

ВИЗНАЧЕННЯ ТРАЄКТОРІЇ РОЗТАШУВАННЯ КОНТАКТНОГО ПРОВОДУ ДЛЯ ФІЗИЧНОЇ МОДЕЛІ ВЗАЄМОДІЇ КОНТАКТНОЇ ПІДВІСКИ ЗІ СТРУМОПРИЙМАЧЕМ ЕЛЕКТРОРУХОМОГО СКЛАДУ

Представив д.т.н., професор Гетьман Г.К.

Вступ

Починаючи з 1928 р. в Центральному науково-дослідному інституті транспортної електротехніки, групою контактної мережі були проведені перші роботи по взаємодії контактної мережі з електрорухомим складом під час струмознімання. З 1935 р. лабораторією контактної мережі ВНДІЗТу велись науково-дослідні роботи по розробці та дослідженню елементів взаємодії в процесі струмознімання та покращенню якості струмознімання. На базі цієї лабораторії створені стенди для триботехнічних випробувань контактних матеріалів, елементів системи струмознімання [1].

В Омському державному університеті шляхів сполучення з 1977 р. виконуються експериментальні дослідження пристроїв струмознімання електричного транспорту, спрямовані на розробку нових і модернізацію існуючих пристроїв. Розроблена і випробувана методика експериментальних досліджень зносу контактних пар пристроїв струмознімання реалізується лабораторним комплексом, що включає спеціалізовані установки зворотного-поступального, обертового й ударного типів, аеродинамічну установку, дискову машину тертя для експрес-випробувань, а також електроустановку для навантажувальних випробувань [2].

Подібного роду випробувальна лабораторія створюється і в ДНУЗТ фахівцями кафедри «Електропостачання залізниць». Лабораторна база дозволить досліджувати та вивчати процеси струмознімання в умовах, максимально наближених до реальних. При цьому імітуються різні типи підвісок, стріли прогину, зигзаги, коливання, удари в широкому швидкісному діапазоні. Конструктивні особливості лабораторного комплексу дозволять проводити весь спектр струмових та динамічних досліджень пристроїв струмознімання в умовах, які відповідають реальним режимам експлуатації пристроїв. Методика випробувань включатиме варіювання наступних параметрів для кожної пари контактних матеріалів: контактного натиску;

відносного положення контактуючих поверхонь; швидкості відносного руху елементів пари тертя; режимів руху; сили електричного струму і полярності (для постійного струму); параметрів навколишнього середовища (температури, вологості, запиленості) та ін. [3].

В даний час існує велика кількість різноманітних конструкцій контактних підвісок, призначених для експлуатації в умовах швидкісного руху. Параметри і конструктивні особливості цих пристроїв варіюються в широких межах. Вплив цих параметрів на динаміку взаємодії контактної підвіски і струмоприймача виражено неявно і має безліч нюансів, що і спонукає до більш детального розгляду цього питання.

Взаємодія струмоприймача й контактної підвіски являє собою складний механічний процес, тому що взаємодіюча система має нескінченне число ступенів свободи та в обох взаємодіючих пристроях залежно від положення точки контакту й умов її переміщення (траєкторії) змінюються жорсткість, маса, тертя. Зміна контактного натискання в залежності від положення точки контакту призводить до нерівномірного зносу контактуючих елементів. Вивчення цього процесу ведуть як експериментальними, так і теоретичними методами, залучаючи складний математичний апарат, фізичні моделі та використовуючи програмне забезпечення моделювання процесів взаємодії в системі струмознімання.

Для вивчення та дослідження такого складного процесу пропонується застосування фізичної моделі – кільцевого стенду.

Постановка задачі

Для визначення траєкторії розташування контактного проводу на кільцевому стенді необхідно виконати таке перетворення над рівнянням, яке описує його положення всередині прогону в лінійних декартових координатах, щоб отримати замкнену криву, деяке математичне місце точок відносно початку координат, кожна з точок якого відповідає конкретній точці всередині прогону. Слід зазначити, що в декартових координатах вихідна функція має бути пе-

ріодичною на інтервалі T , бо інакше, виконуючи описане перетворення, отримаємо незамкнену криву, застосування якої в якості траєкторії на кільцевому стенду не досить зручне.

