

Проців В. В.

Національний
гірничий
університет
України

УДК 625.22

**ОСЛАБЛЕННЯ ГАЛЬМІВНОЇ
СИЛИ МАГНІТОРЕЙКОВОГО
ГАЛЬМА НА ОДИНИЧНИХ
НЕРІВНОСТЯХ РЕЙКОВОЇ КОЛІЇ**

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

Influencing of equivalent gap between the tip of brake and rail on the size of force of magnetic attractive brake to the single burries of rail 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.

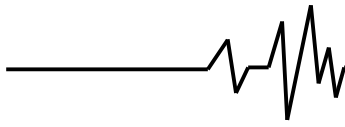
Сучасні шахтні локомотиви оснащені двома основними видами гальмівних систем, – що здійснюють передачу гальмівного моменту через колеса і що створюють гальмівну силу безпосередньою взаємодією гальмівної секції рейкового гальма з рейкою. Найбільш ефективним способом екстреного і службового гальмування шахтного рейкового локомотива є другий спосіб, що використовує магніторейкове гальмо [1], оскільки гальмівна сила, що розвивається їм, не залежить від зчпної маси локомотива і коефіцієнта зчплення коліс з рейками. Гальмівна сила такого гальма визначається силами магнітного тяжіння F_n і j_m секцій гальма до рейок, а вона, у свою чергу, залежить від площі контакту полюсних наконечників і рейок, а також величини двох повітряних зазорів [2] в електромагнітному ланцюзі «північний полюс магніту – магнітопровід секції гальма – повітряний зазор – головка рейки – повітряний зазор – магнітопровід секції гальма – південний полюс магніту».

Оскільки стан шахтної рейкової колії найчастіше незадовільний, то рейкові стики мають вертикальні сходинки та просідання. А унаслідок економії рейок використовують навіть короткі їх обрізки, що збільшує загальну кількість рейкових стиків до 45 штук на 100 м колії (на обох рейках), а самі стики часто розташовані поза шпалами. При цьому, із-за незадовільної фіксації кінців рейок щодо один

одного (унаслідок нестачі накладок і болтових з'єднань), вони з часом деформуються під дією ударних навантажень від коліс рухомого складу і набувають вигину профілю радіусом від 10 м до 70 м.

Із-за порушень періодичності укладання шпал і просідання баластного шару колії утворюються порівняно короткі (до 3 м) локальні прогини рейкових ниток, радіус кривизни яких складає від 30 м до 70 м. Це показали результати вимірів стану шахтного рейкового шляху, виконані на шахтах Виробничого об'єднання Павлоградвугілля. Над короткими одиничними нерівностями рейкової колії, якими є рейкові стики, між поверхнею доріжки катання рейки і полюсним наконечником секції магніторейкового гальма виникають локальні ослаблення сили магнітного тяжіння. Тому гальмівна сила шахтного локомотива постійно коливається майже від нуля до максимального її значення на рівній прямій ділянці.

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 дорівнює 10 мм. На реально викривлених ділянках шляху збільшуються зазори Δ і зменшуються площі контакту S_m гальмівних наконечників з рейками, тому відповідно зменшуються сили магнітного тяжіння, а



значить і гальмівні сили, вважаючи магнітне поле в повітряному зазорі однорідним. 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), викривлення в плані (повороти) або при проїзді одиничної нерівності, діюче значення гальмівної сили секції магніторейкового гальма дорівнює

$$F_{ijm} = F_{0yn} l_m \varphi_m k_v k_o ijm k_c ijm k_\phi ijm k_\delta ijm k_u,$$

