ІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна

Кафедра Інтелектуальні системи електропостачання

«ДО ЗАХИСТУ»

В.о. завідувача кафедри
_____ /Д. О. Босий/

«_____» _____ 20____р.

ДИПЛОМНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня «магістр»

Галузь знань **14 Електрична інженерія**

Спеціальність **141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка**

Освітньо-професійна програма **Електротехнічні системи електроспоживання**

Тема **Удосконалення електричних розрахунків для визначення нагріву елементів струмоприймача**

Theme **Improvement of electrical calculations to determine the heating of the elements of the pantograph**

Керівник дипломної роботи доц. _____ А. В. Антонов

Нормоконтролер доц. _____ Т. М. Міщенко

Студент групи ЕС1926 _____ А. В. Зіненко

Student Zinenko Anatolii

Дніпро – 2020

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Дніпровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна
Факультет «Управління енергетичними процесами»
Кафедра «Інтелектуальні системи електропостачання»
Галузь 14 Електрична інженерія
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Спеціалізація Електротехнічні системи електроспоживання

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
В.О. завідувача кафедри
_____ Сиченко В.Г.
(підпис)
«20» січня 2020р.

ЗАВДАННЯ

до дипломної роботи на здобуття ОС магістр
(освітньо-кваліфікаційний рівень)

студента групи ЕС1926 Зіненко А.В.
(номер групи) (ПІБ)

1 Тема дипломної роботи: «Удосконалення електричних розрахунків для визначення нагріву елементів струмоприймача»

затверджена наказом по університету від «17» січня 2020 р. № 53ст.

2 Термін подання студентом закінченої роботи «7» грудня 2020р.

3 Вихідні дані до дипломного проекту (роботи): нормативна документація на струмоприймачі, Правила улаштування та технічного обслуговування контактної мережі електрифікованих залізниць

4 Зміст пояснювальної записки (перелік питань до розробки): струмознімання на електрифікованих залізницях, дослідження теплових процесів та удосконалення методики теплового розрахунку елементів струмоприймачів

5 Перелік креслень (демонстраційного матеріалу): ілюстрований опис результатів досліджень.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва розділу	Термін виконання	Обсяг розділу, %
ВСТУП	23.09	5
ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУМОЗНІМАННЯ НА ЕЛЕКТРИФІКОВАНИХ ЗАЛІЗНИЦЯХ	15.10	25
УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДИКИ ТЕПЛОВОГО РОЗРАХУНКУ ЕЛЕМЕНТІВ СТРУМОПРИЙМАЧІВ	11.11	30
МОДЕЛЮВАННЯ НАГРІВУ СТРУМОПРИЙМАЧА	25.11	30
ВИСНОВКИ	04.12	5
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	07.12	5

Дата видачі завдання: «17» вересня 2020 р.

Керівник дипломної роботи _____ к.т.н., доц. Антонов А.В.
(підпис) (ПІБ)

Завдання прийняв до виконання _____ Зіненко А.В.
(підпис) (ПІБ

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка має обсяг 60 сторінок, складається з 3 розділів та містить 25 ілюстрацій, 6 таблиць, 38 бібліографічних джерел.

Мета роботи – Розробка температурної моделі струмоприймача.

Сучасні умови експлуатації і проектування пристроїв струмознімання представляють дедалі жорсткіші вимоги до оцінки температур струмоприймачів в нестандартних режимах роботи. Причиною цього є розширення спектру експлуатаційних режимів, зростання питомих навантажень.

Зниження оцінки теплових навантажень призводить до підвищеної пошкоджуваності пристроїв струмознімання та елементів системи електропостачання, скорочення їх терміну служби, внаслідок незворотних температурних властивостей і характеристик ізоляційних, провідникових і конструктивних матеріалів.

Підвищення перетину основних елементів пристроїв струмознімання, призводить до того, що струмоприймач володіє збільшеною масою, має гірші динамічні характеристики і працює в енергетично невигідному режимі. Така ситуація характерна для роботи струмоприймачів постійного і змінного струмів. Зазначені обставини вимагають наявності достовірних методик розрахунку теплових процесів пристроїв струмознімання, що включають в себе питання створення математичної моделі, ідентифікації її параметрів, побудови спеціалізованих чисельних методів розрахунку.

Ключові слова: ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТ; СТРУМОПРИЙМАЧ; ТЕМПЕРАТУРА; МОДЕЛЮВАННЯ.

ЗМІСТ

ВСТУП.. 6
1 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВАЮЧИХ ФАКТОРІВ НА РОБОТУ СТРУМОПРИЙМАЧІВ..... 9
1.1 Основні впливаючі параметри 9
1.2 Особливості роботи струмоприймачів 10
1.3 Аналіз напрямків вдосконалення струмоприймачів..... 20
2 УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДИКИ ТЕПЛОВОГО РОЗРАХУНКУ ЕЛЕМЕНТІВ СТРУМОПРИЙМАЧІВ..... 25
2.1 Особливості розрахунку змінних електричних опорів верхнього вузла струмоприймача..... 25
2.2 Пропонована послідовність теплового розрахунку асиметричного струмоприймача..... 29
2.3 Розрахунок значень елементарних струмів струмоприймача за допомогою пропонованої методики 31
3 МОДЕЛЮВАННЯ НАГРІВУ СТРУМОПРИЙМАЧА..... 39
3.1 Результати розрахунку температур елементів струмоприймача 41
3.2 Узагальнення та уточнення електричної схеми заміщення струмоприймача .. 44
ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ 55
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 56

ВСТУП

Забезпечення електрорухомого складу якісним струмозніманням є одним з найскладніших завдань в системі електропостачання. Забезпечення надійної взаємодії рухомого струмоприймача і контактної підвіски є більш складним технічним завданням, ніж забезпечення надійної взаємодії рухомого екіпажу з рейками. Рівень надійності роботи електрифікованих залізницях напряму залежить від безвідмовності та довговічності окремих об'єктів системи електропостачання та локомотивного господарства, а якість процесу струмознімання від конструктивного виконання контактних підвісок та струмоприймачів, матеріалів з яких вони виконані та зовнішніх впливаючих факторів.

Вагоме значення в забезпеченні якісного струмознімання займає врахування параметрів усіх елементів, які задіяні в передачі тягового струму від контактної підвіски до електродвигунів. Найважливішим елементом в цьому ланцюзі є струмоприймач. Від стану його струмопровідних елементів, конструктивних особливостей самого споживача залежить якість струмознімання і всі показники роботи електрорухомого складу.

Актуальність роботи. Сучасні умови експлуатації і проектування пристроїв струмознімання представляють дедалі жорсткіші вимоги до оцінки температур струмоприймачів в нестандартних режимах роботи. Причиною цього є розширення спектру експлуатаційних режимів, зростання питомих навантажень.

Зниження оцінки теплових навантажень призводить до підвищеної пошкоджуваності пристроїв струмознімання та елементів системи електропостачання, скорочення їх терміну служби, внаслідок незворотних температурних властивостей і характеристик ізоляційних, провідникових і конструктивних матеріалів.

Підвищення перетину основних елементів пристроїв струмознімання, призводить до того, що струмоприймач володіє збільшеною масою, має гірші динамічні характеристики і працює в енергетично невигідному режимі. Така ситуація характерна для роботи струмоприймачів постійного і змінного струмів. Зазначені обставини вимагають наявності достовірних методик розрахунку теплових процесів пристроїв струмознімання, що включають в себе питання створення математичної моделі, ідентифікації її параметрів, побудови спеціалізованих чисельних методів розрахунку.

Зв'язок роботи з науковими програмами. Робота відповідає науковим напрямам роботи кафедри «Інтелектуальні системи електропостачання» Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.

Мета і завдання роботи. Розробка температурної моделі струмоприймача.

Відповідно до поставленої мети в роботі вирішені наступні завдання:

- аналіз конструктивних особливостей струмоприймачів;

- дослідження впливаючих факторів на нагрів елементів струмоприймача;

- розробка методики моделювання процесів нагріву струмоприймача.

Об'єкт дослідження – струмоприймач електрифікованого залізничного транспорту.

Предмет дослідження – нагрів струмоприймача електрифікованого транспорту.

Методи дослідження – в основу роботи покладені теоретичні та емпіричні методи дослідження.

Наукова новизна та основні положення, які виносяться на захист.

Розроблено модель нагріву елементів струмоприймача електрорухомого складу, яка відрізняється від існуючих можливістю

врахування параметрів сукупності елементів струмоприймача при різних навантажувальних характеристиках.

Практичне значення отриманих результатів:

Отримані в роботі результати дозволяють більш точно визначати напрямки удосконалення конструкції струмоприймачів з точки зору їх навантажувальної здатності та опосередковано впливати на зменшення пошкоджень контактної мережі в ході експлуатації зі споживанням великих струмів.

Особистий внесок здобувача. Постановку мети та завдань дослідження виконано спільно з науковим керівником. Основні наукові положення, теоретичні та експериментальні дослідження отримані здобувачем самостійно.

Апробація результатів магістерської роботи. Основні положення роботи і результати досліджень доповідалися здобувачем і обговорювалися на Міжнародній студентській науковій конференції «Перспективні галузі наукових досліджень: динаміка та тренди», м. Суми, 16.10.2020.

Публікації

Нікітенко Д. Є., Зіненко А. В., Кожушняк К. В. Підвищення надійності функціонування елементів системи електропостачання електричного транспорту. Міжнародна студентська наукова конференція «Перспективні галузі наукових досліджень: динаміка та тренди» м. Суми, 16.10.2020. с. 88 – 89.

1. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВАЮЧИХ ФАКТОРІВ НА РОБОТУ СТРУМОПРИЙМАЧІВ

Актуальність проблеми струмознімання на електрифікованих залізницях визначається рядом обставин [1]:

- реалізацією швидкостей руху електрорухомого складу понад 160 км/год;

- значним підвищенням потужності електровозів та електропоїздів;

- підвищення вимог за надійністю, безпекою, екологічністю струмознімання;

- актуалізацією проблем інтероперабельності.

Результати робіт [2…4] свідчать про те, що найбільш раціональним шляхом забезпечення якісного струмознімання для швидкостей руху до 220 км/год є застосування сучасних струмоприймачів, а також поглиблене дослідження процесів струмознімання, при цьому, якість монтажу нових та регулювання уже експлуатованих контактних підвісок повинно бути на відповідно високому рівні. Невідповідність контактних підвісок та струмоприймачів умовам експлуатації призведе до появи незадовільного струмознімання, перепалів контактних проводів, пошкоджень струмоприймачів, аварійним зупинкам електрорухомого складу, і відповідно, до значних економічних витрат.

1.1 Основні впливаючі параметри

Проведений аналіз літературних джерел [5…9] визначає сукупність критеріїв якості струмознімання та вимоги до взаємодії контактних підвісок і струмоприймачів.

До основних критеріїв якості струмознімання відносяться: величина зношування контактного проводу та накладок струмоприймача, відриви струмоприймача, розмах коливань полозу, контактний натиск, коефіцієнт нерівномірності натиску.

Основною частиною витрат, зв’язаних з процесом струмознімання, на утримання контактної мережі та струмоприймачів являються витрати на заміну контактних проводів та струмознімальних елементів струмоприймачів. Інтенсивність зношування контактуючих елементів знаходиться в певній залежності від контактного натиску. Ці залежності від конкретних умов взаємодії контактної підвіски зі струмоприймачем можна представити кривою, що приведена на рис. [8].

Мінімум кривої визначає оптимальне значення контактного натиску, яке забезпечує найменше зношування контактуючих елементів. Також, для отримання якісної оцінки струмознімання, при зрівнянні різних конструктивних особливостей контактних підвісок і струмоприймачів, найбільш об’єктивною функцією для визначення якості струмознімання є контактний натиск. Чим стабільніший контактний натиск, тим менше зношуються контактні проводи та струмознімальні елементи, а відповідно якість струмознімання вище [8].

1.2 Особливості роботи струмоприймачів

Місцем натискання струмоприймача на контактний провід є ковзний контакт між цими двома елементами, один з яких переміщується з великою швидкістю. При цьому, через ковзний контакт передається електрична енергія великої потужності. У швидкісному русі можуть використовуватися поїзди потужністю до 20 МВт. Постійний контакт між проводом і струмоприймачем є найважливішим елементом електричної тягової системи, від якого залежить якість і надійність струмознімання. У швидкісному русі їм визначаються межі збільшення тягової потужності. Взаємодія між струмоприймачем і контактним проводом повинна бути постійною, безперебійною, щоб ковзний контакт між ними не переривався.

Важливим фактором якості струмознімання є підтримка постійного контакту струмоприймача з контактним проводом у всіх точках підвіски і у

всьому діапазоні зростання руху ЕРС Відрив струмоприймача від контактного проводу навіть на короткий час (кілька мілісекунд) призводить до іскріння, а порушення ковзного контакту на більш тривалий час – до утворення електричної дуги.

Іскріння і особливо електрична дуга знижують стійкість роботи електрообладнання ЕРС Вони також підвищують рівень перешкод в поїзному радіозв'язку і пристроях зв'язку, розташованих поблизу залізниці. Зі збільшенням тягового струму іскріння в ковзному контакті посилюється. Електрична дуга призводить до місцевого перегріву контактного проводу, що в свою чергу обумовлює перепал наклепаної міді (наклепаної бронзи), змінює її структуру, електричні і механічні властивості і, отже, істотно знижує термін служби контактного проводу. Щодо тривалого впливу електричної дуги, він призводить до тяжких наслідків – контактні проводи і струмознімальні пластини з міді можуть оплавлятися, і в результаті їх поверхні стають нерівними через що утворюються нарости і кратери, які погіршують електричний контакт між ними і підвищують у них електричне зношування. Сильна дуга може перепалити контактний провід і знеструмити ЕРС. Електричне зношування контактних проводів і струмознімальних елементів призводить до збільшення витрат на утримання і ремонт контактної підвіски і струмоприймачів. Тому, чим менше коефіцієнт відриву $k_{от}$ струмоприймача від контактного проводу, тим вище якість струмознімання і менше електричне зношування контактного проводу.

Якість струмознімання залежить від сталості натискання контактними пластинами струмоприймача на контактний провід, і чим менше змінюється це натискання, тим вища якість струмознімання. Сталість натискання контактними пластинами на контактний провід є особливо важливою на високошвидкісних залізницях. Сили, що діють в контакті, не можуть бути виміряні безпосередньо в точці натискання контактних пластин на контактний провід [13].

Для якісного струмознімання встановлені межі натискання контактними пластинами рухомого струмоприймача на контактний провід. На дорогах змінного струму це натискання повинно бути в межах від 40 Н (4 кгс) до 200 Н (20 кгс), на дорогах постійного струму – від 60Н (6 кгс) до 360 Н (36 кгс) . Нижня межа визначається натисканням, при якому контактні пластини ні за яких умов не повинні відриватися від контактного проводу. Верхня межа визначається тим, щоб струмоприймач, натискаючи знизу вгору, не зачіпав деталі на контактній підвісці. На залізницях Німеччини при русі ЕРС з одним піднятим струмоприймачем для швидкості до 250 км/год встановлені наступні середні сили натискання полозом, що рухається на контактний провід: максимальне 200 Н, мінімальне 40 Н, середнє <120 Н, стандартне відхилення ±24 Н.