Для визначення математичного апарату цього переходу розглянемо найпростіший випадок. Нехай положення контактної провуду всередині прогону визначається рівнянням $y=1$. Тоді шукане математичне місце точок являє собою одиничне коло, яке в полярній системі координат описується рівнянням $\rho=1$. Звідси випливає, що перехід слід виконувати за допомогою заміни змінної $y \rightarrow \rho$. Крім того, слід зазначити, що в полярній системі координат аргумент φ набуває значень в межах $0..2\pi$, і при виконанні шуканого перетворення необхідно абсцисі x увести перевідний коефіцієнт $T/2\pi$, тобто для аргументу необхідно виконати заміну змінної вигляду $x \rightarrow \varphi \cdot T/2\pi$.

Застосуємо отримане перетворення для визначення трьох можливих розташувань контактної провуду всередині прогону для напівкосої підвіски на прямій ділянці колії, вертикально-хордової підвіски на кривих та ромбовидної підвіски збільшеної вітростійкості [4-6].

Для напівкосої контактної підвіски характерне зигзагоподібне розташування контактної провуду (рис. 1), яке аналітично в загальному вигляді опишемо рівнянням

$$y(x) = \begin{cases} k \cdot x + b, & 0 \leq x \leq \ell; \\ -k \cdot x + b, & \ell \leq x \leq 2\ell. \end{cases} \quad (1)$$

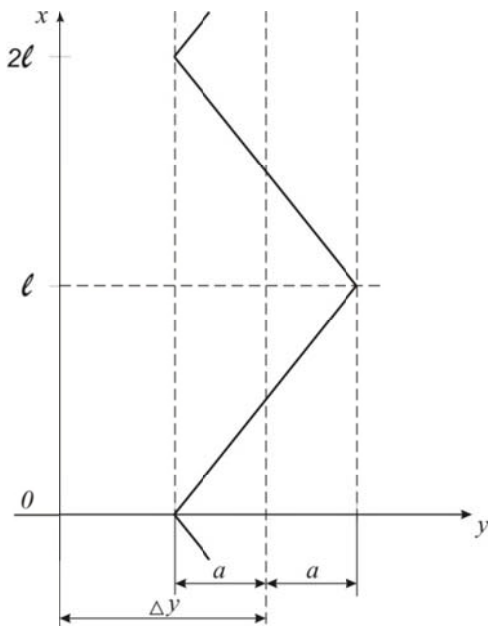


Рис. 1. Схема розташування контактної провуду напівкосої підвіски в прогоні

Інтервал періодичності в даному випадку складатиме подвоєну довжину прогону $T=2\ell$, де ℓ – довжина прогону.

Розглянемо граничні умови розташування контактної провуду та отримаємо рівняння в загальному вигляді з використанням параметрів: Δy – зміщення вісі струмоприймача відносно осі обертання кільцевого стенду; a – зигзаг контактної провуду. Для першого рівняння у виразі (1) матимемо

$$x=0: y=\Delta y-a, k \cdot 0+b=\Delta y-a, b=\Delta y-a;$$

$$x=\ell: y=\Delta y+a, k \cdot \ell+b=\Delta y+a,$$

$$k = \frac{\Delta y+a-b}{\ell} = \frac{\Delta y+a-(\Delta y-a)}{\ell} = \frac{2a}{\ell}.$$

Застосуємо граничні умови для другого рівняння системи (1)

$$x=\ell: y=\Delta y+a, -k \cdot \ell+b=\Delta y+a,$$

$$b=\Delta y+a+k \cdot \ell;$$

$$x=2\ell: y=\Delta y-a, -k \cdot 2\ell+b=\Delta y-a.$$

Знайдемо різницю останніх двох рівнянь, отримаємо

$$\Delta y+a+k \cdot \ell-(\Delta y-a+2k \cdot \ell)=0,$$

$$2a-k \cdot \ell=0, k=\frac{2a}{\ell}.$$

Підставляючи отриманий коефіцієнт в одне з попередніх рівнянь, знайдемо

$$b=\Delta y+a+\frac{2a}{\ell} \cdot \ell=\Delta y+3a;$$

або, що теж саме

$$b=\Delta y-a+2 \cdot \frac{2a}{\ell} \cdot \ell=\Delta y+3a.$$

Таким чином, рівняння (1) з врахуванням вищезазначеного матиме вигляд

$$y(x) = \begin{cases} \frac{2a}{\ell} \cdot x + \Delta y - a, & 0 \leq x \leq \ell; \\ -\frac{2a}{\ell} \cdot x + \Delta y + 3a, & \ell \leq x \leq 2\ell. \end{cases} \quad (2)$$