де F_{0yn} – питома сила магнітного тяжіння секції магніторейкового гальма до прямої рейки, Н/м; l_m – довжина полюсних наконечників секції гальма, м; φ_m – коефіцієнт тертя ковзання матеріалу наконечника магніторейкового гальма по рейці для конкретних умов забрудненості рейок; k_v – коефіцієнт, що враховує вплив швидкості руху локомотива на крайовий ефект, коли вихрові струми створюють магнітне поле, що «розмагнічує» магнітну систему, зменшуючи, тим самим, силу магнітного тяжіння гальма до рейки; $k_o ijm$ – 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); $k_c ijm$ – коефіцієнт використання сили магнітного тяжіння над одиничною нерівністю у вигляді сходинки рейкового стику (відношення сили тяжіння гальма над реальною одиничною нерівністю у вигляді сходинки рейкового стику до її максимально можливої величини над прямою рейкою); $k_\phi ijm$ – коефіцієнт використання сили магнітного тяжіння над одиничною нерівністю у вигляді просідання кінців рейок на стику (відношення сили тяжіння гальма над реальною одиничною нерівністю у вигляді просідання рейок на стику до її максимально можливої величини над прямою рейкою); $k_\delta ijm$ – коефіцієнт використання сили магнітного тяжіння над одиничною нерівністю у вигляді локального прогину рейкової нитки (відношення сили тяжіння гальма над реальною одиничною нерівністю у вигляді прогину рейкової нитки до її максимально можливої величини над прямою рейкою); k_u – коефіцієнт зносу, визначає ступінь зносу полюсних наконечників уздовж терміну експлуатації.

Проїзд сходинки рейкового стику секцією магніторейкового гальма знижує силу магнітного тяжіння наконечників гальма до поверхні доріжки катання рейки [3, 5, 6], оскільки при цьому між ними збільшується еквівалентний зазор Δ . Зміну гальмівної сили над сходинкою рейкового стику колії можна врахувати за допомогою коефіцієнта використання сили магнітного тяжіння над такою одиничною нерівністю, який визначають як

$$k_{c ijm} = \frac{1}{k_{\Delta c}^2},$$

де $k_{\Delta c}$ – коефіцієнт збільшення еквівалентного зазору між поверхнями контакту наконечників і рейок над сходинкою рейкового стику. Визначають як відношення еквівалентного зазору між поверхнею тертя полюсного наконечника секції гальма і поверхнею доріжки катання рейки над сходинкою рейкового стику при її конкретній величині до такого ж зазору над прямою (не викривленою) рейкою. Такий коефіцієнт над конкретним стиком знаходять методом обчислювального експерименту [2], як це видно на рис. 1, в програмі тривимірного моделювання КОМПАС.

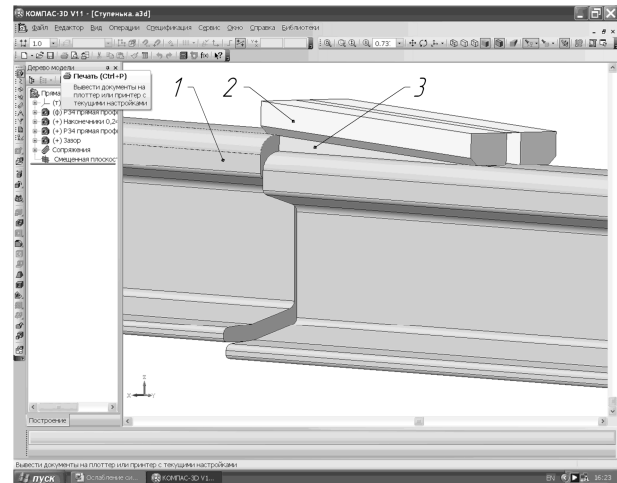


Рис. 1. Розрахункова схема до визначення еквівалентного зазору над сходинкою рейкового стику

Над сходинкою стику рейок 1 розміщують модель наконечників секції магніторейкового гальма 2, а потім будують модель 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, що труться, та $k_{\Delta c}$. На рис. 2



приведена залежність коефіцієнта використання сили магнітного тяжіння над сходинкою рейкового стику $k_{c\ ijm}$ від величини цієї сходинки h_{LR} . При цьому, як показали дослідження, коефіцієнт не залежить від довжини наконечника секції магніторейкового гальма.

