

Горошко О.А. – К.: Наук. думка, 1962. – 332 с. – Библиогр.: С. 318–332.

Розглянута задача про рух канатів вантажотранспортуючих установок з рухомим розподіленням і дискретним інерційним навантаженням із урахуванням розсіювання енергії в канатах і швидкості зміни довжини. Побудовано асимптотичним методом у модифікованій формі Боголюбова-Митропольського розв'язок інтегродиференціальних рівнянь типу Фредгольма II роду зі змінними у часі ядрами і границями інтегрування.

Ключові слова: *поздовжні коливання, рухоме інерційне навантаження, інтегро-диференціальні рівняння, зосереджений вантаж, розсіювання енергії*

It is considered the problem of motion of ropes of load-transporting devices, bearing the mobile distributed and concentrated inertial load, taking into account dispersion of energy in ropes and speed of change of length. By means of asymptotic method in the modified form of Bogolyubova-Mitropol'skogo the decision of integro-differential equalizations of Fredgol'ma of II type with variable in time kernels and scopes of integration has been build.

Keywords: *longitudinal vibrations, mobile inertial load, integro-differential equalizations, concentrated loading, dispersion of energy*

Рекомендовано до публікації докт. техн. наук А.Н. Шапенком. Дата надходження рукопису 22.11.10

УДК 622.625.28

В.В. Проців, канд. техн. наук

Державний вищий навчальний заклад „Національний гірничий університет“, м. Дніпропетровськ, Україна

ВПЛИВ ЗАБРУДНЕНОСТІ РЕЙКОВОЇ КОЛІЇ НА ГАЛЬМУВАННЯ ПРИСТРОЯМИ З ОБМЕЖЕНИМ ФРИКЦІЙНИМ МОМЕНТОМ НА КОЛЕСІ

V.V. Protsiv, Cand. Sc. (Tech.)

State Higher Educational Institution “National Mining University”, Dnipropetrovsk, Ukraine

INFLUENCING OF RAILTRACK MUDDINESS ON BRAKING BY DEVICES WITH LIMITED FRICTION MOMENT ON WHEEL

Проведено теоретичне дослідження впливу забрудненості шахтної рейкової колії на шарнірно-зчленований локомотив у режимі гальмування пристроями, що реалізують гальмівну силу в точці контакту колеса з рейкою. Визначено умови блокування коліс гальмівним моментом при їзді по рейках з різним ступенем забрудненості. Максимальний і мінімальний коефіцієнти зчеплення відрізняються в 2,63 рази, а максимально можливі моменти при цьому – лише в 2,40 рази.

Ключові слова: *шахтний локомотив, гальма, рівняння Лагранжа, коефіцієнт зчеплення*

Вступ. Використання на шахтних локомотивах гальмівних пристроїв, що реалізують гальмівну силу в точці контакту колеса і рейки, у даний час обмежено коефіцієнтом зчеплення між колесом і рейкою, істотно залежною від забрудненості рейкової колії [1]. Вугільний пил, волога й агресивне повітряне середовище не дозволяють гарантовано розраховувати на його високі значення, тому конструктори й експлуатаційники вимушені закладати в розрахунки мінімальну величину коефіцієнту зчеплення, яка може виявитися такою, що діє під час екстреного гальмування складу навантажених вагонеток на найбільшому ухилі колії (50 %) [2] або хоч на керівному (від 30 до 35 %). Особливо важливе це при використанні важких шарнірно-зчленованих локомотивів, що мають значні можливості по тязі (особливо з використанням пісочниць барабанного типу [3]), проте не здатних забезпечити гарантовану зупинку складу навантажених вагонеток на керівному ухилі.

Метою цієї роботи є моделювання процесу гальмування модернізованого шахтного шарнірно-зчленованого локомотива Е10 дисковими осьовими (розташованим на осі колісної пари) гальмами на колії з різним коефіцієнтом зчеплення шляхом прикладення гальмівних моментів, вплив яких призводить до зриву зчеплення в точці контакту колеса і рейки.

Завданням роботи є теоретичне визначення впливу коефіцієнту зчеплення колеса і рейки під час переходу локомотива в юз у режимі гальмування моментом, що перевищує максимально можливий, з використанням різних гальмівних пристроїв, що реалізують гальмівну силу через колеса, шляхом урахування нелінійної характеристики тертя при розв'язанні системи рівнянь Лагранжа другого роду.

