRACT

Korol O.G. Improvement of the forced control system of the electromagnet of the vacuum contactor using an electronic system. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences in specialty 05.09.01 "Electric Machines and Apparatus" (14 – Electrical Engineering) – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, 2020.

The dissertation is devoted to the improvement of the forced control system of the low voltage vacuum contactor monostable electromagnet with the help of the electronic system in particular regarding increase of the reliability (failure-free operation) and service life of the device, and also improvement of the designs of the gas distribution valves of launch vehicles in the conditions of the forced modes due to the proved technical solutions and recommendations. To achieve this goal the following tasks are set:

- to review and analyze the designs of low voltage vacuum contactors and their forced control systems with starting and holding shunt windings;
- to review and analyze the designs of gas distribution valves of launch vehicles;
- to conduct experimental studies of processes in the basic electromechanical device (system) of forced control with starting and holding shunt windings for a monostable electromagnet of a vacuum contactor;
- to investigate and improve the mathematical model of the dynamics of the forced electromagnetic system of vacuum contactors;
- to investigate and improve the mathematical model of stationary heating of shunt windings of vacuum contactors;
- to investigate and improve the mathematical model of forced heating of the shunt winding of the gas distribution valves of launch vehicles;
- to improve the device for forced control with starting and holding shunt windings for a monostable electromagnet of a vacuum contactor and to carry out experimental investigations of processes in it.

The object of research – electromagnetic, thermal stationary and transient processes in the circuits of shunt windings of monostable electromagnets and circuits of the device of forced control of these windings.

The subject of research – a device for forced control of a monostable electromagnet of vacuum contactors; monostable solenoid of gas distribution valves of launch vehicles.

Research methods. Computer mathematical modelling of transient electromagnetic mechanical and thermal processes in a monostable electromagnet of vacuum contactors and in shunt windings of gas distribution valves of launch vehicles taking into account the peculiarities of their operation is performed using the mathematical computer code Maple which allows to speed up the simulation process, perform cumbersome transformations and obtain computer simulation results in a convenient tabular and/or graphical form.. Numerical solution of partial differential equations is performed using codes written by the applicant, the results of which have been validated experimentally.

The following scientific results are obtained in the work.

In the dissertation work the scientific and practical problem on improvement of system of forced control of a monostable electromagnet of a low voltage vacuum contactor using an electronic system in particular on increase of reliability (failure-free operation) and service life of the device, and also improvement of designs of the gas distribution valves of launch vehicles in the conditions of the forced modes due to the proved technical solutions and recommendations is solved.

The analysis of existing designs of low voltage vacuum contactors is carried out. It was found that to reduce their size and power consumption, as well as to increase the speed and reliability of the contactors, forced control systems with starting and holding shunt windings are used. A number of shortcomings of such control systems have been identified.

The most widespread (basic) system of forced control with starting and holding shunt windings for vacuum contactors at power supply from various sources of electric power is investigated and analyzed, recommendations on its improvement for

elimination of shortcomings which arise during operation are given.

The mathematical model of electromagnet dynamics as a part of the system of forced control of vacuum contactors is improved, which is a system of differential equations for transient processes in the mechanical system, as well as in the magnetic and electrical circuits of the forced electromagnetic system. The application of the model allowed to take into account the interaction of the electromagnet with the control device during the operation of the vacuum contactor, to determine the necessary system parameters, to establish the relationship and influence of drive and actuator parameters on the dynamic characteristics of the system, to determine the duration of operation of the electromagnet and the operation time interval of the timer.

The nature of the dynamic processes in the forced electromagnetic system during the operation of the vacuum contactor is scientifically substantiated, which made it possible to increase the efficiency of its operation.

A mathematical model of stationary heating of shunt windings of electromagnets in complex systems of forced control of vacuum contactors is improved. It takes into account the peculiarities of heat exchange between the windings, heat transfer from the windings to the magnetic circuit and the environment, taking into account the pulsations of currents and other features of electromagnets operation in forced electromagnetic systems.

An algorithm for calculating the stationary heating of shunt windings of electromagnets operating in forced electromagnetic systems of vacuum contactors has been developed.

The mathematical model and algorithm for calculating the forced heating of the shunt winding of the DC electromagnets of the gas distribution valves of launch vehicles are improved and significant temperature differences in the winding and the effect on the heating of objects surrounding the winding are analyzed.

The improved semiconductor system of forced control with starting and holding shunt windings for vacuum contactors at power supply from various sources of electric power is investigated and analyzed, recommendations concerning its

practical realization are given.

The results of investigations are tested on models and prototypes that confirmed the recommendations and conclusions and are used in the development of vacuum contactors KVTn-250/1,14 of Research and Production Enterprise "Electrodynamics" with a semiconductor device for forced control of a monostable electromagnet.

The materials of the dissertation are used in the educational process of NTU "KhPI" in the discipline "Electrical Apparatus" for students of specialty "141 – Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics" (specializations "141.07 Electrical Apparatus" and "141.08 Electrical Household Appliances"), course projects, diploma theses and research work conducted at the Department of Electrical Apparatus.