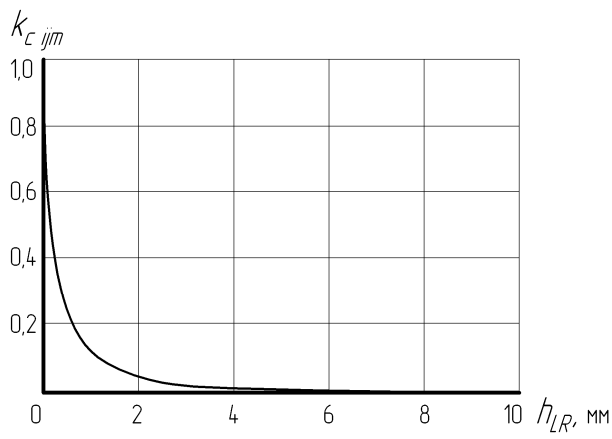


Рис. 2. Залежність коефіцієнта використання сили магнітного тяжіння над стиком від величини сходинки рейкового стику

Одержану табличну залежність $k_{c\ ijm} = f(h_{LR})$ апроксимували степеневим поліномом InterpolatingPolynomial в програмі Wolfram Mathematica 7, який приведений нижче.

$$1.00000 - 2.22990 h_{LR} + 2.33233 h_{LR}^2 - 1.40237 h_{LR}^3 + 0.527412 h_{LR}^4 - 0.129398 h_{LR}^5 + 0.0210366 h_{LR}^6 - 0.00224711 h_{LR}^7 + 0.000151577 h_{LR}^8 - 5.85284 \times 10^{-6} h_{LR}^9 + 9.85745 \times 10^{-8} h_{LR}^{10}$$

При проїзді секцією магніторейкового гальма рейкового стику з просіданням кінців рейок гальмівна сила також знижується, оскільки сили магнітного тяжіння наконечників гальма до поверхні доріжки катання рейки зменшуються за рахунок збільшення еквівалентного зазору між ними. Таку зміну сил над локальною нерівністю колії можна врахувати за допомогою коефіцієнта використання сили магнітного тяжіння над одиначною нерівністю у вигляді просідання кінців рейок на стику $k_{\Delta\phi\ ijm}$, що розраховується по формулі

$$k_{\Delta\phi\ ijm} = \frac{1}{k_{\Delta\phi}^2}$$

де $k_{\Delta\phi}$ – коефіцієнт збільшення еквівалентного зазору між поверхнями контакту наконечників і рейок над сходинкою рейкового стику.

Визначають як відношення еквівалентного зазору між поверхнею тертя полюсного наконечника секції гальма і поверхнею доріжки катання рейки над просіданням рейок в профілі до такого ж зазору над прямою (не викривленою) рейкою. Хоча кінці рейок викривляються по параболі, в першому наближенні півметрові кінці рейок можна вважати зігнутими по дузі радіусом R_{PC} . Цей радіус експериментально знаходять для кожного конкретного випадку просідання стиків на ділянці шахтної рейкової колії по розрахунковій схемі, приведений на рис. 3. Метровий вимірювальний шаблон 1 симетрично накладають на стик рейок 2 та 3, а потім вимірюють глибину просідання стику H_{LR} і зазор в середньому перетині між торцями сусідніх рейок. Умовно викривлення кінця рейки починається на відстані 0,5 м від стику.