Так як контактна підвіска являє собою пружну систему, то під дією натискання струмоприймача, спрямованого по вертикалі вгору, контактний провід може відтискатися (зміщуватися вгору). Величина відтискання контактного проводу залежить від сили натискання струмоприймача і еластичності контактної підвіски.

У Німеччині, у якій перебуває в експлуатації контактна підвіска типу Re 250, розрахована на максимальну швидкість руху з двома піднятими струмоприймачами 280 км/год і одним – 300 км/год. У цій підвісці (в порівнянні з підвісками Re 160 і Re 200) несучий трос виконаний з магнієвої бронзи (БрМг0,35) і має перетин 70 мм^2 (замість 50 мм ^{2}), контактний провід виконаний з міді, легованої сріблом (Ag 0, 1%), і має перетин 120 мм ^{2} (замість 100 мм ^{2}), а ресорний трос (БрМг0,35) має перетин 35 мм^2 (замість 25 мм ^{2}). Натяг несучого тросу та контактного проводу збільшено відповідно з 10 до 15 і з 10 до 15, а ресорного троса з 1,7…2,3 до 2,8 кН. Маючи досвід застосування тросів, виконаних з магнієвої бронзи БрМг0,35, була розроблена і випробувана контактна підвіска Re 330, що забезпечує максимальну швидкість руху з двома піднятими струмоприймачами 380 км/год і одним – 400 км/год, з контактним

проводом з магнієвої бронзи, що містить магнію 0,7% (на діючих лініях – Mg 0,5%). Цей контактний провід без додаткових заходів щодо зміцнення витримує навантаження на розтягнення 490 Н/мм^2, правда електропровідність його складає всього 60% від електропровідності чистої міді.

При високих швидкостях руху неодмінною умовою забезпечення стабільного ковзного контакту між струмознімальними елементами і контактним проводом є значна ширина полоза струмоприймача, яка повинна бути не менше 400 мм. На дорогах СНД у авторегулюючих струмоприймачів типу Сп-1М і Сп-6М ширина полоза прийнята рівною 440 мм. В силу багатьох причин струмоприймачі на рухомому складі різних європейських країн мають полози різної довжини: в Німеччині, Австрії та Іспанії загальна довжина полоза дорівнює 1950 мм, в Великобританії – 1600 мм, у Франції та Швейцарії – 1450 мм.

На електровозах і моторних вагонах електропоїздів в СНД і ряді інших країн застосовують струмоприймачі пантографного типу (рис. 1.2). Тому їх часто називають пантографом. Такі струмоприймачі складаються з чотирьох основних частин:

- підставки, що закріплена на даху локомотива за допомогою чотирьох опорних ізоляторів;
- рухомої системи, зібраної з легких елементів, пов’язаних шарнірами;
- контактної системи (кареток), до яких кріпляться один або два полози з струмознімальними елементами;
- механізму підйому і опускання, що складається з пневматичного приводу, пружин і важелів.

Струмоприймачі ЕРС постійного і змінного струму для швидкостей руху до 160 км/год включно в країнах СНД застосовують залежно від навантажувального струму двох типів:

– тип Т (важкі) – вони призначені для вантажних і пасажирських електровозів постійного струму з тривалим зніманням струму з контактного проводу при русі до 2200 А, а при стоянці – 300 А для розрахункового зимового і 160 А для розрахункового річного режимів;

– типу Л (легкого) – для вантажних і пасажирських електровозів змінного струму і електропоїздів постійного і змінного струму з тривалим зніманням струму з контактного проводу при русі 500 А, а при стоянці – 80 А для розрахункового зимового і 50 А для розрахункового літнього режиму .

Умовні позначення струмоприймача крім вказівки типу (Т або Л) повинні також містити номер моделі і матеріал струмознімальних елементів (М – мідні, У – вугільні). Наприклад, Л-13У01 означає: струмоприймач легкого типу, моделі 13, з вугільними струмознімальних елементами, виконання 0, категорії 1.

Струмоприймач і контактна мережа при русі ЕРС постійно взаємодіють один з одним, і повинні забезпечувати надійне і економічне струмознімання [11]. Якість струмознімання характеризується такими двома основними факторами:

– Умовами електромеханічної взаємодії рухомого струмоприймача і контактної підвіски;

– Природою матеріалів контактного проводу та струмознімальних елементів струмоприймача, і технологією їх отримання.

Як вже зазначалося вище, дуже важливим для практики показником, що характеризує процес взаємодії струмоприймача і контактного проводу та забезпечує надійність і високу якість струмознімання, є контактне натискання – натискання полозом струмоприймача на контактний провід.

При русі ЕРС висота полоза струмоприймача над рівнем головки рейок не залишається постійною, так як не постійною є висота підвісу контактного проводу, його еластичність і маса в прольоті [13]. Якщо контактне натискання близько до постійного, то можна вважати, що не відбувається відривів полоза

струмоприймача від контактного проводу, іскріння мінімальне і, отже, контактний провід та струмознімальні елементи менше схильні до електричного зношування. Окрім того, не відбувається помітного підвищення контактного натискання в жорстких точках контактної підвіски (в точках сполучення контактного проводу зі струнами, ізоляторами і т.п.) і, отже, не створюються умови для підвищеного механічного зношування контактного проводу в цих місцях і струмознімальних елементів елементів.

Динамічні сили $P_{дин}$ виникають в місці ковзного контакту і залежать від наведеної маси струмоприймача, на яку впливає маса кожного його рухомого елемента. При цьому, чим нижче в струмоприймача розташовані елементи, тим менше їх вплив. Тому наведена маса струмоприймачів в основному залежить від маси їх верхнього вузла – маси каретки і, особливо, полоза. І чим менше маса верхнього вузла, тим більше рухлива каретка по вертикалі.

У відповідність з європейським стандартом EN 50119 для зниження ймовірності відриву контактних пластин струмоприймача від контактного проводу та утворення електричної дуги, а також для обмеження підйому (відтискання) контактного проводу рухомого струмоприймача, максимальне контактне натискання $P_{макс}$ полозом має бути: для ліній змінного струму при швидкості руху $\upsilon \leq 200$ км/год $P_{макс}=300$ Н, а при $\upsilon > 200$ км/год $P_{макс} = 350$ Н. Якщо υ близько 200 км/год, то $P_{макс}$ має бути не більше 250 Н.

Для ліній постійного струму $\upsilon \leq 200$ км/год $P_{макс}=300$ Н, а при $\upsilon > 200$ км/год $P_{макс} = 400$ Н.

При високих швидкостях руху, щоб зменшити амплітуду коливань струмоприймача і забезпечити їх швидке згасання, між нижньою рухомою рамою струмоприймача і дахом локомотива встановлюють спеціальні пристрої. Ці пристрої називають демпферами або амортизаторами. Їх виконують у вигляді пружин; вони можуть бути також гідравлічними.

Для безперебійного струмознімання конструкція струмоприймача повинна відповідати наступним вимогам:

- під дією підйомних пружин струмоприймач при русі ЕРС повинен надавати на контактний провід оптимальне стабільне натискання і, з одного боку, не повинен від нього відриватися, погіршуючи тим самим якість струмознімання і збільшуючи електричне зношування контактного проводу, а з іншого не чинити надмірного натискання, підсилюючи механічне зношування контактного проводу та струмознімальних елементів;
- рухомі вгору і вниз частини струмоприймача повинні мати мінімальну приведену масу (низьку динамічну силу $P_{дин}$);
- незначний розмах коливань струмоприймача і швидке їх загасання;
- мінімальні сили тертя в шарнірах;
- стійкість до аеродинамічних сил.

В ідеальному випадку при будь-якій висоті полоза струмоприймача його натискання на контактний провід має бути постійним.

Реальні характеристики статичного натискання залежать від конструкції підйомного пристрою: підйомної пружини, радіусу важеля, кута між віссю важеля і стержня нижньої рухомої рами.

З наведеного матеріалу видно, що еволюція конструкції струмоприймачів пов’язана з необхідністю підвищення швидкості руху ЕРС і поліпшення якості струмознімання полягає в прагненні знизити наведену масу струмоприймача і при цьому забезпечити необхідну навантажувальну здатність. Це завдання можна вирішити тільки шляхом зменшення маси верхнього вузла і підвищення тим самим його рухомості, а для цього потрібне застосування нових матеріалів (наприклад, легких сплавів титану і алюмінію), нових конструкцій (наприклад, одностоякових струмоприймачів).

Необхідно застосовувати контактні підвіски, натяг проводів і тросів яких повинен задовольняти вимогам забезпечення мінімальних стріл провисання,

при задоволенні необхідних споживаних потужностей електрорухомого складу.

Критеріями якості струмознімання, є мінімальні приведені витрати (тобто витрати, що складаються з поточних витрат і частки капітальних витрат, обумовленої нормативним коефіцієнтом) на струмоприймачі і контактну мережу.

Конструкції струмоприймачів розраховують на швидкість, що перевищує максимальну експлуатаційну на 10 %, і параметри контактної мережі, використовувані на конкретних ділянках. Одночасно враховують режими знімання струмових навантажень на стоянці, при рушанні і перевантажувальні режими (знімання максимальних струмів), що в остаточному підсумку визначає тип, число і раціональне розміщення робочих струмоприймачів на ЕРС.

При визначенні умов знімання номінальних і максимальних струмових навантажень враховують, що нагрівання контактних пластин, гнучких мідних з'єднувачів і інших струмопровідних елементів не повинен перевищувати значень, установлених нормативними документами.

Струмоприймачі, розраховані на максимальну швидкість руху 120…140 км/год, повинні відповідати вимогам нормативних документів і паспортним даним для струмоприймачів інших серій. Для швидкостей руху понад 140 км/год застосовують струмоприймачі з параметрами, заданими спеціальними технічними умовами на апарат конкретного типу.

Домінуючим показником оцінки динамічних можливостей системи «струмоприймач – контактна мережа» по забезпеченню надійного і економічного струмознімання є приведена маса струмоприймача.

Механізм струмоприймача повинен мати можливість зменшувати натискання на 10 Н и збільшувати його на 70 Н стосовно нормованих значень активної і пасивної складових статичного натискання.

Аеродинамічний вплив на робочий струмоприймач (задній по ходу на електровозі), виконаний по діючих нормативах, не повинен викликати збільшення натискання в порівнянні із середнім статичним більш ніж в 1,8 рази при швидкості руху 33,3 м/с.

Конфігурація конструкції полоза струмоприймача, довжина його робочої частини, оснащеної контактними вставками з основного матеріалу, тип і матеріал контактних вставок (пластин) погоджуються із замовником. У межах робочої частини на полоз при необхідності наноситься дугостійке покриття.

Конструкція верхнього вузла струмоприймача повинна забезпечувати вертикальний і обертовий рух полоза щодо верхнього шарніра верхньої рухомої системи.

Кут повороту навколо горизонтальної осі, проведеної через шарніри, за допомогою яких каретки з'єднуються з полозом (полозами), становить щодо середнього положення 5…7 % на кожну сторону.

Конструкція полозів, обладнуваних мідними пластинами, повинна забезпечувати можливість їхнього заправлення сухим графітовим змащенням. Сухе графітове змащення не повинна розташовуватися вище рівня контактних пластин.

При підйомі на стоянці струмоприймачі повинні забезпечувати контакт полоза з контактним проводом в межах робочої висоти без наступного відриву полоза.

Струмоприймач обладнують пневматичним приводом, що живиться від пневматичної магістралі ЕРС із номінальним тиском стисненого повітря 0,5 МПа. Він повинен зберігати працездатність при зміні тиску від 0,70 до 1,35 номінального і витримувати без пошкодження тиск стисненого повітря, що перевищує номінальне в 1,5 рази.

Швидкість підйому і опускання струмоприймача регулюється встановленими в повітряній магістралі редукційними пристроями.

Струмоприймачі повинні забезпечувати можливість підйому й опускання струмоприймача при швидкості руху ЕРС до 120 км/год і зустрічному або бічному вітрі до 10 м/с. На швидкісному ЕРС повинна бути забезпечена можливість підйому і опускання струмоприймачів при максимальній швидкості руху до 200 км/год і наявності зустрічного або бічного вітру, що має швидкість до 25 м/с.

Привід струмоприймача повинен зберігати нормальну працездатність при будь-яких кліматичних умовах. При температурі навколишнього повітря нижче -30 °С допускається збільшення часу підйому і опускання струмоприймача в 1,5 рази.

У випадку регулювання що підйомно-опускаючого механізму при номінальному тиску стисненого повітря необхідно, щоб час підйому струмоприймача зі складеного стану до найбільшої робочої висоти становив 7…10 с, а час його опускання з найбільшої робочої висоти до складеного положення – від 3,5 до 6,0 с.

Опускаюча сила у діапазоні робочої висоти, як правило, повинна бути не менше 200 Н для швидкостей руху ЕРС до 120 км/год і 220 Н – до 160…200 км/год. Якщо струмоприймачі мають недостатню утримуючу силу, може відбуватися підйом неробочих апаратів зустрічними або бічними повітряними потоками при швидкостях руху ЕРС більше 140 км/год. Для виключення цього служать блокуючі замки, що не допускають підйом цих апаратів без подачі стисненого повітря у пневматичний привод.

На високошвидкісному ЕРС конструкція струмоприймача повинна забезпечувати автоматичне його опускання після удару полоза, що рухається, по несправному елементі контактної мережі. Одночасно з початком опускання струмоприймача автоматично відключається головний вимикач. Інформація про положення струмоприймачів (підняті або опущені) у цьому випадку передається в кабіну машиніста.

Конструкція струмоприймача повинна забезпечувати необхідні статичні характеристики в діапазоні робочої висоти в межах від 400 мм (не більше) до 1900 мм (не менше). Максимальна висота підйому апарата повинна бути не менше 2100 м. Допускається зміна діапазону робочої висоти і максимальної висоти підйому апаратів, що виготовляються для спеціалізованих високошвидкісних магістралей, на яких пристрою контактної мережі виконуються й відповідності зі зміненими вимогами, що відрізняються від діючої нормативної документації для швидкостей руху до 200 км/год.

1.3 Аналіз напрямків вдосконалення струмоприймачів

У конструкції струмоприймачів прийнято виділяти:

1. Базові елементи - елементи, що входять в конструкцію кожного струмоприймача, без яких його нормальне функціонування неможливо. До них відносять:

- систему рухомих рам (важелі, штанги, зв'язку, шарніри, головні вали);
- привід (пружини, пневматичні елементи, торсіони, трансмісію, виконавчі механізми);
- основу (нерухома рама, каркас);
- струмопровідні елементи (шунти, шини, кабелі, покриття);
- ізолюючі елементи (ізолятори, ізолюючі кожухи, стінки, покриття, рукава);
- контактуючі елементи (струмознімальні пластини, вставки, накладки).

