

МІНІСТЕРСТВО 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 **Дослідження статичного контактного натискання струмоприймача
на проводи контактної підвіски**

Theme **Investigation of static contact pressure of the current collector on the
wires of the contact suspension**

Керівник дипломної роботи доц. _____ А. В. Антонов

Нормоконтролер доц. _____ Т. М. Міщенко

Студент групи ЕС1926 _____ Д. Є. Нікітенко

Student Nikitenko Dmytro

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 Нікітенко Д.Є.
(номер групи) (ПІБ)

1 Тема дипломної роботи: «Дослідження статичного контактного натискання струмоприймача на проводи контактної підвіски»

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): типові альбоми контактної мережі, технічна документація струмоприймачів, Правила улаштування та технічного обслуговування контактної мережі електрифікованих залізниць

4 Зміст пояснювальної записки (перелік питань до розробки): аналіз струмознімання при швидкісному русі, моделювання системи струмознімання, результати моделювання взаємодії струмоприймача з контактною підвіскою

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва розділу	Термін виконання	Обсяг розділу, %
ВСТУП	23.09	5
АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ СТРУМОЗНІМАННЯ ПР ШВИДКІСНОМУ РУСІ	15.10	25
ПЕРЕДУМОВИ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ СТРУМОЗНІМАННЯ	11.11	30
РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ ВЗАЄМОДІЇ СТРУМОПРИЙМАЧА З КОНТАКТНОЮ ПІДВІСКОЮ	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) (ПБ)

Завдання прийняв до виконання

_____ Нікітенко Д.Є.
(підпис) (ПБ)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка має обсяг 89 сторінок, складається з 3 розділів та містить 34 ілюстрації, 5 таблиць, 1 додаток, 39 бібліографічних джерел.

Мета роботи – Метою роботи є дослідження впливу статичного контактного натискання струмоприймача на проводи контактної підвіски.

Питання забезпечення відповідної швидкісному режиму якості струмознімання комплексне і при його розгляді необхідно враховувати як механічні параметри контактних підвісок так і їх здатність передавати необхідну потужність до електрорухомого складу.

Основні напрямки в створенні нових контактних підвісок та струмоприймачів, автоматизованих систем проектування та моделей взаємодії контактних підвісок зі струмоприймачами відображені в дослідженнях, проведених в наукових працях І. А. Беляєва, І. І. Власова, В. А. Вологіна, Ю. І. Горошкова, Ю. І. Жаркова, Ю. Е. Купцова, К. Г. Марквардта, В. П. Міхеєва, Е. П. Фігурнова, А. В. Фрайфельда, О. А. Сидорова, І. С. Гершмана та інших.

Проведений аналіз останніх публікацій показує, що головною передумовою впровадження швидкісного руху на електрифікованих залізницях України є визначення найбільш раціональних параметрів струмоприймачів та контактних підвісок, які б дозволяли експлуатувати електрорухомий склад з відповідним швидкісним режимом та забезпеченням необхідного рівня потужності, що отримується з контактної мережі.

Ключові слова: ШВИДКІСНИЙ РУХ; ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТ; СТРУМОПРИЙМАЧ; МОДЕЛЮВАННЯ.

ЗМІСТ

ВСТУП..	6
1 1. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ СТРУМОЗНІМАННЯ ПРИ ШВИДКІСНОМУ РУСІ	10
1.1 Показники якості струмознімання.....	10
1.2 Струмоприймачі електрорухомого складу	14
1.3 Шляхи удосконалення струмоприймачів електрорухомого складу	30
1.4 Дослідження взаємодії контактних підвісок зі струмоприймачами	34
1.5 Стаціонарні системи діагностування системи струмознімання	39
1.6 Стаціонарні комплекси перевірки параметрів струмоприймачів.....	40
2 ПЕРЕДУМОВИ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ СТРУМОЗНІМАННЯ	44
2.1 Метод розрахунку процесу струмознімання при розгляді контактної підвіски як коливальної системи з розподіленими параметрами.....	47
2.2 Метод розрахунку взаємодії контактної підвіски зі струмоприймачем в усталеному режимі.....	49
2.3 Динамічна взаємодія струмоприймачів з контактними підвісками	53
2.4 Моделювання струмоприймача.....	54
3 РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ ВЗАЄМОДІЇ СТРУМОПРИЙМАЧА З КОНТАКТНОЮ ПІДВІСКОЮ	65
3.1 Результати моделювання взаємодії струмоприймачів з контактними підвісками....	65
3.2 Аналіз результатів дослідження та підтвердження їх адекватності	77
ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ	80
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	81
Додаток А	86

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розробив		Нікітенко Д.Є.			Дослідження статичного контактного натискання струмоприймача на проводи контактної підвіски	Літ.	Арк.
Керівник		Антонов А. В.					5
Н. Контр.		Міщенко Т.М.				Аркушів	89
						ДНУЗТ, ІСЕ гр.ЕС1926	

ВСТУП

Забезпечення високої якості струмознімання, тобто визначення необхідних параметрів контактної підвіски й струмоприймачів і їх раціональних конструкцій при високих економічних показниках, є основною метою дослідження взаємодії контактної мережі та струмоприймачів.

З однієї сторони важливим моментом є безперервне вдосконалювання існуючих систем проектування і створення нових типів контактних підвісок та струмоприймачів, синтез нових матеріалів і методик розрахунку з використанням останніх досягнень в області інформаційних технологій і комп'ютерної техніки.

З іншої сторони важлива роль належить розробці методик підтримок станів контактної мережі й струмоприймачів електрорухомого складу на високому технічному рівні за рахунок одержання й застосування оперативної інформації про поточні експлуатаційні характеристики елементів у режимі реального часу.

Основні напрямки в створенні нових контактних підвісок та струмоприймачів, автоматизованих систем проектування та моделей взаємодії контактних підвісок зі струмоприймачами відображені в дослідженнях, проведених в наукових працях І. А. Беляєва, І. І. Власова, В. А. Вологіна, Ю. І. Горошкова, Ю. І. Жаркова, Ю. Е. Купцова, К. Г. Марквардта, В. П. Міхєєва, Е. П. Фігурнова, А. В. Фрайфельда, О. А. Сидорова, І. С. Гершмана та інших.

Проведений аналіз останніх публікацій показує, що головною передумовою впровадження швидкісного руху на електрифікованих залізницях України є визначення найбільш раціональних параметрів струмоприймачів та контактних підвісок, які б дозволяли експлуатувати електрорухомий склад з відповідним швидкісним режимом та забезпеченням необхідного рівня потужності, що отримується з контактної мережі.

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

Питання забезпечення відповідної швидкісному режиму якості струмознімання комплексне і при його розгляді необхідно враховувати як механічні параметри контактних підвісок так і їх здатність передавати необхідну потужність до електрорухомого складу. Результати ж існуючих досліджень розглядають питання підвищення якості струмознімання тільки в окремих напрямках і не враховують можливий вплив зміни конструктиву контактної мережі на її навантажувальну здатність і навпаки. Відсутність комплексного погляду на питання підвищення якості струмознімання може призвести до нераціонального використання технічного ресурсу обладнання та зайвих матеріальних витрат на експлуатацію електрифікованих ділянок залізниць.

Актуальність роботи. Якість струмознімання охарактеризується цілою сукупністю показників, серед яких необхідно виділити натиск струмоприймача, який обумовлює подальшу взаємодію з контактною підвіскою і появу процесів, які викликані цим. При впровадженні швидкісного руху, оновленні електрорухомого складу та інфраструктури набуває важливості питання комплексного дослідження взаємодії струмоприймача електрорухомого складу з контактною підвіскою. А так як спорудження контактної мережі на електрифікованих залізницях є довгостроковим фінансовим вкладенням, від якого залежить якість надання послуг з транспортування вантажів та пасажирів, обґрунтування вибору конструктиву струмоприймача при впровадженні швидкісного руху на електрифікованих залізницях та розробка моделей його взаємодії з контактними підвісами може забезпечити підвищення життєвого циклу контактної підвіски і разом з тим кількість витрат на її обслуговування. Тому, дослідження взаємодії струмоприймача електрорухомого складу з контактною підвіскою є важливим і актуальним завданням.

Зв'язок роботи з науковими програмами. Робота відповідає науковим напрямкам роботи кафедри «Інтелектуальні системи електропостачання»

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.

Мета і завдання роботи. Метою роботи є дослідження впливу статичного контактного натискання струмоприймача на проводи контактної підвіски.

Відповідно до поставленої мети в роботі вирішені наступні завдання:

- проаналізувати параметри струмоприймачів, які впливають на процес їх взаємодії з контактними підвісками;
- проаналізувати засоби та способи контролю взаємодії струмоприймачів та контактних підвісок;
- провести аналіз існуючих моделей взаємодії струмоприймачів та контактних підвісок;
- обрати найбільш доцільну модель струмоприймача;
- розробити прогнозну модель взаємодії струмоприймача з контактною підвіскою та оцінити їх взаємодію;
- проаналізувати результати досліджень.

Об'єкт дослідження – струмоприймач електрифікованого залізничного транспорту.

Предмет дослідження – параметри та показники струмоприймача електрифікованого залізничного транспорту.

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

Наукова новизна та основні положення, які виносяться на захист.

Розроблено прогнозну нейромережеву модель взаємодії струмоприймача з контактною підвіскою, яка відрізняється від існуючих можливістю накопичення статистичних даних та їх врахування при моделювання взаємодії струмоприймачів різних типів з контактними підвісками.

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Практичне значення отриманих результатів:

Отримані в роботі результати дозволяють більш точно визначати показники якості струмознімання, такі як натиск струмоприймача, відсікання контактного проводу, еластичність контактної підвіски. Вказане дозволяє, при умові створення аналогічної моделі контактної підвіски, оцінювати процес їх взаємодії при зміні конструктивних особливостей.

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.

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

1. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ СТРУМОЗНІМАННЯ ПРИ ШВИДКІСНОМУ РУСІ

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 Показники якості струмознімання

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.

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

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].

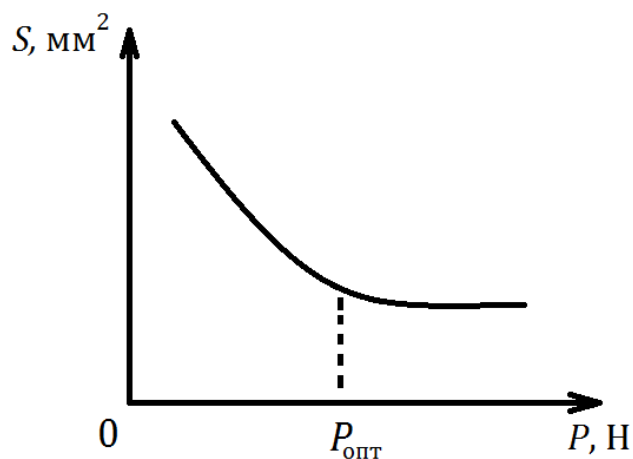


Рисунок 1.1 – Залежність зносу від натиску струмоприймача

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].

Коефіцієнт відносної зміни контактного натиску n , обирається з двох значень:

$$n_1 = \frac{P_{max}}{P_c - 1} \text{ чи } n_2 = \frac{P_{min}}{P_c - 1} \quad (1.1)$$

де P_{max} та P_{min} – екстремальні значення контактної натиску в одному й тому ж прольоті, Н.

Струмознімання можна рахувати прийнятними, якщо $|n| \leq 0,3 \div 0,5$. Чим більша швидкість руху, тим меншим необхідно приймати максимальне значення n .

Максимальна змінна складова контактної натиску Q , яка визначається з наступних двох значень:

$$Q_1 = P_{max} - P_c \text{ та } Q_2 = P_{min} - P_c \quad (1.2)$$

Виходячи з вищесказаного, струмознімання можна рахувати задовільним, при умові:

$$|Q_{max}| \leq (0,3 \div 0,5) \cdot P_c \quad (1.3)$$

При наявності кривих зміни контактної натиску вздовж прогону, в якості показника якості струмознімання можна використовувати його середньоквадратичне відхилення:

$$\sigma[P] = \sqrt{\sum_{i=1}^n [P_i - m(P)]^2 \cdot \frac{n_i}{n}} \quad (1.4)$$

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

де P_i – середнє значення контактнoгo натиску в інтервалі i ;

n_i – число випадків зі значенням P_i ;

n – загальна кількість випадків (інтервалів).

Чим менша величина $\sigma[P]$, тим краща якість струмознімання.

Також, для оцінки якості струмознімання можуть використовуватись показники, що характеризують вертикальні переміщення точки контакту:

$$2A = y_{k \max} - y_{k \min} \quad (1.5)$$

де $y_{k \max}$ та $y_{k \min}$ – екстремальні значення висоти точки контакту в одному й тому ж прольоті.

Відтискання контактнoгo проводу в заданій точці описується виразом:

$$y'_{kx} = y_{kx} - z_{kx} \quad (1.6)$$

де y_{kx} та z_{kx} – ординати контактнoгo проводу на відстані x від опори відповідно при наявності та відсутності натиску струмоприймача.

В тих випадках, коли при зрівнянні якості струмознімання можливо визначити час відриву полозу струмоприймача від контактнoгo проводу, може бути використовуватись коефіцієнт відриву струмоприймача:

$$k_{\text{в}} = \frac{\tau_{\text{в}}}{\tau} \cdot 100\% \quad (1.7)$$

де $\tau_{\text{в}}$ – сумарний час відриву струмоприймача.

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

Струмознімання можна вважатися задовільним, якщо $k_g \leq 0,3\%$.

1.2 Струмоприймачі електрорухомого складу

Струмоприймач ЕРС – це пристрій, що забезпечує передачу електричної енергії від контактного проводу до електроустаткування ЕРС.

При русі ЕРС повинні бути виключені удари струмоприймача по елементам підвіски в результаті їх динамічних переміщень. Не допускається електромагнітний вплив процесу струмознімання, що обумовлюються виникненням електричної дуги, на зовнішні електро- і радіопристрої.

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.

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

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 оплаватися, 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

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

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 мм² (замість 50 мм²), контактний провід виконаний з міді, легованої сріблом (Ag 0, 1%), і має перетин 120 мм² (замість 100 мм²), а ресорний трос (БрМг0,35) має перетин 35 мм² (замість 25 мм²). 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/мм², 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

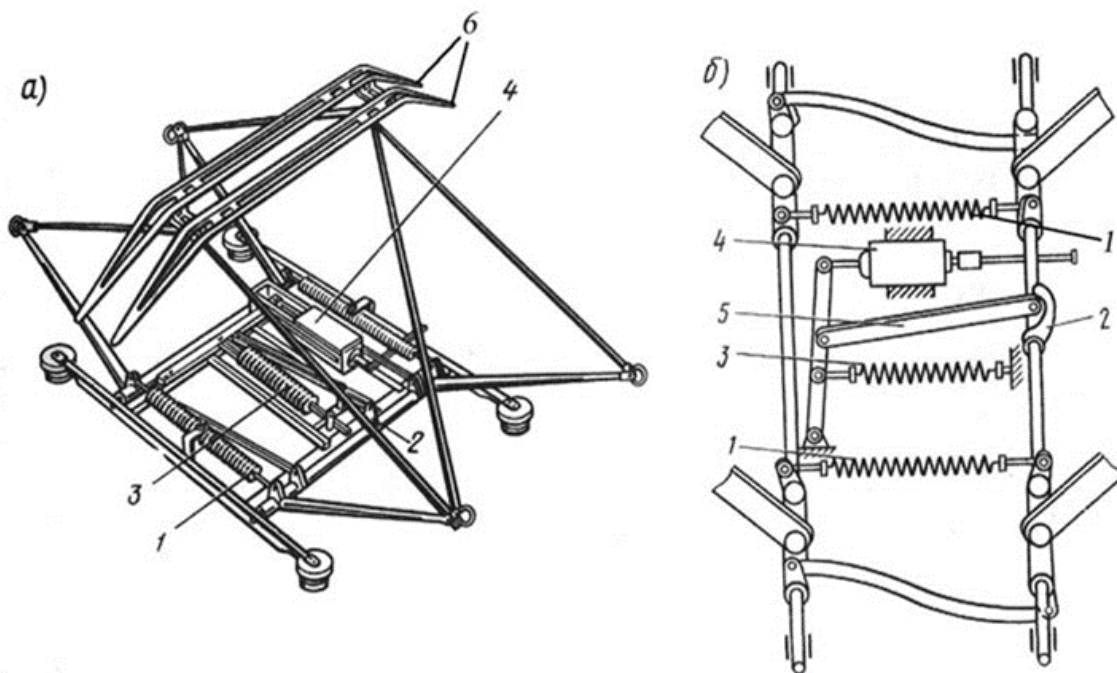
					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

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.
- У робочому стані струмоприймач притискає свої полози 6 до контактної провладу пружинами 1. Для цього в циліндр 4 впускають стиснене повітря його поршень відводить убік важіль 5, в результаті впливу пружини 3 на важіль 2 припиняється і пружини 1 піднімають струмоприймач. Щоб струмоприймач опустити, потрібно випустити повітря з циліндра 4, тоді пружина 3 натискає через важіль 5 на важіль 2 і струмоприймач опускається. Таким чином, підйом і опускання струмоприймача виробляють пружини 1 і 3 відповідно, повітряний циліндр 4 і важелі 2 і 5. Час опускання струмоприймачів всіх типів від максимальної робочої висоти до складеного стану має становити 3,5...6 с.

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17



1 – пружини для підймання струмоприймача; 2 и 5 – важелі; 3 – пружина для опускання струмоприймача; 4 – циліндр; 6 – полози

Рисунок 1.2 – Загальний вигляд струмоприймача типу П-3 (а) та схема його механізму (б)

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 $P_{\text{дин}}$ 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,

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

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 $P_{\text{макс}}$ полозом має бути: для ліній змінного струму при швидкості руху $v \leq 200$ км/год $P_{\text{макс}} = 300$ Н, а при $v > 200$ км/год $P_{\text{макс}} = 350$ Н. Якщо v близько 200 км/год, то $P_{\text{макс}}$ має бути не більше 250 Н.

Для ліній постійного струму $v \leq 200$ км/год $P_{\text{макс}} = 300$ Н, а при $v > 200$ км/год $P_{\text{макс}} = 400$ 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 $P_{\text{дин}}$);

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

- 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.