The dissertation has been performed at the Department of Electrical Devices under the agreement with "ABM Ampere" LLC, Kremenchuk on scientific and technical cooperation and scientific advising on the subject "Improvement of vacuum switching devices" (No. 33/227-2019) where the applicant was the executor of certain sections; initiative research work of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" K3301 "Improvement of vacuum switching devices" (State registration No. 0119U002552) where the applicant was the executor of certain sections.

Key words: vacuum contactor, forced electromagnetic system, DC electromagnet, forced control system, gas distribution valve, shunt windings, forced heating, dynamics of electromagnets.

LIST OF PUBLICATIONS OF THE APPLICANT

1. Korol Ye. G. Analiz metodov modelirovaniya magnitnykh harakteristik elektromagnetov dlya kompensatsii magnitnogo polya elektrooborudovaniya / Ye.G. Korol // Elektrotehnika I elektromekhanika. – Kharkiv: NTU " KhPI ". – 2007. – №2. – S. 31-34.
2. Korol Ye. G. Analiz metodov modelirovaniya petly hysterezya ferromagnitnykh materialov / Ye.G. Korol // Elektrotehnika i elektromekhanika. – Kharkiv: NTU "KHPI". – 2007. – №6. – S. 44-47.
3. Korol Ye. G. Metod opredeleniya parametrov petly hysterezya po eksperimentalnym dannym / Ye.G. Korol, V. S. Lupykov // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "KHPI". – Kharkiv: NTU " KhPI ". – 2008. – № 25. – S. 47-53.
4. Bajda, Ye.I., Klymenko, B.V., Pantelyat, M.G., Korol, O.G. and Yelanskyi, Yu.A. (2018): Peculiarities of calculating forced electromagnets shunt windings heating in transient modes. Proceedings of the 18th International IGTE Symposium on Numerical Field Calculation in Electrical Engineering, Graz, Austria, September 16-19, 2018, p. 31-36.
5. Korol O. G. Doslidzhennia perekhidnykh protsesiv v prystroi forsovanoho keruvannia monostabilnym elektromagnitom vakuumnoho kontaktora / O. G. Korol, B. V. Klymenko, O. V. Eresko // Visnyk NTU "KhPI". – Kharkiv: NTU "KhPI". – 2018. – № 32 (1308). – S. 34-40.
6. Korol O. G. Doslidzhennia perekhidnykh protsesiv v novomu napivprovidnykovomu prystroi forsovanoho keruvannia monostabilnym elektromagnitom vakuumnoho kontaktora / O. G. Korol, B. V. Klymenko, O. V. Yeresko // Visnyk NTU "KhPI". – Kharkiv: NTU "KhPI". – 2019. – № 1. – S. 18-24.
7. Korol O. G. Novyi napivprovidnykovyi prystrii forsovanoho keruvannia monostabilnym elektromagnitom vakuumnoho kontaktora / O. G. Korol, B.V. Klymenko, O.V. Yeresko // Informatsiini tekhnolohii: nauka, tekhnika, tekhnolohiia, osvita, zdorovia: tezy dopovidei KhXVII mizhn. nauk.-praktychna

konf. (MicroCAD-2019), 15-17 travnia: tezy dop. / Kharkiv: NTU «KhPI». – 2019. – S. 87.

8. Ye.I. Baida, M. Clemens, B.V. Klymenko, O.G. Korol, P.Ye. Pustovoitov Application of the computing environment maple to the calculation of the dynamics of the electromagnets in the complicated systems of forced control. – «Електротехніка і Електромеханіка». – 2019, №3. – С. 18 – 23. doi: 10.20998/2074-272X.2019.3.03.

9. Ye.I. Baida, M. Clemens, B.V. Klymenko, O.G. Korol, M.G. Pantelyat, P.Ye. Pustovoitov Peculiarities of calculating stationary heating of windings operating in complex forced control systems. – «Електротехніка і Електромеханіка». – 2019, №5. – С. 12 – 19. doi: 10.20998/2074-272X.2019.5.02.

10. Pat. 131531 Ukraina, MPK H01F 7/18 (2006.01), H01F 7/06 (2006.01), H01H 33/38 (2006.01). Prystrii dlia forsovanoho keruvannia monostabilnym elektromahnitom / Buhaichuk V.M., Klymenko B.V., Yeresko O.V., Korol O.G. – № u201805507; zaiavl. 18.05.2018; opubl. 25.01.2019, Biul. № 2.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМИ І ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	17
1.1. Загальні положення.....	17
1.2. Огляд та аналіз існуючих конструкцій вакуумних контакторів низької напруги різних виробників	18
1.3. Огляд систем форсованого керування з пусковими та утримуючими обмотками вакуумних контакторів	34
1.4. Огляд конструкцій газорозподільних клапанів ракет-носіїв.....	38
1.5. Огляд методів розрахунку динаміки електромагнітів	41
1.6. Огляд методів апроксимації кривої намагнічування та петлі гістерезису	44
1.7. Опис методів розрахунку нагрівання шунтових обмоток	47
1.8. Висновки за першим розділом.....	49
1.9. Постановка задач для дослідження.....	52
РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМ ФОРСОВАНОГО КЕРУВАННЯ МОНОСТАБІЛЬНИМ ЕЛЕКТРОМАГНІТОМ ВАКУУМНИХ КОНТАКТОРІВ.....	54
2.1. Електромеханічна системи форсованого керування моностабільним електромагнітом вакуумного контактора КВТн-250/1,14 науково-виробничого підприємства «Електродинаміка».....	54
2.2. Досліджуваний вакуумний контактор КВТн-250/1,14 науково-виробничого підприємства «Електродинаміка».....	56
2.3. Результати досліджень динаміки спрацьовування в електромеханічній системі форсованого керування моностабільним електромагнітом контактора КВТн-250/1,14	63
2.4. Аналіз результатів досліджень динаміки спрацьовування в електромеханічній системі форсованого керування моностабільним електромагнітом контактора КВТн-250/1,14	69