Застосуємо до рівняння (2) запропоноване перетворення та враховуючи, що $T=2\ell$ матимемо

$$\rho(\varphi) = \begin{cases} \frac{2a}{\ell} \cdot \frac{2\ell}{2\pi} \cdot \varphi + \Delta y - a, & 0 \leq \varphi \leq \pi; \\ -\frac{2a}{\ell} \cdot \frac{2\ell}{2\pi} \cdot \varphi + \Delta y + 3a, & \pi \leq \varphi \leq 2\pi, \end{cases}$$

спрощуючи який, отримаємо

$$\rho(\varphi) = \begin{cases} \frac{2a}{\pi} \cdot \varphi + \Delta y - a, & 0 \leq \varphi \leq \pi; \\ -\frac{2a}{\pi} \cdot \varphi + \Delta y + 3a, & \pi \leq \varphi \leq 2\pi. \end{cases} \quad (3)$$

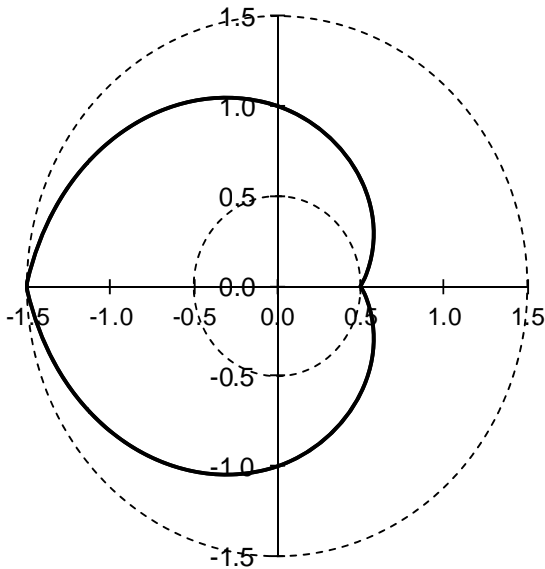


Рис. 2. Траєкторія розташування контактної провуду для моделювання взаємодії з напівкосю підвіскою

На кривих ділянках колії має місце параболічне розташування контактної провуду (рис. 3). Визначимо в загальному вигляді траєкторію розташування контактної провуду в кривих відносно випрямленої осі струмоприймача на основі квадратичного рівняння.

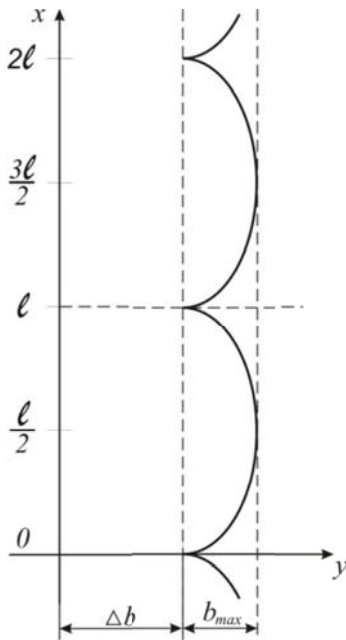


Рис. 3. Схема розташування контактної провуду вертикально-хордової підвіски в прогоні

В загальному вигляді

$$y(x) = A \cdot x^2 + B \cdot x + C. \quad (4)$$

Використаємо наступні параметри: b_{\max} – максимальний винос контактної провуду в середині прогону; Δb – зміщення найближчої

точки контактної провуду відносно осі обертання кільцевого стелуду.

Інтервал періодичності для вертикально-хордової підвіски дорівнюватиме довжині прогону, тобто $T = \ell$.