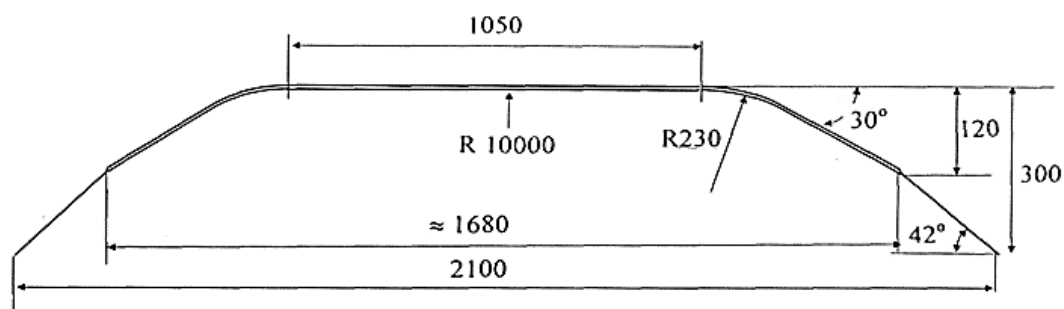
Реальні характеристики статичного натискання залежать від конструкції підйомного пристрою: підйомної пружини, радіусу важеля, кута між віссю важеля і стержня нижньої рухомої рами.

Для швидкісного і високошвидкісного руху ОСЗ (Р-630) рекомендовано виготовляти і застосовувати струмоприймачі, схематичне зображення яких приведене на рис. 1.3. Основні геометричні параметри цих струмоприймачів представлені в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Основні геометричні параметри струмоприймачів, відповідно до ОСЗ (Р-630)

Параметри струмоприймача	Розміри, мм
Найбільша висота підйому струмоприймача	не менше 2100
Висота струмоприймача в складеному стані	не більше 510
Найбільша висота робочого діапазону	не менше 1900
Найменша висота робочого діапазону	не більше 400

a)



б)

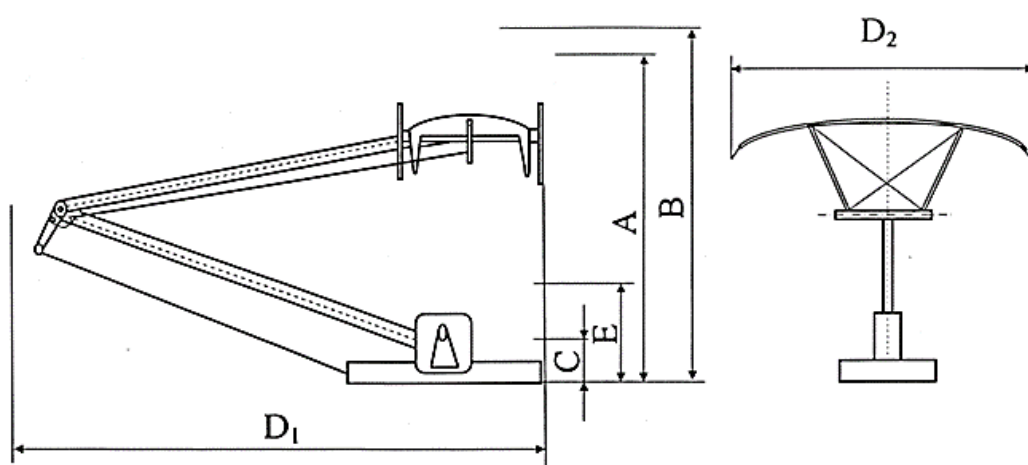
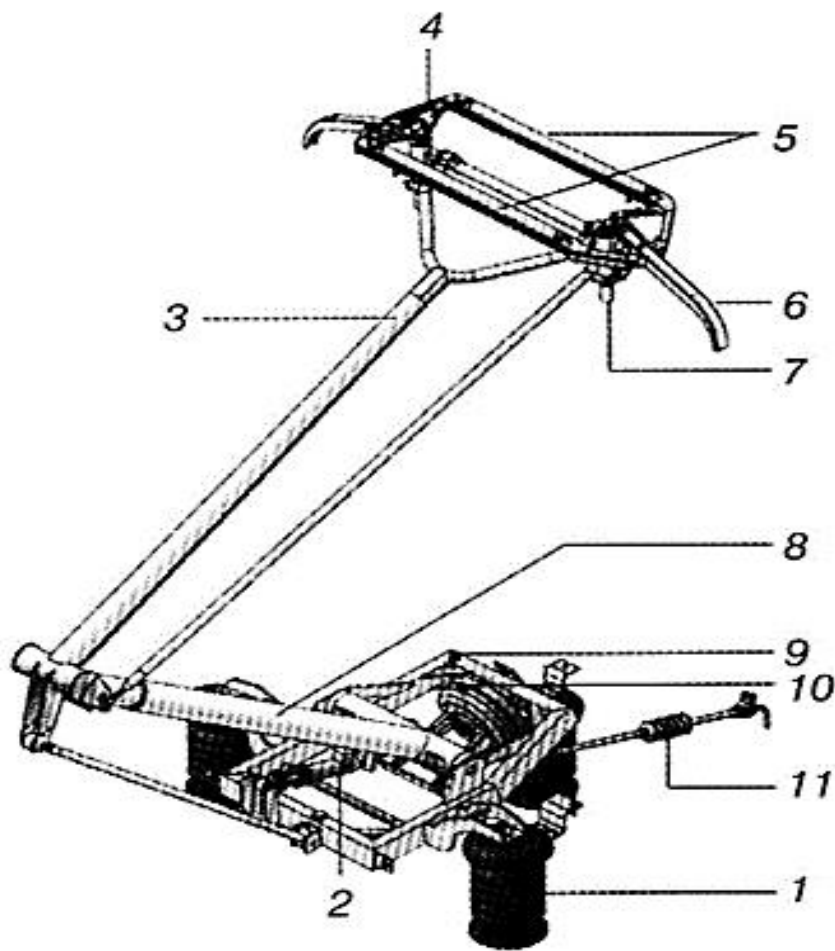


Рисунок 1.3 – Зовнішній вигляд та основні розміри полоза струмоприймачів, рекомендованих ОСЗ (Р-630)

На європейських швидкісних поїздах отримали застосування універсальні струмоприймачі типу СХ, які, зокрема, випускає компанія Alstom.

Струмоприймачі цього типу (рис. 1.4) призначені для ліній постійного струму на 1,5 і 3 кВ, змінного струму на 25 кВ 50 Гц і 15 кВ 162/3 Гц і забезпечують передачу необхідної електроенергії при швидкості руху до 350 км/год.



1 – ізолятор, 2 – демпфер, 3 – верхня штанга, 4 – полоз, 5 – струмознімальні елементи, 6 – направляючий риг, 7 – підвіска, 8 – нижня штанга, 9 – рама, 10 – пневмопривід, 11 – ізолююча трубка повітряної магістралі приводу

Рисунок 1.4 – Загальний вигляд універсального струмоприймача типу СХ

При розробці струмоприймачів для високошвидкісного руху важливим фактором є аеродинамічна взаємодія полоза та інших елементів струмоприймача з набігаючим повітряним потоком. Виникаюча аеродинамічна підйомна сила істотно впливає на взаємодію струмоприймача з контактним проводом. При цьому особливо небезпечним є прояв асиметрії аеродинамічних сил при русі струмоприймача в одну і іншу сторону. Цю силу необхідно врівноважити, вводячи в конструкцію струмоприймача додаткові елементи, що знижують вплив повітряного потоку. В Японії для високошвидкісних поїздів серії 700 відпрацьована конструкція

одноштангового струмоприймача (рис. 1.5), що максимально враховує вплив аеродинамічних сил.

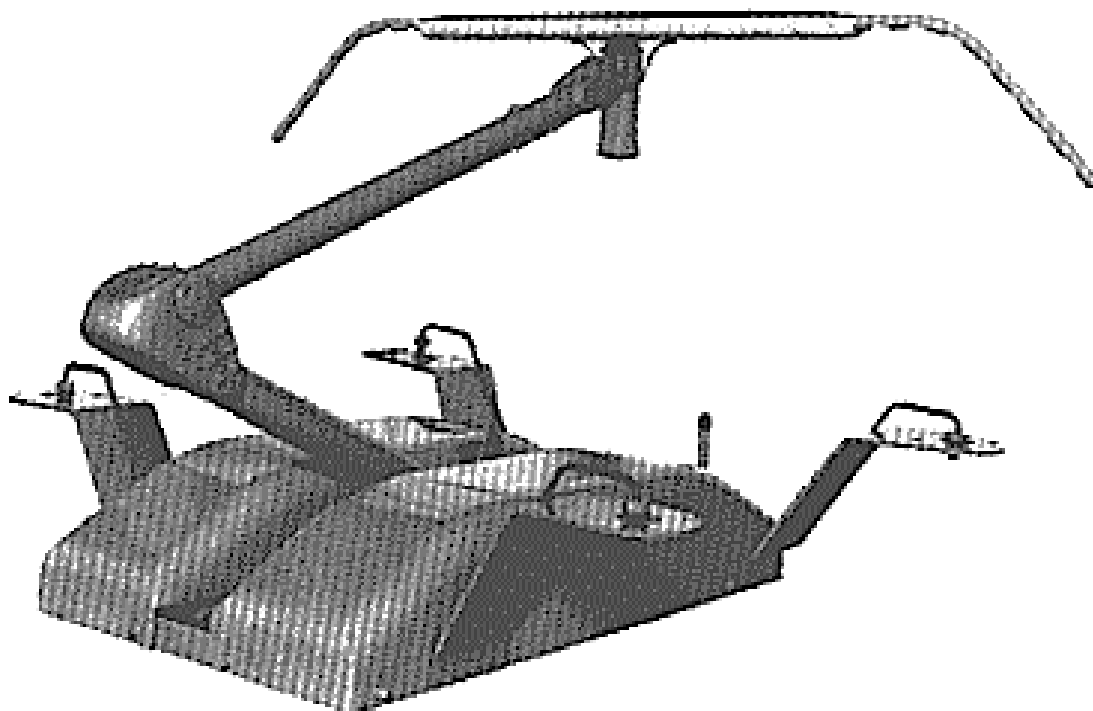


Рисунок 1.5 – Загальний вигляд одноштангового струмоприймача потяга серії 700

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. Максимальні значення приведеної маси струмоприймачів для різних умов експлуатації приведені в табл. 1.2. Характеристики сили натиску струмоприймачів повинні бути в межах, зазначених у табл. 1.3.

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

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.

Таблиця 1.2 – **Максимальні значення приведеної маси струмоприймачів**

Об'єкт застосування струмоприймача	Максимальна швидкість, км/год	Найбільша приведена маса струмоприймача, кг, при контактній підвісці	
		компенсованої	напівкомпенсованої
Постійний струм			
Електровоз, що працює на одному струмоприймачі	120	60	50
	140- 160	47	40
	120-200	37	28
Електровоз, що працює на двох струмоприймачах (спарені електровози)	120	60	50
	140- 160	47	40
	180-200	35	26
Електропоїзд	120	49	45
	140- 160	42	37
	180-200	35	26
Змінний струм			
Електровоз або електропоїзд	120	40	35
	140- 160	34	29
	180-200	30	22

При введенні в експлуатацію швидкісного ЕРС (160...200 км/год), обладнаного струмоприймачами з поліпшеними динамічними параметрами,

аеродинамічний вплив на струмоприймач зустрічного повітряного потоку при куті атаки 1 % повинен становити не більше 90 і не менше 70 Н для ділянок постійного струму, не більше 70 і не менше 50 Н для ділянок змінного струму при розрахунковій швидкості повітряного потоку 80,5 м/с. З метою досягнення заданої аеродинамічної характеристики припустиме застосування регулюючих екранів

Таблиця 1.3 – Характеристики сили натиску струмоприймачів

Характеристика	Струмоприймач	
	важкий	легкий
Статичне натискання, Н: пасивне активне	Не більше 130 Не нижче 100	Не більше 90 Не нижче 70
Різниця між найбільшим і найменшим натисканням у діапазоні робочої висоти струмоприймача	Не більше 15	Не більше 15
Сила тертя в шарнірах (подвійна), приведена до контактної поверхні в діапазоні робочої висоти струмоприймача	Не більше 25	Не більше 20

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 кожную сторону.

Конструкція полозів, обладнаних 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

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

нижче -30°C 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 кабінку 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.

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.3 Шляхи удосконалення струмоприймачів електрорухомого складу

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, шарніри, головні вали);
- привід (пружини, пневматичні елементи, торсіони, трансмісія, виконавчі механізми);
- основа (нерухома рама, каркас);
- струмопровідні елементи (струмознімальні елементи, шунти, шини, кабелі, покриття);
- ізолюючі елементи (ізолятори, ізолюючі кожухи, стінки, покриття, рукава);

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 струмознімальні елементи);
- запобіжні (деформуються елементи, 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);
- виброізолюючі (амортизатори, дисипативні елементи, прокладки);
- ожеледозахисні (кожухи, чохли, пристрої об'ємного наддуву);
- діагностичні (датчики, індикатори, електронні блоки);
- аеродинамічні (екрани, крила, закрилки, виконавчі елементи, датчики);
- змащувальні (електропровідне мастило, датчики, виконавчі механізми);
- охолоджуючі (елементи з ребрами і внутрішніми порожнинами, насоси, датчики, теплоносії);
- світлозахисні (кожухи, екрани, фільтри для захисту полімерних деталей від ультрафіолетового випромінювання);

У більшості конструкцій функції безлічі додаткових елементів скомбіновані, основні елементи 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 наведеної маси рухомих частин струмоприймача, проте мала вага струмознімального вузла визначає ресурс до заміни контактних вставок, а також обмежує можливості по зняттю великих струмів протягом тривалого часу. Габаритні розміри полозів визначені межами можливого розташування проводів контактної підвіски в плані при найнесприятливіших кліматичних умовах.

Система рухомих рам струмоприймача повинна забезпечувати максимально великий діапазон зміни робочої висоти, при цьому мати

необхідні поздовжню і поперечну жорсткістю, малу приведену масу і незначний коефіцієнт тертя в шарнірах. Крім того, шлях протікання струму повинен володіти найменшим можливим опором, це гарантує не тільки мінімізацію втрат, а й високу навантажувальну здатність струмоприймача.

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

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

Проведений аналіз конструкцій 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.

Мінімізована кількість колійних розгалужень станцій і мінімальна кількість повітряних стрілок на швидкісних лініях дозволяє знизити вимоги до поперечної жорсткості струмоприймачів, а високий натяг і бездоганне позиціонування проводів контактної мережі щодо осі колії знижує вимоги до системи вторинного підресорювання струмоприймача. Для мінімізації простору на даху, відведеного під установку струмоприймача, все не

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

струмопровідні 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 та 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.



Рисунок 1.6 – Основні типи струмоприймачів

1.4 Дослідження взаємодії контактних підвісок зі струмоприймачами

В основному, для дослідження взаємодії контактних підвісок зі струмоприймачами застосовують або вагон-лабораторії, або спеціалізований електрорухомий склад.

Для оцінки функціонального стану пристроїв струмознімання і якості їх роботи проводяться випробувальні поїздки з піднятим вимірювальним струмоприймачем, натискання якого встановлюється на певному рівні.

Вимірювальні струмоприймачі (рисунок 1.7) схожі по конструкції, принципу роботи і, не дивлячись на повсюдне застосування в випробувальних поїздках при дослідженні систем струмознімання, призначені для експлуатації на ЕРС попереднього покоління, тобто не є типовими для сучасного швидкісного ЕРС.

а)



б)



Рисунок 1.7 – Загальний вид вимірювального струмоприймача (а) та датчики, які розміщені на полозі (б)

При проведенні експериментальних поїздок з використанням вимірювального струмоприймача на базі Л-13У контролюються наступні параметри взаємодії в системі «струмоприймач - контактна підвіска»:

- миттєве натискання струмоприймача на контактний провід (датчики натискання розташовані під спеціальним захисним полозом);

- вертикальні прискорення для обліку маси полоза струмоприймача при вимірах натискання (два акселерометра по краях полоза) і прискорення в горизонтальній площині для реєстрації ударів і підбоїв (один акселерометр в середині полоза);

- підхоплення гілок, що відходять (контактні датчики з двома різновисокими гнучкими дотикачами);

- рівень напруги в контактній мережі.

Діапазон вимірюваних вертикальних прискорень становить ± 5 g, поздовжніх прискорень, ± 50 g. Абсолютна похибка вимірювання не більше $\pm 0,1$ g. Діапазон вимірювання значень натискання ($0 \div 400$ Н); смуга пропускання сигналу ($0 \div 40$ Гц);

Необхідна висока точність вимірювань при швидкостях руху до і понад 100 км / год забезпечується системами визначення положення вагона щодо рівня головки рейки (РГР).

Моніторинг вузлів контактної мережі за допомогою системи інфра- та ультра- хвильових камер дозволяє в ручному, автоматичному чи напівавтоматичному режимах порівнювати відеообрази з «відбитками» несправностей, наявних в базі даних комплексу.

Окрім різнопланових вагонів лабораторій застосовуються і вимірювальні, які встановлюються на даху дрезин для монтажу та обслуговування контактної мережі (рис. 1.8).

Необхідно відзначити, що використання вимірювально-обчислювальних комплексів на базі пасажирських вагонів виправдано тільки для інспектування параметрів і характеристик інфраструктури контактної мережі в статичному положенні. Вплив на контактну мережу струмоприймачів, встановлених на вагонах, обладнаних оглядовими вежами, значно відрізняється від тих, що мають місце на даху швидкісного ЕРС.

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

а)



б)



Рисунок 1.8 – Вигляд вагон-лабораторії (а) та вимірювального комплексу на даху дрезини (б)

Аеродинамічні характеристики дахового обладнання електровозів, швидкісних електропоїздів і вимірювальних вагонів значно відрізняються. Масогабаритні показники струмоприймачів, дисипативні характеристики і жорсткості їх вузлів не відповідають значенням струмоприймачів, призначених для швидкісного і високошвидкісного руху. Нездатність передачі електроенергії до двигунів та обладнання тягового рухомого складу під час випробувань, змушує використовувати автономну тягу або додатково спотворювати картину взаємодії за рахунок тягового струмоприймача

електровоза. Через це, на швидкісних магістралях для інспекційних і дослідницьких цілей використовуються спеціалізовані поїзди, оснащені вимірювальним обладнанням, при цьому в іншому відповідні типовим або перспективних моделей для комерційної експлуатації.

Використання електровозів або електропоїздів (рис. 1.9 ... 1.12) обумовлено типом ЕРС, який переважно використовується в швидкісному русі. Основною перевагою такого підходу є максимальна наближеність роботи пристроїв струмознімання до реальних умов експлуатації рухомого складу. Тим самим враховується вплив динаміки рухомого складу на процес струмознімання, підвищується інформативність і достовірність результатів дослідних поїздок.