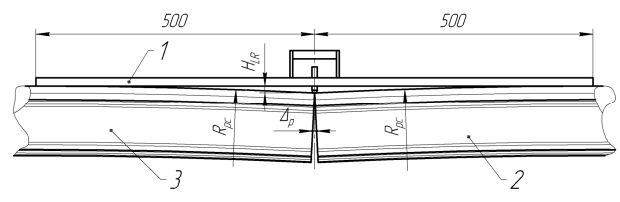


Рис. 3. Розрахункова схема до визначення радіуса вигину кінців рейок на просіданні рейкового стику

Знаходять коефіцієнт $k_{\Delta\phi}$ над конкретним стиком методом обчислювального експерименту, як це видно на рис. 4, в програмі тривимірного моделювання КОМПАС.

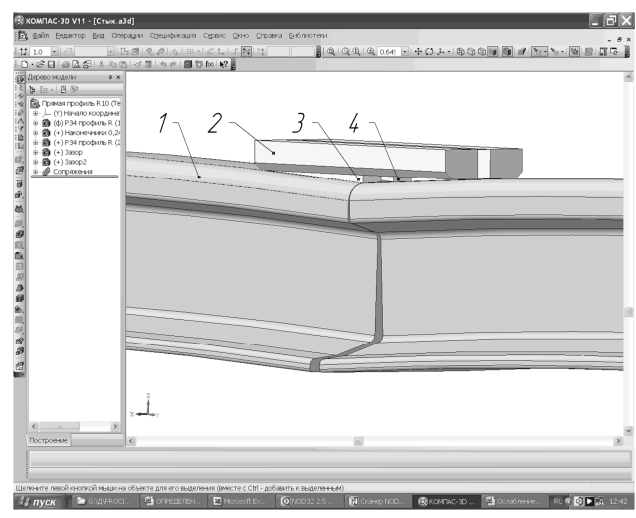
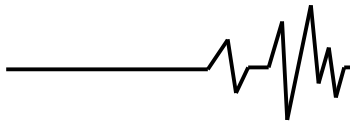


Рис. 4. Розрахункова схема до визначення еквівалентного зазору над просіданням рейкового стику



Над стиком викривлених кінців рейок 1 розміщують модель наконечників секції магнорейкового гальма 2, а потім будують моделі 3 та 4 повітряних зазорів між ними і поверхнями доріжок катання рейок. Визначивши за допомогою програми об'єм зазору і площу його контакту з наконечником, знаходять еквівалентний зазор. Потім визначають коефіцієнт збільшення еквівалентного зазору $k_{\Delta\phi}$ та коефіцієнт використання сили магнітного тяжіння над одиничною нерівністю у вигляді просідання кінців рейок на стику $k_{\phi ij m}$.

На рис. 5 показана залежність коефіцієнта використання сили магнітного тяжіння над просіданням кінців рейок на стику $k_{\phi ij m}$ від глибини просідання кінців рейок H_{LR} (див. рис. 5 а) та від радіусу вигину кінців рейок в профілі R_{pc} (див. рис. 5 б) на досліджуваному рейковому стику для секцій магнорейкового гальма з різною довжиною гальмівних наконечників l_m . Крива 1 відповідає секції гальма з довжиною наконечника, що дорівнює 0,125 м, залежність 2 – 0,25 м, крива 3 для 0,5 м, крива 4 для 0,75 м, а залежність 5 – для наконечника завдовжки 1 м.

Функція $k_{\phi ij m} = f(H_{LR})$ добре апроксимується степеневими поліномами InterpolatingPolynomial в програмі Wolfram Mathematica 7, приведеними нижче для l_m , що дорівнюють 0,125, 0,250, 0,500, 0,750, 1,000 м.