Розглянемо граничні умови та визначимо коефіцієнти рівняння (4),

$$x = 0 : y = \Delta b, \quad A \cdot 0^2 + B \cdot 0 + C = \Delta b, \quad C = \Delta b.$$

$$x = \ell/2 : y = b_{\max}, \quad A \cdot \frac{\ell^2}{4} + B \cdot \frac{\ell}{2} + \Delta b = b_{\max},$$

$$A \cdot \ell^2 + B \cdot 2\ell = 4(b_{\max} - \Delta b).$$

$$x = \ell : y = \Delta b, \quad A \cdot \ell^2 + B \cdot \ell + \Delta b = \Delta b,$$

$$A \cdot \ell^2 + B \cdot \ell = 0.$$

Розв'язуючи систему двох останніх рівнянь, отримаємо

$$\begin{cases} A \cdot \ell^2 + B \cdot 2\ell = 4(b_{\max} - \Delta b); \\ A \cdot \ell^2 + B \cdot \ell = 0; \end{cases}$$

$$\begin{cases} A \cdot \ell^2 - 2A \cdot \ell^2 = 4(b_{\max} - \Delta b); \\ B = -A \cdot \ell; \end{cases}$$

$$\begin{cases} A = -\frac{4(b_{\max} - \Delta b)}{\ell^2}; \\ B = \frac{4(b_{\max} - \Delta b)}{\ell}. \end{cases}$$

Остаточно, рівняння (4) перепишемо наступним чином

$$y(x) = -\frac{4(b_{\max} - \Delta b)}{\ell^2} \cdot x^2 + \frac{4(b_{\max} - \Delta b)}{\ell} \cdot x + \Delta b. \quad (5)$$

Виконаємо необхідні заміни змінних та отримаємо шукане рівняння в полярних координатах, для спрощення запису при цьому $b_{\max} - \Delta b$ замінимо на b :

$$\rho(\varphi) = -\frac{4(b_{\max} - \Delta b)}{\ell^2} \cdot \varphi^2 \frac{\ell^2}{4\pi^2} + \frac{4(b_{\max} - \Delta b)}{\ell} \cdot \varphi \frac{\ell}{2\pi} + \Delta b;$$

$$\rho(\varphi) = -\frac{b}{\pi^2} \cdot \varphi^2 + \frac{2b}{\pi} \cdot \varphi + \Delta b. \quad (6)$$

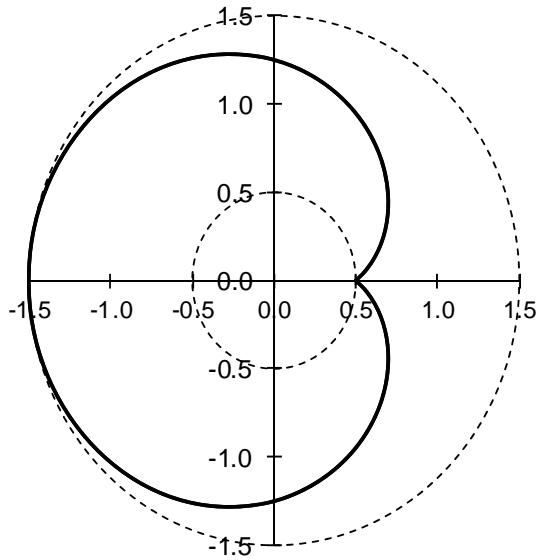


Рис. 4. Траєкторія розташування контактної провуду для моделювання взаємодії з вертикально-хордовою підвіскою

На складних ділянках електрифікованих залізниць, де спостерігаються значні вітрові навантаження, застосовується ромбовидна контактна підвіска підвищеної вітростійкості (рис. 5). Місця скріплення розташовують приблизно на $1/4$ довжини прогону від кожної опори. Для збільшення вітростійкості такої підвіски намагаються дотримуватись мінімально можливої відстані між контактними провудами всередині прогону та максимальних зигзагів в опорному вузлі.