Рисунок 1.9 – Діагностичний потяг Archimede



Рисунок 1.10 – Діагностичний потяг Doctor Yellow



Рисунок 1.11 – Діагностичний потяг East-i



Рисунок 1.12 – Діагностичний потяг ICE-V

Вимірювальні системи, розміщені на швидкісному рухомому складі, дозволяють реєструвати не тільки контактне натискання, але і випадки іскріння, що виникають при струмозніманні (рис. 1.13).

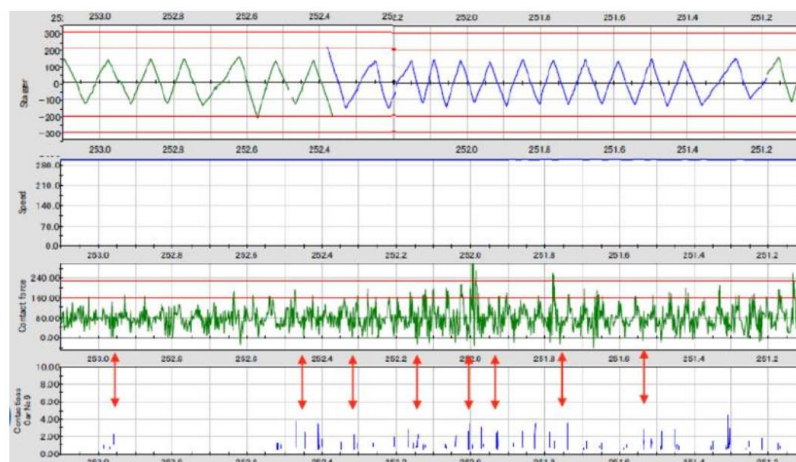


Рисунок 1.13 – Результати досліджень

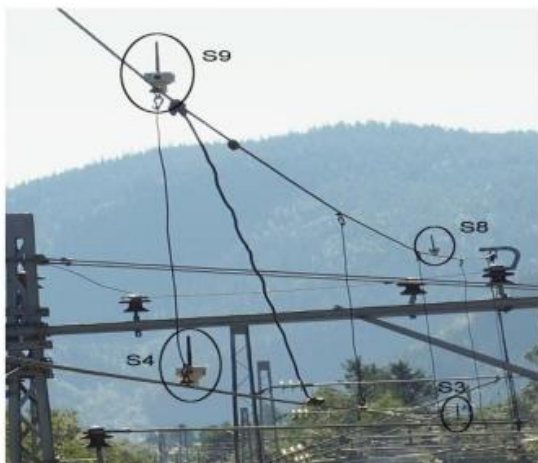
Найбільш доцільнішим є створення поїздів, які здійснюють комплексне дослідження стану ділянки залізниці. Побідні системи дозволяють оцінювати не кожен систему окремо, а їх взаємодію і впливи одна на одну.

1.5 Стационарні системи діагностування системи струмознімання

В даний час активно розробляються і використовуються пристрої стаціонарної діагностики систем струмознімання, призначені для контролю основних конструктивних параметрів і характеристик контактної мережі, струмоприймачів, а також процесу струмознімання. З цією метою використовуються пристрої вимірювання електромагнітних завад, датчики натискання, акселерометри, датчики переміщення, вимірювачі температури, телевізійні камери.

Як правило, системи даного виду є розгорнуту мережу з датчиками, розміщеними в ключових вузлах. Частина системи розміщується на потенціалі контактної мережі і тому має бездротові засоби обміну інформацією (рис. 1.4, а), а також автономні джерела живлення. Пристрої, розміщені на потенціалі «землі», можуть мати живлення від мережі, накопичувач інформації, а також лінії зв'язку з високою пропускнуною спроможністю (рис. 1.4,б).

а)



б)



Рисунок 1.14 – Безпроводні датчики (а) та блок прийому (б)

Типовий склад системи включає в себе датчики натягу проводів, що входять до складу підвіски, акселерометри для вимірювання коливань,

викликаних проходять ЕРС і вітром, пристрої для вимірювання температури проводів і довкілля. У деяких випадках в систему можуть бути додані мікрофони, датчики електромагнітних хвиль, датчики струму, датчики ожеледиці, переміщення вантажів компенсатора і т.і.

Основна ідея застосування датчиків коливань проводів контактної підвіски полягає в тому, що слабозатухаюча система, якою є ланцюгова контактна підвіска, дуже чутлива до змін маси (внаслідок випадання ожеледиці, появи зносу) і пружності (зміни натягу проводів). коливання можуть викликатися проходять струмоприймачами або вітровим впливом, вібрації з'являються внаслідок часткових пошкоджень багатожильних проводів підвіски, а також падіння сторонніх предметів на контактну мережу.

Аналізуючи записи сигналів тензодатчиків і акселерометрів, виявляються закономірності, що зв'язують частотний склад коливань і стану системи струмознімання.

1.6 Стационарні комплекси перевірки параметрів струмоприймачів

У зв'язку з поділом відповідальності (в тому числі і фінансової) за пошкодження контактної мережі і струмоприймачів ЕРС в ході експлуатації в усьому світі спостерігається активне зростання числа розробок, присвяченим контролю струмоприймачів «На виході з депо» або на в'їзді на швидкісну ділянку. Оператори залізничних ліній зацікавлені в суворій відповідності параметрів рухомого складу технічним специфікаціям.

Найбільший виробник і розробник залізничної техніки фірма SIEMENS запропонувала рішення «SICAT PMS», що включає різноманітність способів виявлення дефектних струмоприймачів перед виходом на важливі ділянки (швидкісні магістралі, тунелі і т.і.).

Система призначена для перевірки натискання струмоприймача, цілісності його контактних вставок, відповідності конфігурації полоза встановленому габариту, дозволяє визначити швидкість руху, кількість

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

піднятих струмоприймачів. При цьому, в залежності від налаштувань, в разі виникнення пошкодження, може бути зупинено рух на ділянці, зареєстрований ідентифікатор ЕРС, відправлений сигнал на пульт диспетчера. Для цілей ризик-аналізу також може бути визначений розмір збитку, який може заподіяти несправний струмоприймач в разі якщо продовжить рух.

Система включає в себе безконтактні датчики підйому проводів контактної мережі при проході струмоприймача, сканери поверхні полозів і конфігурації верхнього вузла (рис. 1.15).



Рисунок 1.15 – «SICAT PMS» на ізолюваній консолі

Після проході ЕРС формуються графіки відтискання проводів та зрівнюються з референтними значеннями для даного типу рухомого складу (визначається по графіку руху) і швидкості (визначається за допомогою лічильника колісних пар, що входить до складу комплексу). Система доповнюється метеодатчиками для оцінки швидкості і напрямку вітру, вологості повітря і температури. Ці дані потрібні для коригування залежно підйому проводів контактної мережі від натискання струмоприймачів. Графічний інтерфейс системи контролю дозволяє спостерігати в реальному часі зміна висотного положення проводів при проході ЕРС.

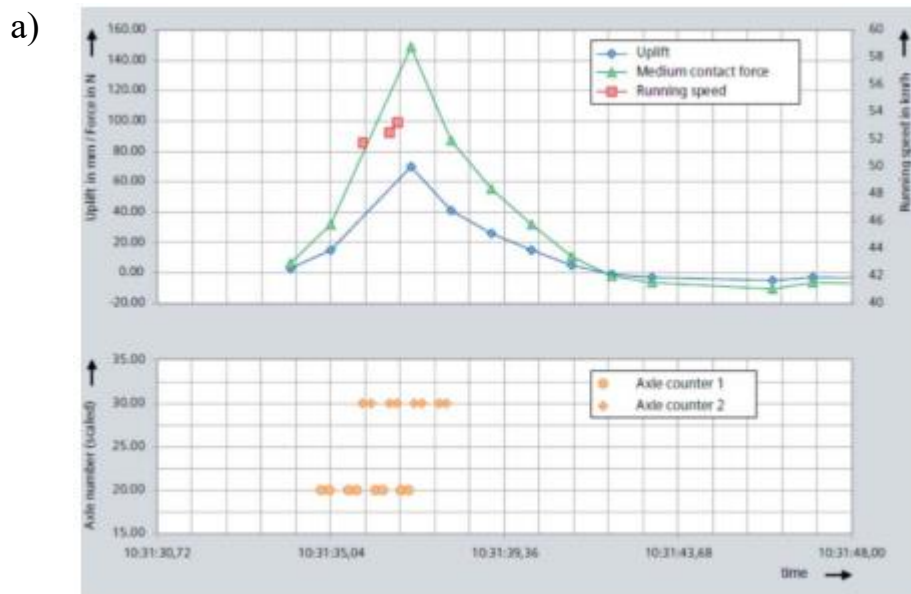


Рисунок 1.16 – Зовнішній вигляд вікна програми «SICAT PMS» (а) та PnatoInspect (б)

Аналіз діагностичних комплексів різних типів дозволяє говорити про необхідності їх інтеграції в єдину систему, із загальною інформаційною базою.

Ефект проявляється завдяки синхронізації тимчасових відміток всіх інформаційних сигналів і прив'язці даних до колійних координат.

В даний час принципові схеми струмоприймачів і контактної мережі еволюціонували практично до свого завершеного вигляду. Подальший розвиток можливо при кардинальній зміні умов роботи і висунутих вимог.

Для появи передумов застосування керованих струмоприймачів і контактних мереж з розвиненими системами самодіагностики і т.і. необхідний вектор на зниження зносу струмознімальних матеріалів (економіка, екологія тощо).

Поточна кон'юнктура розташовує до економії струмознімальних матеріалів за рахунок подорожчання, ускладнення струмоприймачів і витрат енергії на роботу додаткових систем.

Особливої актуальності набувають напрямки розвитку, що стосуються зниження пошкоджуваності системи струмознімання в ході експлуатації, а так само зменшують витрати часу на технічне обслуговування.

Подальше підвищення швидкості поширення механічних коливань вздовж контактної підвіски обмежена властивостями конструкційних матеріалів, несучою здатністю опорно-підтримуючих пристроїв, недосконалістю конструкції сполучень анкерних ділянок і повітряних стрілок.

Збільшення точності вертикальної і горизонтальної регулювання проводів контактної підвіски, вирівнювання еластичності уздовж анкерного ділянки вимагає вдосконалення технологій монтажу та експлуатації, веде до ускладнення систем контролю цих параметрів.

Протиріччя між провідністю проводів контактної підвіски і їх питомою міцністю на розтяг не дозволяє рекомендувати однакові підходи для реалізації і високошвидкісних систем струмознімання і систем для великовагового руху.

Наявність вузькоспеціалізованих елементів конструкції струмоприймачів дозволяє акцентувати їх швидкісні переваги або струмові можливості.

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

2 ПЕРЕДУМОВИ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ СТРУМОЗНІМАННЯ

Для правильного вибору оптимальних параметрів контактних підвісок та струмоприймачів, необхідно оцінювати якість струмознімання при різноманітних варіантах виконання взаємодіючих систем. Для цього необхідно будувати траєкторії струмоприймачів та криві їх натисків, визначати екстремальні значення вертикальних переміщень точки контакту полозу струмоприймача з контактним проводом та контактних натисків, визначати можливість відриву струмоприймача від контактного проводу та інше. Рішення подібних задач не може бути отримане при використанні статичних методик, для цього необхідно враховувати динаміку взаємодії струмоприймача з контактною підвіскою під час струмознімання.

Взаємодія контактних підвісок зі струмоприймачем представляє складний коливальний процес, в якому мають місце різноманітні коливальні системи, такі як контактна підвіска, залізничне полотно, струмоприймач, електровоз (чи електропоїзд) [11]. Так, точка контакту полозу струмоприймача з контактним проводом здійснює коливання, які обумовлені конструктивним виконанням взаємодіючих систем, їх параметрами, впливом зовнішніх факторів та коливаннями, які передаються від залізничного полотна та електрорухомого складу до струмоприймача, а також кількістю струмоприймачів.

При взаємодії контактної підвіски з декількома струмоприймачами, на коливання кожного з них будуть накладатись коливання інших струмоприймачів. Окрім основних хвиль коливань, існують також відбиті та заломлені хвилі. Коливання різних проводів контактної підвіски можуть бути несинфазними чи володіти іншими специфічними властивостями, які зв'язані з конструктивним виконанням контактних підвісок [13].

Основними факторами, які впливають на випадковий характер збудження, що передається на струмоприймач від контактної підвіски є

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

нестабільність висоти підвішування контактних проводів біля опор, відхилення стріл прогину та геометричних розмірів контактних підвісок від нормованих значень, зміна натягу проводів по довжині анкерної ділянки.

Моделі струмознімання поділяють на структурні та функціональні (див. рис. 2.1).

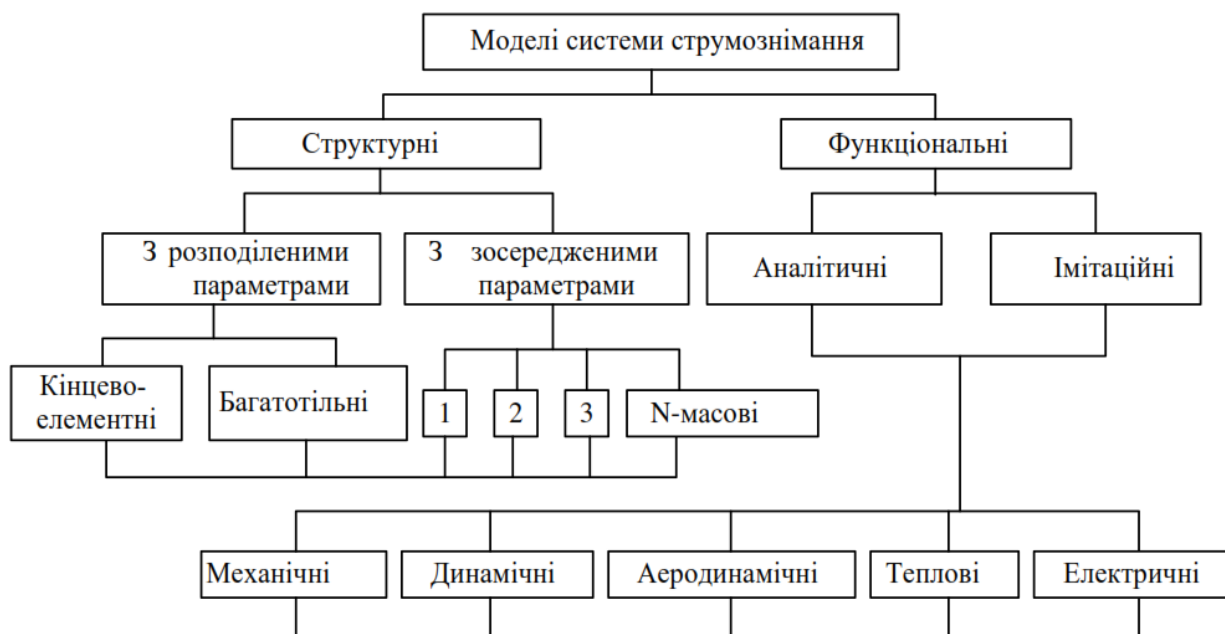


Рисунок 2.1 – Класифікація моделей струмознімання

Врахувати весь спектр впливаючих факторів на взаємодію системи «контактна підвіска – струмоприймач» практично неможливо. Простішим для теоретичних досліджень та практичного застосування є розгляд взаємодії контактної підвіски зі струмоприймачами як детермінованого процесу.

В ході аналізу робіт І. І. Власова, К. Г. Марквардта, В. П. Міхеєва, А. В. Плакса, Т. А. Тибилова, А. В. Фрайфельда, І. А. Бейна, В. Брюкнера, Г. Гильберта, Е. І. Леклерка, Р. Морриса, В. Фишера, А. Шмидера, В. А. Вологіна встановлено, що для вивчення досліджуваного питання можна використовувати спрощені моделі, в яких домінує досліджуваний процес.

При розгляді взаємодії одиночного струмоприймача з контактною підвіскою, яка представлена зосередженими та розподіленими параметрами, отримуються практично однакові результати, це викликано тим, що при

модельованні не враховують відображені коливання проводів, приймаються допущення, для спрощення розрахунків.

В більшості робіт, по дослідженню взаємодії контактних підвісок зі струмоприймачами, розглядають один робочий струмоприймач та спрощені контактні підвіски.

Складність розрахунку математичних моделей з контактними підвісками представленими у вигляді системи з розподіленими параметрами, викликає цілий ряд складнощів, а результати отримані за такими методиками мають значну розбіжність з експериментальними даними, подібні дослідження зводяться до представлення контактної підвіски як системи зі зосередженими масами, а ділянка підвіски з однією струною приймається як одна зосереджена маса.

Аналогічним чином була розв'язана задача взаємодії одного струмоприймача з контактною підвіскою аналіз відбувався наближено за допомогою системи лінійних диференціальних рівнянь, але з врахуванням відбитої хвилі, яка впливала на значення контактного натиску. Також, була запропонована модель яка описує процес взаємодії контактної підвіски зі струмоприймачем з врахуванням розповсюдження коливань по контактній підвісці, було встановлено, що при швидкості руху, яка менша швидкості розповсюдження хвилі, область великих амплітуд вертикального переміщення проводу має місце попереду струмоприймача і на процес взаємодії не впливає, але при співвимірних швидкостях умови струмознімання будуть найгіршими.

При подібних умовах експлуатації, рівномірність еластичності контактного проводу по довжині прольоту не грає ролі, струмоприймач буде взаємодіяти з ним як зі жорстким струмопроводом, при таких умовах необхідно забезпечити відсутність стріл прогину контактного проводу в прольоті та максимально збільшити натяг проводів та тросів.

В роботі С. М. Ковалєва враховувалась взаємодія контактних підвісок зі струмоприймачами з коливаннями першої гармоніки. Струмоприймачі

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

імітувались як системи з одним ступенем свободи, усі прогони анкерної ділянки приймалися рівної довжини, а коливання електрорухомого складу та ряд інших факторів, які чинили вплив на струмознімання, в розрахунках не враховувався. Подібний підхід привів до значних похибок теоретичних та експериментальних досліджень.

В ході досліджень А. В. Фрайфельда, Г. Г. Энгельса, Р. Ш. Каландадзе, Д. Ф. Железнова, М. М. Ерофеевої, був вирішений цілий ряд питань, відносно створення моделей взаємодії контактних підвісок зі струмоприймачами: розроблені основні принципи врахування в розрахункових схемах демпфуючих характеристик струмоприймачів та контактних підвісок, визначені значення реальних демпфуючих характеристик, приведених мас контактних підвісок та інших параметрів системи «контактна підвіска – струмоприймач», а також можливий діапазон їх виміру, обмовлені основні допущення, які дозволили спростити розрахункові моделі.