$$1.16479 - 0.805523 H_{LR} + 0.303349 H_{LR}^2 - 0.0709160 H_{LR}^3 + 0.0105469 H_{LR}^4 - 0.000987759 H_{LR}^5 + 0.0000558717 H_{LR}^6 - 1.72772 \times 10^{-6} H_{LR}^7 + 2.22062 \times 10^{-8} H_{LR}^8$$

$$0.971410 - 0.978093 H_{LR} + 0.503635 H_{LR}^2 - 0.154443 H_{LR}^3 + 0.0294153 H_{LR}^4 - 0.00349402 H_{LR}^5 + 0.000250990 H_{LR}^6 - 9.95573 \times 10^{-6} H_{LR}^7 + 1.67155 \times 10^{-7} H_{LR}^8$$

$$0.690808 - 0.797716 H_{LR} + 0.447698 H_{LR}^2 - 0.145798 H_{LR}^3 + 0.0290970 H_{LR}^4 - 0.00359375 H_{LR}^5 + 0.000267012 H_{LR}^6 - 0.0000109081 H_{LR}^7 + 1.87921 \times 10^{-7} H_{LR}^8$$

$$-0.0965113 + 0.350990 H_{LR} - 0.265395 H_{LR}^2 + 0.0962197 H_{LR}^3 - 0.0198588 H_{LR}^4 + 0.00245545 H_{LR}^5 - 0.000180052 H_{LR}^6 + 7.21996 \times 10^{-6} H_{LR}^7 - 1.21953 \times 10^{-7} H_{LR}^8$$

$$0.489649 - 0.461817 H_{LR} + 0.221174 H_{LR}^2 - 0.0651445 H_{LR}^3 + 0.0124167 H_{LR}^4 - 0.00152541 H_{LR}^5 + 0.000115594 H_{LR}^6 - 4.87964 \times 10^{-6} H_{LR}^7 + 8.73414 \times 10^{-8} H_{LR}^8$$

Функцію $k_{\phi ij m} = f(H_{LR})$ теж можна апроксимувати степеневими поліномами, як це показано нижче для тих же умов.

$$-0.0000647619 R_{cp} + 0.000339643 R_{cp}^2 - 9.83929 \times 10^{-6} R_{cp}^3 + 1.67262 \times 10^{-7} R_{cp}^4 - 1.55952 \times 10^{-9} R_{cp}^5 + 5.95238 \times 10^{-12} R_{cp}^6$$

$$-0.000415238 R_{cp} + 0.000171496 R_{cp}^2 - 6.47321 \times 10^{-6} R_{cp}^3 + 1.69544 \times 10^{-7} R_{cp}^4 - 2.31548 \times 10^{-9} R_{cp}^5 + 1.21032 \times 10^{-11} R_{cp}^6$$

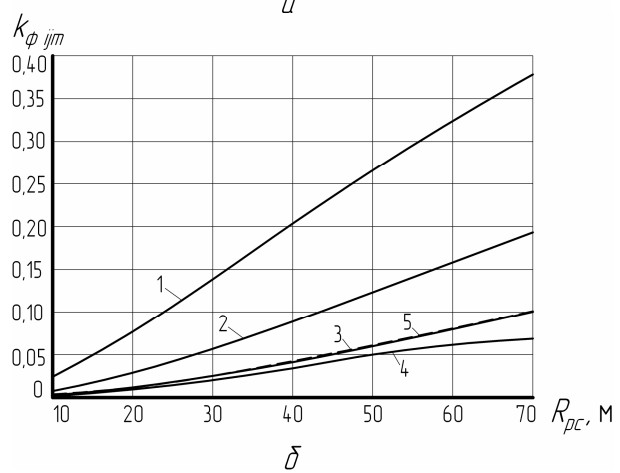
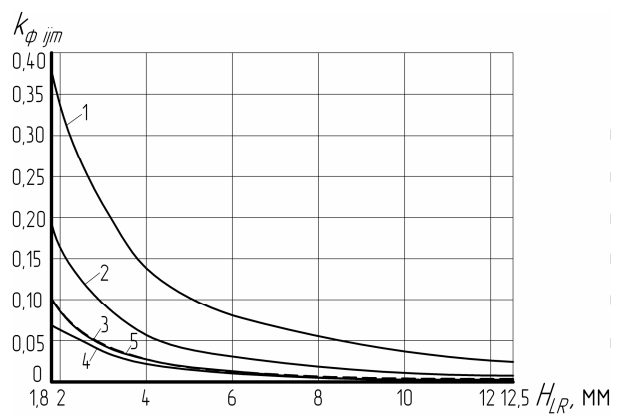
$$-0.0000647619 R_{cp} + 0.000339643 R_{cp}^2 - 9.83929 \times 10^{-6} R_{cp}^3 + 1.67262 \times 10^{-7} R_{cp}^4 - 1.55952 \times 10^{-9} R_{cp}^5 + 5.95238 \times 10^{-12} R_{cp}^6$$