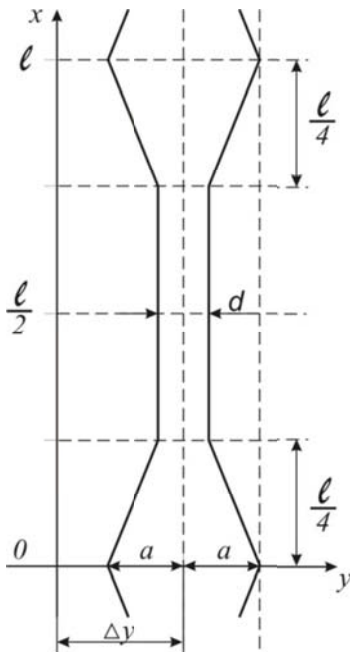


Рис. 5. Схема розташування контактних провудів ромбовидної підвіски в прогоні

В загальному вигляді рівняння розташування одного контактної провуду запишемо у вигляді

$$y(x) = \begin{cases} k \cdot x + b, & 0 \leq x \leq l/4; \\ c, & l/4 \leq x \leq 3l/4; \\ -k \cdot x + b, & 3l/4 \leq x \leq l. \end{cases} \quad (7)$$

Розглянемо граничні умови та визначимо значення сталих коефіцієнтів

$$x=0 : y = \Delta y - a, \quad k \cdot 0 + b = \Delta y - a, \quad b = \Delta y - a.$$

$$x=l/4 : y = \Delta y - d/2,$$

$$k \cdot l/4 + \Delta y - a = \Delta y - d/2, \quad k = \frac{4a - 2d}{l},$$

$$c = \Delta y - d/2.$$

$$x=3l/4 : y = \Delta y - d/2, \quad -k \cdot 3l/4 + b = \Delta y - d/2;$$

$$x=l : y = \Delta y - a, \quad -k \cdot l + b = \Delta y - a.$$

Визначимо різницю останніх двох рівнянь, отримаємо

$$-k \cdot 3l/4 + b - (-k \cdot l + b) = \Delta y - d/2 - \Delta y + a;$$

$$k \cdot l/4 = -d/2 + a; \quad k = \frac{4a - 2d}{l}.$$

Підставляючи отриманий коефіцієнт в одне з попередніх рівнянь, знайдемо

$$b = \Delta y - d/2 + 3/4(4a - 2d) =$$

$$\Delta y - d/2 + 3a - 3/2d = \Delta y + 3a - 2d.$$

Таким чином, остаточно рівняння (7) для першого контактної провуду перепишемо у вигляді

$$y_1(x) = \begin{cases} \frac{4a - 2d}{l} \cdot x + \Delta y - a, & 0 \leq x \leq l/4; \\ \Delta y - d/2, & l/4 \leq x \leq 3l/4; \\ -\frac{4a - 2d}{l} \cdot x + \Delta y + 3a - 2d, & 3l/4 \leq x \leq l. \end{cases} \quad (8)$$

Оскільки контактні провуди розташовані симетрично, запишемо рівняння розташування другого контактної провуду користуючись властивістю симетрії, тобто

$$y_2(x) = \begin{cases} -\frac{4a - 2d}{l} \cdot x + \Delta y + a, & 0 \leq x \leq l/4; \\ \Delta y + d/2, & l/4 \leq x \leq 3l/4; \\ \frac{4a - 2d}{l} \cdot x + \Delta y - 3a + 2d, & 3l/4 \leq x \leq l. \end{cases} \quad (9)$$

Використовуючи зазначене перетворення до систем рівнянь (8)-(9), отримаємо шукане рів-

няння траєкторії контактних проводів для кільцевого стенду в полярних координатах

$$\rho_1(\varphi) = \begin{cases} \frac{2a-d}{\pi} \cdot \varphi + \Delta y - a, & 0 \leq \varphi \leq \pi/2; \\ \Delta y - d/2, & \pi/2 \leq \varphi \leq 3\pi/2; \\ -\frac{2a-d}{\pi} \cdot \varphi + \Delta y + 3a - 2d, & 3\pi/2 \leq \varphi \leq 2\pi; \end{cases} \quad (10)$$

$$\rho_2(\varphi) = \begin{cases} -\frac{2a-d}{\pi} \cdot \varphi + \Delta y + a, & 0 \leq \varphi \leq \pi/2; \\ \Delta y + d/2, & \pi/2 \leq \varphi \leq 3\pi/2; \\ \frac{2a-d}{\pi} \cdot \varphi + \Delta y - 3a + 2d, & 3\pi/2 \leq \varphi \leq 2\pi. \end{cases} \quad (11)$$