2.1 Метод розрахунку процесу струмознімання при розгляді контактної підвіски як коливальної системи з розподіленими параметрами

При врахуванні коливання проводу (рис. 3.1) рівняння коливання i -го струмоприймача буде мати вигляд:

$$\ddot{y}_i + 2\delta_i \dot{y}_i + \left(\Omega_i^2 + \frac{c_k \left(t - \frac{L_{ij}}{v} \right)}{m_i} \right) y_i = \frac{P_{Ci}}{m_i} + \Omega_i^2 y_{л0} \left(t - \frac{L_{ij}}{v} \right) + 2\delta_i \dot{y}_{л0} \left(t - \frac{L_{ij}}{v} \right) + \frac{c_k \left(t - \frac{L_{ij}}{v} \right) y_{к0} \left(t - \frac{L_{ij}}{v} \right)}{m_i} + \frac{P_{Bi}}{m_i} \quad (2.1)$$

$$\text{де } \delta = \frac{r_e}{2m}; \Omega^2 = \frac{c_e}{m}; i = 1, 2, \dots, n;$$

P_{Ci} – сила натиску струмоприймача;

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

Рішення рівняння (3.1) можна представити у вигляді:

$$y_i(t) = y_{i_D}(t) + y_{i_C}(t) + y_{i_B}(t) \quad (2.2)$$

де $y_{id}(t), y_{ic}(t), y_{iv}(t)$ – переміщення полозу струмоприймача, які виникають від впливу ЕРС, зміни жорсткості та стріли провисання контактної підвіски та розповсюдження хвиль вздовж неї. Відповідно, для знаходження $y_i(t)$ необхідно перш за все визначити P_{ci} так як інші члени рівняння (2.1) виражаються через відомі функції. Це досягається сумісним розв'язанням рівняння (2.1) з рівняннями, які характеризують коливання еквівалентного проводу під впливом рухомого навантаження.

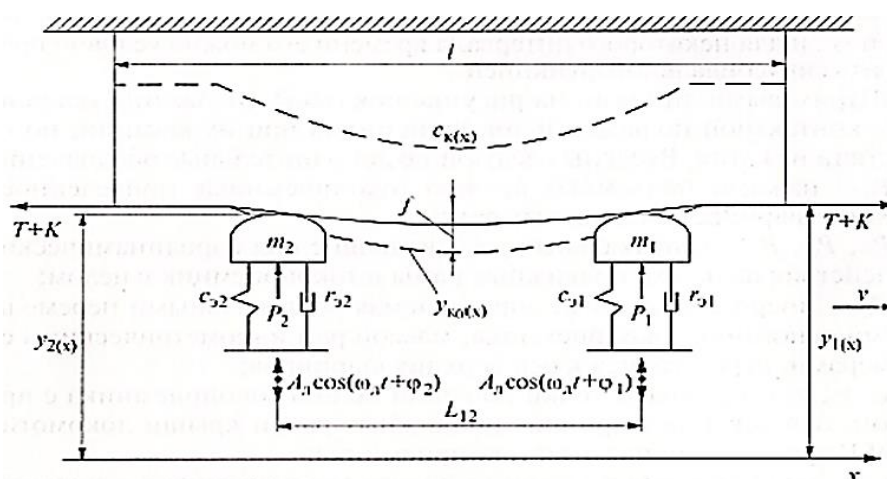


Рисунок 2.2 – Врахування коливання контактного проводу

Метод розрахунку контактної підвіски як системи з розподіленими параметрами дозволяє в явному вигляді виразити вплив одних струмоприймачів на інші, завдяки чому можна робити якісні та кількісні висновки відносно їх умов роботи.

При незначних відстанях між двома робочими струмоприймачами ($L < 40$ м) необхідно окрім хвильових процесів враховувати додаткове

піднімання контактної провідності, яке з достатньою точністю можна визначити за формулою:

$$\Delta y'_{\text{кк}} = \frac{P_c}{c_{\text{сх}}} \left(1 - \frac{L_{12}}{40} \right) \quad (2.3)$$

де P_c – постійна складова контактної натискової струмоприймача;

$c_{\text{сх}}$ – жорсткість контактної підвіски на відстані x від опори, для котрого визначається величина відтискання контактної провідності.

Якщо має місце випадок коли піднято більше двох струмоприймачів, необхідно враховувати вплив кожного з них місце розташування відносно інших струмоприймачів, наприклад, при трьох струмоприймачах, з відстанями між ними менше 40 м найбільший додатковий підйом провідності буде завжди у середнього струмоприймача.

При розгляді взаємодії декількох струмоприймачів з контактною підвіскою використовується метод суперпозиції, який полягає у врахуванні впливів від декількох струмоприймачів на провід та приводиться до вирішення задачі з одним струмоприймачем.

2.2 Метод розрахунку взаємодії контактної підвіски зі струмоприймачем в усталеному режимі

Приведений метод розрахунку розроблений А. В. Фрайфельдом та підтверджений експериментальними дослідженнями. Він не враховує розповсюдження коливань вздовж контактної підвіски, але рекомендований до практичного застосування, так як дозволяє з високим рівнем точності моделювати процеси взаємодії контактних підвісок зі струмоприймачами. В цьому методі прийняті такі допущення: не враховується власна жорсткість провідів, а натяг несучого та контактної провідності по довжині анкерної ділянки є незмінним.

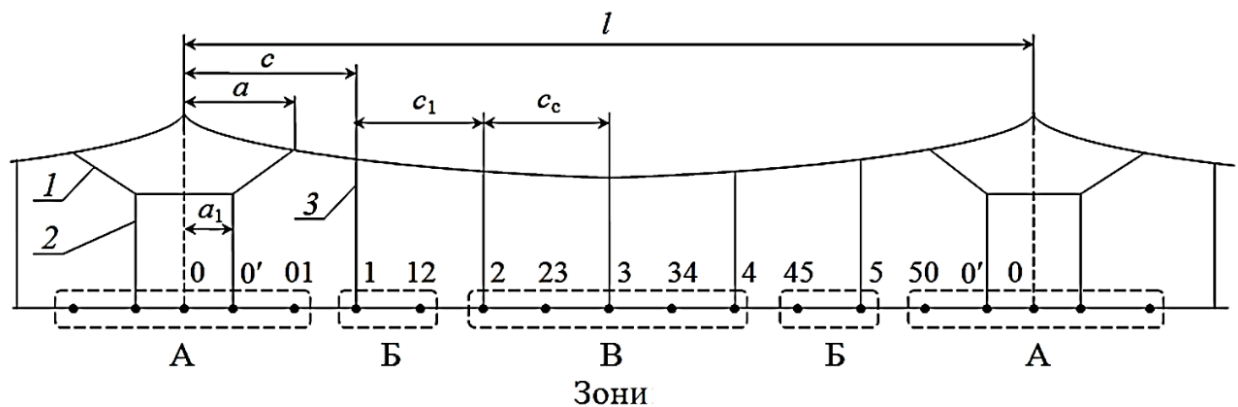
Побудова кривих натиску струмоприймача в прольоті проводиться для одного чи для декількох прольотів максимальної довжини в середній частині анкерної ділянки. Ці прольоти поділяються на окремі інтервали, всередині котрих параметри контактних підвісок приймаються незмінними (рис. 2.3). Розподілені параметри контактної підвіски замінюють зосередженими та приведеними до точки контакту з полозом струмоприймача.

Побудова кривих натиску струмоприймача приводиться до визначення сили натискання полозу струмоприймача в конкретній розрахунковій точці прольоту при незмінному натязі контактних проводів та несучого тросу по довжині анкерної ділянки.

Точно визначити натиск струмоприймача на контактний провід досить складно, так як необхідно окрім характеристик струмоприймача треба знати як впливає конструкція контактної підвіски та взаємне розташування струмоприймачів.

При незначній силі натиску, струни, які розташовуються близько до зони контакту як правило не розвантажуються, при значних натисках струни ослабляються і можуть взагалі розвантажуватись, в такому випадку вони перестають виконувати свої функції, а навантаження від контактного проводу передаються на наступні струни, які віддалені від точки контакту.

При побудові кривих контактного натиску струмоприймача, прогін розділяють на розрахункові зони: А, Б – зони, що відносяться до опорних вузлів контактної підвіски; В – до середньої частини прогону. Кожній з розрахункових зон відповідають розрахункові формули. Розподілені параметри контактної підвіски замінюють зосередженими та приведеними до точки контакту з полозом струмоприймача.



1 – ресорний трос; 2 – підресорна струна, 3 – вертикальна струна

Рисунок 2.3 – Розрахункові зони прогону ресорної контактної підвіски

Вибір розрахункової формули проводиться в залежності від місця розташування струмоприймача в прольоті.

Визначення траєкторії точки контакту в різних координатах прольоту та контактного натиску представляють основний інтерес при математичному моделюванні взаємодії контактних підвісок зі струмоприймачами. В теоретичних дослідженнях, при швидкостях руху до 300 км/год, приймають що швидкість розповсюдження хвилі в проводах підвіски більша швидкості руху

Система взаємодії контактної підвіски зі струмоприймачем має безкінечну кількість ступенів свободи. Якщо враховувати тільки найбільш суттєві вертикальні переміщення та значно спростивши коливальні системи колії та локомотива, можна при наявності контакту полозу струмоприймача з контактним проводом представити для кожного інтервалу прогону загальну коливальну систему з шістьма ступенями свободи.

Коливання колії передаються на локомотив, маса якого значно більше маси струмоприймача, через це зворотна взаємодія не враховується. Коливання локомотива можна врахувати ввівши в схему вертикальні переміщення даху локомотива. Ці коливання мають певний спектр частот та змінну амплітуду. Для спрощення, розрахунки проводяться при постійній

амплітуді та основній круговій частоті галопування локомотиву, які приймаються у відповідності до експериментальних даних конкретного екіпажу для різних швидкостей руху.

Для визначення перших двох показників в кожному розрахунковому інтервалі, який в залежності від швидкості руху повинен бути в межах 0,5 – 1 м, при дискретизації параметрів контактної підвіски (рис.2.4, а) розраховують наступні диференціальні рівняння.

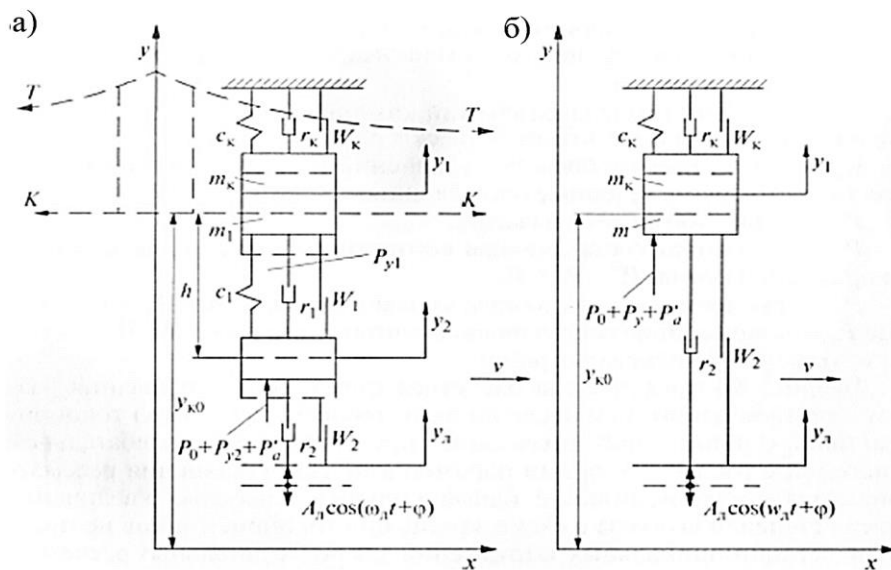


Рисунок 2.4 – Розрахункові схеми взаємодії контактної підвіски зі струмоприймачами, які мають дві (а) та одну (б) ступінь свободи

Для розрахункової схеми (рис. 2.4, а):

$$\left\{ \begin{array}{l} (m_k + m_1) \ddot{y}_1 + r_k \dot{y}_1 + c_k (y_1 - y_{k0}) + W_k \text{sign} \dot{y}_1 + \\ + r_1 (\dot{y}_1 - \dot{y}_2) + c_1 (y_1 - y_2 - h) + W_1 \text{sign} (\dot{y}_1 - \dot{y}_2) = P_{y1}; \\ m_2 \ddot{y}_2 + r_2 (\dot{y}_2 - \dot{y}_3) + W_2 \text{sign} (\dot{y}_2 - \dot{y}_3) - r_1 (\dot{y}_1 - \dot{y}_2) - \\ - c_1 (y_1 - y_2 - h) - W_1 \text{sign} (\dot{y}_1 - \dot{y}_2) = P_0 + P_{y2} + P'_a. \end{array} \right. \quad (2.4)$$

Для розрахункової схеми (рис. 3.3, б):

$$\begin{aligned} (m_k + m)\ddot{y}_1 + r_k \dot{y}_1 + c_k (y_1 - y_{k0}) + W_k \operatorname{sign} \dot{y}_1 + \\ + r_2 (\dot{y}_1 - \dot{y}_a) + W_2 \operatorname{sign} (\dot{y}_1 - \dot{y}_a) = P_0 + P_y + P'_a. \end{aligned} \quad (2.5)$$

Контактний натиск в кожному розрахунковому інтервалі:

$$P = m_k \ddot{y}_k + r_k \dot{y}_1 + c_k (y_1 - y_{k0}) + W_k \operatorname{sign} \dot{y}_1 \quad (2.6)$$

Для оцінки складових рівнянь, були проведені значні експериментальні дослідження, які показали, що в невеликому розрахунковому інтервалі при наявності слабо нелінійних систем можна без суттєвих похибок провести лінеаризацію необхідних параметрів.

При створенні розрахункових моделей приймалися до уваги деякі методи та результати проведених досліджень по вертикальній динаміці залізничних екіпажів

2.3 Динамічна взаємодія струмоприймачів з контактними підвісками

Питаннями динамічної взаємодії контактних підвісок зі струмоприймачами та розробкою відповідних методик розрахунків займався цілий ряд вчених.

Відомо, що механічна взаємодія контактної підвіски зі струмоприймачами представляє собою результат взаємодії різнорідних коливальних систем. Контактна підвіска є системою з розподіленими параметрами, а струмоприймачі електрорухомого складу – системою з умовно-зосередженими параметрами. Також, на процес коливання здійснює вплив в вертикальній площині і електрорухомий склад, який передається на основу струмоприймача. В контактній підвісці окрім основних хвиль, мають також місце відображені та заломлені хвилі, які значним чином ускладнюють процес аналізу коливань в системі «контактна мережа – струмоприймач». В

випадку експлуатації багатосекційного електрорухомого складу з декількома струмоприймачами на кожний з них будуть накладатись коливання, які викликані взаємодією з контактною підвіскою сусідніх струмоприймачів.

Коливання проводів контактних підвісок зв'язані з конструктивними особливостями як самих контактних підвісок так і струмоприймачів. Основними впливаючими факторами на появу коливань контактних проводів зі сторони контактної підвіски є нестабільність підвішування контактних проводів на опорах, значення яких відрізняються від нормованих, нерівномірність натягу проводів і тросів по довжині анкерної ділянки. Зі сторони струмоприймачів – невідповідність реальної статичної характеристики нормованій.

Якість взаємодії струмоприймачів з контактними підвісками визначає якість передачі електричної енергії через систему електропостачання до електрорухомого складу та залежить від конструктивного виконання цих взаємодіючих систем, що при значному підвищенні швидкості руху електрорухомого складу є визначним фактором для досягнення максимальної швидкості руху.

2.4 Моделювання струмоприймача

Основним результатом проведення моделювання впливу струмоприймача на контактну підвіску є отримання кривої натиску вздовж прогону.

Струмоприймач являє собою складну нелінійну механічну систему, моделювання якої є нетривіальною багатогранною завданням. В залежності від призначення і можливостей реалізації моделі, в її склад можуть входити елементи, що забезпечують облік нелінійності сил, що впливають на висотне положення полозів струмоприймача, демпфування і т.і. Пропонується класифікувати моделі струмоприймачів за кількістю рухомих мас і

розмірностей їх кінематичних схем (рис. 2.5), а також за функціональним призначенням.

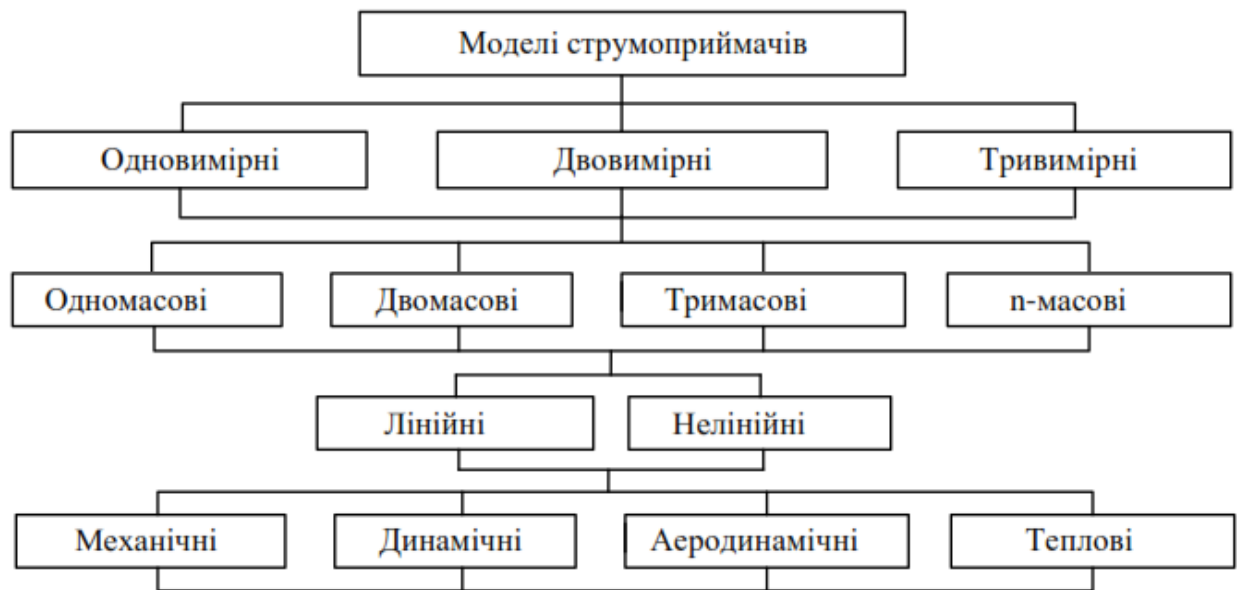


Рисунок 2.5 – Середньоквадратичні значення амплітуди коливань основи струмоприймача

З ростом швидкостей руху актуальним стає важливим облік розподілу аеродинамічних сил за елементами струмоприймача. Вимоги, що пред'являються до експлуатаційними якостями нових перспективних струмоприймачів, свідчать про необхідність активного використання тривимірних моделей в механічних розрахунках. Разом з тим, одновимірні двох-трьох масові спрощені моделі як і раніше дозволяють вирішувати безліч інженерних і наукових завдань, забезпечуючи основну можливу кінематику струмоприймача, що підтверджується дослідженнями.