$$-0.000415238 R_{cp} + 0.000171496 R_{cp}^2 - 6.47321 \times 10^{-6} R_{cp}^3 + 1.69544 \times 10^{-7} R_{cp}^4 - 2.31548 \times 10^{-9} R_{cp}^5 + 1.21032 \times 10^{-11} R_{cp}^6$$

$$-1.38778 \times 10^{-17} - 0.000114524 R_{cp} + 0.0000800635 R_{cp}^2 - 3.94940 \times 10^{-6} R_{cp}^3 + 1.26885 \times 10^{-7} R_{cp}^4 - 1.91071 \times 10^{-9} R_{cp}^5 + 1.05159 \times 10^{-11} R_{cp}^6$$

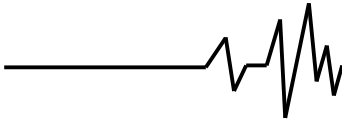
$$0.000127381 R_{cp} + 0.0000148730 R_{cp}^2 + 2.94643 \times 10^{-7} R_{cp}^3 - 5.85317 \times 10^{-9} R_{cp}^4 + 2.97619 \times 10^{-11} R_{cp}^5 - 1.98413 \times 10^{-13} R_{cp}^6$$

$$-0.000403810 R_{cp} + 0.0000992421 R_{cp}^2 - 3.59226 \times 10^{-6} R_{cp}^3 + 7.86706 \times 10^{-8} R_{cp}^4 - 8.39286 \times 10^{-10} R_{cp}^5 + 3.37302 \times 10^{-12} R_{cp}^6$$



а – від глибини просідання кінців рейок;
б – від радіуса кривизни в плані кінців рейок

Рис. 5. Залежність коефіцієнта використання сили магнітного тяжіння над просіданням стику від глибини просідання кінців рейок та від радіуса кривизни в плані кінців рейок



Помітно, що криві 3 та 5 практично співпадають. Це пов'язано з тим, що при довжині наконечника, більшій, ніж приблизно 0,75 м, його кінці лягають на рейки близько до дотичної і відповідно площа контактуючої поверхні на недеформованій ділянці збільшується. Цей мінімум виразно видно на рис. 6, де представлена залежність коефіцієнта використання сили магнітного тяжіння $k_{\phi ijm}$ над просіданням кінців рейок на стику від довжини рейкового наконечника l_m магніторейкового гальма. Криві від першої до шостої відповідають радіусу вигину кінців рейок в профілі R_{pc} величиною, рівною 10, 20, 30, 40, 50, 70 м.

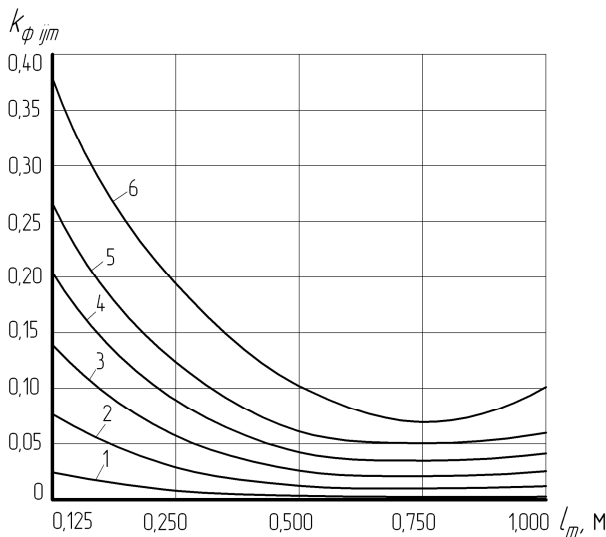


Рис. 6. Залежність коефіцієнта використання сили магнітного тяжіння від довжини наконечників магніторейкового гальма