Виклад матеріалу дослідження. Дослідження проводилися на динамічній моделі [4] гальмування локомотива Е10 зі складом навантажених вагонеток на рейковій колії з подовжнім ухилом на ідеально рівній колії з локальними одиничними нерівностями. Динамічна модель дозволяє враховувати вплив коротких (локаль-

них) нерівностей рейкової колії на параметри руху локомотива в режимі гальмування пристроями з обмеженим фрикційним моментом на колесах. Тут і надалі для позначення змінних прийняті наступні основні та додаткові нижні індекси, що визначають приналежність змінної до об'єкту математичної моделі: k – до середньої секції; i – до тягових секцій ($i = 1, 2$), причому 1 позначена перша за ходом руху в напрямку осі $\tilde{O}\xi$ секція. Вона оснащена циліндровим шарніром для спинання середньої секції на тягову. Секція 2 сполучена з середньою секцією локомотива сферичним шарніром; in – до колісних пар (осьових редукторів) i -ї секції ($n = 1, 2$), причому 1 позначена ближня до голови потягу колісна пара; inj – до коліс in -ї пари, пружних і дисипуючих елементів ($j = 1, 2$), де 1 позначено ліве в напрямку до голови потягу колеса; ins – до колісно-коловодкового гальма, встановленого на n -й колісній парі ($s = 1, 2$), де 1 позначено ліве в напрямку до голови потягу колоско; ind – до дискового гальма, встановленого на n -й колісній парі ($d = 1, 2$), при цьому 1 позначено ліве в напрямку до голови потягу колоско; id – до дискового гальма, встановленого в трансмісії i -ї секції, причому 1 позначено ближнє у напрямку до голови потягу колоско; it – до валу тягового двигуна, встановленого на i -й тяговій секції.

Чисельне розв'язання системи з 25 диференціальних рівнянь другого порядку виконувалося в програмі Wolfram Mathematica 7, при цьому знаходили мінімальний гальмівний шлях, на якому зупиниться потяг у разі прикладання максимально можливого гальмівного моменту, при русі по ідеально рівній колії та колії з одиничними короткими локальними нерівностями.

Кінетичні та динамічні параметри процесу гальмування осьовими дисковими гальмами електровоза Е10, що рухається зі швидкістю 1,65 м/с із сімома навантаженими вагонетками типу ВГ3,3 по ухилу в 30 ‰, наведені на рис. 1. До осьових гальмівних дисків прикладали гальмівний момент величиною 1128 Н·м, який залишався постійним протягом усього гальмування (рис. 1, а). У точці контакту колеса та рейки виникло відносне ковзання (рис. 1, б) стосується лівого колеса першої за ходом руху колісної пари другої тягової секції), яке протягом 0,27 с (час спрацювання гальмівних пристроїв локомотива Е10) різко зросло до 4,5 %, потім приблизно через 1 с коливання затухали і впродовж усієї решти часу відносне ковзання не перевищувало 1,5 %.

Сила подовжнього опору руху W_x упродовж 1 с (час ухвалення рішення машиністом про необхідність початку гальмування) відповідала постійній складовій опору руху колеса W_0 (сума моментів тертя в підшипниках буксових вузлів, валів колісного редуктора, карданних валів та двигуна під статичним навантаженням, а також у зубчастих передачах редуктора, приведених до точки контакту колеса та рейки), дорівнювала приблизно 107 Н. При переході в гальмівний режим W_x зростала приблизно до 120 Н (рис. 1, в) і коливалася синхронно з ковзан-

ням. За рахунок подовжнього прискорення, що з'явилося при гальмуванні, передні за ходом руху колісні пари довантажувалися і вертикальна реакція рейки під відповідним колесом збільшувалася з 1740 до 1810 Н (рис. 1, г).