2. Додаткові елементи - елементи, які підвищують надійність, економічність і екологічність струмознімання при різних видах зовнішніх впливів на струмоприймач. До них відносять:

- керуючі (механізм управління приводом);
- каретки (пружні елементи, що забезпечують додаткові ступені свободи полоза);

- полози (конструкції і деталі, на яких встановлені контактучі елементи);

- запобіжні (елементи, які деформуються, деталі з обмеженою міцністю, датчики зусиль);

- демпфуючі(демпфери, гасителі, поглиначі);

- авторегулюючі (датчики, виконавчі механізми, електронні блоки, процесори);

- зберігаючі (стулки, порожнини, вентилятори, підігрівачі, датчики);

- компенсуючі (датчики нахилу кузова, виконавчі механізми);

- перешкодоподавлюючі (екрани, схеми, покриття);

- шумоподавлюючі (екрани, покриття);

- віброізолюючі (амортизатори, дисипативні елементи, прокладки);

- ожеледозахисні (кожухи, чохли, пристрої об'ємного наддуву);

- діагностичні (датчики, індикатори, електронні блоки);

- аеродинамічні (екрани, крила, закрилки, виконавчі елементи, датчики);

- змащувальні (електропровідний мастило, датчики, виконавчі механізми);

- охолоджуючі (елементи з ребрами і внутрішніми порожнинами, насоси, датчики, теплоносії);

- світломаскуючі (екрани);

- світлозахисні (кожухи, екрани, фільтри для захисту полімерних деталей від ультрафіолетового випромінювання);

- пристрої електробезпеки (виконавчі елементи, контакти роз'єднувача, шунти, кабелі);

- електрозахисні (кожухи, чохли, покриття).

У більшості конструкцій функції безлічі додаткових елементів скомбіновані, основні елементи конструктивно виконані таким чином, що

кожен з вузлів виконує кілька функцій. Розвиток конструкцій струмоприймачів відбувається на тлі посилення вимог до розмірів і маси.

Струмоприймач, як частина системи струмознімання, повинен задовольняти цілому ряду вимог, деякі з яких суперечать один одному. Дана проблема особливо помітна на тлі підвищення швидкостей руху. Наприклад для забезпечення стабільного контакту при підвищенні швидкостей руху необхідно прагнути до мінімізації приведеної маси рухомих частин струмоприймача, проте мала вага струмознімального вузла визначає ресурс до заміни контактних вставок, а також обмежує можливості по зняттю великих струмів в перебігу тривалого часу. Габаритні розміри полозів визначені межами можливого розташування проводів контактної підвіски в плані колії при найнесприятливіших кліматичних умовах.

Система рухомих рам струмоприймача повинна забезпечувати максимально великий діапазон зміни робочої висоти, при цьому мати необхідну поздовжню і поперечну жорсткість, малу наведену масу і незначне тертя в шарнірах. Крім того електрична провідність елементів струмоприймача повинна бути на високому рівні. Шлях протікання струму повинен бути найменшим можливим, це гарантує не тільки мінімізацію втрат на тягу поїздів, а й високу навантажувальну здатність струмоприймача.

Привід струмоприймача повинен забезпечувати його стабільні показники в всьому діапазоні зміни робочої висоти, при різних значеннях тиску живильної пневмомагістралі і температури навколишнього повітря, а також надавати можливість швидкого підйому і опускання струмоприймача.

Струмоприймачі оснащуються пристроями контролю справності, що дозволяють виявити пошкодження на ранній стадії, не чекаючи їх розвитку.

В даний час в Україні діє ДСТУ 32204-2013 Струмоприймачі залізничного електрорухомого складу. Однак даний ДСТУ не поширюється на спеціальні конструкції струмоприймачів, призначені для високошвидкісних поїздів.

Проведений аналіз дозволяє виділити основні риси швидкісних струмоприймачів: зменшений вертикальний і горизонтальний розмір системи рухомих рам; при необхідності, основа струмоприймача може переміщатися по вертикалі. Через відсутність необхідності сумісності з звичайними залізничними лініями, рухомий склад і його струмоприймачі розраховуються на ефективну роботу в більш вузькому діапазоні зміни геометричних, кліматичних і експлуатаційних параметрів. Наприклад, ширина робочої частини полоза швидкісних струмоприймачів наближається до значення 800 мм при загальній довжині 1450 мм.

Незначний колійний розвиток станцій і мінімальна кількість повітряних стрілок на швидкісних лініях дозволяє знизити вимоги до поперечної жорсткості струмоприймачів, високий натяг і бездоганне позиціонування проводів контактної мережі щодо осі шляху знижує вимоги до системи вторинного підресорювання струмоприймача. Для мінімізації простору на даху, відведеного під установку струмоприймача, все непровідні елементи струмоприймача намагаються виконувати з ізоляційного матеріалу, або покривають шаром ізоляції.

Сухе тертя в шарнірах струмоприймача намагаються мінімізувати для зниження впливу коливань основи на контактне натискання і знос. В'язке тертя в системі рухомих рам налаштовують таким чином, що при незначних коливаннях натискання в контакті воно велике, а при досягненні заздалегідь визначеного значення сили - в'язке тертя різко знижується, дозволяючи уникнути пошкодження елементів струмоприймачів.

Не рідко описані вище особливості конструкції призводять до відмов струмоприймачів, проте вихід з ладу струмоприймача не повинен супроводжуватися розвитком аварійної ситуації і пошкодженням контактної мережі. Для цього служать запобіжні пристрої, що спрацьовують при надмірному зусиллі в системі рухомих рам, пошкодженні полозів або при підйомі струмоприймачів на неприпустиму висоту

На підставі проведеного аналізу можна зробити наступні висновки:

1. Спостерігається значна варіативність конструкції додаткових пристроїв і підсистем струмоприймачів, призначених для підвищення якості та надійності струмознімання;

2. В якості підйомно-опускаючих механізмів струмоприймачів найбільш часто використовуються гумокордні елементи;

3. Підйомно-опускаючий механізм (привід) струмоприймача повинен бути керованим, що дозволяє регулювати статичну силу натискання на контактний провід як по команді машиніста, так і автоматично;

4. Основа струмоприймача повинна бути уніфікована, для можливості установки струмоприймача на різні типи електрорухомого складу. Для цього бажано мати можливість зміни посадочних розмірів.

5. Система рухомих рам струмоприймача при досить великий поперечній та поздовжній жорсткості повинна мати мінімальну наведену масу, а також мінімальні габаритні розміри в складеному стані.

Кількість шарнірних зчленувань також потрібно мінімізувати. Для забезпечення протікання тягового струму доцільно вибирати конструкційні матеріали з хорошою провідністю, конструкцією повинні бути передбачені місця для закріплення шунтів, які з'єднують струмопровідні деталі між собою;

2 УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДИКИ ТЕПЛОВОГО РОЗРАХУНКУ ЕЛЕМЕНТІВ СТРУМОПРИЙМАЧІВ

Сучасні умови експлуатації і проектування пристроїв струмознімання представляють дедалі жорсткіші вимоги до оцінки температур струмоприймачів в нестандартних режимах роботи. Причиною цього є розширення спектра експлуатаційних режимів, зростання питомих навантажень.

Занижена теплова оцінка навантажень призводить до підвищеної пошкоджуваності пристроїв струмознімання, скорочення їх терміну служби, внаслідок незворотних температурних перероджень властивостей і характеристик ізоляційних, провідникових і конструктивних матеріалів.

Підвищення перетину основних елементів пристроїв струмознімання, призводить до того, що струмоприймач володіє збільшеною масою, має гірші динамічні характеристики і працює в енергетично невигідному режимі. Така ситуація характерна для роботи струмоприймачів постійного і змінного струмів.

Зазначені обставини вимагають наявності достовірних методик розрахунку теплових процесів пристроїв струмознімання, що включають в себе питання створення математичної моделі, ідентифікації її параметрів, побудови спеціалізованих чисельних методів розрахунку.

2.1 Особливості розрахунку змінних електричних опорів верхнього вузла струмоприймача

Особливістю електричного ковзаючого контакту пари підвіска - струмоприймач є наявність зиґзаґа контактного проводу, що утворює при русі ЕРС складну траєкторію точки взаємодії (рис. 2.1).

Опір контакту є головним елементом математичної моделі, тому що найбільше виділення тепла відбувається саме в цій розподіленої зоні. Воно може бути описано з урахуванням відомих значень довжин прольотів, величин

зигзагів швидкості руху і особливостей взаємодії струмоприймача і контактної підвіски. Ще однією особливістю є наявність як мінімум двох точок контакту через наявність двох полозів, опору яких можна вважати однаковими.

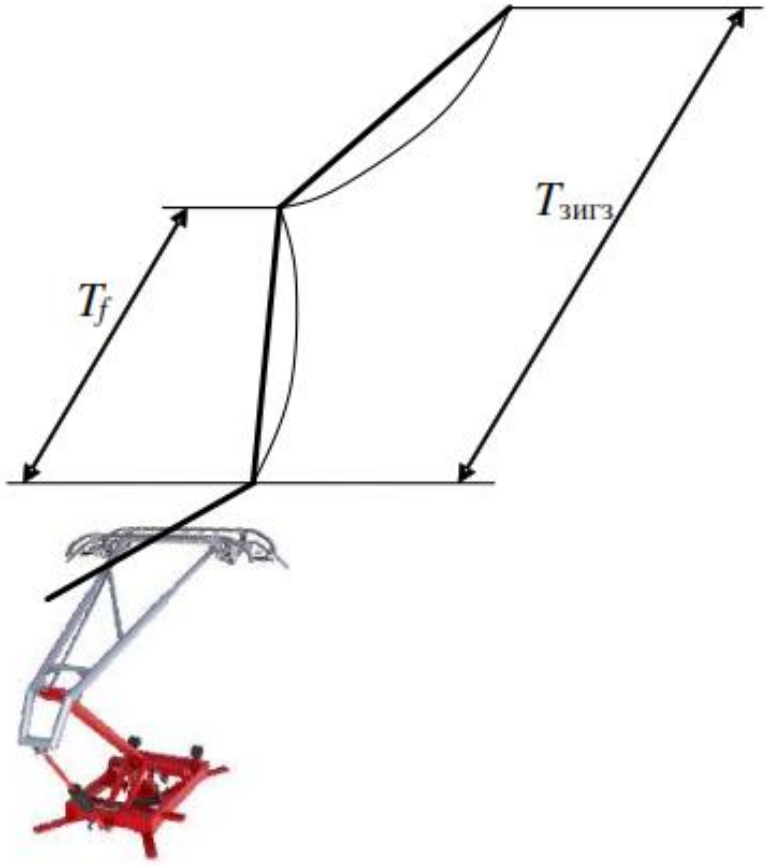


Рисунок 2.1 – Визначення переміщення точок контакту щодо полозів

З рис.2.1 видно, що період циклічного руху в поперечній площині полоза залежить від «зиґзаґа» контактного проводу і він в два рази більший періоду в вертикальній площині стріли провисання T_f, с:

$$T_{зигз} = 2T_f \tag{2.1}$$

Періоди будуть обернено пропорційні швидкості рухомого складу і прямо пропорційні довжині прольоту:

$$T_{зигз} = \frac{\lambda}{\upsilon_{п.с.}} \tag{2.2}$$

Введемо припущення, що в підопорних вузлах опір контакту зменшується, так як натискання в контакті зростає, і навпаки: в середині прольоту збільшується через зниження натискання (рис. 2.2). Математичної функцією, яка описує періодичність зміни зигзага і натискання, може бути тригонометрична функція або їх ряд. В пропонованому методі прийнято допущення, що ці параметри змінюються по синусоїдальному закону, що значно скорочує час розрахунку.

Залежно від зигзага змінюються опори електричного кола вздовж полоза (так як полози приєднані до системи рухомих рам шунтами по краях).

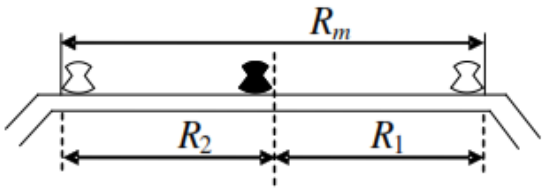


Рисунок 2.2 - Зміна опорів ділянок «контакт – струмопровідні шунти »полозів струмоприймача

З рис. 2.2 видно, що при знаходженні точки контакту в крайніх положеннях один з опорів зменшується практично до нуля, а протилежний - збільшується до повного опору полоза. При цьому сума опорів завжди постійна:

$$R_m = R_1 + R_2 \tag{2.3}$$

Звідки:

$$R_2 = R_m \sin(\psi_{зиг} \cdot t + \delta) \qquad R_1 = R_m - R_m \sin(\psi_{зиг} \cdot t + \delta) \tag{2.4}$$

де R_m – поздовжній опір робочої частини полоза;

$\psi_{зиг}$ – частота траєкторії провода в плані колії.

За аналогічним принципом змінюється перехідний опір в контакті:

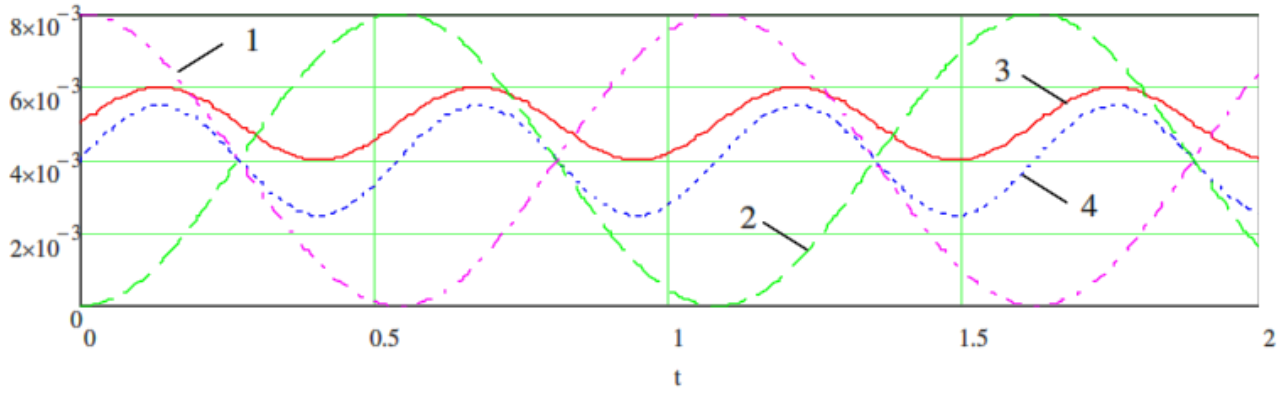
$$R_{K_i}(t) = R_{K_1} \sin(\omega_f \cdot t + \gamma) \quad (2.5)$$

де δ, γ – початкові значення «фази» зміни зигзага і стріли провисання відповідно;

R_{k1} – номінальний опір;

ω_f – частота стріли провисання.

Наведений нижче графік (рис. 2.3) зміни опорів показує особливість моделювання опору контакту проводів і струмоприймача.



1 - опір лівих частин полозів; 2 - опір правих частин полозів; 3 - опір контакту першого полоза; 4 - опір контакту другого полоза

Рисунок 2.3 - Зміна опорів верхнього вузла струмоприймача під час руху

Дана модель має можливість імітувати зміни опору при проходженні зигзагів, що не відповідають нормативно-технічним вимогам: односторонні зигзаги, виноси контактного проводу, які збільшують навантаження на одну зі сторін струмоприймача завдяки матричному способу введення вихідних даних.

Також у вигляді матриці можливо задавати реальне контактне натискання для кожного з полозів. Встановлено, що натискання в контакті набігаючого полоза як правило більше, ніж збігаючого (рисунок 2.4), відповідно перехідний опір між першим полозом і контактним проводом буде менше, ніж між другим полозом і контактним проводом. Різниця може досягати 10%.

