

Визначення гальмівної сили магніторейкового гальма на довгих нерівностях рейкової колії

ПРОЦІВ В.В.

Національний гірничий університет

Определено влияние эквивалентного зазора между наконечником тормоза и рельсом на величину силы примагничивания тормоза к искривленному в плане и профиле рельсу. Учет ослабления силы магнитного притяжения необходим для определения тормозной силы локомотива при движении по реальному шахтному пути с несовершенствами.

Визначено вплив еквівалентного зазору між наконечником гальма і рейкою на величину сили примагнічування гальма до викривленої в плані й профілі рейки. Облік ослаблення сили магнітного тяжіння необхідний для визначення гальмівної сили локомотива при русі по реальній шахтній колії з недосконалістю.

Influencing of equivalent gap between the tip of brake and rail on the size of force of magnetic attractive brake to distorted rail in a plan and type is found. The account of weakening of magnetic attractive power is needed for determination of brake force of locomotive at motion on the real mine way with imperfections.

Вступ. Основними засобами гальмування рухомого складу шахтного рейкового транспорту є колісно-колоткові та магніторейкові гальма. Проте найбільш ефективним способом екстреного і службового гальмування шахтного рейкового локомотива є саме магніторейкове гальмо [1], оскільки його гальмівна сила не залежить від зчпної маси локомотива і коефіцієнта зчеплення коліс з рейками (забрудненості доріжок катання коліс та рейок). Тому математичне прогнозування гальмівної сили локомотива, оснащеного магніторейковими гальмами, є актуальним завданням.

Ціллю роботи є визначення впливу еквівалентного зазору між наконечником гальма і рейкою на величину сили примагнічування гальма до викривленої в плані й профілі рейки.

Завданням роботи є отримання математичних функцій, які апроксимують значення коефіцієнтів ослаблення сил магнітного тяжіння секцій магніторейкового гальма до рейок на викривленнях шахтної рейкової колії в плані та профілі.

Виклад матеріалу дослідження. Значною мірою гальмівна сила визначається силами магнітного тяжіння $F_{i\ jmj}$ секцій гальма до рейок, а вона, у свою чергу, залежить від площі контакту полюсних наконечників та рейок, а також величини двох повітряних зазорів [2] в електромагнітному ланцозі «північний полюс магніту – магнітопровід секції гальма – повітряний зазор – головка рейки – повітряний зазор – магнітопровід секції гальма – південний полюс магніту». Між новими рейками і полюсними наконечниками гальм нормальний зазор складає приблизно 0,22 мм, а між приробленими – 0,1 мм (0,15 мм за даними [3]). Відстань між полюсними наконечниками секції зазвичай дорівнює 10 мм. Як у статистиці за відсутності руху, так і при ковзанні електромагнітного рейкового гальма із сталюю швидкістю по рейці на прямій горизонтальній ділянці шляху [3] (без урахування впливу вихрових токів в рейці) сили магнітного тяжіння рівні й визначаються по виразу

$$F_{n\ jmj} = 2 \frac{B_{\Delta}^2 S_m}{2\mu_0} = 2 \frac{\Phi_{\Delta}^2}{2\mu_0 S} = 2 \frac{(J w)^2}{2\mu_0 R_{\Delta}} = \frac{\mu_0 (J w)^2 S_m}{\Delta^2},$$

де μ_0 – магнітна стала, дорівнює $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; B_{Δ} – магнітна індукція секції магніторейкового гальма в робочому зазорі між поверхнею тертя полюсних наконечників і доріжки катання рейки, Т; Φ_{Δ} – магнітний потік секції магніторейкового гальма в робочому зазорі між поверхнею тертя полюсних наконечників і доріжки катання рейки, Вб; S_m – площа полюсних наконечників секції магніторейкового гальма, контактуючих з поверхнею катання рейок м²; J , w – сила струму (А) і число витків електромагнітної котушки (шт.) відповідно, а їх добуток є сила, що намагнічує, Н; Δ – величина повітряного зазору між полюсними наконечниками магніторейкового гальма і доріжкою катання рейки, м.