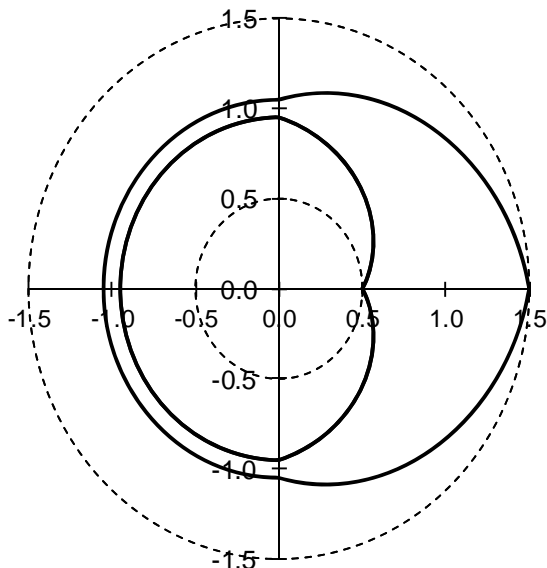


Рис. 6. Траєкторія розташування контактних проводів для моделювання взаємодії з ромбовидною підвіскою

Аналізуючи отримані рівняння траєкторії в полярних координатах (3), (6), (10)-(11), бачимо, що до жодного з них не входить такий параметр, як довжина прогону ℓ , яка безпосередньо визначає необхідну довжину контактних проводів для монтування на кільцевому стенді. Цю довжину можливо визначити на підставі відомої формули визначення довжини кривої в полярних координатах

$$L = \int_a^b \sqrt{\rho^2 + \left(\frac{d\rho}{d\varphi}\right)^2} d\varphi. \quad (12)$$

Застосуємо формулу (12) до кожної з розглянутих підвісок:

– для контактних проводів напівкосій підвіски

$$L_H = \int_0^\pi \sqrt{\left(\frac{2a}{\pi} \varphi + \Delta y - a\right)^2 + \frac{4a^2}{\pi^2}} d\varphi + \int_\pi^{2\pi} \sqrt{\left(-\frac{2a}{\pi} \varphi + \Delta y + 3a\right)^2 + \frac{4a^2}{\pi^2}} d\varphi; \quad (13)$$

$$L_H = \frac{2a}{\pi} \ln \left(\frac{a + \Delta y + d_1}{\Delta y - a + d_2} \right) + \frac{\pi}{2a} [(a + \Delta y)d_1 + (a - \Delta y)d_2]; \quad (14)$$

де $d_1 = \sqrt{\frac{4a^2}{\pi^2} + (a + \Delta y)^2}$, $d_2 = \sqrt{\frac{4a^2}{\pi^2} + (a - \Delta y)^2}$;

використовуючи значення $a = 0,5$ м, $\Delta y = 1,0$ м, визначимо значення d_1 та d_2 і відповідну довжину контактних проводів напівкосій підвіски

$$d_1 = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,5^2}{\pi^2} + (0,5 + 1)^2} = 1,533 \text{ м};$$

$$d_2 = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,5^2}{\pi^2} + (0,5 - 1)^2} = 0,593 \text{ м};$$

$$L_H = \frac{2 \cdot 0,5}{\pi} \ln \left(\frac{0,5 + 1 + 1,533}{1 - 0,5 + 0,593} \right) + \frac{\pi}{2 \cdot 0,5} [(0,5 + 1)1,533 + (0,5 - 1)0,593] = 6,617 \text{ м}.$$

– для контактних проводів вертикально-хордової підвіски

$$L_{BX} = \int_0^{2\pi} \sqrt{\left(-\frac{b}{\pi^2} \varphi^2 + \frac{2b}{\pi} \varphi + \Delta b\right)^2 + \left(-\frac{2b}{\pi^2} \varphi + \frac{2b}{\pi}\right)^2} d\varphi, \quad (15)$$

оскільки в загальному вигляді досить складно отримати вираз для обчислення інтегралу такого вигляду, скористаємось чисельним методом вирішення виразу (12), для наступних значень параметрів $\Delta b = 0,5$; $b_{\max} = 1,5$; $b = 1,0$ матимемо $L_{BX} = 7,789$ м.