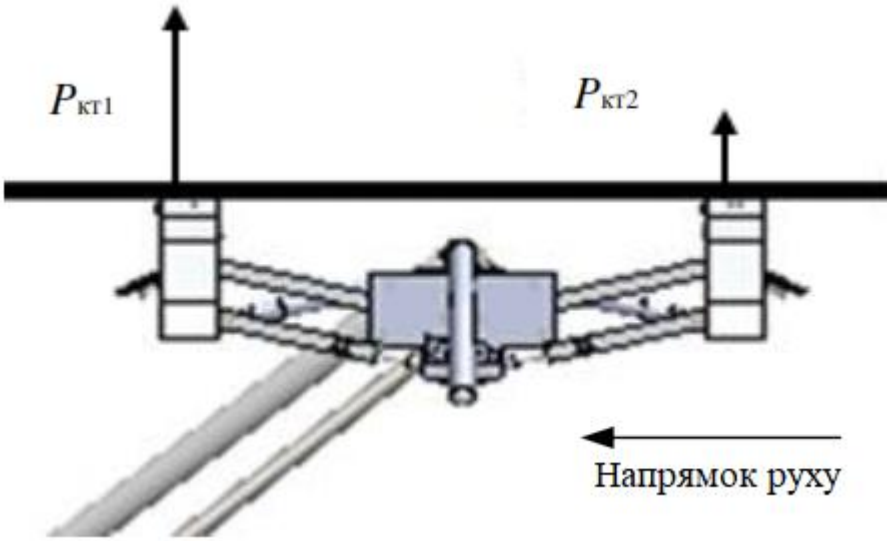


Рисунок 2.4 – Нерівномірність контактного натискання на полози

Для врахування цієї особливості, що виявляється при збільшенні швидкостей руху, пропонується в спрощеній моделі ввести коефіцієнт k, який дорівнює 1,1.

$$R_{P_{кт2}} = k \cdot R_{P_{кт1}} \tag{2.6}$$

2.2 Пропонована послідовність теплового розрахунку асиметричного струмоприймача

У загальному випадку методика виконання теплового розрахунку відображень у вигляді графічної блок-схеми на рис. 2.5.

На першому етапі виконується розрахунок розподілу тягового струму в верхньому вузлі та інших елементах струмоприймача. Для зручності розрахунку і можливості завдання тягового струму будь-якою функцією або рядом, всі струми розрахункових ділянок визначаються прямою залежністю тільки від тягового, для чого метод розрахунку передбачає перетворення складної схеми в спрощену, з одним контуром і еквівалентним опором всього струмоприймача.

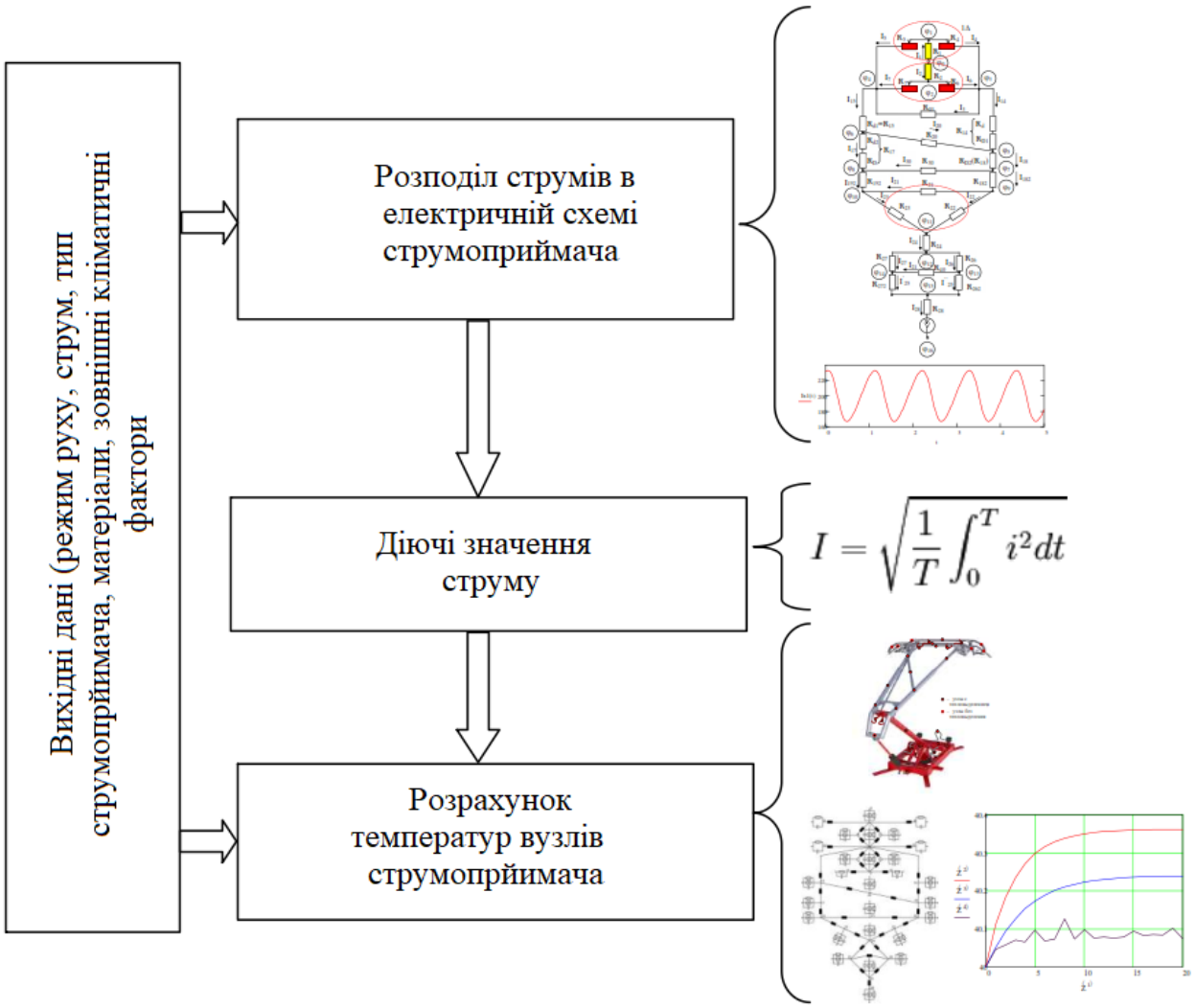


Рисунок 2.5 – Графічна блок-схема визначення теплових характеристик струмоприймача

Симетрування електричної схеми заміщення для струмоприймача, що зменшує час розрахунку, стало б досить грубим допущенням, тому що у багатьох струмоприймачах верхній важіль має асиметричну конструкцію.

На другому етапі виконується розрахунок діючих значень струмів в елементах струмоприймача. Третім етапом є розрахунок теплофізичних параметрів матеріалів струмоприймача: теплоємностей і теплопровідності.

Останній етап полягає у вирішенні підсумкової системи однорідних диференціальних рівнянь і знаходженню температур, побудові графіків.

2.3 Розрахунок значень елементарних струмів струмоприймача за допомогою пропонованої методики

Для виконання розрахунку були обрані вихідні дані, які б забезпечували можливість звірки розрахункових даних з експериментальними. Вихідні дані для розрахунку розподілу струмів вказані в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – **Характеристики, умови руху**

№ п/п	Найменування фізичної величини	Позначення	Величина	Од. вим.
1	Швидкість ЕРС	$\upsilon_{\text{п.с.}}$	200	км/ч
2	Довжина прогону	l	60	м
3	Період відхилення контактного проводу в плані	$T_{\text{зигз}}$	1,08	с
4	Частота відхилення контактного проводу в плані	$\psi_{\text{зиг}}$	5,818	рад/с
5	Основна частота зміни контактного натиску	ω_f	11,636	рад/с
6	Середнє значення струму струмоприймача	I	400	А

Перелік параметрів розрахунку, що впливають на його точність і швидкість, вказана в табл. 2.2.

Спрощена електрична схема (рис 4.6) розроблена для розрахунку теплових процесів верхнього вузла струмоприймача за пропонованою методикою обліку динамічних процесів в контакті.

Таблиця 2.2 – **Параметри розрахунку спрощеної моделі**

№ п/п	Найменування фізичної величини	Позначення	Величина	Од. вим.
1	Час кроку розрахунку	s	5	с
2	Кількість ітерацій	K	500	–
3	Ранжована змінна	t	$t \in [0; 100]$	с

Опори контактів R_1, R_2 і частин полоза R_3-R_6 розраховуються у відповідності до виразів 2.3…2.6 (рису. 2.6).

Значення постійних і незмінних величин визначені експериментальним шляхом і наведені в табл. 2.3.

Таблиця 2.3 – **Значення постійних величин**

№ п/п	Найменування фізичної величини	Позначення	Величина	Од. вим.
1	Повздовжній опір полозу	R_m	0,5	Ом
2	Опір правого ричага верхньої рами	R_{07}	0,0001	Ом
3	Опір лівого ричага верхньої рами	R_{08}	0,0001	Ом
4	Опір верхнього валу	R_{09}	0,0001	Ом
5	Опір ковзного контакту	R_{1max}	4	Ом

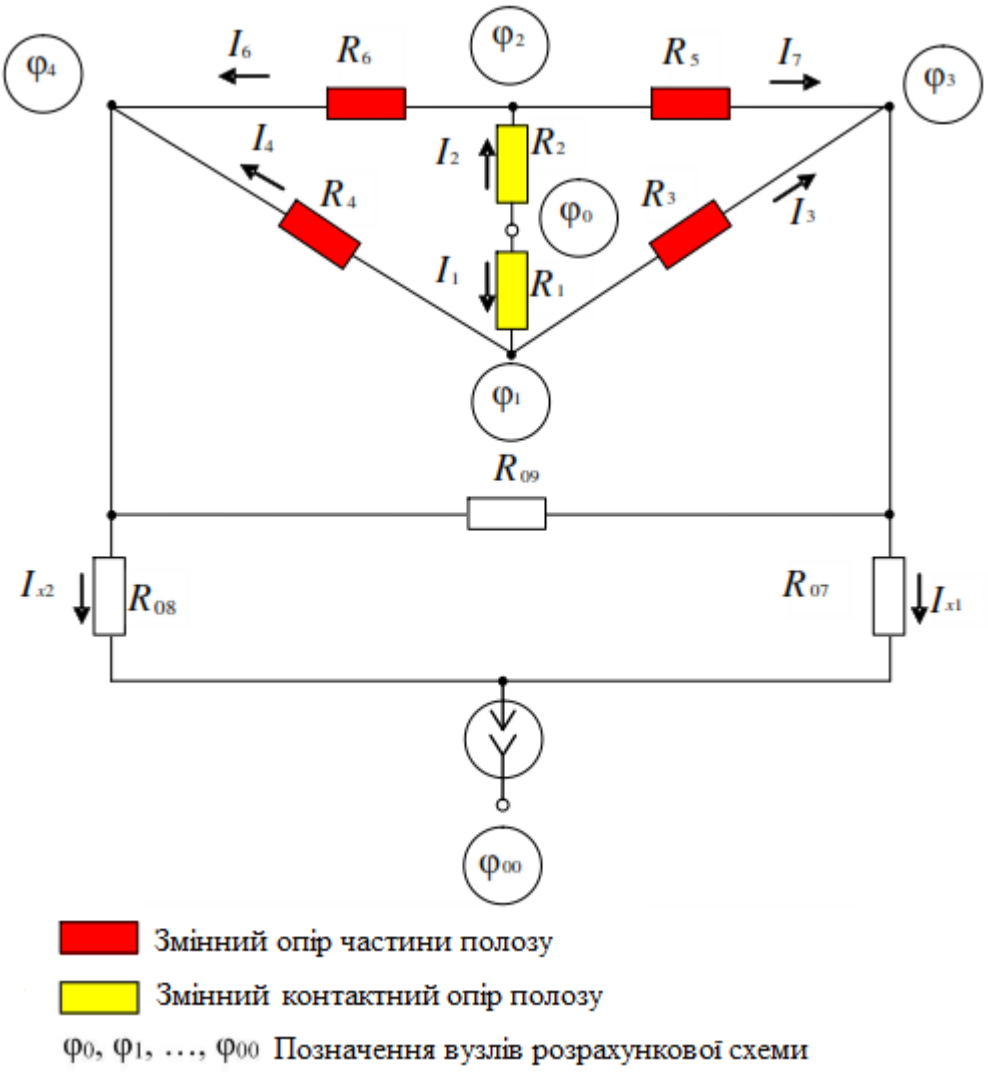


Рисунок 2.6 – Вихідна спрощена розрахункова схема

Для спрощення розрахунку складного ланцюга в даному випадку доцільно здійснити перетворення частини ланцюга. Ця частина ланцюга до її перетворення повинна бути еквівалентна цій же частині ланцюга після її перетворення за умови, що режим в останній, не перетвореній частині залишається незмінним [44, 59, 58].

Опори полозів і точок їх контакту з проводами після перетворень записуються в наступному вигляді:

Для першого полоза:

$$R_{41} = \frac{D_2}{R_3} \qquad R_{13} = \frac{D_2}{R_4} \qquad R_{43} = \frac{D_2}{R_1} \tag{2.7}$$

де:

$$D_2 = R_1 \cdot R_4 + R_1 \cdot R_3 + R_4 \cdot R_3 \tag{2.8}$$

Для другого полоза:

$$R_{62} = \frac{D_1}{R_5} \qquad R_{65} = \frac{D_1}{R_2} \qquad R_{25} = \frac{D_1}{R_6} \tag{2.9}$$

$$D_1 = R_2 \cdot R_5 + R_5 \cdot R_6 + R_2 \cdot R_6 \tag{2.10}$$

Як показано на рис. 2.7.