2.5. Удосконалена напівпровідникова система форсованого керування моностабільним електромагнітом вакуумного контактора КВТн-250/1,14.....	70
2.6. Висновки за другим розділом.....	76
РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНОК ДИНАМІКИ ФОРСОВАНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТІВ У СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ВАКУУМНИХ КОНТАКТОРІВ.....	
3.1. Загальні положення.....	78
3.2. Математична модель динаміки форсованої електромагнітної системи.....	79
3.2.1. Нестационарні процеси в механічній системі комутаційного апарата.....	80
3.2.2. Нестационарні процеси у магнітному колі форсованої електромагнітної системи.....	85
3.2.3. Нестационарні процеси у електричному колі форсованої електромагнітної системи.....	90
3.3. Алгоритм розрахунку динаміки форсованих електромагнітів у системах керування вакуумних контакторів	95
3.4. Результати розрахунку динаміки форсованих електромагнітів у системах керування вакуумних контакторів	102
3.5. Висновки за третім розділом	110
РОЗДІЛ 4. ОСОБЛИВОСТІ РОЗРАХУНКУ НАГРІВАННЯ ОБМОТОК ЕЛЕКТРОМАГНІТІВ, ЩО ПРАЦЮЮТЬ У ФОРСОВАНИХ РЕЖИМАХ	
4.1. Загальні положення.....	112
4.2. Особливості розрахунку стаціонарного нагріву шунтових обмоток працюючих у системах форсованого керування вакуумних контакторів	113
4.2.1. Геометрична модель форсованого електромагніта	115
4.2.2. Методика визначення коефіцієнтів тепловіддачі	119

4.2.3. Методика розрахунку еквівалентних коефіцієнтів теплопровідності пускової і утримуючої обмоток	121
4.2.4. Диференційні рівняння для розрахунку стаціонарного поля температур в електромагніті та густина джерел тепла	123
4.2.5. Система рівнянь в одновимірній постановці задачі розрахунку температурного поля	127
4.2.6. Розрахунок розподілу перевищень температури, виходячи з умов однозначності рішення	128
4.2.7. Процедура обчислення середньоквадратичних значень струмів в обмотках і втрат у магнітопроводі	131
4.2.8. Алгоритм ітераційного розрахунку розподілу температури в обмотках форсованих електромагнітів	136
4.2.9. Результати розрахунку стаціонарного нагріву обмоток працюючих у системах форсованого керування.....	139
4.3. Нагрівання шунтової обмотки газорозподільних клапанів ракет-носіїв в перехідних режимах.....	141
4.3.1. Опис методики теплового розрахунку електромагніта в нестационарному режимі.....	142
4.3.2. Результати теплових розрахунків газорозподільного клапану.....	149
4.4. Висновки за четвертим розділом.....	157
РОЗДІЛ 5. ДОСЛІДЖЕННЯ УДОСКОНАЛЕНОЇ НАПІВПРОВІДНИКОВОЇ СИСТЕМИ ФОРСОВАНОГО КЕРУВАННЯ МОНОСТАБІЛЬНИМ ЕЛЕКТРОМАГНІТОМ ВАКУУМНИХ КОНТАКТОРІВ.....	159
5.1. Удосконалений напівпровідниковий пристрій форсованого керування	159
5.2. Результати досліджень динаміки спрацьовування в напівпровідниковій системі форсованого керування моностабільним електромагнітом досліджуваного контактора КВТн-250/1,14.....	161

5.3. Аналіз результатів досліджень динаміки спрацьовування в удосконаленому напівпровідниковому пристрої форсованого керування моностабільним електромагнітом контактора	167
5.4. Висновки за п'ятим розділом.....	169
ВИСНОВКИ.....	171
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	174
ДОДАТОК А – Акти впровадження	190
ДОДАТОК Б – Патент на корисну модель	196
ДОДАТОК В – Лістинг програми з розрахунку динаміки форсованих електромагнітів вакуумних контакторів	203
ДОДАТОК Г – Лістинг програми з розрахунку стаціонарного нагріву обмоток працюючих у складних системах форсованого керування	221
ДОДАТОК Д – Список публікацій здобувача.....	229