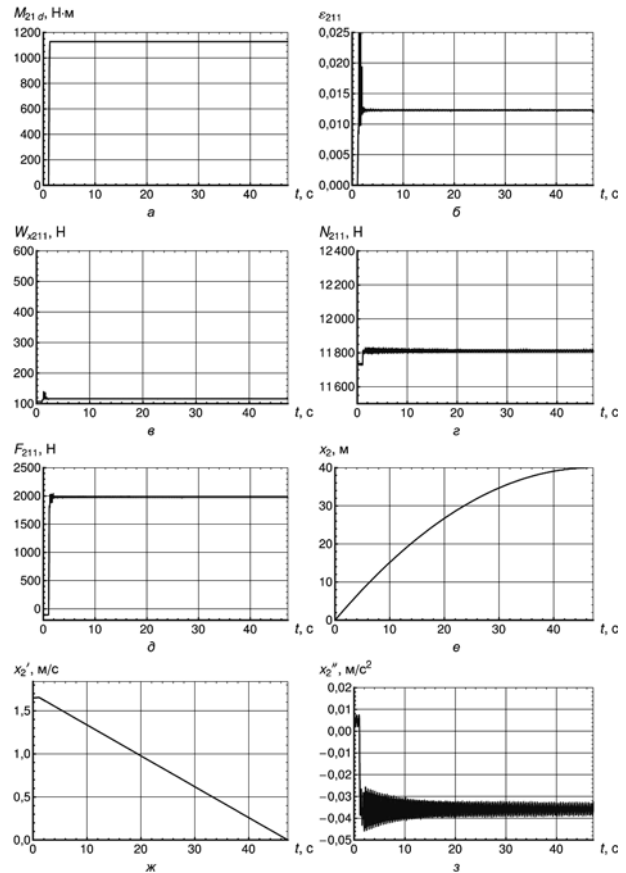


Рис. 1. Графіки параметрів гальмування від часу без зриву зчеплення: а – гальмівний момент M_{21d} на першій колісній парі другої тягової секції; б – відносне ковзання ε_{211} лівого колеса першої колісної пари другої тягової секції; в – сила опору руху W_{x211} того ж колеса; г – реакція рейки N_{211} під тим самим колесом; д – гальмівна сила F_{211} на тому ж колесі; е – переміщення x_2 другої тягової секції; ж – швидкість x'_2 тієї ж тягової секції; з – прискорення x''_2 тієї ж тягової секції

У точці контакту колеса та рейки виникала гальмівна сила (рис. 2, д), величина якої визначається вищезазначеними чинниками (приблизно 1980 Н·м). Зупиняючись, потяг пройшов дійсний гальмівний шлях 37,920 м (рис. 1, е), залежний від зміни швидкості руху (рис. 1, ж) та прискорення (уповільнення) (рис. 1, з), яке дорівнювало в середньому 0,37 м/с² при частоті близько 2,2 Гц (ця частота відповідає коливанням і всієї решти параметрів процесу гальмування). На початку гальмування амплітуда осциляцій складала 0,02 м/с², але після чотирнадцятисекундного загасання встановилася на значенні 0,06 м/с². Локомотив зупинився через 45,979 с після початку гальмування.

Вплив коефіцієнту зчеплення на процес гальмування в математичній моделі визначається задаванням його значення для конкретних умов забрудненості рейкової колії. Залежність коефіцієнту зчеплення конкретного колеса від його повного ковзання по рейці [3] наведена на рис. 2.

Робоча частина характеристики, коли кочення колеса по рейці знаходиться в зоні пружного ковзання, показана на рис. 2, а, а кочення в зоні зриву зчеплення при юзі – на рис. 2, б.

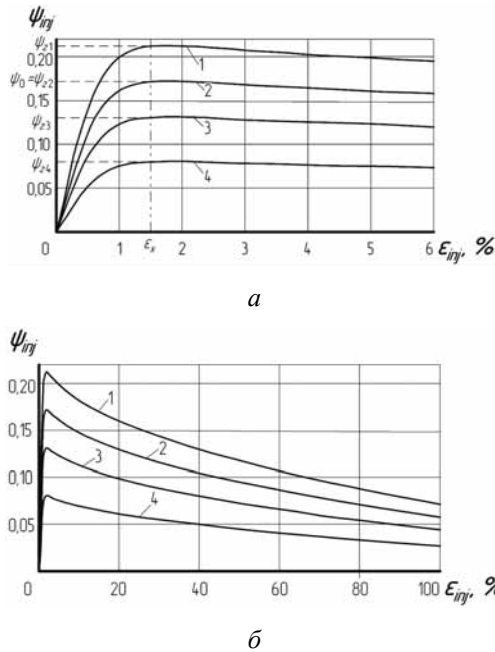


Рис. 2. Залежність коефіцієнту зчеплення ψ_{inj} колеса від повного ковзання ε_{inj} по рейці: а – на ділянці пружного ковзання; б – на ділянці підвищеного ковзання