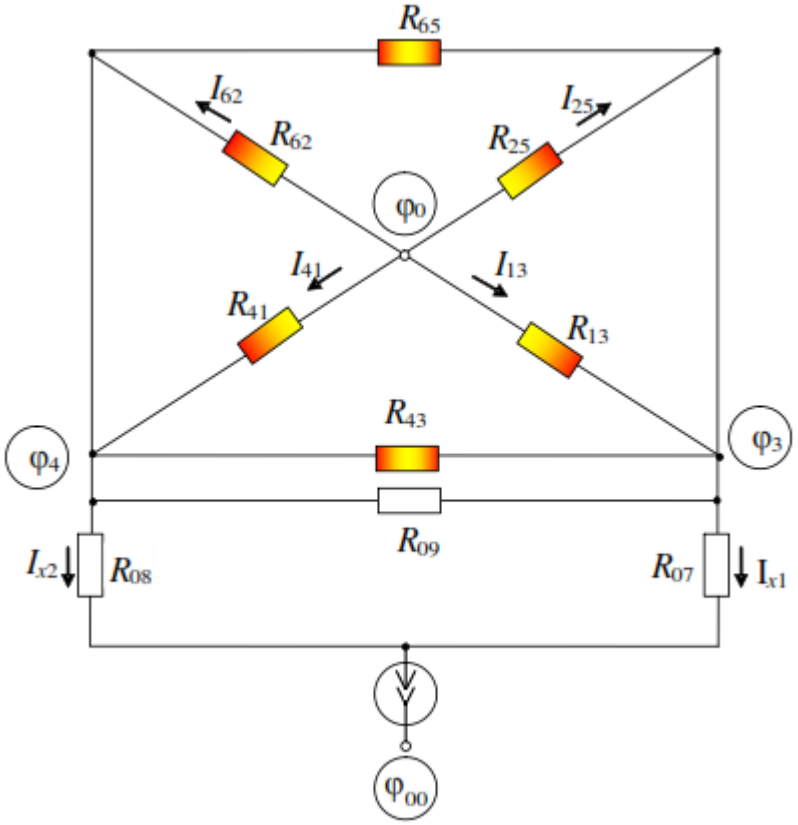


Рисунок 2.7 – Спрощена схема заміщення струмоприймача після першого перетворення

Перетворимо схему шляхом складання об'єднаних опорів паралельних гілок на рис. 2.7 (рис 2.8).

$$Z_1 = \frac{R_{25}R_{13}}{R_{25} + R_{13}} \qquad Z_2 = \frac{R_{62}R_{41}}{R_{62} + R_{41}} \qquad Z_3 = \frac{R_{65}R_{43}R_{09}}{R_{65}R_{43} + R_{65}R_{09} + R_{64}R_{09}} \tag{2.11}$$

$$\frac{1}{Z_3} = \frac{1}{R_{65}} + \frac{1}{R_{43}} + \frac{1}{R_{09}} = \frac{R_{43}R_{09}}{R_{65} + R_{43} + R_{09}} + \frac{R_{65}R_{09}}{R_{65} + R_{43} + R_{09}} + \frac{R_{65}R_{43}}{R_{65} + R_{43} + R_{09}} \tag{2.12}$$

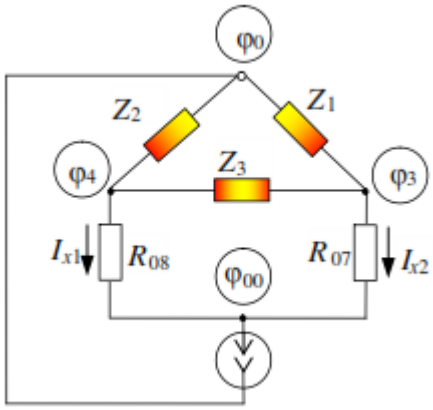


Рисунок 2.8 – Розрахункова схема струмоприймача після об’єднання опорів паралельних віток

Визначимо опір після другого перетворення (трикутник-зірка) (рис. 2.9).

$$Z_{12} = \frac{Z_2 + Z_1}{Z_1 + Z_2 + Z_3} \qquad Z_{23} = \frac{Z_2 + Z_3}{Z_1 + Z_2 + Z_3} \qquad Z_{13} = \frac{Z_1 + Z_3}{Z_1 + Z_2 + Z_3} \qquad (2.13)$$

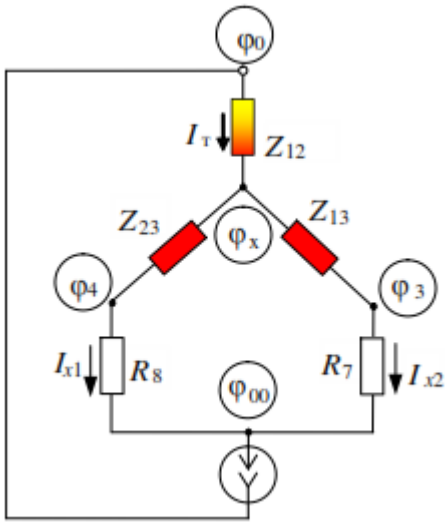


Рисунок 2.9 – Розрахункова схема струмоприймача після другого перетворення

Підсумковий опір паралельних гілок та повний опір спрощеної електричної схеми струмоприймача приведено на рис. 2.10, а та рис. 2.10, б, відповідно.

$$Z_{13} = \frac{(Z_{23} + R_8)(Z_{13} + R_7)}{Z_{23} + R_8 + Z_{13} + R_7} \quad (2.14)$$

Опір спрощеної електричної схеми струмоприймача:

$$Z_x = Z_{31} + Z_{12} \quad (2.15)$$

а) б)

Рисунок 2.10 – Підсумковий опір паралельних гілок (а) та повний опір спрощеної електричної схеми струмоприймача (б)

Падіння напруги на струмоприймачі зі спрощеної електричної схемою:

$$U = Z \cdot I \quad (2.16)$$

З урахуванням (2.16):

$$U = Z_x I \quad (2.17)$$

Падіння напруги між вузлами φ_0 і φ_3

$$U_{03} = I_T Z_{12} + I_{x2} Z_{13} \quad (2.18)$$

Падіння напруги між вузлами φ_0 і φ_4

$$U_{04} = I_T Z_{12} + I_{x1} Z_{23} \quad (2.19)$$

Падіння напруги між вузлами φ_x і φ_{00}

$$U_{x00} = Z_{31} I \tag{2.20}$$

Розраховуються струми в ланцюзі між потенціалами φ_0 і φ_x рівні струму правого важеля рами:

$$I_{x1} = \frac{U_{x00}}{Z_{23} + R_{08}} \tag{2.21}$$

Та лівого важеля рами:

$$I_{x2} = \frac{U_{x00}}{Z_{13} + R_{07}} \tag{2.22}$$

З урахуванням (2.22), маємо:

$$I_{x1} = \frac{Z_{31} I}{Z_{23} + R_{08}} \tag{2.23}$$

$$I_{x2} = \frac{Z_{31} I}{Z_{13} + R_{07}} \tag{2.24}$$

Знаючи падіння напруги U_{03} та U_{04} визначимо струми верхнього вузла першого полоза I_1, I_4, I_5 із системи рівнянь:

$$\begin{cases} U_{03} = I_1 R_1 + I_4 R_4 \\ U_{04} = I_1 R_1 + I_5 R_5 \\ I_1 - I_4 - I_5 = 0 \end{cases} \tag{2.25}$$

Звідки:

$$I_4 = \frac{U_{03} - I_1 R_1}{R_4} \qquad I_5 = \frac{U_{04} - I_1 R_1}{R_5} \qquad I_1 = \frac{U_{03} - I_1 R_1}{R_4} + \frac{U_{04} - I_1 R_1}{R_5} \tag{2.26}$$

$$I_1 = \frac{\frac{U_{03}}{R_4} + \frac{U_{04}}{R_5}}{1 + \frac{R_1}{R_2} + \frac{R_1}{R_5}} \tag{2.27}$$

Аналогічно визначаються точки I_2, I_6, I_7

$$\begin{cases} U_{03} = I_2R_2 + I_6R_6 \\ U_{04} = I_2R_2 + I_7R_7 \\ I_2 - I_6 - I_7 = 0 \end{cases} \quad (2.28)$$

Звідки:

$$I_6 = \frac{U_{03} - I_2R_2}{R_6} \qquad I_7 = \frac{U_{04} - I_2R_2}{R_7} \qquad I_2 = \frac{U_{03} - I_2R_2}{R_6} + \frac{U_{04} - I_2R_2}{R_7} \quad (2.29)$$

$$I_2 = \frac{\frac{U_{03}}{R_6} + \frac{U_{04}}{R_7}}{1 + \frac{R_1}{R_2} + \frac{R_1}{R_5}} \quad (2.30)$$

Струм верхнього валу розраховується за законом Ома для ділянки ланцюгу:

$$I_3 = \frac{U_{34}}{R_7} \quad (2.31)$$

Діюче значення струму знаходиться з відомої формули:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T I^2(t)dt} \quad (2.32)$$

де T – період струму.

Для заданих вихідних даних, отримані діючі значення струмів рівні: I_1= 243,144 А; I_2= 161,343 А; I_3= 132,353 А; I_4= 140,068 А; I_5= 87,37 А; I_6= 81,849 А; I_{x1}= 201,324 А; I_{x2}= 201,324 А.

Для всіх струмів в ланцюгах конструкції струмоприймача період буде дорівнює вихідного періоду тягового струму [50]. Період зміни струму, викликаний зміною опору в результаті переміщення точки контакту щодо полозів, буде значно більше періоду промислової частоти.

3 МОДЕЛЮВАННЯ НАГРІВУ СТРУМОПРИЙМАЧА

Джерелами тепла є елементи струмоприймача, через які протікає тяговий струм. Для даної теплової моделі розрахунковими значеннями є струми верхнього вузла I_1- I_7.

На рис. 3.1 наведена спрощена карта температур вузлів асиметричного струмоприймача, на якій вказані вузли з виділенням тепла і без нього. Теплова схема заміщення приведена на рис. 3.2.

Рисунок 3.1 – Карта температур вузлів струмоприймача

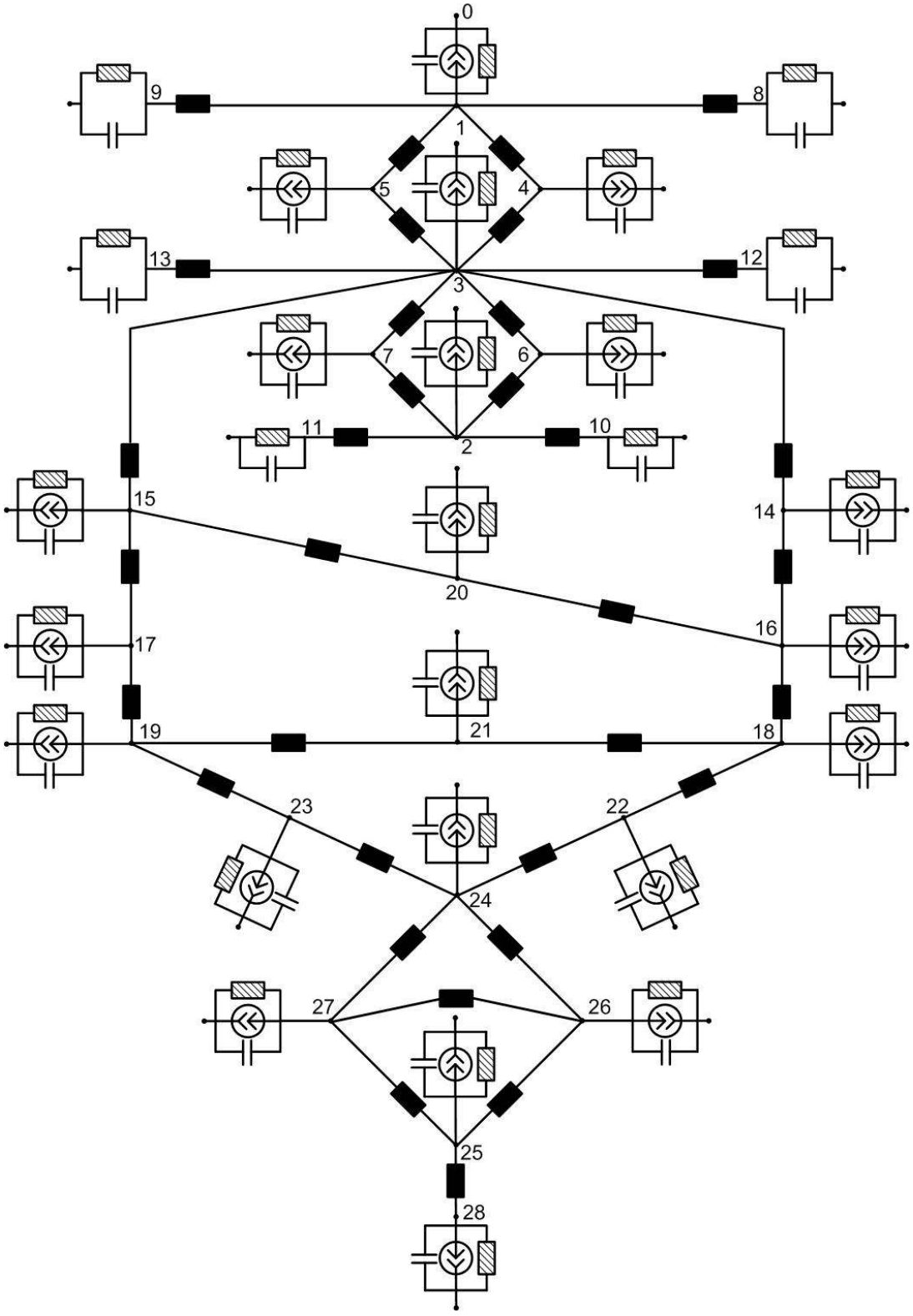


Рисунок 3.2 – Теплова схема асиметричного струмоприймача

Система звичайних диференціальних рівнянь першого порядку, приведена до форми Коші [46], складена для окремих елементів, дозволяє

визначити за допомогою чисельних методів температуру і її збільшення в часі (рис. 3.3.)

3.1 Результати розрахунку температур елементів струмоприймача

Рішенням отриманої системи рівнянь першого порядку є матриця результатів розрахунку температур і часу (таблиця 3.1). Графіки (рис. 3.3…3.5) показують, що температури полозів струмоприймача досить швидко приймають усталені значення на відміну від шунтів і рогів.