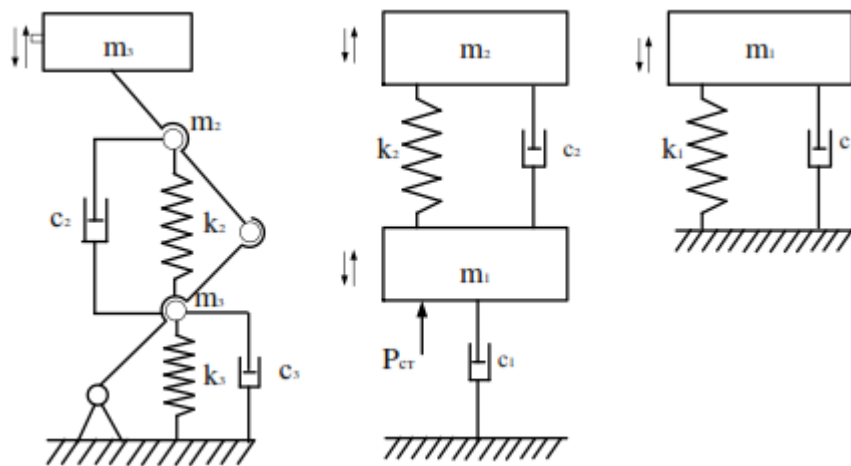


Рисунок 2.6 – Приклади типових розрахункових схем струмоприймачів

Визначити сили, які діють на струмоприймач в процесі струмознімання, за допомогою експериментальних досліджень в експлуатації, нарізі в Україні не представляється можливим, через відсутність засобів, які б дозволили визначати в динаміці натиск струмоприймача на вагон-лабораторіях контролю стану контактної мережі. В зв'язку з цим, розподіл натиску струмоприймача по довжині прогону необхідно визначати за допомогою теоретичних методів, які дозволяють враховувати фізичні процеси, які протікають при струмозніманні та використовуючи математичний апарат, який забезпечує необхідну точність результатів [3].

Розрахунки взаємодії струмоприймача з контактною підвіскою необхідно проводити з урахуванням параметрів рухомих частин струмоприймача і контактної підвіски, стріл провисання контактного проводу, коефіцієнта тертя ковзання в контакті, довжини прольоту, аеродинамічних сил, що діють на струмоприймач.

При виборі методу розрахунку керуються тим, щоб даний метод давав можливість визначити не тільки криві контактного натискання, але і інерційні сили при повністю скомпенсованій вертикальній складовій аеродинамічної сили. Всім цим умовам задовольняє метод, запропонований професором В. П. Міхєєвим [1]. Даний метод дозволяє побудувати криві контактного

натискання для окремого прольоту, розділеного на задане число інтервалів (точок), шляхом заміни розподілених параметрів підвіски зосередженими.

Вплив з боку стріли провисання контактної підвіски, враховується в нерівномірності жорсткості контактної підвіски в прольоті. Цей вплив збільшується зі зростанням швидкості руху рухомого складу.

Для визначення кривої жорсткості контактної підвіски, в залежності від положення струмоприймача в прольоті, повинна розкладатися в ряд Фур'є.

Коефіцієнти жорсткості контактної підвіски можуть бути отримані за допомогою рівнянь:

$$\begin{cases} a_0 = \frac{1}{l_{\text{пр}}} \int_{-l_{\text{пр}}}^{l_{\text{пр}}} j_{\text{км}}(x) dx \\ a_k = \frac{1}{l_{\text{пр}}} \int_{-l_{\text{пр}}}^{l_{\text{пр}}} j_{\text{км}}(|x|) \cos(k \cdot x) dx \end{cases} \quad (2.7)$$

де $l_{\text{пр}}$ – довжина прогону контактної підвіски;

k – номер гармонічної складової контактної підвіски;

a_k – амплітуда косинусоїдальної складової k -ої гармоніки.

Жорсткість контактної підвіски задається виходячи з її відомого значення для конкретного типу контактної підвіски або на основі проведеного розрахунку контактної підвіски. Залежність жорсткості контактної підвіски від часу, швидкості руху електрорухомого складу і розрахункової координати x записується в наступному вигляді:

$$j_{\text{км}} = j_{\text{км}0} \left(1 + \sum_{k=1}^a \mu_k \cos \frac{2\pi kx}{l_{\text{пр}}} \right) \quad (2.8)$$

При розрахунках враховуються перші десять гармонійних складових жорсткості контактної підвіски в прольоті, тому що вони відповідають фактичній жорсткості з точністю понад 95% вірогідністю [1]. При такій умові, вираз (2.8) можна перетворити до вигляду:

$$J_{\text{км}} = J_{\text{км}0} \left(1 + \sum_{k=1}^a \mu_k \cos \left(k \frac{2\pi v}{l_{\text{пр}}} \right) \cdot t \right) \quad (2.9)$$

Таким чином, на верхній вузол струмоприймача здійснюється вплив переносного руху, що виникає при зміні висотного положення полозу струмоприймача через зміну жорсткості контактної підвіски.

Поворот полозу щодо поздовжньої осі внаслідок достатньої жорсткості підвіски і ширини струмознімальних елементів на полозі не береться до уваги в розрахунках і рух коливальної системи приймають поступальним.

Коливання основи струмоприймача, амплітудно-частотний спектр якої визначається безліччю параметрів, також впливає на контактний натиск.

Розрахункові частоти підстрибування і галопування кузова локомотива знаходяться в діапазоні 1,5...2,2 Гц. Складові з більш високою частотою (від 7 до 9 Гц) викликаються вібраціями рами локомотиву і колісних пар. Так як основна частина енергії процесу зосереджена у вузькій частині спектру, то вихідний процес є вузькосмуговим, випадковим процесом, який можна представити у вигляді умови вузькополосності:

$$M_k(v) = \int_0^{\infty} \omega^k S_{xx}(\omega, v) d\omega, \quad k \in [0, 0] \quad (2.10)$$

Середньоквадратичні значення амплітуди коливань основи струмоприймача у вертикальному напрямку в залежності від швидкості рухомого складу описуються виразами:

$$\begin{cases} \sigma_{\text{осн}} = \sqrt{\int_{\omega_{\text{поч}}}^{\omega_{\text{кін}}} S_{y_{\text{осн}}}(\omega, V_{nc}) d\omega} \\ S_{y_{\text{осн}}}(\omega, V_{nc}) = \frac{S_{\ddot{y}_{\text{осн}}}(\omega, V_{nc})}{\omega^4} \end{cases} \quad (2.11)$$

де $\omega_{\text{поч}}$, $\omega_{\text{кін}}$ – початкова та кінцева частоти, які враховуються при розрахунках;

$S_{y_{\text{осн}}}(\omega)$ – амплітуда коливань основи струмоприймача при частоті ω .

Амплітуда коливань основи струмоприймача визначається згідно нормального закону розподілу випадкової величини з математичним очікуванням рівним нулю і середньоквадратичним відхиленням $\sigma_{\text{осн}}$.

Отримані середньоквадратичні значення амплітуди коливань основи струмоприймача наведені на рис. 2.7.

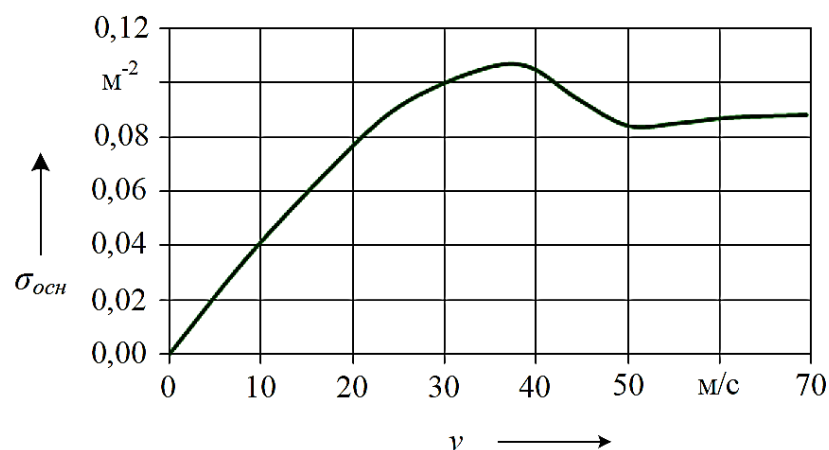


Рисунок 2.7 – Середньоквадратичні значення амплітуди коливань основи струмоприймача

Підстановка отриманих значень коливань основи струмоприймача в математичну модель взаємодії системи «струмоприймач – контактна підвіска» здійснюється за допомогою виразу (2.11). Таким чином, проводиться облік впливу цих коливань на значення контактної натиску.

В процесі взаємодії струмоприймача з контактною підвіскою виникають резонансні явища, особливо при швидкостях 150...230 км/год. Дані явища обумовлені тим, що коливальна система «струмоприймач – контактна підвіска» має зони динамічної нестійкості, форма яких визначає поведінку досліджуваної системи при різних зовнішніх впливах (наприклад, криві жорсткості контактної підвіски в прольоті) [3, 30]. Області динамічної нестійкості з урахуванням сили опору (тертя в системі) знаходяться за допомогою рівняння Мат'є, яке є окремим випадком рівняння Хілла:

$$q'' + 2nq' + k_0^2(1 - 2\mu \cos(\omega t)) \cdot q = 0 \quad (2.12)$$

де q – шукана функція (рішення рівняння);

n – коефіцієнт загасання коливань системи;

k_0 – власна частота коливань системи, Гц;

μ – коефіцієнт збудження;

ω – частота зовнішнього впливу на систему, Гц;

t – час, с.

Сучасні асиметричні струмоприймачі мають невеликі коефіцієнти збудження на швидкостях до 250 км/год [2, 8]. Найбільшою мірою параметричний резонанс спостерігається при швидкостях понад 340 км/год, що суттєво більше максимальної планованої найближчим часом швидкості експлуатації ЕРС в Україні.

Першим етапом розрахунку взаємодії струмоприймача з контактною підвіскою є визначення числа ступенів свободи коливальної системи. У

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

загальному випадку дана коливальна система володіє нескінченним числом ступенів свободи, однак, з огляду на найбільш істотні переміщення у вертикальному напрямку і привівши до точки контакту маси елементів, можна отримати систему з шістьма ступенями свободи [7].

Електрорухомий склад володіє значною масою в порівнянні з струмоприймачем. Коливання основи струмоприймача визначаються амплітудою коливань основи A , середньої частотою коливань ω_0 , зрушенням фаз φ .

Швидкість переміщення основи струмоприймача на практиці оцінюється шляхом інтегрування за часом експериментально отриманих записів прискорення.

Поділ мас несучого тросу та контактного проводу необхідно здійснювати там, де дані елементи здійснюють несинфазні коливання. Такі коливання можуть виникнути тільки при наявності ресорних струн [7]. В ході численних експериментів авторами [1, 3] відзначалося, що при взаємодії швидкісних струмоприймачів і швидкісних контактних підвісок коефіцієнт відривів не перевищував 1%. І так як при підвищенні швидкості руху електрорухомого складу використовуються прогресивні конструкції струмоприймачів та контактних підвісок [31], які наплавлені для використання при швидкісному русі, розрахунки коливальної системи взаємодії струмоприймача з контактною підвіскою доцільно проводити без врахування відривів струмоприймача від контактного проводу.

Розрахункова схема, для визначення контактної натискання по довжині прогону з врахуванням вказаних вище допущень, приведена на рис. 2.2.

Наведена на рис. 2.5 коливальна система задовольняє вимогам Європейських стандартів (EN 50318: 2002; International Union of Railways (UIC) 799) [32...36].

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

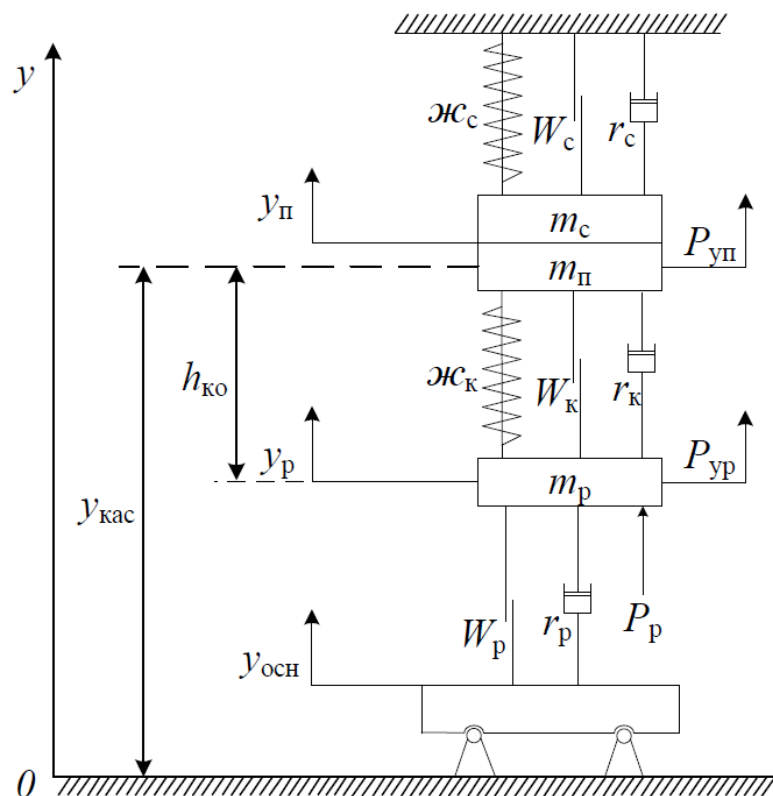


Рисунок 2.5 – Розрахункова схема для визначення контактної натискання

Рух мас m_c і $m_п$ визначається за допомогою наступного виразу:

$$\begin{aligned}
 (m_c + m_п) \cdot \frac{d^2 y_п}{dt^2} = & -r_c \cdot \frac{dy_п}{dt} - \\
 & -Ж_c \cdot (y_п - y_{кас}) - W_c \cdot \sin \frac{dy_п}{dt} - r_k \cdot \left(\frac{dy_п}{dt} - \frac{dy_p}{dt} \right) - \\
 & -Ж_k \cdot (y_п - y_p - h_{ко}) - W_k \cdot \sin n \left(\frac{dy_п}{dt} - \frac{dy_p}{dt} \right) + P_{уп}
 \end{aligned} \quad (2.13)$$

де m_c , $m_п$, m_p – приведена маса контактної підвіски, полоза і рам струмоприймача, кг;

$Ж_c$, $Ж_k$ - жорсткість контактної підвіски, кареток струмоприймача, даН/м;

r_c, r_k, r_p – коефіцієнт в'язкого тертя контактної підвіски, кареток і рам струмоприймача, даН·с/м;

W_c, W_k, W_p – сила сухого тертя в контактній підвісці, каретках і в рамах струмоприймача, даН;

$y_{\Pi}, y_p, y_{\text{осн}}$ – ордината центру мас полоза, рам і основи струмоприймача, м;

$\frac{dy_{\Pi}}{dt}, \frac{dy_p}{dt}, \frac{dy_{\text{осн}}}{dt}$ – швидкість переміщення центру мас полоза, рам і основи струмоприймача, м/с;

$\frac{d^2 y_{\Pi}}{dt^2}, \frac{d^2 y_p}{dt^2}$ – прискорення центра мас полоза і рам, м/с²;

$y_{\text{кас}}$ – ордината точки контакту полоза струмоприймача з контактним проводом при відсутності натискання, м;

$h_{\text{ко}}$ – довжина ходу кареток струмоприймача у вільному стані, м.

Рівняння руху маси m_p виглядає наступним чином:

$$\begin{aligned}
 m_p \cdot \frac{d^2 y_p}{dt^2} = & r_k \cdot \left(\frac{dy_{\Pi}}{dt} - \frac{dy_p}{dt} \right) + \\
 & + \mathcal{J}_k \cdot (y_{\Pi} - y_p - h_{\text{ко}}) + W_k \cdot \sin n \left(\frac{dy_{\Pi}}{dt} - \frac{dy_p}{dt} \right) - r_p \cdot \left(\frac{dy_p}{dt} - \frac{dy_{\text{осн}}}{dt} \right) - \\
 & - W_p \cdot \sin n \left(\frac{dy_p}{dt} - \frac{dy_{\text{осн}}}{dt} \right) + P_p + P_{\text{уп}}
 \end{aligned}
 \tag{2.14}$$

Рівняння контактного натискання отримується шляхом заміни реакції дії полоза на контактну підвіску:

$$P_{\text{кт}} = m_c \cdot \frac{d^2 y_{\text{п}}}{dt^2} + r_c \cdot \left(\frac{dy_{\text{п}}}{dt} \right) + \text{ж}_c \cdot (y_{\text{п}} - y_{\text{кас}}) + W_c \cdot \sin n \left(\frac{dy_y}{dt} \right) \quad (2.15)$$

Для розрахунку контактної натискання $P_{\text{кт}}(x)$ необхідно перетворити систему диференціальних рівнянь другого порядку (2.14) і (2.15) в систему чотирьох диференціальних рівнянь першого порядку шляхом підстановки:

$$\begin{cases} y_0 = y_{\text{п}}; \\ y_1 = \frac{dy_{\text{п}}}{dt}; \\ y_2 = y_{\text{п}}; \\ y_3 = \frac{dy_{\text{п}}}{dt}, \end{cases} \quad (2.16)$$

$$\begin{cases} y_0 = y_1; \\ y_1 = \frac{d^2 y_{\text{п}}}{dt^2}; \\ y_2 = y_3; \\ y_3 = \frac{d^2 y_{\text{п}}}{dt^2}. \end{cases} \quad (2.17)$$

Вирази (2.16) і (2.17) вирішуються методом Булірша-Штера. Крок інтегрування задається з розрахунку, що не менше однієї точки доводиться на метр прольоту.

З РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ ВЗАЄМОДІЇ СТРУМОПРИЙМАЧА З КОНТАКТНОЮ ПІДВІСКОЮ

3.1 Результати моделювання взаємодії струмоприймачів з контактними підвісками

На основі приведених в розділі 2 виразів та для асиметричного струмоприймача Stromabnehmer SBS 2T (рис. 3.1) і контактної підвіски (рис. 3.2) було проведено моделювання на вдосконаленій, шляхом адаптації до можливості моделювання асиметричних струмоприймачів моделі, яка була представлена в роботі [40] (див рис. 3.4).



Stromabnehmer SBS 2T – DC Der Stromabnehmer für normale bis mittlere Fahrtgeschwindigkeiten im Gleichstromnetz

Funktionalität:

Das Stromabnehmergestell besteht aus dem Unterarm, dem Oberarm und der Kuppelstange. Zusammen mit dem Grundrahmen bilden diese Teile das Gelenkviereck, welches die Wippe annähernd vertikal führt.

Zum Aufrichten des Stromabnehmers und zum Herstellen der Kontaktkraft dienen zwei Luftfederbälge, welche zwischen Grundrahmen und Unterarm angeordnet sind. Das Absenken des Stromabnehmers erfolgt durch sein Eigengewicht nach Entlüften der Hubbälge. Ein Heben und Senken des Stromabnehmers ist bei allen Fahrtgeschwindigkeiten möglich.

Technische Daten

Bauhöhe in Senklage:	610mm
min. Arbeitshöhe über Senklage:	300mm
max. Arbeitshöhe über Senklage:	2400mm
Steighöhe:	>2500mm
Nennisolation:	25kV
Nennstrom mit Kohle:	1 000A
Nennstrom mit metallimprägnierter Kohle:	1 500A
Nennstrom mit Metall:	2 500A
Kontaktkraft Einstellbereich:	60-150N
max. Betriebsgeschwindigkeit bei entsprechender Fahrleitung:	1 60km/h
Wippenbreite (Betreiberspezifisch anpassbar):	1 450mm
Gesamtgewicht inkl. Isolatoren:	ca. 150kg

Kontakt:

Für den Vertrieb:

Hr. Walter Engelmayer
E-Mail: walter.engelmayer@siemens.com
Telefon: +43-(0) 51707-41911, Fax: -51560

Hr. Gerhard Nassek
E-Mail: gerhard.nassek@siemens.com
Telefon: +43-(0) 51707-41576, Fax: -51560

Für die Technik:

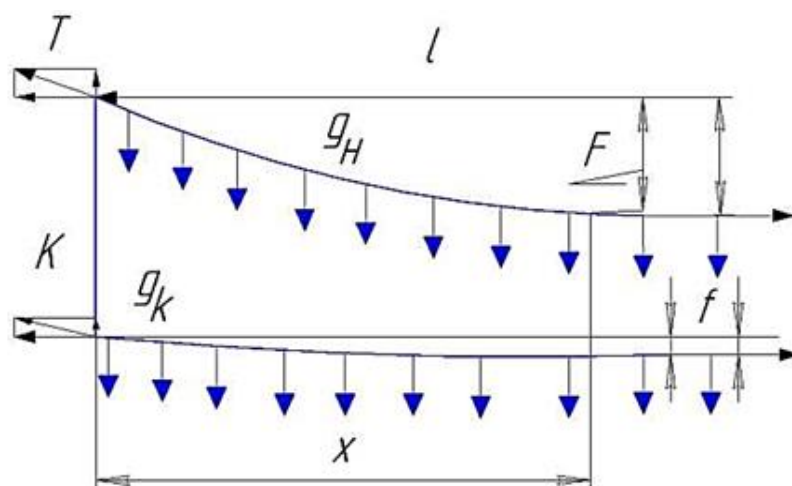
Hr. Gerhard Löffler
E-Mail: gerhard.m.loeffler@siemens.com
Telefon: +43-(0) 51707-40869, Fax: -51560

Siemens Mechanical Solutions
MWW Metallbearbeitungs GmbH & Co KG
A-1110 Wien, Leberstraße 34

www.siemens.at
www.siemens.at/mww

Рисунок 3.1 – Струмоприймач Stromabnehmer SBS 2T

а)



б)

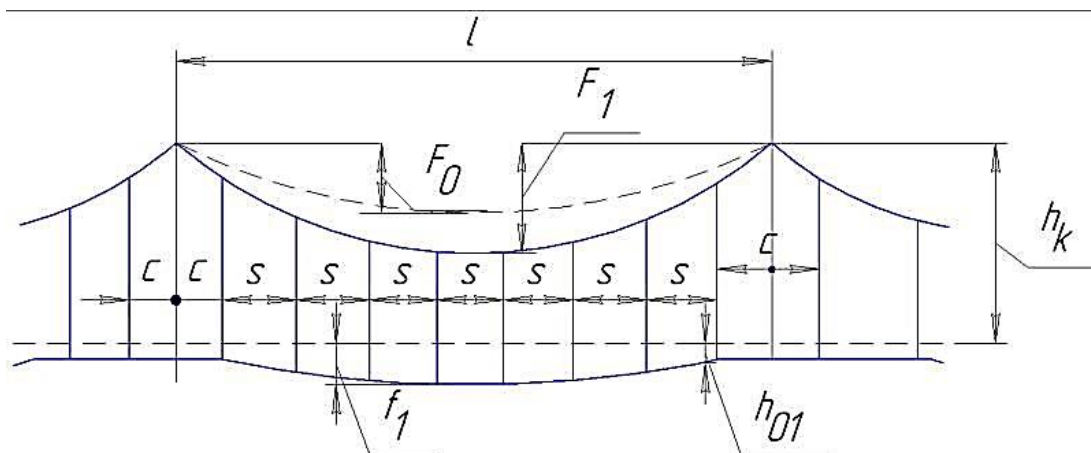


Рисунок 3.2 – Типова схема контактної підвіски КМ-200 з обмеженою (а) та обмеженою кількістю струн

Моделювання здійснювалось при унормованих параметрах як для контактної підвіски так і для струмоприймача.

Під час моделювання задавались реальними даними, отриманими в експлуатації для швидкісного електрорухомого складу, який взаємодівав з контактною підвіскою аналогічного типу.

Параметри струмоприймача приведено в табл. 3.1, а параметри контактної підвіски КМ-200, яка була прийнята для моделювання в табл. 3.2.

Авторами [31] розроблений проект контактної мережі для забезпечення швидкості руху електрорухомого складу до 200 км/год.

Схема заміщення елементів струмоприймача приведена на рис. 3.3.

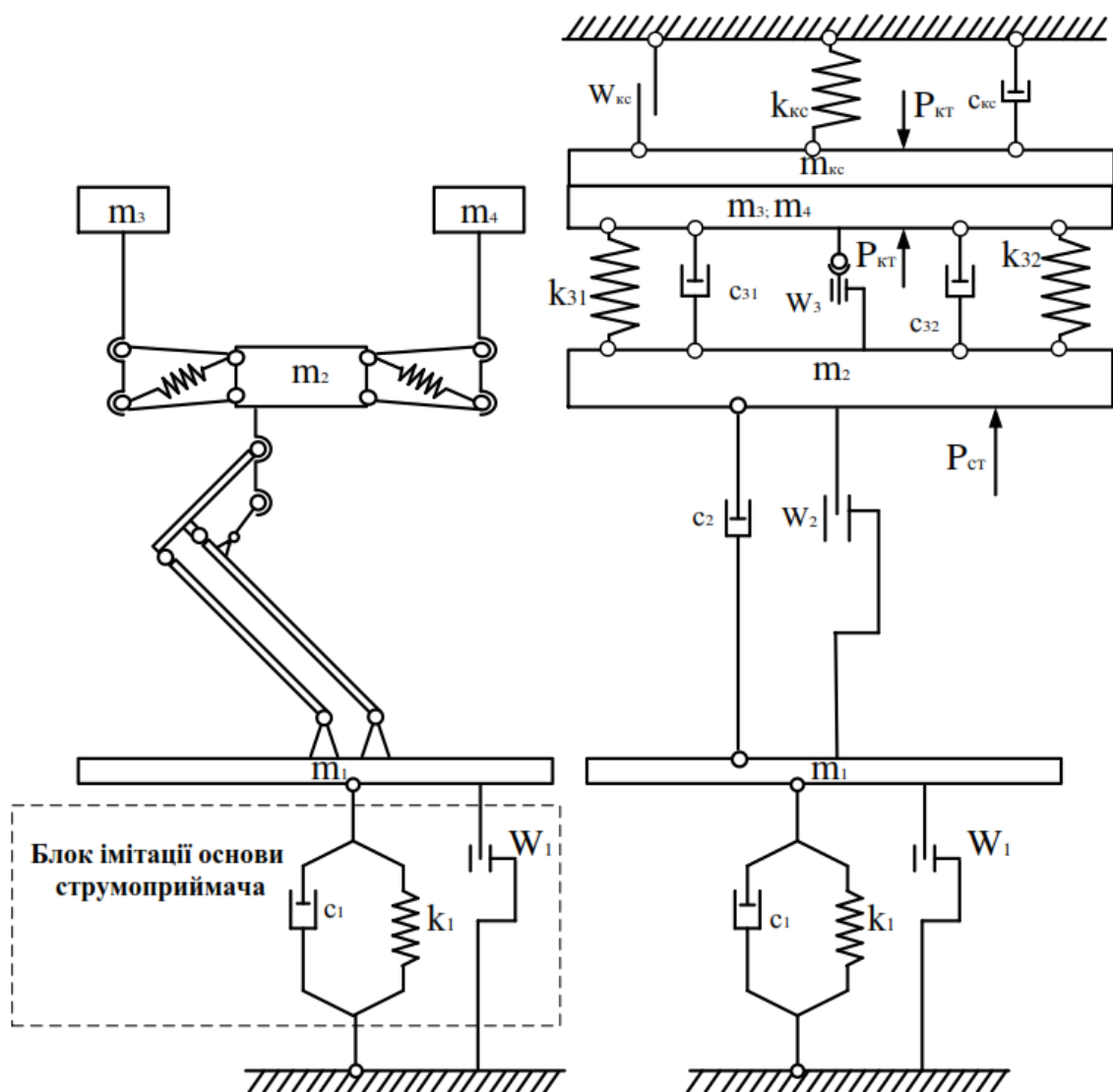


Рисунок 3.3 – Кінетична схема взаємодії контактної підвіски та струмоприймача

Основною складністю є адаптується розрахункової схеми під реалізацію струмоприймача, який моделюється, параметри і характеристики всіх елементів системи визначаються з нормативної документації на обладнання, яке відсутнє в вільному доступі і надається виробником тільки в випадку нерозголошення інформації про виріб.

Розрахункова схема дозволяє враховувати дію набігаючого потоку повітря, коливання основи, кривизну полозів, тертя в шарнірах і інше.

Параметри струмоприймача при робочій висоті 1,5 м, необхідні для розрахунку в програмному комплексі MathCAD наведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Параметри струмоприймача для розрахунку контактної натискання

Параметр	Одиниця виміру	Позначення	Значення
Маса полозу	кг	m_{Π}	10,5
Маса рам струмоприймача	кг	m_p	27,0
Коефіцієнт в'язкого тертя кареток	Нс/м	r_k	125,0
Коефіцієнт сухого тертя кареток	Н	W_k	10,0
Жорсткість кареток	Н/м	$Ж_k$	12000
Вільний хід кареток	м	h_{KO}	0,05
Коефіцієнт в'язкого тертя рам	Нс/м	r_p	40,0
Коефіцієнт сухого тертя рам	Н	W_p	10,0
Сила натиску, приведена до верхніх шарнірів рам	Н	P_0	110
Початкова висота полозу	м	y_2	1,40
Початкова швидкість струмоприймача	м/с	y_3	0
Початкова висота рам	м	y_0	0,75
Початкова швидкість рам	м/с	y_1	0

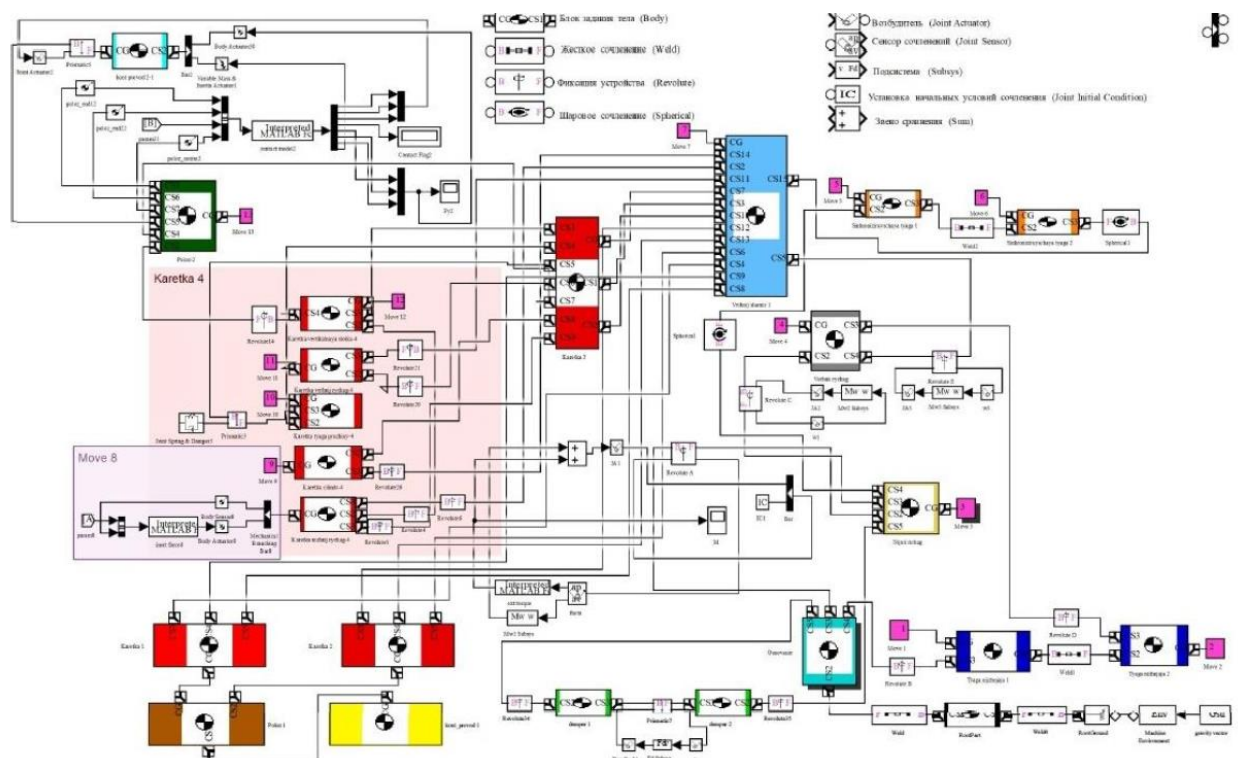


Рисунок 3.4 – Структурна схема для описання взаємодії струмоприймача з контактною підвіскою

Таблиця 3.2 – Основні технічні параметри контактної підвіски КМ-200

Найменування технічних характеристик	Параметри
Несучий трос (головні колії)	М-120
Натяг несучого тросу, кН	18
Контактний провід (головні колії)	БрФ-120
Натяг контактного проводу, кН	20
Струни, марка проводу струн	мірні регульовані, МГ-16 або ВzII-10
Підсилюючий провід	2×АС-150 або А-185
Максимально допустимий тривалий струм контактної підвіски, А	1280
з підсилюючим проводом А-185	1536
Максимальна довжина прольоту, м	65
Конструктивна висота підвіски, мм	1800
Висота контактного проводу від рівня головки рейки (РГР), мм	6000
Стріла провисання контактного проводу в середині прольоту, мм	35
Допустимий середній знос контактного проводу, %	20
Максимальний місцевий знос контактного проводу, %	25
Максимально допустиме відхилення натягу несучого тросу, % на прямих ділянках на кривих	±5 ±10
Спряження анкерних ділянок неізолювані та ізолювані	3- або 4-прольотні
Максимальна довжина анкерної ділянки, м	1400 (2×700)
Відхилення висоти підвішування контактного проводу в опорних вузлах на суміжних опорах, мм, не більше	±30
Допустимі основні ухили контактного проводу при зміні висоти його підвішування (з перехідними 2–3 ділянками з ухилом 0,5 від вказаних)	0,001
Розрахункове приведенне натиснення струмоприймача, Н	120
Допустимий підйом контактного проводу в момент проходження стру- моприймача, мм	120
Максимально допустимий вільний підйом контактного проводу в опорному вузлі, мм	240
Допустимий інтервал температур (на перегоні / на станції)	120/100
Необхідність вертикального регулювання контактного проводу	при зносі 10%
Розрахункова швидкість руху, км/год	200

В результаті моделювання взаємодії контактної підвіски КМ-200 зі струмоприймачем Stromabnehmer SBS 2T були отримані залежності натиску від координати струмоприймача на анкерній ділянці.