Величина діючого коефіцієнту зчеплення під конкретним колесом залежно від повного ковзання може бути описана емпіричною залежністю

$$\psi_{inj} = k_{\Pi} \frac{\psi_2}{\psi_0} \left[\begin{array}{l} -0,016935 \left(1 \sqrt{100 \varepsilon_{inj}^5} \right) + \\ + 0,195576 \operatorname{th} \left(100 \times 1,5 \varepsilon_{inj} \right) \end{array} \right],$$

де k_{Π} – коефіцієнт згрупування приводу, що дорівнює одиниці для індивідуального приводу локомотива (коли кожна колісна пара приводиться окремим двигуном) і дорівнює від 1,0 до 1,2 – для групового приводу (коли всі колісні пари тягової секції приводяться одним двигуном); ψ_0 – коефіцієнт зчеплення коліс локомотива на сухих чистих рейках, за експериментальними даними, для вугільних шахт приймають рівним 0,17; ψ_2 – коефіцієнт зчеплення коліс локомотива на прямій (при $\varepsilon_x = 1,5\%$) для певного ступеня забрудненості доріжок катання рейок. Його приймають рівним наступним значенням: 0,21 на посипаних піском

рейках (крива 1 на рис. 2); 0,17 на сухих чистих (лінія 2); 0,13 для мокрих чистих (крива 3); 0,08 для покритих вугільно-породним брудом (крива 4).

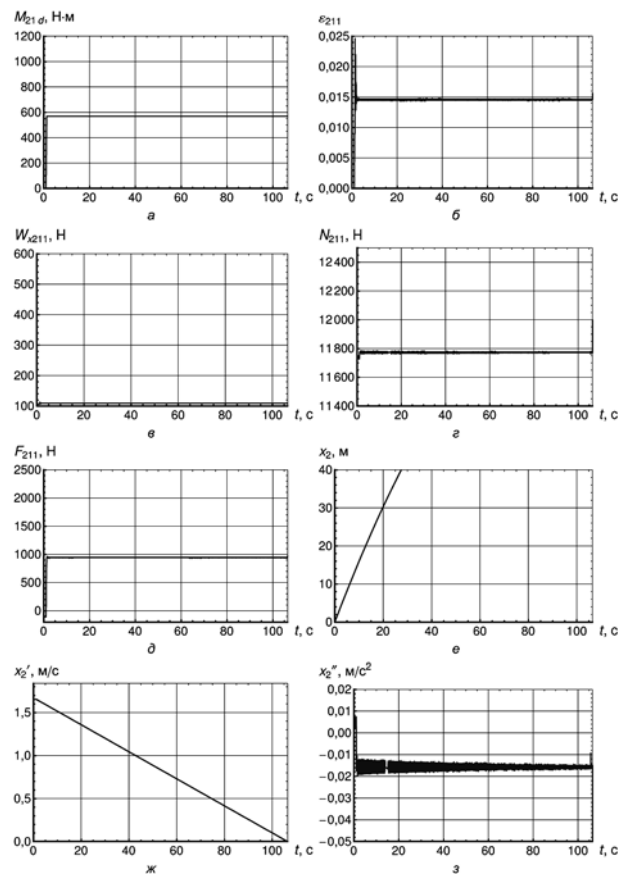


Рис. 3. Графіки параметрів гальмування на рейках, забруднених вологим вугільно-породним пилом (див. позначення на рис. 1)

Модельовання руху того ж складу по тій же рівній рейковій колії (як у першому прикладі для ідеально рівної колії), але з мокрими чистими рейками (коефіцієнт зчеплення 0,13) показало, що прикладання гальмівного моменту величиною 1128 Н·м миттєво спричинить зрив зчеплення через блокування коліс. Тільки зниження гальмівного моменту до значення 828 Н·м відновить нормальний режим гальмування (без тертя ковзання). Але дійсний час гальмування збільшиться до 65,910 с, а гальмівний шлях зросте до 54,414 м, що звичайно ж неприпустимо, оскільки дозволені 40 м [2] перевищені.