На реально викривлених ділянках колії збільшуються зазори Δ і зменшуються площі контакту S_m , тому відповідно зменшуються сили магнітного тяжіння, а значить і гальмівні сили. Збільшення Δ зменшує силу тяжіння обернено пропорційно до квадрата зазору, а зменшення S_m зменшує її прямо пропорційно. При гальмуванні локомотива на ділянках шахтної колії, що мають кривизну профілю (перегини) і викривлення в плані (повороти), діюче значення гальмівної сили секції магніторейкового гальма (вважаючи магнітне поле в повітряному зазорі однорідним) дорівнює

$$F_{i\ jmj} = F_{0i} k_{o\ jmj},$$

де F_{0i} – сила тяжіння секції гальма до прямої (не викривленої) рейки; $k_{o\ jmj}$ – коефіцієнт використання сили магнітного тяжіння секції магніторейкового гальма до рейки [4] (відношення сили тяжіння гальма над реально викривленою рейкою до її максимально можливої величини над прямою рейкою). Цей коефіцієнт враховує збільшення еквівалентного зазору між колесом і рейкою, а також зменшення площі їх контакту. Оскільки ділянка рейки може бути одночасно викривлена в плані та в профілі, то $k_{o\ jmj}$ можна знайти як

$$k_{o\ jmj} = \frac{k_{SR}}{k_{\Delta R}^2} \frac{1}{k_{\Delta R p}^2},$$

де k_{SR} – коефіцієнт зменшення площі контактуючих поверхонь полюсних наконечників та рейок на кривій в плані, визначають як відношення площі контакту полюсного наконечника секції гальма з поверхнею доріжки катання рейки над викривленням рейкової колії в плані до такої ж площі над прямою (не викривленою) рейкою; над викривленням профілю колії незалежно від радіусу його кривизни в профілі R_p площа контактуючих поверхонь гальмівних наконечників S_m залишається незмінною; $k_{\Delta R}$, $k_{\Delta R_p}$ – коефіцієнти збільшення еквівалентного зазору між поверхнями контакту наконечників і рейок в плані та профілі, відповідно. Коефіцієнт $k_{\Delta R}$ визначають як відношення еквівалентного зазору між поверхнею тертя полюсного наконечника секції гальма і поверхнею доріжки катання рейки над викривленням рейкової колії в плані до такого ж зазору над прямою (не викривленою) рейкою. Аналогічно знаходять $k_{\Delta R_p}$ як відношення еквівалентного зазору між поверхнею тертя полюсного наконечника секції гальма і поверхнею доріжки катання рейки над викривленням рейкової колії в профілі до такого ж зазору над прямою (не викривленою) рейкою.

Вказані коефіцієнти знаходять методом обчислювального експерименту [5], як це видно на рис. 1 в програмі тривимірному моделювання КОМПАС.

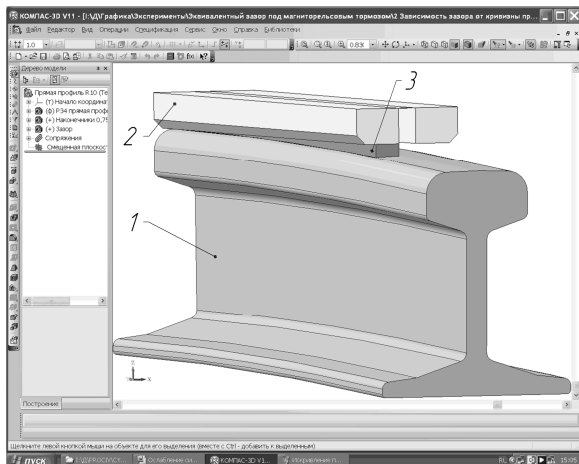


Рис. 1. Розрахункова схема до визначення еквівалентного зазору над викривленням рейки в профілі

Над викривленою в плані або профілі рейкою 1 розміщують модель половини наконечників секції магніторейкового гальма 2, а потім будують модель половини повітряних зазорів 3 між ними і поверхнями

доріжок катання рейок. Визначивши за допомогою програми об'єм зазору і площу його контакту з наконечником, знаходять еквівалентний зазор між поверхнями тертя і коефіцієнти k_{SR} , $k_{\Delta R}$, $k_{\Delta R_p}$, а потім обчислюють $k_{o\ ijm}$ для конкретної нерівності колії. При дослідженні на викривленнях рейок в профілі вимірювання проводилися і для положення гальма в «ямі» і на «горбі».