Таблиця 3.1 - **Матриця результатів розрахунку температур елементів струмоприймача від часу**

Час, с	Перший полоз	Другий полоз	Верхній вал	Правий ріг	…	Основа струмоприймача
0	40	40	40	40	…	40
60	41,3	42	40,5	40,127	…	40,127
120	42,3	43,5	40,8	40,169	…	40,169
180	43	44,5	41,1	40,158	…	40,158
240	43,5	45,2	41,3	40,173	…	40,173
300	43,8	45,8	41,5	40,187	…	40,187
360	44,1	46,2	41,6	40,202	…	20,202
420	44,3	46,6	41,7	40,215	…	20,215
480	44,4	46,9	41,75	40,23	…	40,23
540	44,5	47,1	41,8	40,244	…	40,244
600	44,5	47,2	41,8	40,258	…	40,258
660	44,5	47,3	41,8	40,271	…	40,271
720	44,5	47,4	41,8	40,287	…	40,287
780	44,5	47,4	41,8	40,3	…	40,3
840	44,5	47,4	41,8	41,1	…	40,313
…	…	…	…	…	…	…
1200	44,5	47,3	41,8	41,1	…	40,8

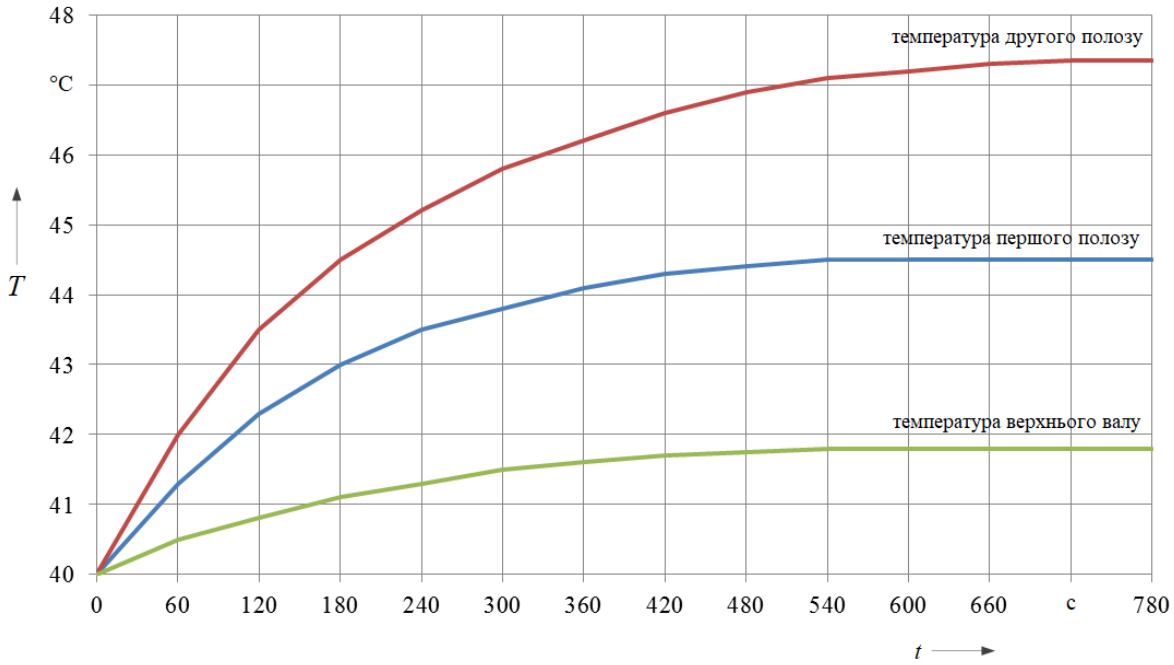


Рисунок 3.3 – Фрагмент графіка зміни температури першого і другого полозу, верхнього вузла

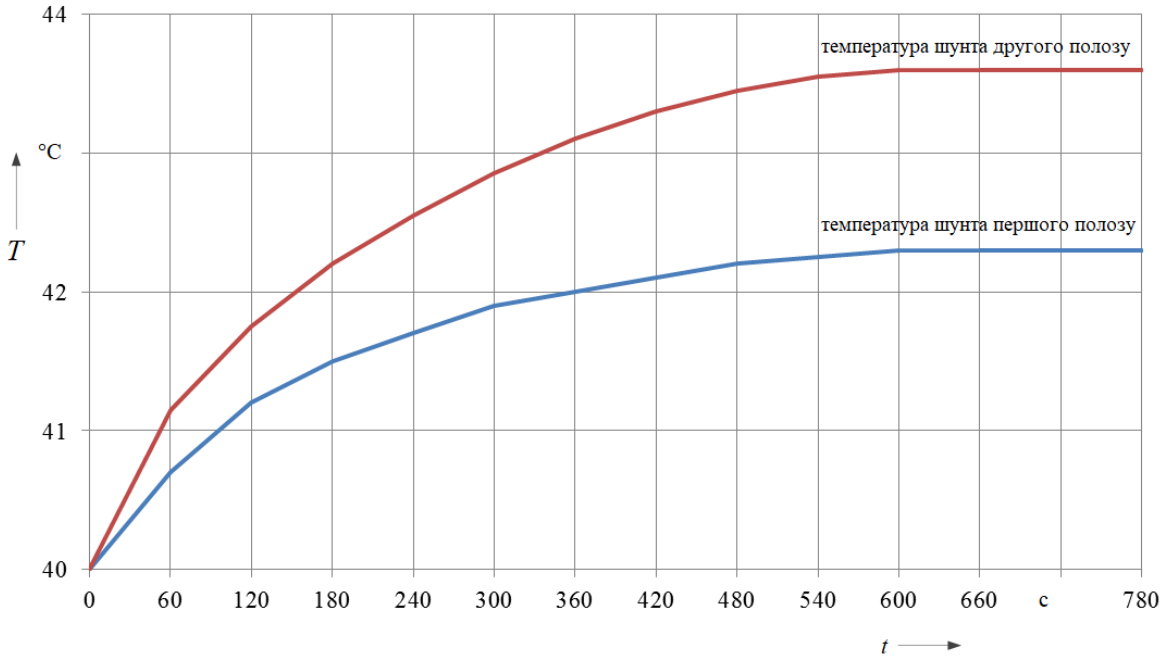


Рисунок 3.4 – Фрагмент графіка зміни температури шунтів полозів

На основі наведеної вище моделі розраховані теплові характеристики для складних режимів роботи струмоприймача: режим трогання (тяговий струм дорівнює 2000 А, швидкість обдуву υ = 5 м / с (18 км / ч)) (рис. 3.5).

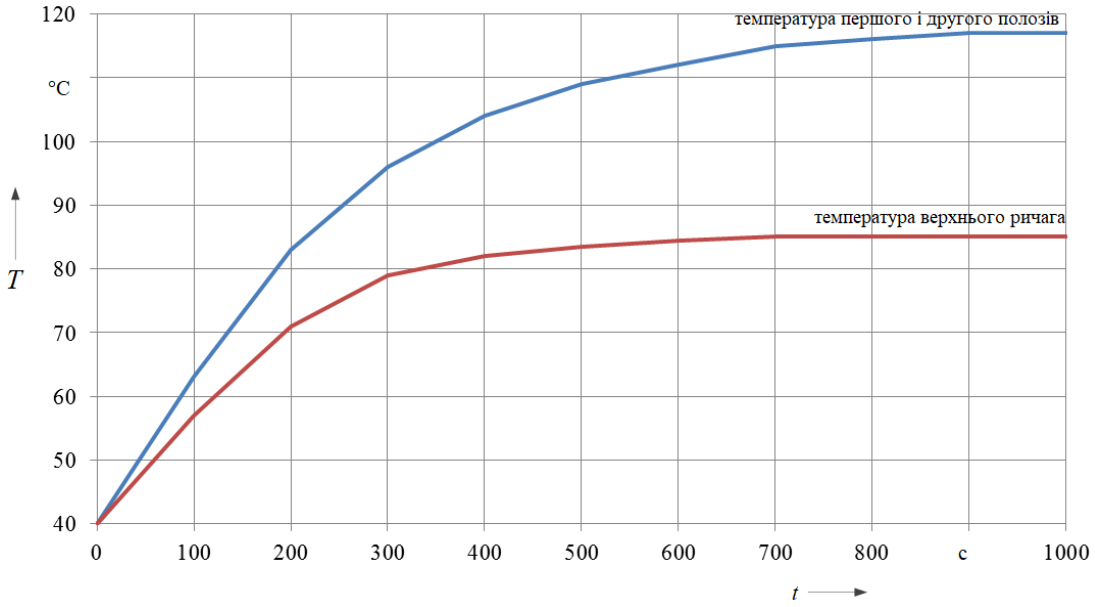


Рисунок 3.5 – Фрагмент графіка результатів розрахунку температур в режимі трогання

Для режиму стоянки отримана не тільки залежність температури від часу, але і значення при сталому режимі (струм 150 А при стоянці υ = 0 м/с) (рис. 3.6).

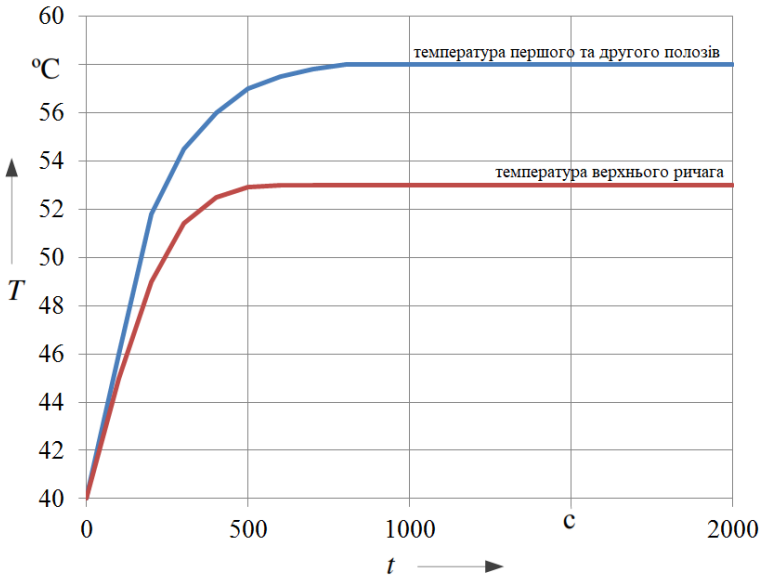


Рисунок 3.6 – Фрагмент графіка температур в режимі стоянки

Результати розрахунку теплової математичної моделі показують досить адекватні дані. В цілому запропонована методика і математична модель є працездатною.

3.2 Узагальнення та уточнення електричної схеми заміщення струмоприймача

Уточнена електрична схема заміщення асиметричного струмоприймача наведена на рис. 3.7.

Елементи верхньої рами адекватно заміщені відповідними опорами, включаючи поперечні конструкції (тяга, посилююча планка, кінцеве відведення), через які тяговий струм протікає навіть при симетричному положенні контактного проводу щодо полоза через небаланс опорів верхньої рами, що обумовлено асиметричною конструкцією верхнього важеля.

Для визначення струмів в електричній схемі виконані аналогічні перетворення, в результаті яких отримано узагальнення опору струмоприймача, струми і напруги можливо визначити в явній залежно від відомого тягового струму струмоприймача.

Нижня конструкція системи рухомих рам замінена еквівалентним опором. Вважаємо, що тяговий струм не протікає через синхронізуючі тяги, тому в них включені ізолюючі елементи. Нижня рама має еквівалентну схему заміщення, що дозволяє, як і для верхніх конструкцій, моделювати режим відриву будь-якого шунта.

Характеристики, умови руху аналогічні наведеним для спрощеної моделі, параметри розрахунку відповідають складності моделі струмоприймача.

Таблиця 3.2 – **Параметри розрахунку теплової моделі струмоприймача**

№ п/п	Найменування фізичної величини	Позначення	Величина	Од.вим.
1	Час кроку	s	4	с
2	Крок ітерацій	k	0,001	–
3	Кількість ітерацій	K	4000	–
4	Ранжована змінна	t	$t \in [0; 100]$	с
5	Середнє значення струму стр.	I	400	А

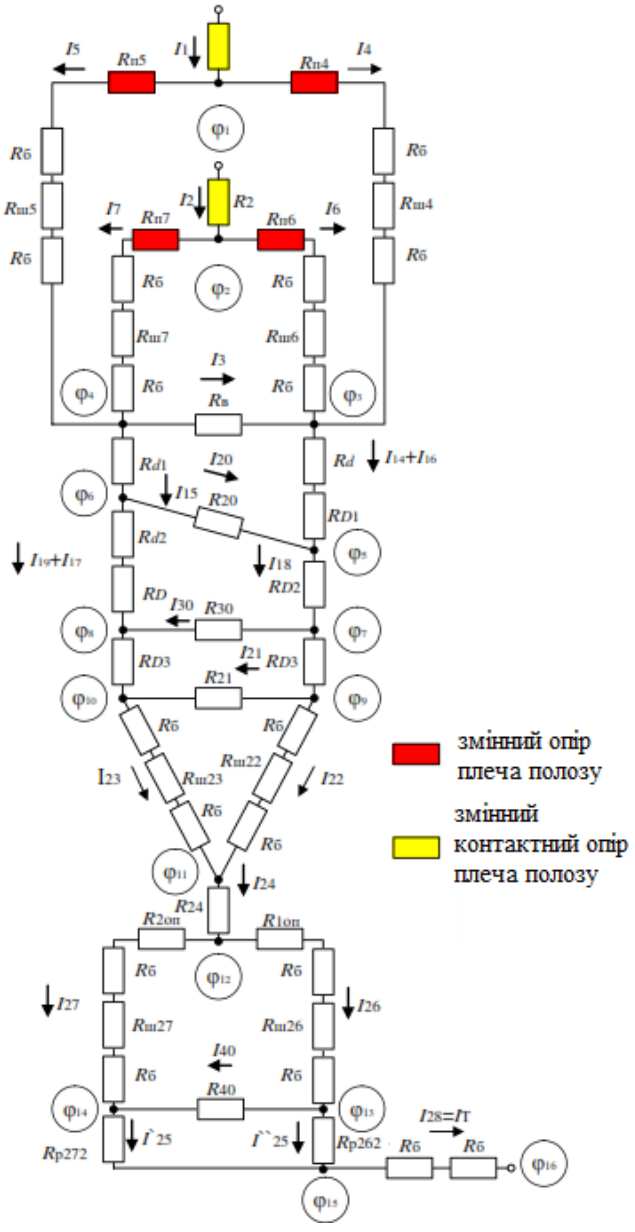


Рисунок 3.7 – Електрична схема заміщення струмоприймача

Значення постійних і незмінних величин приведені в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – **Значення опорів елементів струмоприймача**

Налаштування ділянки ланцюгу	Позначення	Величина	Од. вим.
Перехідний опір контакту при номінальному натиску	$R_1; R_2$	0,015	Ом
Повздовжній опір полозу	R_m	0,004	Ом
Болтове з'єднання шунта	$R_б$	0,002	Ом
Верхній вал	$R_B; R_{03}$	0,003	Ом
Тонка труба верхнього ричага	R_d	0,0025	Ом
Товста труба верхнього ричага	R_D	0,0015	Ом
Діагональна труба верхнього ричага	R_{20}	0,0025	Ом
Верхній відрізок лівої тонкої труби, що розділена діагональною трубою верхнього ричага	$R_{d1}; R_{15}$	0,00125	Ом
Верхній відрізок правої товстої труби, розділеної діагональною трубою верхнього ричага	R_{D1}	0,00075	Ом
Нижня перемичка верхнього ричага	R_{30}	0,0005	Ом
Права нижня частина верхнього ричага	$R_{192}; R_{D3}$	0,0005	Ом
Ліва нижня частина верхнього ричага	$R_{182}; R_{D3}$	0,0005	Ом
Кронштейн кріплення верхнього ричага	R_{21}	0,0009	Ом
Середній шунт	$R_{срш}; R_{ш22}; R_{ш23}$	0,0003	Ом
Стрижень нижнього ричага	R_{24}	0,001	Ом
Нижній шунт	$R_{нш}; R_{ш26}; R_{ш27}$	0,0003	Ом
Поперечна балка основи	R_{40}	0,004	Ом
Права повздовжня балка	R_{262}	0,004	Ом
Ліва повзовжня балка	R_{272}	0,004	Ом
Верхній шунт	$R_{вш}; R_{ш4}; R_{ш5}; R_{ш6}; R_{ш7}$	0,0003	Ом

Подальші перетворення електричної схеми заміщення струмоприймача приведено лише в графічному вигляді (рис. 3.8…3.13).