– для контактних проводів ромбовидної підвіски

$$L_{P1} = \int_0^{\pi/2} \sqrt{\left(\frac{2a-d}{\pi} \cdot \varphi + \Delta y - a\right)^2 + \frac{(2a-d)^2}{\pi^2}} d\varphi +$$

$$+ \int_{\pi/2}^{3\pi/2} \sqrt{(\Delta y - d/2)^2} d\varphi +$$

$$+ \int_{3\pi/2}^{2\pi} \sqrt{\left(-\frac{2a-d}{\pi} \cdot \varphi + 3a - 2d\right)^2 + \frac{(2a-d)^2}{\pi^2}} d\varphi,$$

$$L_{P2} = \int_0^{\pi/2} \sqrt{\left(-\frac{2a-d}{\pi} \cdot \varphi + \Delta y + a\right)^2 + \frac{(2a-d)^2}{\pi^2}} d\varphi +$$

$$+ \int_{\pi/2}^{3\pi/2} \sqrt{(\Delta y + d/2)^2} d\varphi +$$

$$+ \int_{3\pi/2}^{2\pi} \sqrt{\left(\frac{2a-d}{\pi} \cdot \varphi + \Delta y - 3a + 2d\right)^2 + \frac{(2a-d)^2}{\pi^2}} d\varphi;$$

аналогічно попередньому випадку, вираження

цих інтегралів в загальному вигляді досить громіздке, користуючись чисельним методом інтегрування за наступним параметрів $a=0,5$ м; $\Delta y=1,0$ м; $d=0,1$ м, отримуємо $L_{P1}=4,854$ м; $L_{P2}=7,405$ м.

Відповідно до реальних розмірів кільцевого ственду визначимо необхідну довжину контактного проводу для монтажу підвіски кожного типу і модельні довжини прогонів для співставлення з реальними та подальшого визначення масштабного коефіцієнту фізичної моделі (табл. 1).

Таблиця 1

Довжини контактних проводів та прогонів

№	Тип контактної підвіски	Довжина контактного проводу, м	Кількість прогонів	Довжина одного прогону, м
1	Напівкоса	6,617	2	3,142
2	Вертикально-хордова	7,789	1	6,283
3	Ромбовидна	4,854 / 7,405	1	6,283

Висновки

1. Траєкторію розташування контактного проводу для фізичної моделі взаємодії струмоприймача з контактною підвіскою (кільцевого ственду) досить просто можна отримати в полярній системі координат заміною змінних у рівнянні розташування контактного проводу уздовж ділянки $y \rightarrow \rho$, $x \rightarrow \varphi \cdot T/2\pi$.

2. Рівняння траєкторії контактного проводу в полярній формі не містить параметру ℓ – довжини прогону, тому визначення необхідної довжини контактного проводу для монтажу на кільцевому ственді слід визначати за допомогою спрямлення кривої в полярних координатах.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Подольский, В.И. Лаборатория контактной сети ВНИИЖТ. Прошлое, настоящее, будущее (к 80 летнему юбилею лаборатории) [Текст] / В.И. Подольский, Н.В.Миронос, П.Г. Тюрнин, М.В. Вязовой, Е.Э. Закиев // Вестник ВНИИЖТ. – 2008. - №1. – С. 3 – 5.

2. Сидоров, О.А. Совершенствование методов испытаний контактных подвесок и токоприемников [Текст] / О.А. Сидоров, А.Н. Смердин // Железнодорожный транспорт. – 2010. – №11. – С. 72 – 74.

3. Сиченко, В.Г. Дослідження взаємодії струмоприймача та контактної мережі [Текст] / В.Г. Сиченко, В.Г. Мандич, О.М. Клак, О.В. Михайлов, О.Г. Маркевич, Р.М. Пилипишин // тез. докл. наук.-практ. конф. «Транселектро». – 2009. – С. 64 – 65.

4. Михеев, В.П. Контактные сети и линии электропередачи [Текст] / В.П. Михеев. – М.: Маршрут, 2003. – 416 с.

5. Фрайфельд, А. В. Устройство, сооружение и эксплуатация контактной сети и воздушных линий [Текст] : учебник / А. В. Фрайфельд, Н. А. Бондарев, А. С. Марков. – М.: Транспорт, 1980. – 422 с.

6. Гельфанд, И. М. Метод координат [Текст] / И. М. Гельфанд, Е. Г. Глаголева, А.А. Кириллов. – М.: Наука, 1971. – 87 с.