Результати визначення коефіцієнта використання сили магнітного тяжіння секції магніторейкового гальма до рейки залежно від величини радіусу кривизни в профілі та довжини секції магніторейкового гальма приведені на рис. 2 та 3 відповідно.

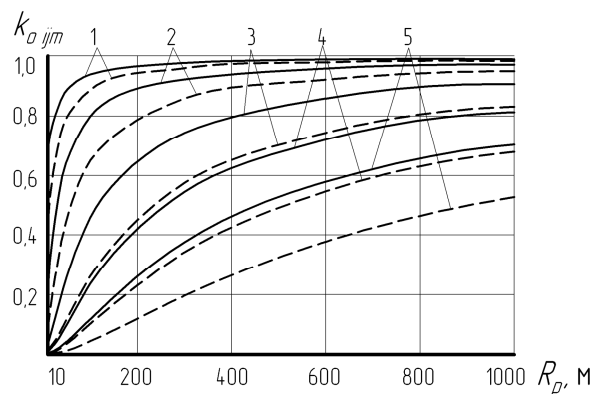


Рис. 2. Залежність коефіцієнта використання сили магнітного тяжіння від радіусу кривизни в профілі (по еквівалентному зазору)

На рис. 2 суцільні криві відповідають установці гальма на «горбі», а штрихові – в «ямі». Залежності з першої по п'яту показують зміну $k_{o\ ijm}$ від радіусу перегину рейки в профілі R_p для полюсних наконечників завдовжки l_m , що дорівнюють 0,125, 0,500, 0,750 м та відповідно 1,000 м. Добре видно, що із збільшенням довжини гальмівної секції на перегині профілю колії $k_{o\ ijm}$ різко падає, а значить і гальмівна сила істотно зменшується.

Одержані табличні залежності $k_{i\ ijm} = f(R_p)$ апроксимували степеневими поліномами InterpolatingPolynomial в програмі Wolfram Mathematica 7, приклад яких для гальм різної довжини (див. вище), розташованих на «горбі», наведений нижче.

$$0.103243 R_p - 0.00609905 R_p^2 + 0.000215786 R_p^3 - 4.92287 \times 10^{-6} R_p^4 + 7.71657 \times 10^{-8} R_p^5 - 8.72130 \times 10^{-10} R_p^6 + 7.36431 \times 10^{-12} R_p^7 - 4.76884 \times 10^{-14} R_p^8 + 2.41385 \times 10^{-16} R_p^9 - 9.68238 \times 10^{-19} R_p^{10} + 3.10689 \times 10^{-21} R_p^{11} - 8.02151 \times 10^{-24} R_p^{12} + 1.67047 \times 10^{-26} R_p^{13} - 2.80349 \times 10^{-29} R_p^{14} + 3.77470 \times 10^{-32} R_p^{15} - 4.04162 \times 10^{-35} R_p^{16} + 3.39159 \times 10^{-38} R_p^{17} - 2.18037 \times 10^{-41} R_p^{18} + 1.03585 \times 10^{-44} R_p^{19} - 3.42409 \times 10^{-48} R_p^{20} + 7.02766 \times 10^{-52} R_p^{21} - 6.74038 \times 10^{-56} R_p^{22}$$