Ще гіршою буде ситуація при русі по рейках, вкритих вугільно-породним брудом з коефіцієнтом зчеплення, рівним 0,08 (характеристичні графіки наведені на рис. 3). У цьому випадку гальмування без ковзання можливе лише при гальмівному моменті величиною 569 Н·м, при цьому дійсний час гальмування зросте до 105,192 с, а гальмівний шлях – до 86,921 м. Звичайно, такий склад (сім навантажених вагонеток) по ухилу в 30% не можна транспортувати зі швидкістю 1,65 м/с, потрібно істотно знизити швидкість руху.

Навпаки, при використанні підсипання піску коефіцієнт зчеплення складе 0,21 і гальмівний момент може

бути збільшений до 1368 Н·м, при цьому дійсний гальмівний шлях зменшиться до 30,520 м, а час гальмування складе лише 37,043 с. На рис. 4 наведені характеристичні графіки гальмування за описаних умов.

При підвищеному гальмівному моменті, (рис. 4, а), який вдалося прикласти без блокування коліс завдяки високому значенню коефіцієнту зчеплення, середнє діюче значення подовжнього прискорення (уповільнення) зросло (до $0,44 \text{ м/с}^2$), що і дозволило зупинити склад раніше, ніж у першому випадку (при коефіцієнті зчеплення 0,13).

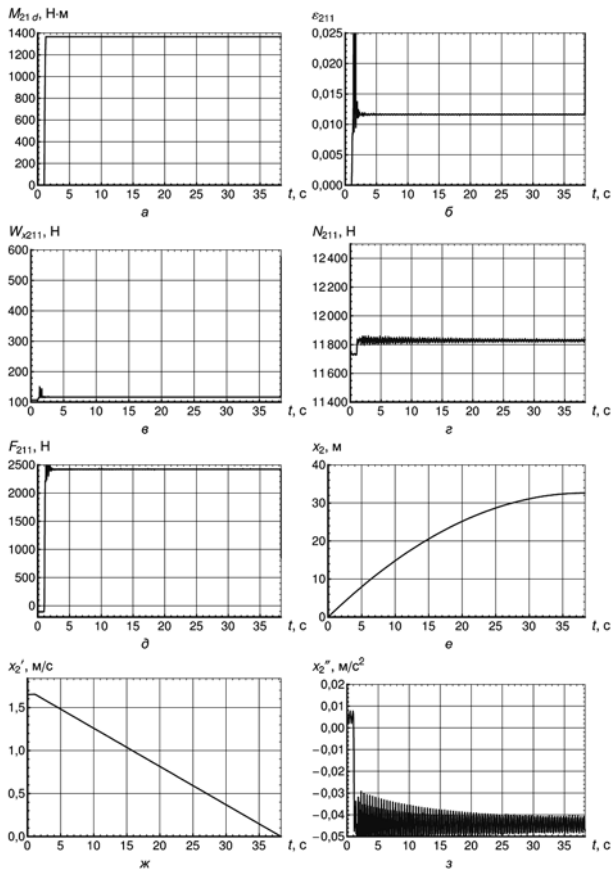


Рис. 4. Графіки параметрів гальмування при підси-
пванні рейок піском (див. позначення на рис. 1)

Якщо ж порівняти максимальний і мінімальний коефіцієнти зчеплення, то можна відмітити, що вони відрізняються в 2,63 рази, а максимально можливі моменти при цьому – тільки в 2,40 рази.

Залежності максимально можливого гальмівного моменту (що не викликає блокування коліс), дійсного гальмівного шляху і часу гальмування від коефіцієнту зчеплення коліс з рейками наведені на рис. 5.

Проте, якщо задати зміну коефіцієнту зчеплення як локальні недосконалості колії, що періодично виникають на чистій колії (де коефіцієнт зчеплення дорівнює 0,13), та розташувати через 4,5 м забруднені вологим вугільно-породним пилом (коефіцієнт зчеплення 0,08) ділянки завдовжки по 1,5 м окремо для лівої і правої рейок (як це видно на рис. 6), то картина зміни параметрів зміниться радикально. На рис. 6 наведені характеристичні гра-

фіки такого руху. При постійно діючому гальмівному моменті величиною 730 Н·м (рис. 6, а) на кожній наступній забрудненій ділянці відносно ковзання зростало, поки не досягло максимально можливого значення в 100 %.