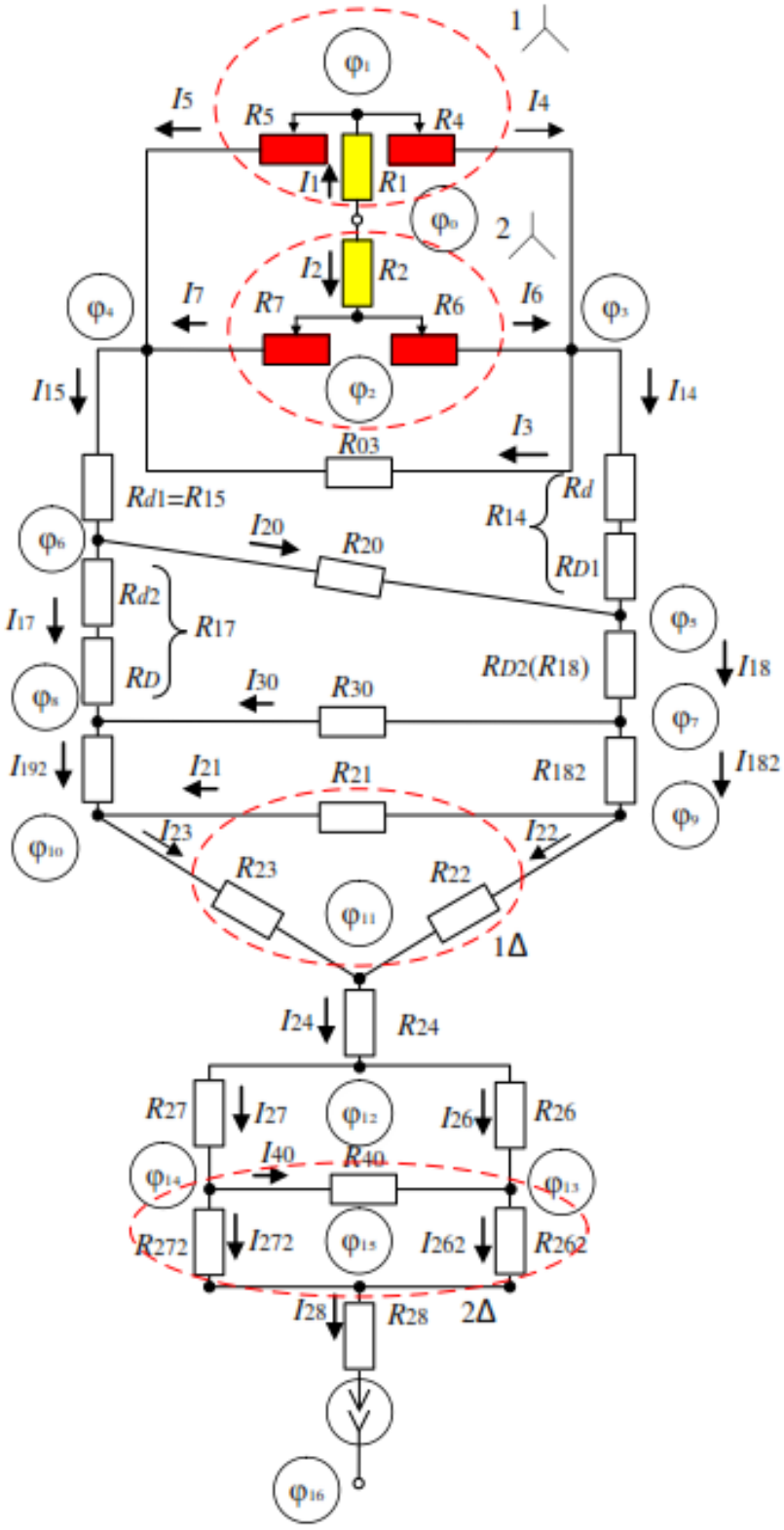


Рисунок 3.8 – Електрична схема заміщення струмоприймача після об’єднання послідовних опорів

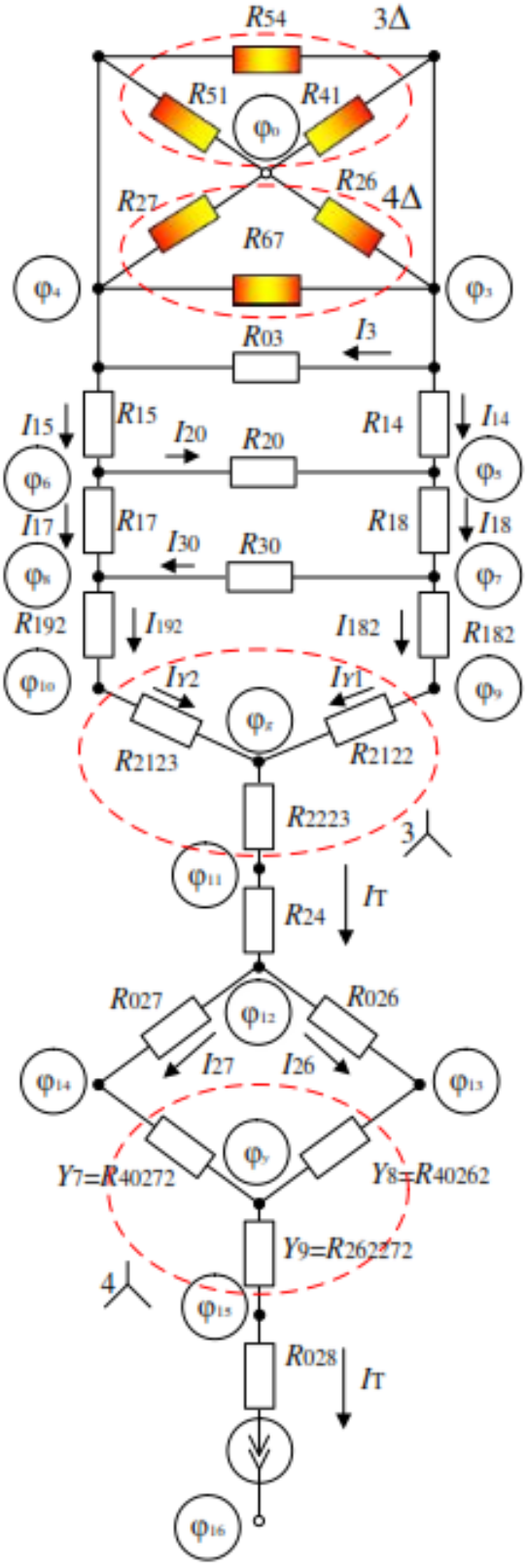


Рисунок 3.9 – Електрична схема заміщення струмоприймача після першого перетворення

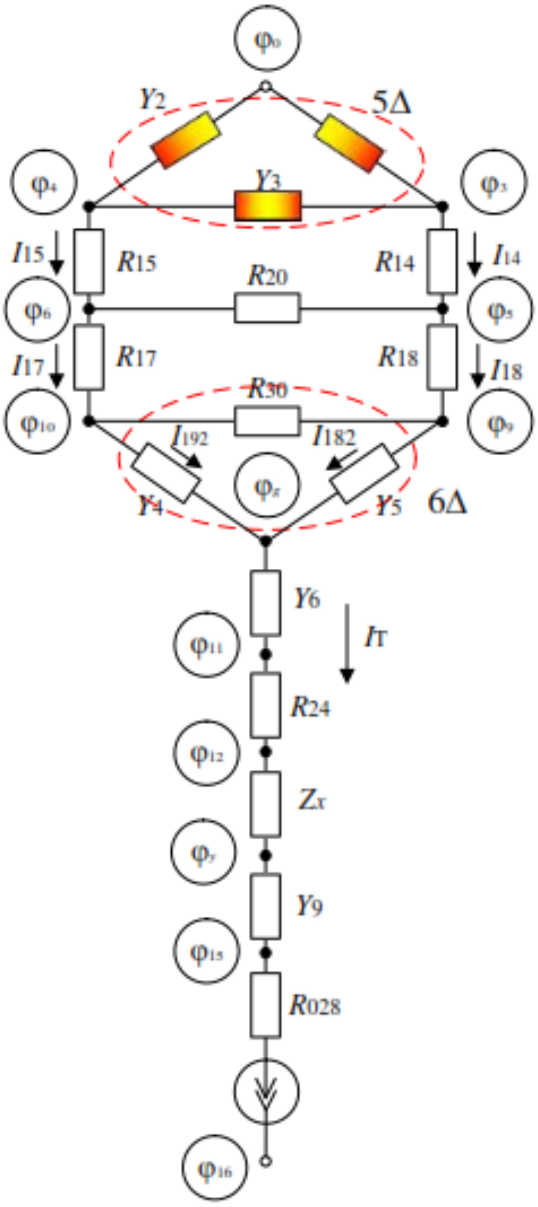


Рисунок 3.10 – Електрична схема заміщення струмоприймача після об’єднання послідовних опорів

Розроблена комплексна модель придатна для розрахунків на ЕОМ. Діючі значення струмів обчислюються для елементів всіх варіантів перетворених схем заміщення. Даний підхід значно скорочує обсяг обчислень при необхідності розрахунку цікавлять окремих вузлів струмоприймача.

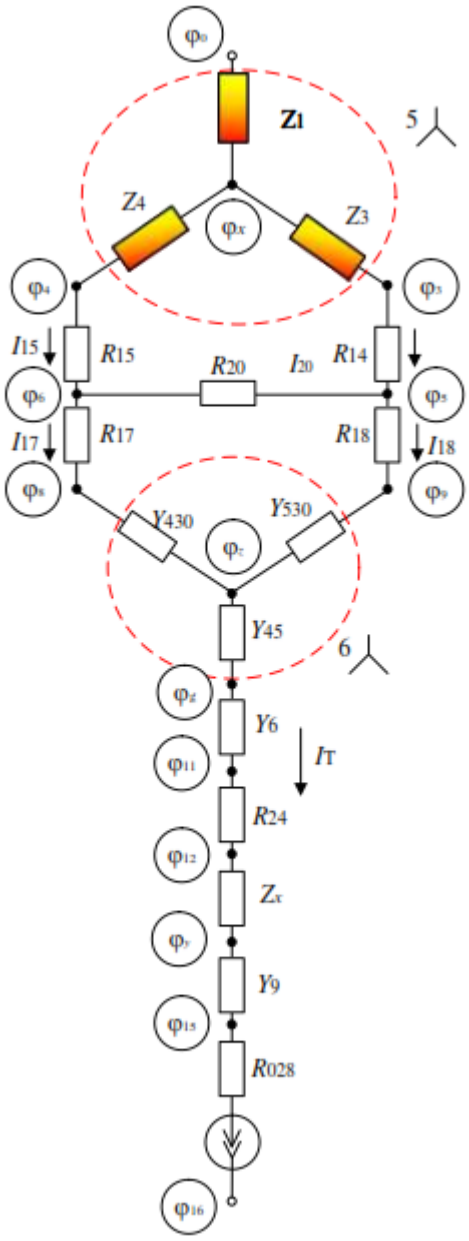


Рисунок 3.11 – Електрична схема заміщення струмоприймача після другого перетворення

Тепловий розрахунок виконується в нестаціонарному режимі.

Потрібно відзначити, що під час руху струмоприймач значну частину часу перебуває в перехідному температурному режимі, так як постійно змінюються умови його охолодження і струм, що нагріває елементи струмоприймача.

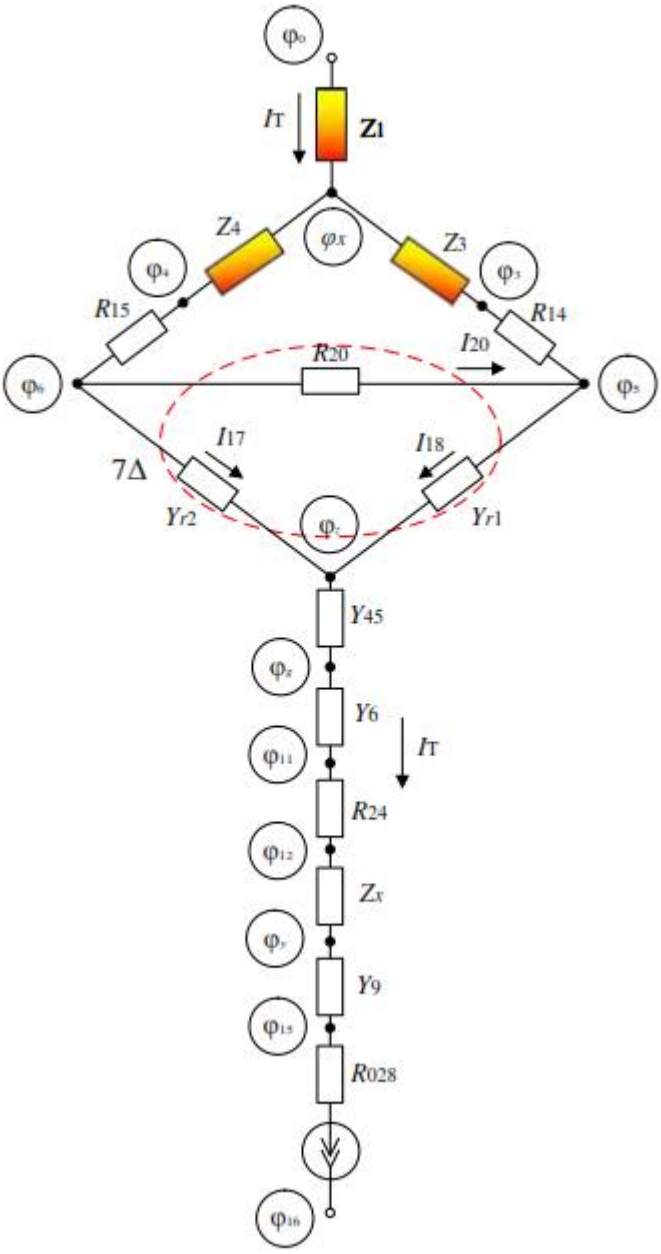


Рисунок 3.12 – Електрична схема заміщення струмоприймача після другого перетворення і після об’єднання послідовних опорів

Аналіз зміни температури окремих вузлів під час розрахункових режимів показує, що швидкість нагріву в загальному випадку не однакова (рис.3.14). Швидкість настання встановленого режиму залежить від тепловіддачі вузла і потужності внутрішніх джерел теплоти.

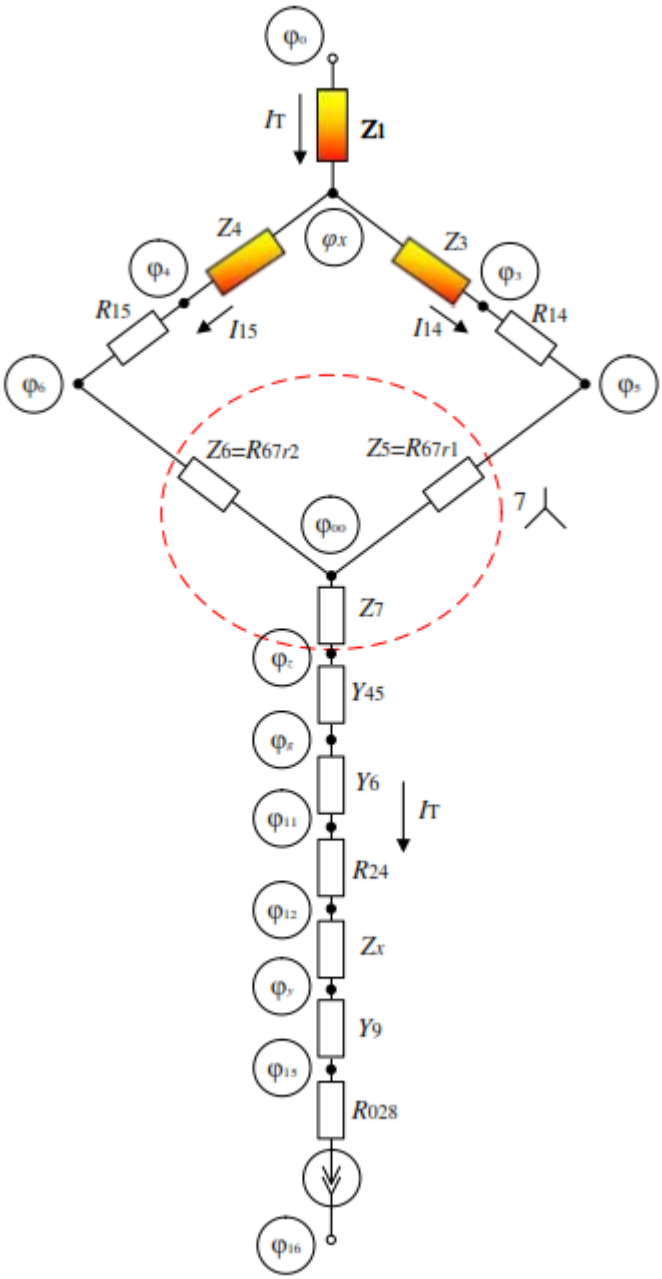


Рисунок 3.13 – Електрична схема заміщення струмоприймача після третього перетворення

Вузли, що мають температуру, не набагато перевищує температуру навколишнього середовища можна вважати «недовантаженими» і виконувати перевірку їх перетину на механічну міцність (перевірити можливість зниження їх маси).