$$\begin{aligned}
& 0.0192006 R_p + 0.000505334 R_p^2 - 0.0000418347 R_p^3 + 1.21885 \times 10^{-6} R_p^4 - 2.12555 \times 10^{-8} R_p^5 + \\
& 2.52508 \times 10^{-10} R_p^6 - 2.17599 \times 10^{-12} R_p^7 + 1.41337 \times 10^{-14} R_p^8 - 7.09861 \times 10^{-17} R_p^9 + 2.80571 \times 10^{-19} R_p^{10} - \\
& 8.83130 \times 10^{-22} R_p^{11} + 2.23021 \times 10^{-24} R_p^{12} - 4.53486 \times 10^{-27} R_p^{13} + 7.42409 \times 10^{-30} R_p^{14} - \\
& 9.74712 \times 10^{-33} R_p^{15} + 1.01765 \times 10^{-35} R_p^{16} - 8.32958 \times 10^{-39} R_p^{17} + 5.22562 \times 10^{-42} R_p^{18} - \\
& 2.42417 \times 10^{-45} R_p^{19} + 7.83033 \times 10^{-49} R_p^{20} - 1.57164 \times 10^{-52} R_p^{21} + 1.47532 \times 10^{-56} R_p^{22} \\
& 0.000116348 R_p + 0.000423314 R_p^2 - 0.0000159267 R_p^3 + 3.80477 \times 10^{-7} R_p^4 - 6.46448 \times 10^{-9} R_p^5 + \\
& 8.04563 \times 10^{-11} R_p^6 - 7.49391 \times 10^{-13} R_p^7 + 5.32503 \times 10^{-15} R_p^8 - 2.93431 \times 10^{-17} R_p^9 + 1.27039 \times 10^{-19} R_p^{10} - \\
& 4.36370 \times 10^{-22} R_p^{11} + 1.19698 \times 10^{-24} R_p^{12} - 2.63071 \times 10^{-27} R_p^{13} + 4.63228 \times 10^{-30} R_p^{14} - \\
& 6.51082 \times 10^{-33} R_p^{15} + 7.24523 \times 10^{-36} R_p^{16} - 6.29481 \times 10^{-39} R_p^{17} + 4.17587 \times 10^{-42} R_p^{18} - \\
& 2.04120 \times 10^{-45} R_p^{19} + 6.92465 \times 10^{-49} R_p^{20} - 1.45529 \times 10^{-52} R_p^{21} + 1.42639 \times 10^{-56} R_p^{22} \\
& -0.000298843 R_p + 0.000153234 R_p^2 - 6.49819 \times 10^{-6} R_p^3 + 2.03474 \times 10^{-7} R_p^4 - 4.26719 \times 10^{-9} R_p^5 + \\
& 6.10099 \times 10^{-11} R_p^6 - 6.21610 \times 10^{-13} R_p^7 + 4.68798 \times 10^{-15} R_p^8 - 2.69209 \times 10^{-17} R_p^9 + 1.20127 \times 10^{-19} R_p^{10} - \\
& 4.22426 \times 10^{-22} R_p^{11} + 1.18136 \times 10^{-24} R_p^{12} - 2.64031 \times 10^{-27} R_p^{13} + 4.72025 \times 10^{-30} R_p^{14} - \\
& 6.72890 \times 10^{-33} R_p^{15} + 7.58923 \times 10^{-36} R_p^{16} - 6.67958 \times 10^{-39} R_p^{17} + 4.48710 \times 10^{-42} R_p^{18} - \\
& 2.22030 \times 10^{-45} R_p^{19} + 7.62246 \times 10^{-49} R_p^{20} - 1.62062 \times 10^{-52} R_p^{21} + 1.60647 \times 10^{-56} R_p^{22} \\
& -0.000307843 R_p + 0.0000910331 R_p^2 - 4.96589 \times 10^{-6} R_p^3 + 1.78843 \times 10^{-7} R_p^4 - 4.01547 \times 10^{-9} R_p^5 + \\
& 5.99733 \times 10^{-11} R_p^6 - 6.31604 \times 10^{-13} R_p^7 + 4.89177 \times 10^{-15} R_p^8 - 2.87067 \times 10^{-17} R_p^9 + 1.30371 \times 10^{-19} R_p^{10} - \\
& 4.65004 \times 10^{-22} R_p^{11} + 1.31521 \times 10^{-24} R_p^{12} - 2.96561 \times 10^{-27} R_p^{13} + 5.33795 \times 10^{-30} R_p^{14} - \\
& 7.64803 \times 10^{-33} R_p^{15} + 8.65693 \times 10^{-36} R_p^{16} - 7.63738 \times 10^{-39} R_p^{17} + 5.13743 \times 10^{-42} R_p^{18} - \\
& 2.54335 \times 10^{-45} R_p^{19} + 8.72969 \times 10^{-49} R_p^{20} - 1.85457 \times 10^{-52} R_p^{21} + 1.83607 \times 10^{-56} R_p^{22}
\end{aligned}$$

На тривимірному графіку (рис. 3) вказані залежності створюють поверхню, що описується залежністю $k_{ijm} = f(R_p, l_m)$.