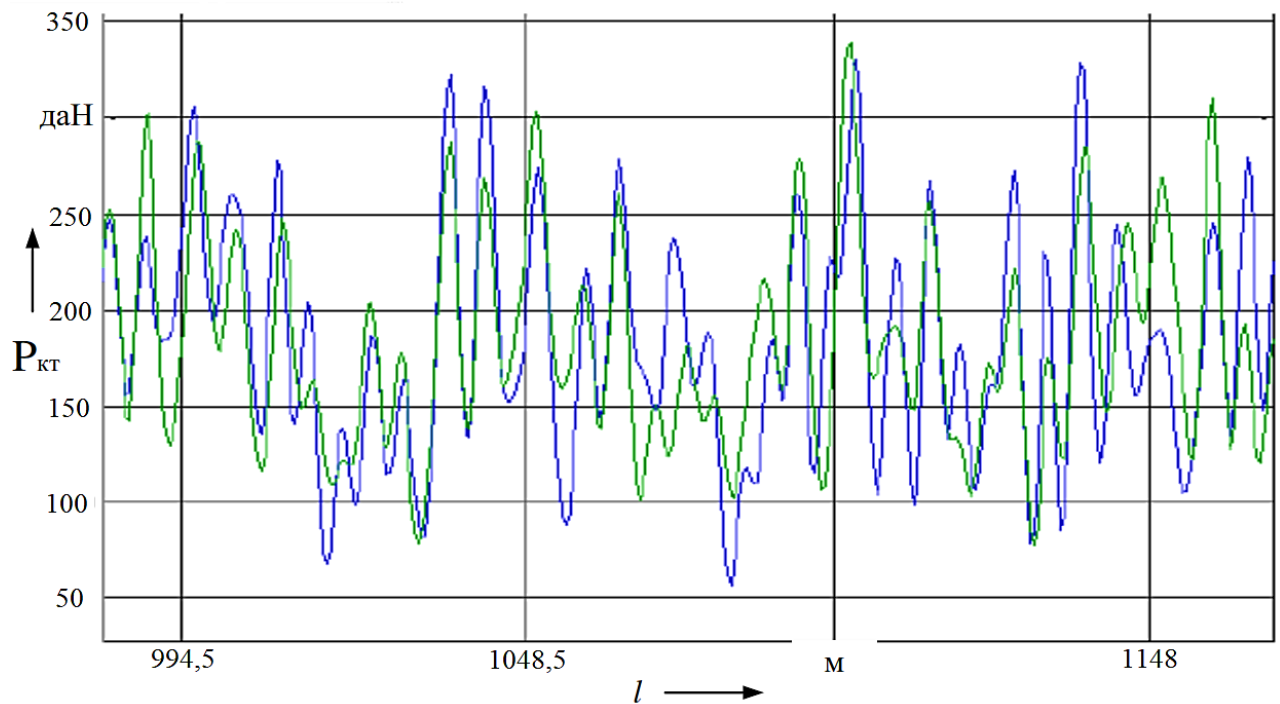


Рисунок 3.5 – Контактне натискання в прольоті 54 м та швидкості моделювання 200 км/год

На графіку синя лінія – це результат моделювання, а зелена – результати експерименту.

Проведене моделювання взаємодії контактної підвіски зі струмоприймачем, у відповідності до розділу 2 дало змогу отримати залежності відтискання контактного проводу від точки розташування струмоприймача в прогоні.

Отримані криві були розраховані при всіх можливих величинах статичного натискання. Це дозволило знайти максимальне і мінімальне значення контактного натискання в прольоті, але необхідно відмітити, що розрахунки проводились без врахування аеродинамічної складової, що суттєвим чином би ускладнило розрахунки.

Відносна похибка моделювання склала 7%, що є достатньо задовільно, так як тип використовуваної контактної підвіски відрізняється від тої, яка використовувалась під час експериментальних досліджень. Відтискання

контактного проводу вздовж прогону для різних точок на полозі струмоприймача приведено на рис. 3.6.

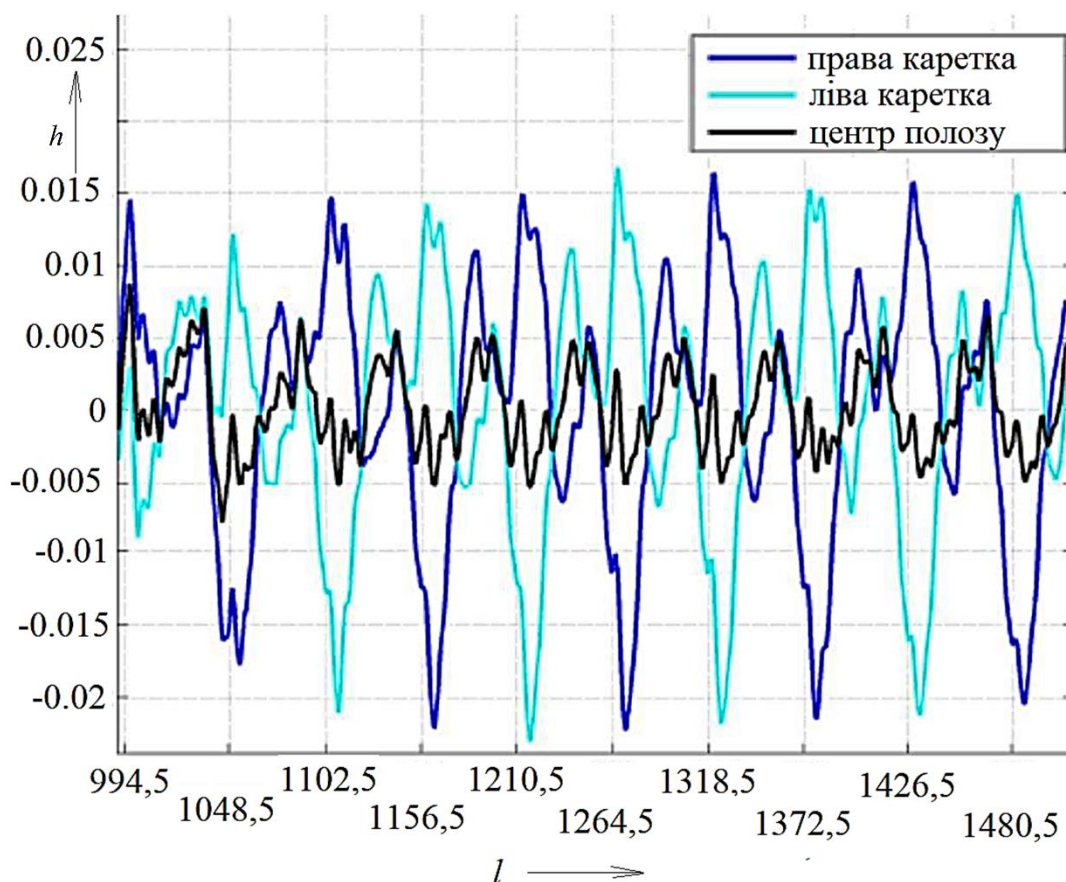


Рисунок 3.6 – Відтискання контактного проводу в прольоті 54 м та швидкості моделювання 200 км/год

Як можна побачити з рис. 3.5...3.6, проведене моделювання контактної підвіски КМ-200 при взаємодії зі струмоприймачем Stromabnehmer SBS 2T та при швидкості руху 200 км/год показує задовільні результати.

Досвід експлуатації високошвидкісних магістралей за кордоном показав, що забезпечення надійної взаємодії рухомого струмоприймача і контактної підвіски є більш складним технічним завданням, ніж забезпечення надійної взаємодії рухомого екіпажу з рейками [1, 2, 7].

На теренах країн Європейської співдружності давно експлуатуються швидкісні та високошвидкісні контактні підвіски [2, 8], які адаптовані для руху

певного типу електрорухомого складу (оремо вантажні та пасажирські поїзди). В Україні ж на одних ділянках колії курсує електрорухомий склад різних типів і контактна мережа повинна задовольняти цілій сукупності вимог для забезпечення надійного струмознімання при різних швидкісних режимах.

Надійність і необхідна якість струмознімання визначаються швидкістю руху електрорухомого складу і конструктивними параметрами контактної підвіски та струмоприймача, а їх взаємодія являє собою складний коливальний процес, при цьому процес взаємодії контактної підвіски та струмоприймача ускладнюється ще й передачею через ковзний контакт електричної енергії. Вказане обумовлює необхідність забезпечення стійкої роботи контактної мережі з врахуванням потужності, яка через неї передається.

У відповідності до поставленої мети дослідження, було вирішено провести моделювання статичної взаємодії швидкісних контактних підвісок зі струмоприймачем, для визначення основних нормованих показників якості струмознімання, при використанні методу розрахунку взаємодії контактної підвіски зі струмоприймачем в усталеному режимі [9], який враховує криву натиску струмоприймача по довжині прогону.

Для отримання більш якісної картини розподілу відтискання та еластичності контактного проводу по довжині прогону було проведене моделювання при змінному натиску в діапазоні від 4 до 18 даН.

На основі отриманого масиву даних було вирішено розробити прогнозну нейромережеву модель, для швидкого прогнозування даних при різних вхідних параметрах.

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		72

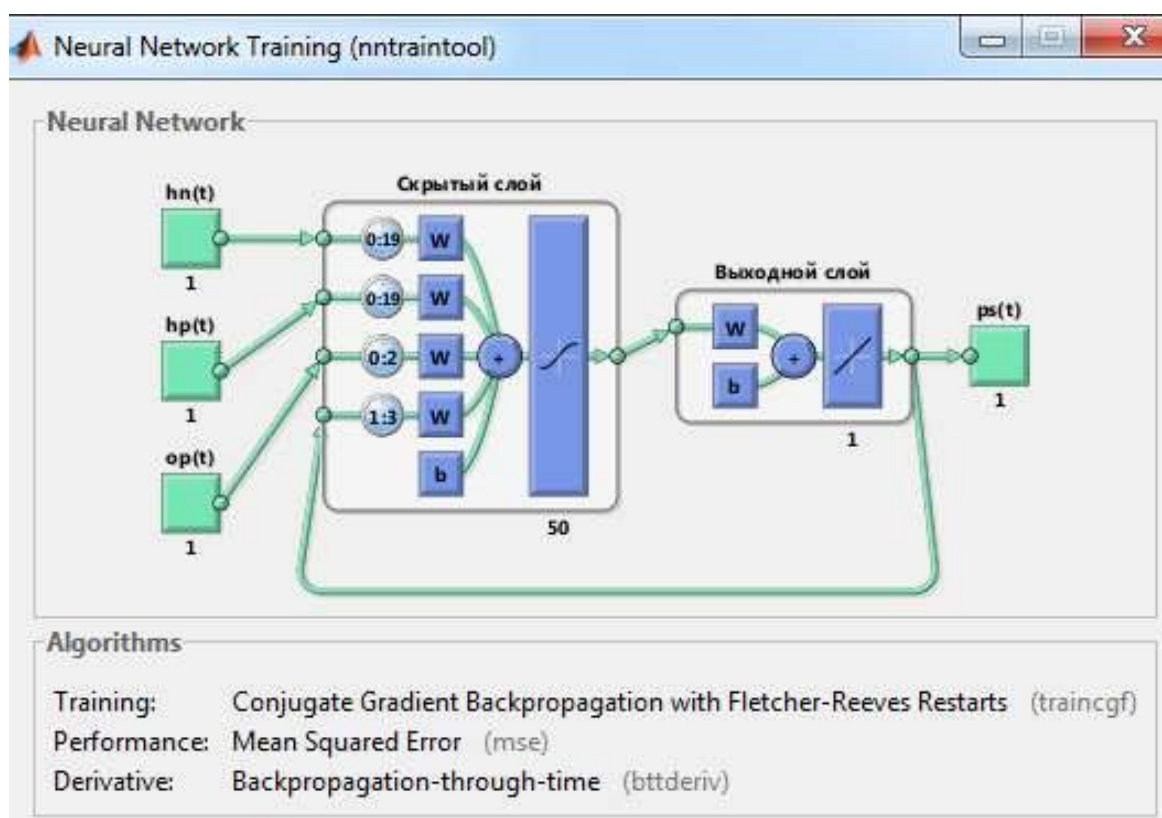


Рисунок 3.7 – Узагальнений вигляд структури нейромережевої моделі

Кількість нейронів у прихованому шарі вибиралась, виходячи з розмірності вхідних векторів. Згідно з теоремою Колмогорова, верхня межа кількості нейронів в прихованому шарі становить $2N + 1$, де N - кількість затриманих входів мережі (тобто для даної моделі 93).

Кількість нейронів може бути зменшено з метою уникнути перенавчання, зменшити кількість локальних мінімумів гіперповерхні критерію навчання, поліпшити збіжність, прискорити і спростити процес навчання (в результаті процесу навчання залишилося 50 нейронів в прихованому шарі).

Вихідний шар мережі містить один нейрон з лінійною функцією активації для можливості екстраполяції вихідного сигналу. Перед початком навчання мережі для ліній затримки формуються масиви затриманих значень на входах мережі (в тому числі для зворотного зв'язку), виконується масштабування (нормалізація) вхідних і вихідного сигналу. Кожна змінна

$h_n(l)$, $h_p(l)$, $d(l)$, P приводиться до нульового математичного сподівання і одиничної дисперсії, що спрощує подальше навчання мережі.

За критерій навчання нейронної мережі прийнятий мінімальний середній квадрат помилки (MSE). Навчання виконано в пакетному режимі, тобто при розрахунку значення критерію помилка моделювання обчислюється відразу для T спостережень. В процесі навчання моделі виконується пошук оптимальних значень ваг і зміщень нейронів мережі. Розмірність задачі оптимізації при зазначеній розмірності нейромережевої моделі дуже велика: $(20 + 20 + 3 + 3) \cdot 50 + 50 + 51 = 2401$ змінна.

Результат зрівняння навченої нейромережевої моделі після 200 циклів навчання (ітерацій) та вхідних даних показаний на рис. 3.8.

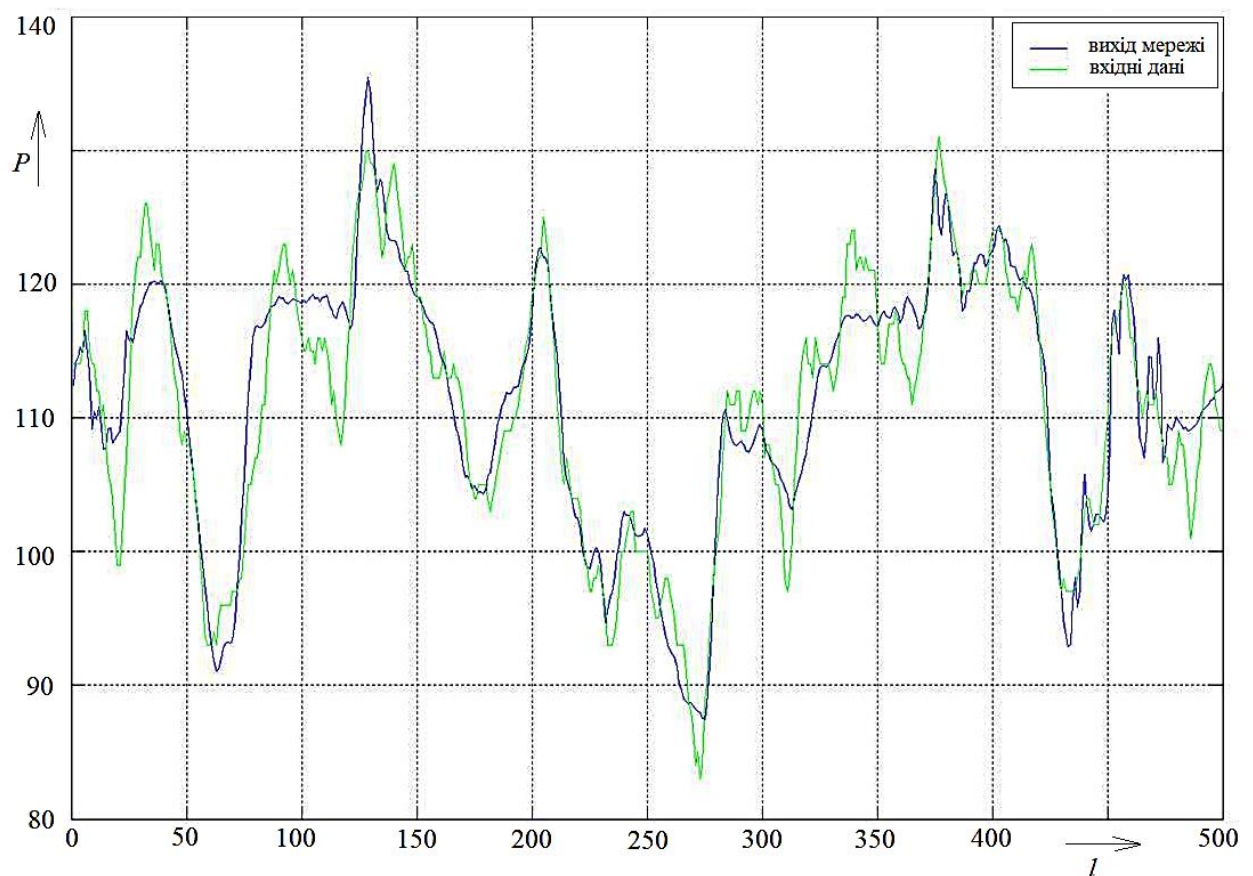
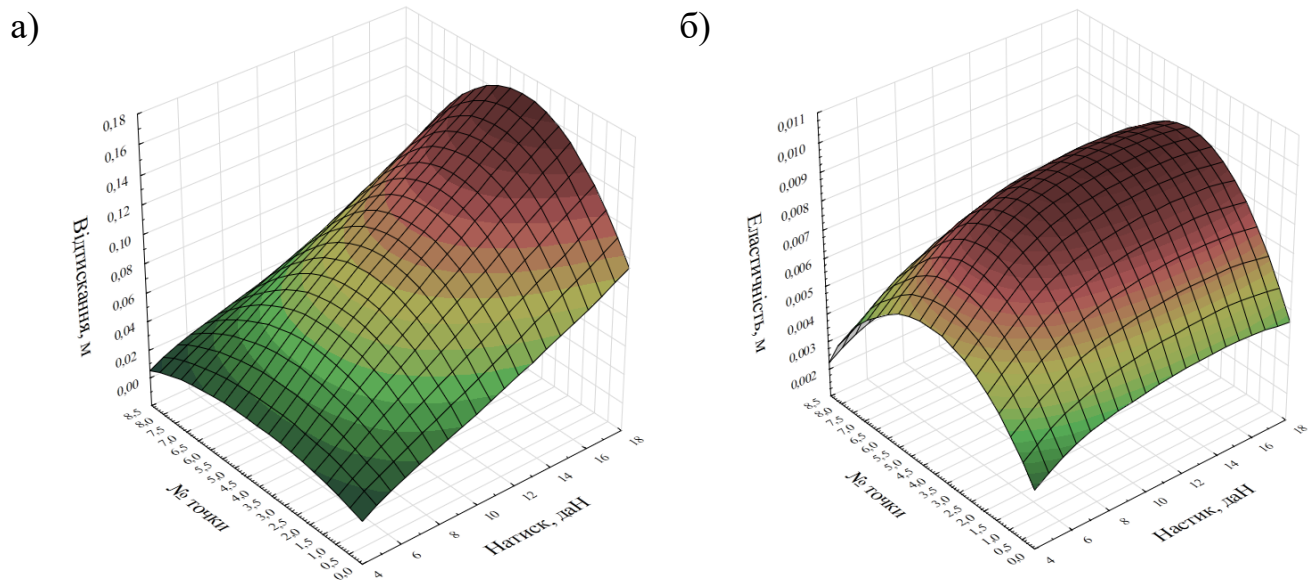


Рисунок 3.8 – Порівняння результатів навчання та вхідних даних нейромережевої моделі

Пошук рішення задачі оптимізації утруднений великою кількістю локальних мінімумів гіперповерхні критерію. Для оптимізації параметрів мережі застосовані методи першого порядку (зокрема, сполучених градієнтів Флетчера-Ривса) і другого порядку (Левенберга-Марквардта). Обчислення приватних похідних критерію за вагами і зсувів виконано на основі методу зворотного поширення помилки.

