

6. Методы классической и современной теории автоматического управления: Учебн. в 5-ти томах; [2-е изд., перераб. и доп.] – Т. 5: Методы современной теории автоматического управления / под ред. **К.А. Пупкова, Н.Д. Егупова.** – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 784 с.

7. **Хорольський В.П., Хоцькіна В.Б.** Адаптивна система оцінки режимів роботи першої стадії збагачення руди на основі мережеских моделей Петрі // Вісник Криворізького національного університету: Кривий Ріг, 2012. – вип. 33. – С. 142-145.

8. **Дорф Р.** Современные системы управления / **Р. Дорф, Р. Бишоп,** [пер. с англ. Б. И. Копылова]. – М. :

Рукопис подано до редакції 19.03.13

УДК 622.625.28

В.В. ПРОЦІВ, д-р техн. наук, проф., Національній гірничий університет

## ПРОСТОРОВА ДИНАМІЧНА МОДЕЛЬ ГАЛЬМУВАННЯ ШАХТНОГО ПОЇЗДА ПРИБОРОМІ З ОБМЕЖЕНИМ ФРИКЦІЙНИМ МОМЕНТОМ

У роботі знайдено спосіб отримання динамічних параметрів складних механічних багатомасних систем машин, що просторово рухаються по наперед означених траєкторіях, та мають у своєму складі неголономні зв'язки. Складено розрахункову схему руху шарнірно-зчленованого локомотива із складом навантажених вагонеток по ділянці шахтної рейкової колії із наперед виміряними геометричними параметрами.

**Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок науковими та практичними завданнями.** При гальмуванні шахтних і рудникових локомотивів найбільш широко застосовується гальмування з використанням гальмівної сили в точці контакту колеса з рейкою. Для цього використовують колісно-колодкові гальма, дискові осьові (розташовані на осі колісної пари) і трансмісійні (на валу тягового двигуна), а також динамічне гальмування двигуном. Найбільш перспективним з нині існуючих шахтних локомотивів є шарнірно-зчленований електровоз Е10 [1], оснащений усіма перерахованими вище системами гальмування і здатний надійно працювати в умовах шахтної колії з легким баластним шаром і суттєвою недосконалістю в плані та профілі. Але опис руху такої машини із складом навантажених вагонеток виявляється складним науково-технічним завданням.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** При побудові тривимірної динамічної моделі шахтного шарнірно-зчленованого локомотива, що рухається по ділянці реальної шахтної колії, із викривленнями в плані і профілі, а також систематичними і локальними (довгі й короткі) недосконалістями, найбільш підходящим можна вважати підхід, заснований на складанні рівнянь Лагранжа другого роду [2]. Однак він базується на припущенні, що всі зв'язки в системі є голономними.

**Завдання дослідження** полягає у пошуку способу отримання динамічних параметрів складних механічних багатомасних систем машин, що просторово рухаються по наперед означених траєкторіях, та мають у своєму складі неголономні зв'язки.

**Мета.** Скласти розрахункову схему руху шарнірно-зчленованого локомотива із складом навантажених вагонеток по ділянці шахтної рейкової колії із наперед виміряними геометричними параметрами.

**Викладення матеріалу дослідження.** Якщо з певною ймовірністю припустити, що всі зв'язки в системі шарнірно-зчленований локомотив - рейкова колія є голономними, то ми отримаємо розрахункову схему його розміщення на колії в режимі вибігу (без тяги і гальмування), що наведена на рис. 1.

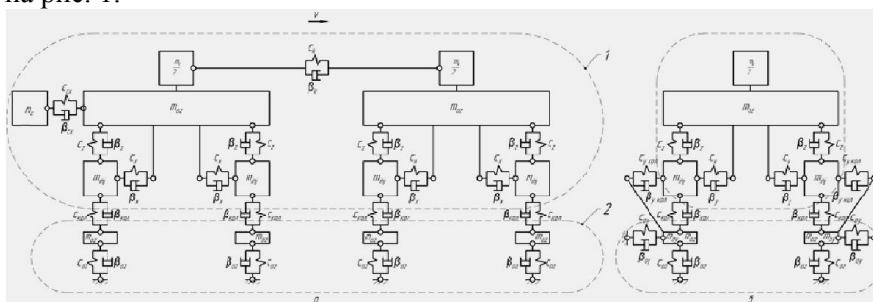


Рис. 1. Розрахункова схема шарнірно-зчленованого локомотива з голономними зв'язками: а - вигляд спереду; б - вигляд зліва

Тут позначені тільки маси, лінійні жорсткості і коефіцієнти лінійної дисипації. Моменти інерції (у тому числі елементів приводу і трансмісії), а також крутильні жорсткості і коефіцієнти крутильної дисипації умовно не показані.