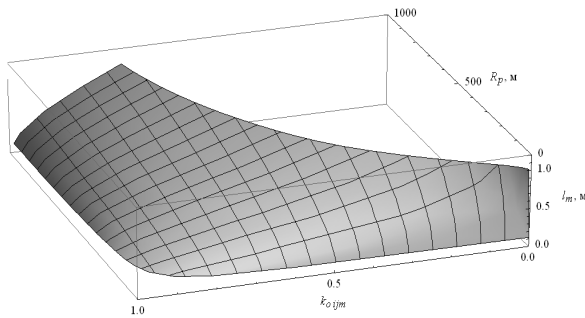
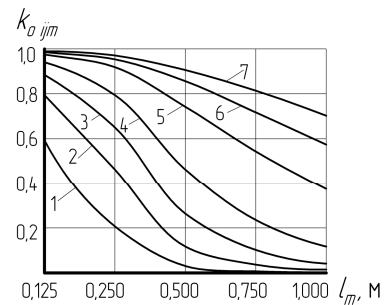
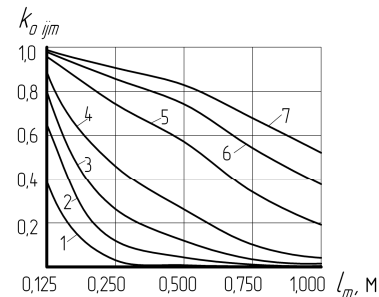


Рис. 3. Залежність коефіцієнта використання сили магнітного тяжіння від радіуса кривизни в профілі та довжини секції магніторейкового гальма

На рис. 4 а показана залежність коефіцієнта використання сили магнітного тяжіння на переломі профілю від довжини полюсних наконечників магніторейкового гальма у разі розміщення їх на «горбі», а на рис. 4 б – в «ямі». Криві з першої по сьому відповідають радіусам кривизни кола в профілі R_p , що дорівнюють 10, 25, 50, 100, 300, 600 м, та 1000 м.



а



б

Рис. 4. Залежність коефіцієнта використання сили магнітного тяжіння від довжини секції магніторейкового гальма (по еквівалентному зазору): а – на «горбі»; б – в «ямі»

Результати визначення коефіцієнта використання сили магнітного тяжіння секції магніторейкового гальма до рейки залежно від величини радіусу кривизни в плані R та від довжини секції l_m такого гальма (по еквівалентному зазору) приведені на рис. 5. На рис. 5 а залежності з першої по п'яту показують зміну $k_{o\ ijm}$ від радіусу вигину рейки в плані, на якому розміщене гальмо, для полюсних наконечників завдовжки 0,125, 0,500, 0,750, 1,000 м. На рис. 5 б показана залежність коефіцієнта використання сили магнітного тяжіння від довжини полюсних наконечників гальма на повороті (у плані). Криві з першою по сьому відповідають радіусам кривизни шляху в плані R , рівним 10, 25, 50, 100, 300, 600 м, та 1000 м. Видно, що із збільшенням довжини гальмівної секції на повороті колії $k_{o\ ijm}$, а значить і гальмівна сила, істотно зменшуються, проте для порівняно довгих секцій (0,75 м та 1,00 м) на кривих малого радіусу коефіцієнт використання сили магнітного тяжіння різко зростає. Це пов'язано з тим, що на кривій малого радіусу довге гальмо внутрішнім наконечником контактує з поверхнею доріжки катання рейки по її середній частині. При цьому наконечники наближаються до вершини доріжки катання рейки так, що еквівалентний зазор зменшується, наближаючись до мінімально можливого на прямій.

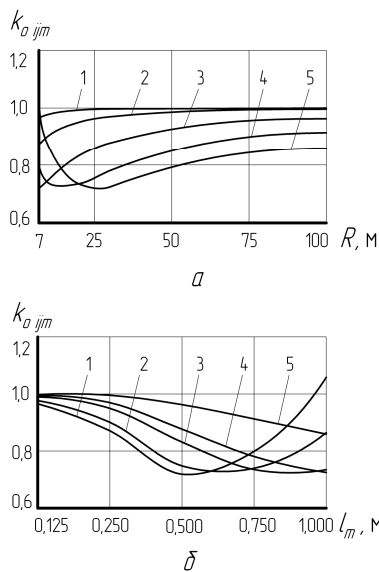


Рис. 5. Залежність коефіцієнта використання сили магнітного тяжіння від радіусу кривизни в плані та довжини секції магніторейкового гальма (по еквівалентному зазору): а – від радіусу кривизни в плані; б – від довжини секції магніторейкового гальма