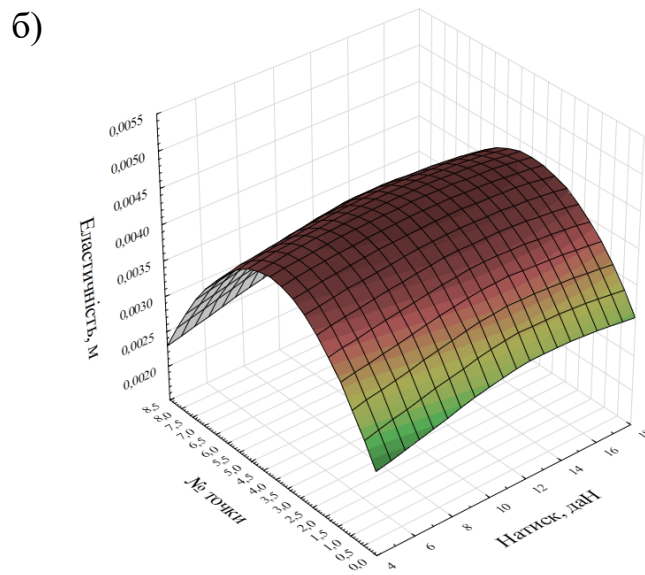
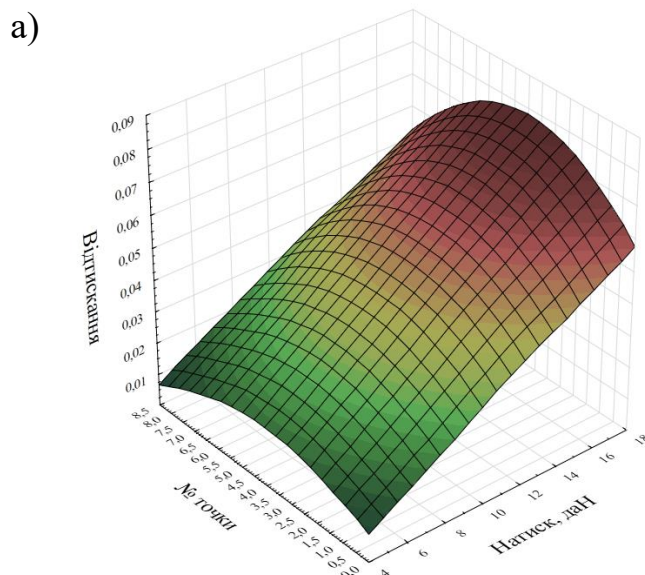
Сходження результатів навчання з вхідними даними становить 96%, що задовольняє постановці задачі.

Результати моделювання взаємодії трьох типів контактних підвісок зі струмоприймачем Stromabnehmer SBS 2T в табличному вигляді приведені в додатку А. В графічному тривимірному вигляді результати моделювання приведені на рис. 3.9...3.11.



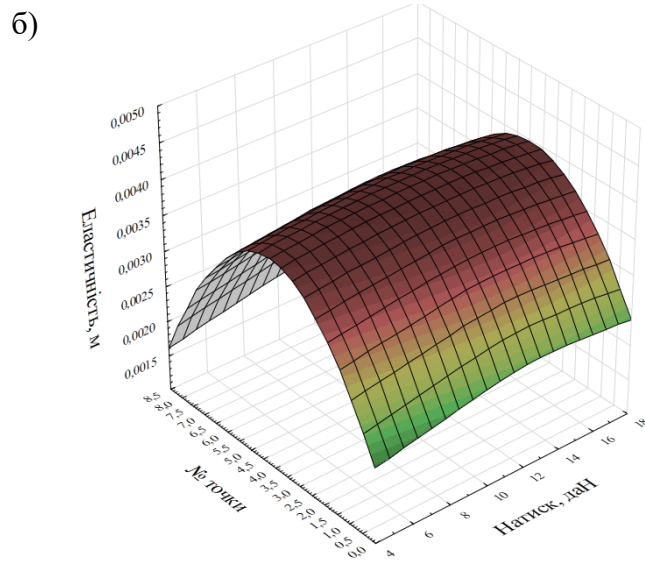
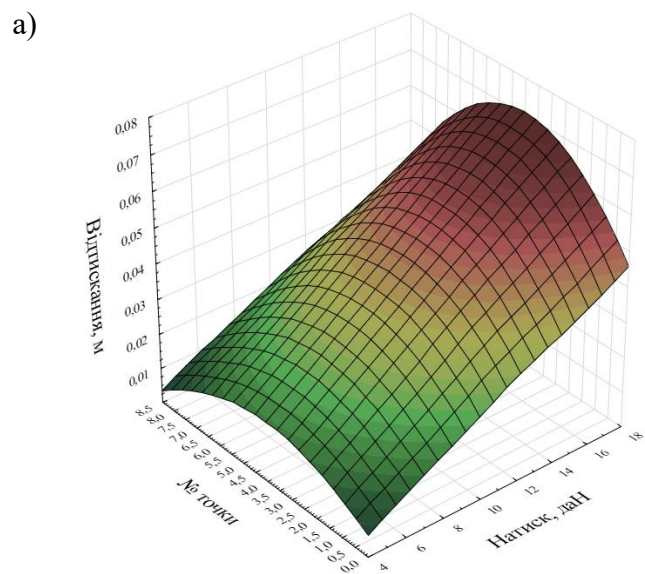
а) відтискання; б) еластичність

Рисунок 3.9 - Результати моделювання взаємодії контактної підвіски ПБСМ-95+МФ-100 при змінному натиску струмоприймача Stromabnehmer SBS 2T



а) відтискання; б) еластичність

Рисунок 3.10 - Результати моделювання взаємодії контактної підвіски М-120+БрФ-120 з мірними струнами при змінному натиску струмоприймача Stromabnehmer SBS 2T



а) відтискання; б) еластичність

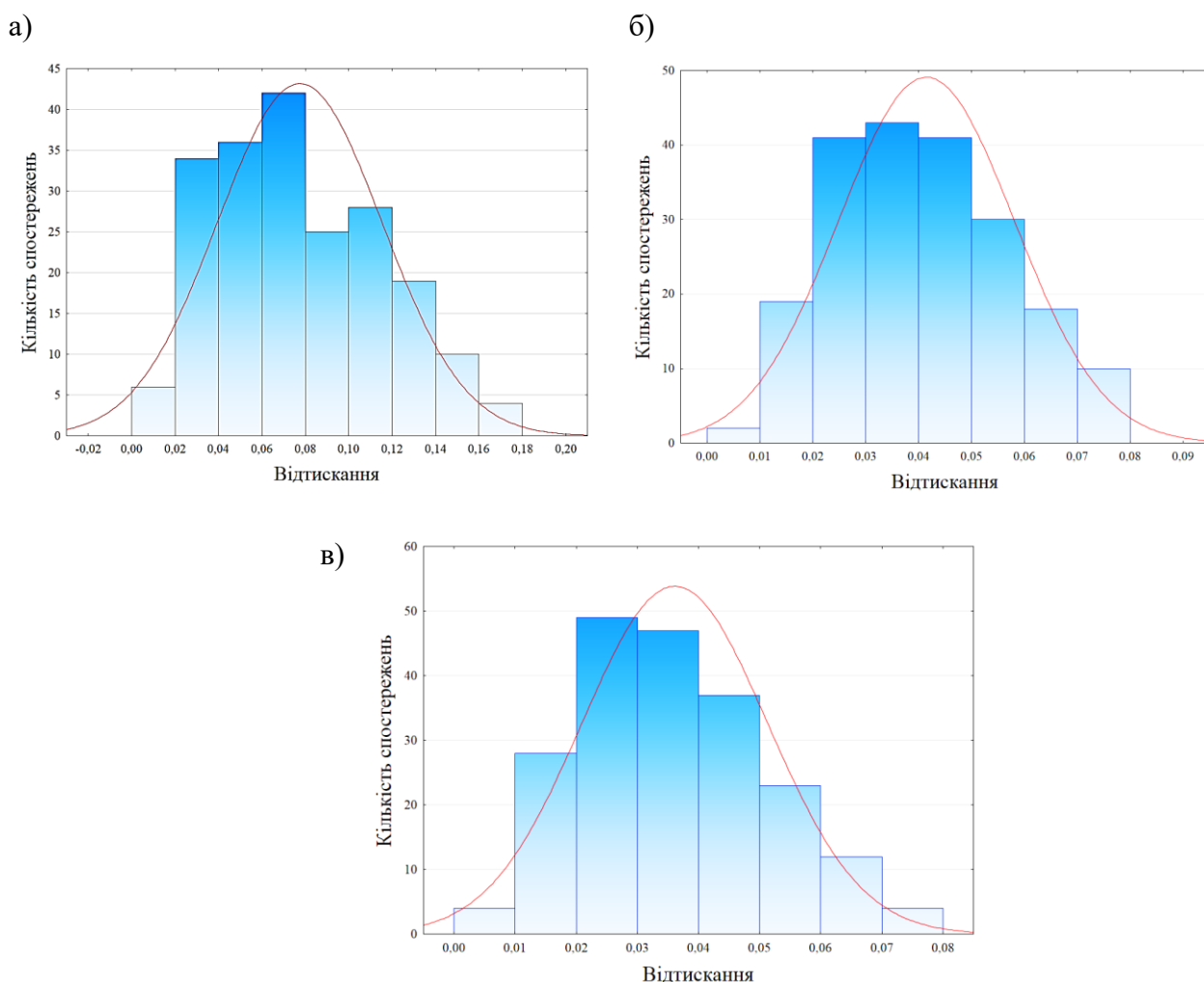
Рисунок 3.11 - Результати моделювання взаємодії контактної підвіски М-120+БрФ-120 з простими струнами при змінному натиску струмоприймача Stromabnehmer SBS 2T

З отриманих результатів (рис.3.9...3.11) можна побачити, що такі показники як відтискання та еластичність при одному й тому ж значенні натиску струмоприймача суттєво відрізняються при використанні різних конструкцій контактних підвісок.

3.2 Аналіз результатів дослідження та підтвердження їх адекватності

Для графічного аналізу даних (див. додаток А) було вирішено побудувати гістограми накопичених частот та коробчасті діаграми.

Як можна побачити, побудовані гістограми накопичених частот (рис. 3.12) симетричні відносно середнього значення відтискання.



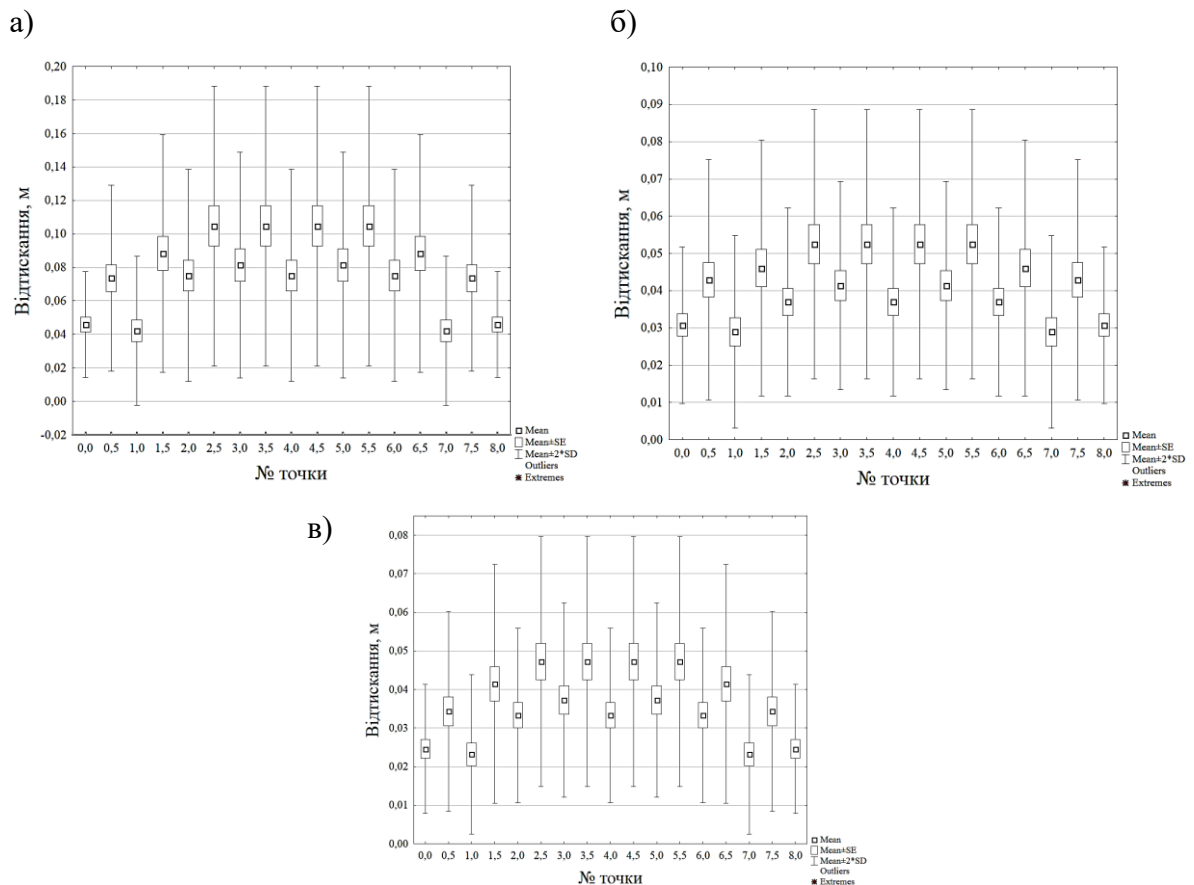
а) ПБСМ-95+МФ-100; б) М-120+БрФ-120 з мірними струнами;

в) М-120+БрФ-120 з простими струнами

Рисунок 3.12 – Гістограми розподілу відтискання контактного проводу

Це свідчить про відповідність нормальному закону розподілу даних та наявність впливу великої кількості впливаючих факторів на розподіл даних. Також необхідно відмітити, що всі гістограми частот мають асиметричність з лівої сторони гістограми, що свідчить про наявну нерівномірність відтискання контактної провідності. Побудова діаграм розмаху дозволяє в графічній формі визначити медіану, середнє та його розкид, мінімальне і максимальне значення вибірки і викиди.

З побудованих коробчастих діаграм (рис. 3.13) можна побачити, що викиди даних, для кожної точки, для якої проводились дослідження відсутні, при цьому необхідно відмітити, що розмахи мінімального і максимального значення відтискання в кожній точці відрізняються вдвічі.



а) ПБСМ-95+МФ-100; б) М-120+БрФ-120 з мірними струнами;

в) М-120+БрФ-120 з простими струнами

Рисунок 3.13 – Коробчасті діаграми розмаху відтискання контактної провідності

Такий розкид обумовлюється занадто великим розкидом натиску струмоприймача, що власне свідчить про необхідність звуження розкиду натиску по довжині прогону. Подібне твердження підкріплюється відомими дослідженнями [3, 7, 8].

Як показують отримані результати досліджень збільшення натягу проводів контактної підвіски дозволяє суттєвим чином досягти зменшення розкиду відтискання, контактного проводу, а стабілізація контактного натиску дозволить досягти більш рівномірної траєкторії полозу струмоприймача по довжині прогону та меншої кількості відривів.

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
						79
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

1. Проведений аналіз роботи струмоприймачів, критеріїв та показників якості струмознімання. Визначено умови для забезпечення необхідної якості струмознімання при експлуатації швидкісного електрорухомого складу.

2. Проаналізовані існуючі та перспективні способи та методи діагностування/контролю стану струмоприймачів та контактних підвісок.

3. Розглянуті існуючі методи взаємодії струмоприймача з контактними підвісками. Визначені основні впливаючі величини на взаємодію контактних підвісок зі струмоприймачами.

4. На існуючій імітаційній моделі взаємодії струмоприймача та контактної підвіски проведено ряд експериментів з моделювання взаємодії струмоприймача з контактними підвісками та отримані залежності натиску та відтискання в залежності від місця розташування струмоприймача в прогоні.

5. На основі отриманих даних розроблена прогнозна нейромережева модель в програмному комплексі Matlab, а отримані дані проаналізовані в середовищі програми Statistica.

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		80

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 токоприёмника 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.

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		81

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. Токосям 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 токосяема / О.А. Сидоров [и др.] // Актуальные проблемы проектирования и эксплуатации контактных подвесок

и токоприемников 148 электрического транспорта: Сборник научных статей с международным участием. – 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 проблеме пантографа и контактной сети / Р.Б. Моррис // Ежемес. бюл. Междунар. ас-социации ж.-д. конгрессов. – 1967. – № 1. – С. 21–41.

22. Nibler, H. Dynamisches Verhalten von fahreitung und stromabnehmer bei elektrischen hauptbahnen / H. Nibler // Elektrische Bahnen. – 1950. – № 10. – С. 8–13.

23. Фудзии, С. Динамика токоприемника / С. Фудзии, Н. Сибата // Материалы VII Японского национального прогресса по прикладной механике. – 1957. – С. 43–47.

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

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

26. Паранин, А.В. Расчет распределения тока в контактном проводе и в ползце токоприемника при токосъеме / А.В. Паранин, Д.А. Ефимов // Транспорт Урала. – 2009. – № 4. – С. 81–84.

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

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
						83
Змн.	Арк.	№ докум.	Подпис	Дата		

28. Моррис, Р.Б. Применение аналоговых вычислительных машин к проблеме 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. Antonov, A. V.Resource Evaluation of Friction Pair “Contact Wire – Contact Strip” / A. V. Antonov, V. G. Sychenko // Archives of Transport. – 2017. Vol. 44, Issue 4. – P. 7-14.

39. 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.

40. Антонов, А. В., Білий, О. М., Варюхін О.О. Передмови розробки моделей взаємодії контактних підвісок та струмоприймачів залізничного електрорухомого складу / А. В. Антонов, О. М. Білий, О. О. Варюхін// Тези доповідей Міжнародної науково-практичної конференції «Енергозбереження та енергоефективність-2019, 28 – 29.11.2019. – Дніпро, 2019. – С. 28.