Результати теплового розрахунку струмоприймачів, призначених для швидкісного руху, свідчать про допустимому тепловому режимі конструкції при використанні струмознімальних вставок, виконаних з мідно-графітового композиту, при цьому максимальна температура полозів не повинна перевищуватиме 120 ° С при русі і 90 ° С при стоянці.

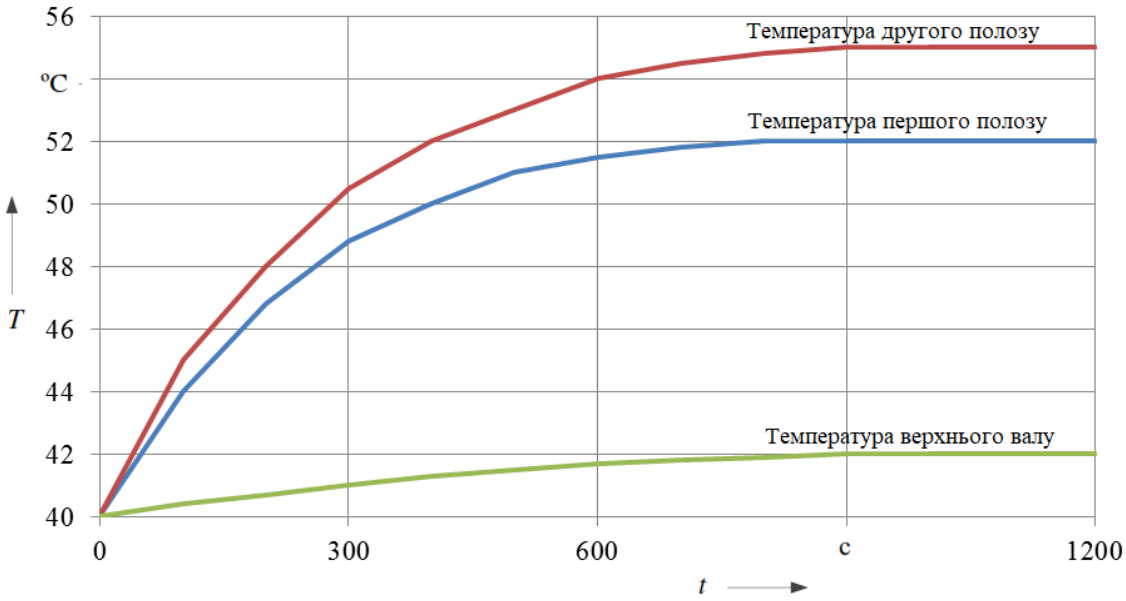


Рисунок 3.14 – Зміна температури верхнього вузла струмоприймача

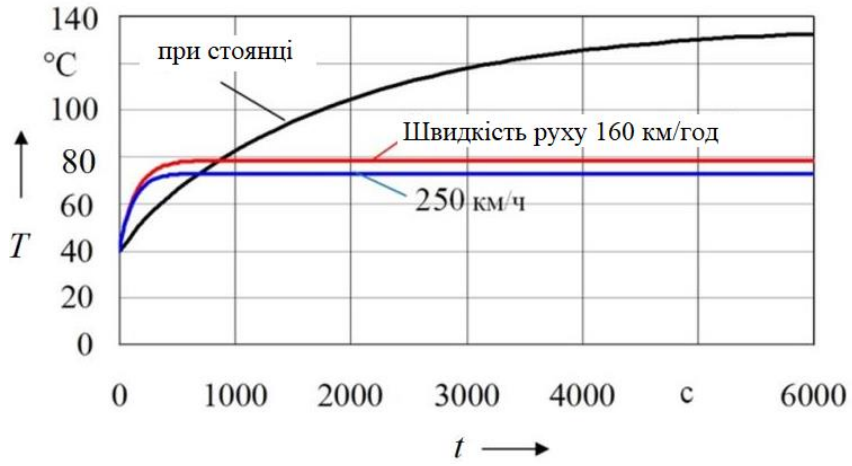


Рисунок 3.15 – Зміна температури полоза струмоприймача при різних режимах

Облік зміни значень електричних опорів забезпечує можливість більш повно використовувати навантажувальну здатність створюваних з допомогою запропонованої моделі струмоприймачів, визначаючи перетину

струмоведучих елементів не тільки за механічним і електричному, але і по тепловому розрахунку в комплексі.

Використання пропонованої моделі дозволяє на стадії проектування струмоприймача переконатися в досяжності заявлених значень навантажувальної здатності розроблюваного струмоприймача.

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

1. Проведено аналіз конструктивних особливостей струмоприймачів та виокремлені основні впливаючі фактори на процеси нагріву його елементів при протіканні струмів.

2. Запропонована комплексна теплова модель струмоприймача дозволяє враховувати несиметрію його конструкції в умовах стаціонарних і перехідних режимів навантаження.

3. Застосування пропонованої методики дозволяє на етапі розрахунку переконатися в досяжності необхідних значень електричного навантаження на струмоприймача.

4. Отримані в роботі результати дозволяють більш точно визначати напрямки удосконалення конструкції струмоприймачів з точки зору їх навантажувальної здатності та опосередковано впливати на зменшення пошкоджень контактної мережі в ході експлуатації зі споживанням великих струмів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Михеев, В. П. Контактные сети и линии электропередачи: Учебник для вузов ж.-д. транспорта / В. П. Михеев. – М.: Маршрут, 2003. – 416 с.
2. Contact Lines for Electrical Railways / Kiessling, F., Puschmann, R., Schmieder, A., Schneider, E. – Germany: Publicis MCD Verlag, 2009. – 994 p.
3. Вологин, В. А. Взаимодействие токоприемников и контактной сети. – М.: Интекст, 2006 – 256 с.
4. Купцов Ю. Е. Увеличение срока службы контактного провода. – М.: Транспорт, 1972. – 160 с.
5. Берент, В. Я. Материалы и свойства электрических контактов в устройствах железнодорожного транспорта / В. Я. Берент. – Москва : Интекст, 2005. – 408 с.
6. Купцов, Ю. Е. Беседы о токосъеме и его надежности, экономичности и о путях совершенствования / Ю. Е. Купцов. – Москва : Модерн – А, 2001. – 256 с.
7. Фрайфельд, А. В. Проектирование контактной сети 3-е изд., перераб. И доп / А. В. Фрайфельд, Г. Н. Брод. – М: Транспорт, 1991. – 335 с.
8. Колесов, С. М. Материалы и взаимодействие контактной подвески и токоприемника / С. М. Колесов, И. С. Колесов. – Днепропетровск : ДНУЖТ, 2006. – 284 с.
9. 39. Ефимов, Д.А. Определение параметров контактной пары «токоприемник – контактный провод» / Д.А. Ефимов // Транспорт Урала. – 2014. – № 4 (43). – С. 72–75.
10. Беляев, И.А. Взаимодействие токоприѐмника и контактной сети при высоких скоростях движения / И.А. Беляев. – М.: Транспорт, 1968. – 159 с.
11. Беляев, И.А. Взаимодействие токоприемников и контактной сети / И.А. Беляев, В.А. Вологин. – М.: Транспорт, 1983. – 191 с.

12. Беляев, И.А. Взаимодействие токоприёмников и контактной сети / И.А. Беляев. – М.: Интекст, 2006. – 256 с.

13. Марквардт, К.Г. Контактная сеть: Учебник для вузов ж.-д. транс. / К.Г. Марквардт, И.И. Власов. – М.: Транспорт, 1977. – 271 с.

14. Вологин, В.А. Динамические параметры системы контактная сеть — токоприемник / В.А. Вологин, В.А. Болотин, А.С. Герасимов // Вестник ВНИИЖ-Та. – 2008. – № 2. – С. 19–23.

15. Фрайфельд, А.В. Уточнение графо-аналитического метода построения траектории токоприемника / А.В. Фрайфельд, М.М. Ерофеева // Труды Москов-ского ин-та инж. ж.-д. транспорта. – 1970. – № 125. – С. 102–106.

16. Беляев, И.А. Токосъем и токоприемники электроподвижного состава / И.А. Беляев, В.П. Михеев, В.А. Шиян. – М.: Транспорт, 1976. – 184 с.

17. Михеев, В.П. К расчету взаимодействия токоприемника с контактными подвесками с одновременным учетом ряда инерционных эффектов / В.П. Михеев, А.Н. Горбань // Энергосбережение электрических железных дорог: Науч. тр. Омского ин-та ж.-д. транспорта. Омск: ОмГУПС. – 1974. – Т. 162. – С. 56–68.

18. Сидоров, О.А. Математическое моделирование ударных процессов при взаимодействии скоростных токоприемников с жестким токопроводом / О.А. Сидоров, А.С. Голубков, И.Л. Саля // Моделирование. Теория, методы и средства: Материалы V Международной научно-практической конференции. – Новочер-касск: Южно-Российский гос. техн. ун-т., 2005. – С. 57–59.

19. Применение искусственных нейронных сетей для расчета интеграль-ных показателей качества токосъема / О.А. Сидоров [и др.] // Актуальные проблемы проектирования и эксплуатации контактных подвесок

и токоприемников 148 электрического транспорта: Сборник научных статей с международным участи-ем. – Омск: ОмГУПС, 2011. – С. 42–50.

20. Кумезава, И. Контактная подвеска при высоких скоростях движения на электрических железных дорогах / И. Кумезава // Еже-мес. бюл. Междунар. ас-социации ж.-д. конгрессов. – 1962. – № 1. – С. 3–14.

21. Моррис, Р.Б. Применение аналоговых вычислительных машин к про-блеме пантографа и контактной сети / Р.Б. Моррис // Ежемес. бюл. Междунар. ас-социации ж.-д. конгрессов. – 1967. – № 1. – С. 21–41.

22. Nibler, H. Dynamishes verhalten von fahreitung und stromabnehmer bei eleltri-shen hauptbahen / H. Nibler // Elektrische Bahnen. – 1950. – № 10. – С. 8–13.

23. Фуджии, С. Динамика токоприемника / С. Фуджии, Н. Сибата // Мате-риалы VII Японского национального прогресса по прикладной механике. – 1957. – С. 43–47.

24. Simulating the dynamic interaction between pantograph and catenary [Элек-тронный ресурс]. – URL: http://www.railway-research.org/IMG/pdf/010.pdf.

25. Ефимов, Д.А. Учет изгибной жесткости контактного провода в моде-лировании контактной подвески / Д.А. Ефимов // Транспорт Урала. – 2009. – № 1. – С. 79–82.

26. Паранин, А.В. Расчѐт распределения тока в контактном проводе и в полозе токоприѐмника при токосъѐме / А.В. Паранин, Д.А. Ефимов // Транспорт Урала. – 2009. – № 4. – С. 81–84.

27. Михеев, В.П. Расчет взаимодействия токоприемника ВСМ с контакт-ной подвеской, учитываемой сосредоточенными параметрами / В.П. Михеев, В.И. Себелев, Э.Р. Абдулин // Железнодорожный транспорт Сибири: проблемы и пер-спективы: Материалы межвуз. науч.-практ. конф. – Омск: ОмГУПС, 1998. – С. 16–25.

28. Моррис, Р.Б. Применение аналоговых вычислительных машин к про-блеме пантографа и контактной сети / Р.Б. Моррис // Ежемес. бюл. Междунар. ас-социации ж.-д. конгрессов. – 1967. – № 1. – С. 21–41.

29. Кудряшов, Е. В. Моделирование динамического взаимодействия токоприемников и контактной подвески с использованием метода конечных элементов // Тез. докл. шестого международного симпозиума «Элтранс-2011»: Электрификация и развитие инфраструктуры энергообеспечения тяги поездов на железнодорожном транспорте. – СПб., ПГУПС, 2011. – С. 23.

30. 117. Финиченко, В. Н. Совершенствование токоприемников для скоростных и тяжеловесных поездов [Текст]: дис. канд. тех. наук. Омск., 2008. – 150 с.

31. Божко, В. В. Особливості конструкції контактної мережі змінного струму для швидкостей руху 160–200 км/год для залізниць України / В.В. Божко, О.О. Краснов, С.В. Демченко // Електрифікація транспорту. – 2015. - №9. – С. 8 – 14.

32. UIC 799-1. Characteristics of direct-current overhead contact systems for lines worked at speeds of over 160 km/h and up to 250 km/h. Translation International Union of Railways (UIC) [Текст]. – England (EU). – 2002. – 25 с.

33. ГОСТ 32793 – 2014. Токосъем токоприемником железнодорожного электроподвижного состава. Номенклатура показателей качества и методы их определения [Текст]. Введен в действие 01.09.2015. – М.: ФГУП «Стандартинформ», 2015. – 15 с. 73.

34. Behrends, D. Prufung der interoperablen oberleitungsbauart EAC 350 [Текст] / D. Behrends, T. Vega // Elektrische Bahnen. 2005. – Vol. 103, No. 4. – P. 273 – 241.

35. Elektrifizierung der hochgeschwindigkeitsstrecke Madrid – Lérida [Текст] / J. M. G. Ortiz, H.-P. Wipfler, H. Tessun et. al. // Elektrische Bahnen. – 2003. – Vol. 100, No. 12. – P. 466 – 472. 75.

36. Fumi, A. Контактная сеть железных дорог Италии [Текст] / A. Fumi // Железные дороги мира. 2003. – №5. – С. 12 – 17.

37. Павличенко, М. Е. Совершенствование конструкции верхнего узла токоприемника / Павличенко М. Е. // Вісник ДНУЗТ ім. Акад. В. Лазаряна. – 2008. – №24. – С.78 – 79.

38. Методичні вказівки до виконання дипломних проектів та робіт [Текст]/ уклад: В. Г. Сиченко, В. О. Дьяков, О. О. Матусевич, М. С. Пастушенко; Дніпропетр. нац. ун-т залізнич. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-т залізнич. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2014. – 39 с.