При наїзді секції рейкового гальма на одиничну локальну недосконалість на рейковому стику шахтної колії еквівалентний зазор між рейкою і гальмом практично ступінчасто зростає, оскільки їх контактуючі поверхні частково відриваються одна від одної. Довжина шляху, впродовж якого на секцію гальма діє така нерівність, дорівнює довжині наконечника гальма l_m , а час залежно від швидкості руху локомотива v визначається як

$$t_c = \frac{l_m}{v} \text{ або } t_{\phi} = \frac{l_m}{v}.$$

Коефіцієнт використання сили магнітного тяжіння над одиничною нерівністю у вигляді

локального прогину рейкової нитки $k_{\partial ijm}$ знаходять як

$$k_{\partial ijm} = \frac{1}{k_{\Delta\partial}^2},$$

де $k_{\Delta\partial}$ – коефіцієнт збільшення еквівалентного зазору між поверхнями контакту наконечників та рейок над локальним прогином рейкової нитки, визначають як відношення еквівалентного зазору між поверхнею тертя полюсного наконечника секції гальма і поверхнею доріжки катання рейки над локальним прогином рейкової нитки в плані до такого ж зазору над прямою (не викривленою) рейкою. Довжина такої дії дорівнює довжині локального прогину рейкової нитки, а час залежно від швидкості руху локомотива v визначається як

$$t_{\partial} = \frac{l_{\partial}}{v}.$$

Знаходять коефіцієнт над конкретною нерівністю методом обчислювального експерименту, як і для вигину рейки в профілі, але радіус кривизни динамічних прогинів R_{dp} при цьому значно менший.

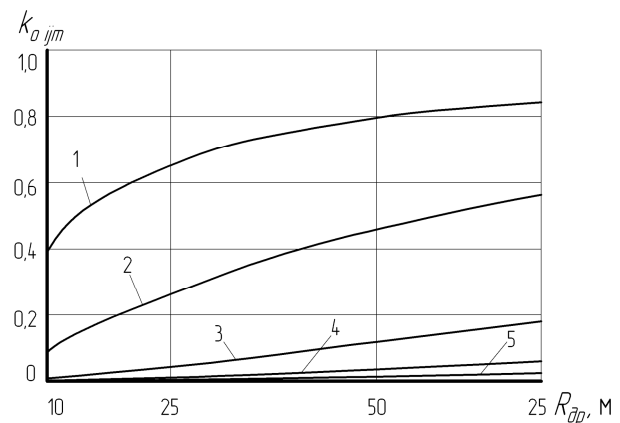
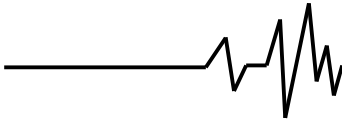


Рис. 7. Залежність коефіцієнта використання сили магнітного тяжіння від радіусу локального прогину рейкової нитки

Одержані табличні залежності $k_{\partial ijm} = f(R_{dp})$ апроксимували степеневими поліномами InterpolatingPolynomial у програмі Wolfram Mathematica 7, які приведені нижче для тих же умов.