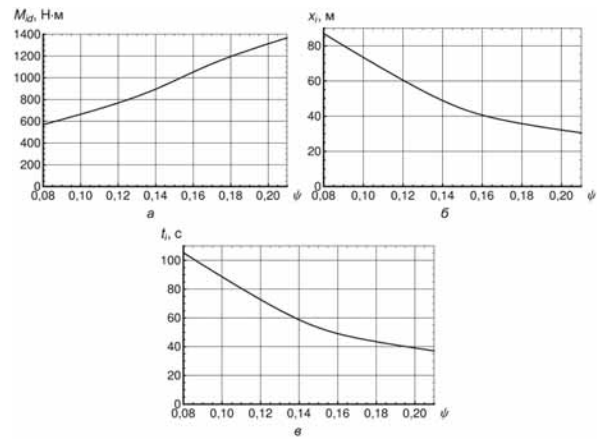


Рис. 5. Залежності гальмівного моменту, гальмівного шляху та часу гальмування від коефіцієнту зчеплення: а – для гальмівного моменту ; б – для гальмівного шляху; в – для часу гальмування

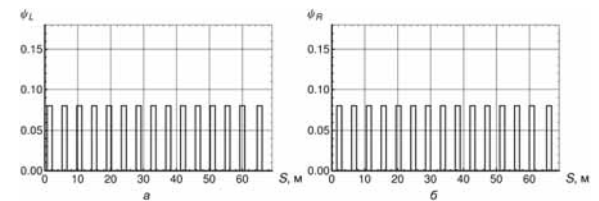


Рис. 6. Залежності коефіцієнту зчеплення від довжи-
ни колії: а – для лівої рейки; б – для правої рейки

Через це гальмівні сили на колесах (рис. 7, д) впали до мінімальної величини в 700 Н·м, а оскільки величина уповільнення (рис. 7, з) стала дуже малою, то потяг не зміг зупинитися через 40 м.

Нестійкий характер видно і на рис. 8, де графіки кутових швидкостей обертання тягових двигунів (рис. 8, а) і відповідних коліс (рис. 8, б) пульсують синхронно з випадками наїзду коліс перших за ходом руху колісних пар тягових секцій локомотива на забруднені ділянки колії.

Висновки. Посилення забрудненості рейок від чистих (коефіцієнт зчеплення 0,17) до вологих покритих вугільно-породним пилом (коефіцієнт зчеплення 0,08) зменшує коефіцієнт зчеплення в 2,13 рази, але при цьому потрібне зниження гальмівного моменту в 1,98 рази. Проте, при використанні підсилення піску (коефіцієнт зчеплення 0,21) коефіцієнт зчеплення збільшується в 1,24 рази, а зниження необхідного гальмівного моменту складає 1,21 рази.

Максимальний і мінімальний коефіцієнти зчеплення відрізняються в 2,63 рази, а максимально можливі моменти при цьому – лише в 2,40 рази.

Періодично виникаючі на шляху потягу локальні забруднення здатні викликати зрив зчеплення і значно подовжити гальмівний шлях локомотива.

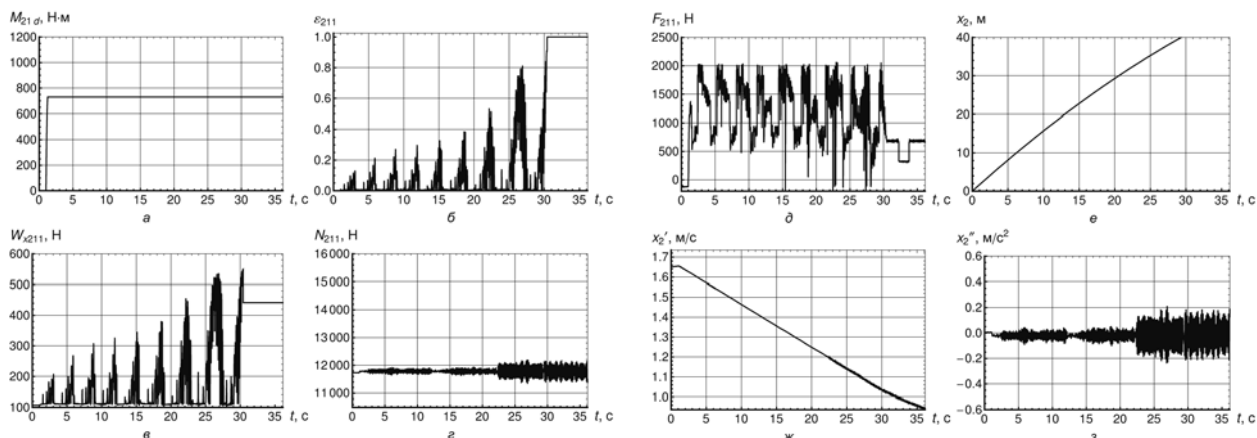


Рис. 7. Графіки параметрів гальмування на рівному чистому шляху з періодично виникаючими ділянками, забрудненими вологим вугільно-породним пилом (див. позначення на рис. 1)