$$0.924074 + 0.00896679 R - 0.000519263 R^2 + 0.0000195767 R^3 - 5.27873 \times 10^{-7} R^4 + 1.00407 \times 10^{-8} R^5 - 1.27834 \times 10^{-10} R^6 + 1.01912 \times 10^{-12} R^7 - 4.56182 \times 10^{-15} R^8 + 8.71580 \times 10^{-18} R^9$$

$$0.744724 + 0.0275305 R - 0.00173365 R^2 + 0.0000724423 R^3 - 2.05931 \times 10^{-6} R^4 + 3.94475 \times 10^{-8} R^5 - 4.95248 \times 10^{-10} R^6 + 3.87687 \times 10^{-12} R^7 - 1.70937 \times 10^{-14} R^8 + 3.23466 \times 10^{-17} R^9$$

На рис. 6 а залежності з першою по п'яту показують зміну $k_{o\ ijm}$ від радіусу кривизни за рахунок зменшення площі контакту полюсних наконечників секції магніторейкового гальма та доріжки катання рейки при викривленні рейки в плані (для полюсних наконечників тієї ж довжини, що і у вище описаних випадках).

На рис. 6 б показана залежність коефіцієнта використання сили магнітного тяжіння від довжини полюсних наконечників магніторейкового гальма в плані. Криві з першою по п'яту відповідають радіусам кривизни колії в профілі 10, 25, 50, 100, 300, 600 м, та 1000 м.

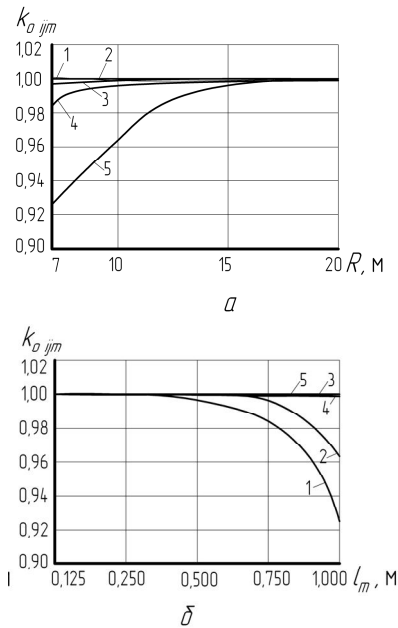


Рис. 6. Залежність коефіцієнта використання сили магнітного тяжіння від радіусу кривизни в плані та довжини секції магніторейкового гальма (за площею контакту): а – від радіусу кривизни в плані; б – від довжини секції магніторейкового гальма

Результуючі залежності, що враховують прямо пропорційний вплив зміни площі контакту контактуючих поверхонь гальма та рейки, а також обернено пропорційний в другому ступені вплив зміни еквівалентного зазору між тими ж поверхнями, приведені на рис. 7. Тут прийняті ті ж позначення, що й на попередньому малюнку.

Функція $k_{i\ ijm} = f(R)$ добре апроксимується степеневими поліномами `interpolatingpolynomial` в програмі `wolfram mathematica 7`, приведеними нижче для l_m 0,125, 0,500, 0,750, 1,000 м.

$$0.664387 + 0.00197664 R + 0.00123533 R^2 - 0.0000821528 R^3 + 2.54987 \times 10^{-6} R^4 -$$

$$4.46177 \times 10^{-8} R^5 + 4.54561 \times 10^{-10} R^6 - 2.57608 \times 10^{-12} R^7 + 6.88041 \times 10^{-15} R^8 - 4.66690 \times 10^{-18} R^9$$

$$1.22529 - 0.115849 R + 0.0105397 R^2 - 0.000514379 R^3 + 0.0000155356 R^4 -$$

$$3.02740 \times 10^{-7} R^5 + 3.81190 \times 10^{-9} R^6 - 2.99454 \times 10^{-11} R^7 + 1.33369 \times 10^{-13} R^8 - 2.56961 \times 10^{-16} R^9$$

$$2.30202 - 0.373950 R + 0.0391188 R^2 - 0.00229771 R^3 + 0.0000819982 R^4 -$$

$$1.83344 \times 10^{-6} R^5 + 2.57687 \times 10^{-8} R^6 - 2.20838 \times 10^{-10} R^7 + 1.05361 \times 10^{-12} R^8 - 2.14385 \times 10^{-15} R^9$$