$$0.0530538 R_{др} - 0.00164354 R_{др}^2 + 0.0000281788 R_{др}^3 - 2.44539 \times 10^{-7} R_{др}^4 + 8.29420 \times 10^{-10} R_{др}^5$$

$$0.00488814 R_{др} + 0.000524202 R_{др}^2 - 0.0000160439 R_{др}^3 + 1.81415 \times 10^{-7} R_{др}^4 - 7.17639 \times 10^{-10} R_{др}^5$$

$$0.0000598852 R_{др} + 0.0000977931 R_{др}^2 - 1.45630 \times 10^{-6} R_{др}^3 + 9.84669 \times 10^{-9} R_{др}^4 - 2.48863 \times 10^{-11} R_{др}^5$$

$$-1.38778 \times 10^{-17} - 55.2774 R_{др} + 9.39718 R_{др}^2 - 0.464330 R_{др}^3 + 0.00818106 R_{др}^4 - 0.0000442219 R_{др}^5$$

$$-4.98832 \times 10^{-6} R_{др} + 7.65108 \times 10^{-6} R_{др}^2 - 6.91228 \times 10^{-8} R_{др}^3 + 7.03255 \times 10^{-10} R_{др}^4 - 3.36001 \times 10^{-12} R_{др}^5$$

Коефіцієнт k_u відображає утворення нагортки (наклепаня) на полюсних наконечниках, видимий в поперечному перетині секції гальма. З одного боку збільшується площа контакту наконечника з рейкою, але з іншого, – зменшується зазор між полюсами, що приводить до шунтування магнітного потоку і погіршує ефективність гальмування. Крім того, поверхні тертя наконечників в подовжньому напрямі набувають кривизни, радіус якої залежить від довжини секції гальма, інтенсивності і терміну експлуатації магніторейкових гальм. Цей коефіцієнт також визначають методом обчислювального експерименту, моделюючи форму і розміри полюсних наконечників на різних термінах їх роботи, використовуючи експериментальні дані реальної експлуатації гальм.

Аналіз одержаних залежностей дозволяє зробити висновок, що навіть невелика сходинка рейкового стику заввишки 1 мм зменшує силу магнітного тяжіння гальма до рейки на 88 %. А оскільки звичайно сходинки складають від 3 до 7 мм, то гальмівна сила секції магніторейкового гальма при проїзді такої нерівності рейкової колії практично зникає (не перевищує 1 %) незалежно від його довжини.

На просіданнях рейкових стиків сила магнітного тяжіння також значно знижується. Наприклад, для секції гальма завдовжки 0,25 м на стику рейок з радіусом вигину кінців в профілі, що дорівнює 30 м вона складає тільки 6 % від максимально можливої на прямій, а у гальма завдовжки 0,75 м вона дорівнює тільки 2 %.

До менших послаблень приводять локальні прогини рейкових ниток, але враховувати їх необхідно, оскільки при радіусі локального прогину, рівному 40 м, коефіцієнт використання сили магнітного тяжіння секції гальма завдовжки 0,25 м складає 40 %. На тій же ділянці для гальма

з довжиною полюсних наконечників завдовжки 0,75 м він рівний всього 3 %.

Це ще раз підтверджує перевагу складених рейкових гальм над довгими, у яких тільки одна з декількох секцій на рейковому стику втрачає гальмівну силу.

Застосовуючи апроксимуючі залежності для коефіцієнтів використання сили магнітного тяжіння секції магніторейкового гальма до рейки на сходинках і просіданнях рейкових стиків, а також локальних прогинах шахтної колії для гальм з різною довжиною полюсних наконечників можна визначати величину гальмівної сили локомотива при відомих значеннях геометричних параметрів рейкової колії.

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. Салов В.А., Сердюк В.А. Определение характеристик магниторельсового тормоза шахтного локомотива при движении по рельсовому стыку // Вибрации в технике и технологиях: Всеукр. науч.-техн. журн. – Винница, – 2000. – № 4(16). – С. 92-95.
6. Проців В.В. Вплив локальної недосконалості шляху на ефективність гальмування шахтного локомотива складеним магніторейковим гальмом // Науковий вісник НГУ України. – 2008. – № 8. – С.77-83.