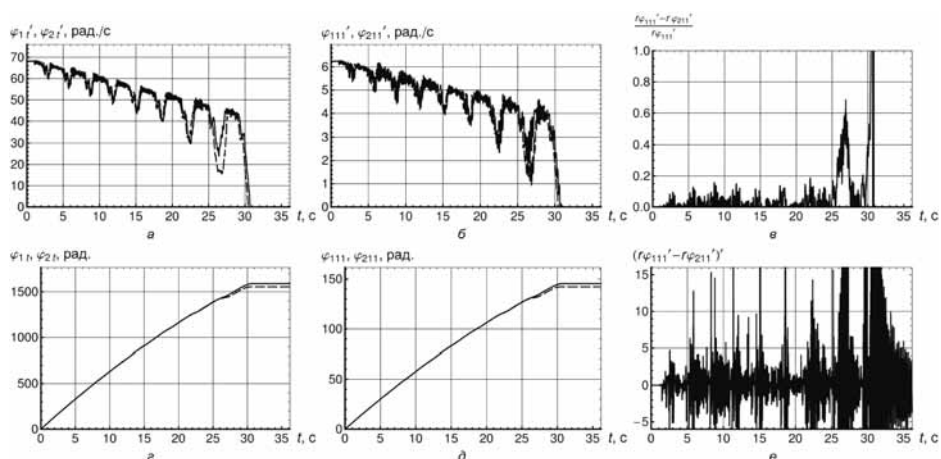


Рис. 8. Графіки зміни куткових швидкостей від часу на колії з ділянками, забрудненими вологим вугільно-породним пилом

Список літератури

1. Ренгевич А.А. Основы теории тяги рудничных поездов: Учебн. пособие [для студ. высш. учебн. завед.] / Ренгевич А.А.; – К.: УМК ВО, 1989. – 40 с. (Шахтный и карьерный рельсовый транспорт).
2. Типовые решения по безопасной перевозке людей и грузов в выработках с уклоном от 0,005 до 0,050. – Донецк: ДонУГИ, 1973. – 62 с.
3. Проців В.В. Визначення сил опору руху та направляючих зусиль шахтного шарнірно-зчленованого локомотива в режимі гальмування / Володимир Васильович Проців; (Шахтний рейковий транспорт) // Зб. наук. праць – Дніпропетровськ: РВК НГУ, 2009. – №33, т. 1. – С. 99–102.
4. Проців В.В., Динамічна модель гальмівних систем, що реалізують гальмівну силу в контактні колеса та рейки / В.В. Проців, О.Є. Гончар; (Шахтний рейковий транспорт) // Зб. наук. праць – Дніпропетровськ: РВК НГУ, 2010. – №34, т. 2 – С. 160–171.

Проведено теоретическое исследование влияния загрязненности шахтного рельсового пути на шарнирно-сочлененный локомотив в режиме торможения устройствами, реализующими тормозную силу в точке

контакта колеса с рельсом. Определены условия блокирования колес тормозным моментом при езде по рельсам с различной степенью загрязненности. Максимальный и минимальный коэффициенты сцепления отличаются в 2,63 раза, а максимально возможные моменты при этом – только в 2,40 раза.

Ключевые слова: шахтный локомотив, тормоз, уравнения Лагранжа, коэффициент сцепления

Theoretical research of influencing of mine railtrack muddiness on the joint-joined locomotive in the mode of braking by devices realizing brake force in the point of contact of a wheel with a rail is carried out. The terms of locking the wheels by the brake moment during the move along rails with different strength of muddiness are ascertained. Maximum and minimum coefficients of rolling friction differ 2,63 times but maximally possible moments differ only 2,40 times.

Keywords: mine locomotive, brake, La Grange's equalization, coefficients of rolling friction

Рекомендовано до публікації докт. техн. наук С.Є. Блохіним. Дата надходження рукопису 07.07.10