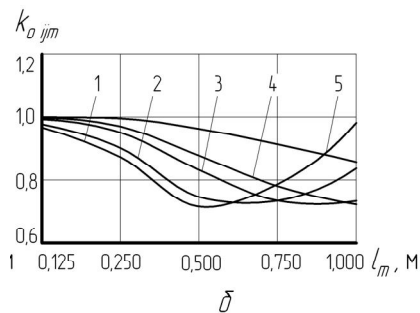
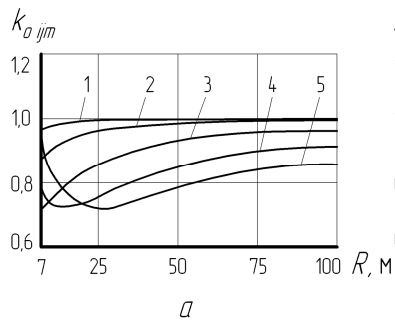


Рис. 7. Залежність коефіцієнта використання сили магнітного тяжіння від радіуса кривизни в плані та довжини секції магніторейкового гальма (по еквівалентному зазору та площі контакту): *a* – від радіуса кривизни в плані; *b* – від довжини секції магніторейкового гальма

Висновки

Аналіз одержаних залежностей дозволяє зробити висновок, що із збільшенням довжини гальмівної секції на вигині шляху площа контакту полюсних наконечників та рейки S_m , а значить і гальмівна сила, зменшуються. Зростання $k_{o ijm}$, що має місце, для довгих секцій (більше 0,5 м) на кривих в плані малого радіуса (менше 10 м) на практиці неможливо використовувати, оскільки тоді конструктивно локомотив повинен мати велику жорстку базу і бути в змозі переміщатися по кривій малого радіуса. До того ж, в кривих малого радіуса сили опору руху настільки великі, що у використанні гальм немає необхідності.

На криволінійних в плані та профілі ділянках шахтної колії сила магнітного тяжіння магніторейкового гальма та рейки, а значить і гальмівна сила, істотно зменшуються.

Найбільш істотний вплив на зменшення сили магнітного тяжіння полюсного наконечника до рейки на поворотах надає збільшення еквівалентного зазору між ними, наприклад, для секції завдовжки 0,125 м коефіцієнт використання сили магнітного тяжіння дорівнює 0,95. На вершині перегину профілю радіусом 150 м, цей коефіцієнт рівний 0,85, а на колії, що має викривлення одночасно цих двох видів, він складе відповідно 0,83. Для гальма завдовжки 0,75 м на тій же ділянці колії сила знижується вже на 75%. Такі зміни можуть бути прогнозовані на реальних ділянках шахтного шляху і повинні бути враховані коефіцієнтами використання сили магнітного тяжіння секції гальма до рейки.

Застосовуючи апроксимуючі залежності для коефіцієнтів використання сили магнітного тяжіння секції магніторейкового гальма до рейки на поворотах і перегинах шахтної колії для гальм з різною довжиною полюсних наконечників можна визначати значення гальмівної сили локомотива при відомих значеннях геометричних параметрів рейкового шляху.

ЛІТЕРАТУРА

1. Ренгевич А.А. и др. Тормозная платформа с электромагнитными рельсовыми тормозами / Горные машины и автоматика. – М.: Недра, 1969. – Вып. 9. – С.57-60.
2. Проців В.В. Визначення раціональної довжини секції складового рейкового магнітного гальма // Зб. наук. праць / НГУ. – Дніпропетровськ: РВК НГУ, 2008. № 30 – С. 102 – 111.
3. Салов В.А. Исследование рельсовых электромагнитных тормозов для шахтного подвижного состава: Автореф. дис. канд. техн. наук. – Днепропетровск, 1972. – 22 с.
4. Проців В.В. Визначення сил, що реалізують гальмівні прилади шахтного шарнірно-зчленованого локомотива // Вісник Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля. – 2009. – № 4(134), – Частина 1. – С.47-52.
5. Проців В.В. Вплив локальної недосконалості шляху на ефективність гальмування шахтного локомотива складеним магніторейковим гальмом // Науковий вісник НГУ України. – 2008. – № 8. – С.77 – 83.