Хоча в реальних зчіпних пристроях шахтних локомотивів присутні зазори, що викликають ударні навантаження на рами другої тягової секції локомотива і першої вагонетки причіпної частини поїзда, в режимі гальмування (зчіпка стиснута) цей зв'язок із високим ступенем точності можна вважати голономним, а масу складу вагонеток  $m_c$  приєднаної до локомотива пружно-дисипативним зв'язком (з параметрами  $c_c$  і  $\beta_c$ ). Маса середньої секції локомотива розділена на ввіл між тяговими секціями  $m_k/2$ , а її рама представлена у вигляді пружного стрижня з параметрами  $c_k$  і  $\beta_k$ .

До рам двох тягових секцій з масами  $m_i$  за допомогою пружно-дисипативних елементів вертикальної (з параметрами  $c_z$  і  $\beta_z$ ) і горизонтальної (з параметрами  $c_x$  і  $\beta_x, c_y$  і  $\beta_y$ ) підвіски приєднані по чотири колеса з масами  $m_{inj}$ . Наведені до колеса маси рейкової колії у вертикальній  $m_{oz}$  і в горизонтальній  $m_{oy}$  площинах приєднані до нерухомої основи шляху за допомогою вертикальних (з параметрами  $c_{oz}$  і  $\beta_{oz}$ ) і горизонтальних (з параметрами  $c_{oy}$  і  $\beta_{oy}$ ) пружно-дисипативних зв'язків.

Пружно-дисипативні зв'язки між колесами і рейками як вертикальні (вони позначені пружно-дисипативних параметрами  $c_{кол}$  і  $\beta_{кол}$ ), так і горизонтальні (відповідно  $c_{укол}$  і  $\beta_{укол}$ ) прийняті голономними. Оскільки контактна жорсткість коліс значно більше (більш ніж на два порядки) жорсткості вертикальної підвіски коліс на рамі тягової секції  $c_z$  та вертикальної жорсткості рейкової колії  $c_{oz}$ , наведеної до колеса, то нею можна було б знехтувати.

Проте в загальному випадку зв'язки коліс (і рейкових гальм) з рейками є односторонні і неголономні як у вертикальній площині (оскільки кочення супроводжується ковзанням), так і в горизонтальній (оскільки присутній поперечне ковзання). Тому така розрахункова схема не може бути коректно описана рівняннями Лагранжа. Але якщо розбити її на дві частини, - верхню 1 (власне локомотив), і нижню 2 (рейкова колія), як це показано на рис. 1, то ми зможемо скласти дві системи рівнянь Лагранжа другого роду, пов'язані по межі взаємодії коліс з рейками. У цьому випадку відкидаючи, наприклад, рейкову колію, ми повинні замінити її вплив на локомотив реакціями рейок, діючих на колеса локомотива у вертикальній і горизонтальній площинах за принципом Д'Аламбера.

Ці ж сили, але з протилежним знаком, за третім законом Ньютона будуть впливати на рейки з боку коліс локомотива і виступати узагальненими силами при вирішенні системи 2 (для рейкової колії). Отже, обидві системи рівнянь можна вирішувати спільно з однаковими початковими умовами, при цьому сили взаємодії коліс з рейками будуть не внутрішніми, а зовнішніми для кожної із зазначених систем.

Тому, розбиваючи завдання на два, отримаємо узагальнені координати для кожного з них, - і для локомотива (табл. 1) і для рейкової колії (табл. 2), де враховані також кутові координати тягових двигунів, вихідних валів осьових редукторів і коліс локомотива з півосями.

У результаті, в загальному випадку неголономні зв'язки між колесом і рейкою можуть бути замінені за принципом Д'Аламбера-Лагранжа їх реакціями на кожну систему так, що траєкторія руху звільненої системи залишиться незмінною в просторі та в часі [3]. При цьому компоненти реакцій зв'язків представляють собою міри Лебега-Стілтьєса.

Таблиця 1

Вибір узагальнених координат рівнянь динаміки поїзда

Головні напрямки переміщень	Узагальнені координати	Число ступенів свободи
$x$	$x_i, x_{inj}, \varphi_i, \varphi_{inj}, \varphi_{in}, \varphi_{in} x_c, z_c, y_c$	27
$z$	$z_i, z_{inj}, \theta_i, \varphi_i, \psi_i, \psi_{in}$	20
$y$	$y_i, y_{in}$	6
	Загалом	53

Таблиця 2

Вибір узагальнених координат рівнянь динаміки рейкової колії

Головні напрямки переміщень	Узагальнені координати	Число ступенів свободи
$z$	$z_{oinj}$	8
$y$	$y_{oinj}$	8
	Разом	16

Отримані реакції необхідні для визначення узагальнених сил в рівнянні Лагранжа другого роду, що описує динамічну модель шарнірно-зчленованого локомотива із складом вагонеток на ділянці реальної шахтного рейкової колії [4]. Сумарна система включатиме наступні узагальнені координати (табл. 3) обох систем.

Таблиця 3

Выбор обобщенных координат уравнений динамики шахтного поезда на рельсовом пути

Головні напрямки переміщень	Узагальнені координати	Число ступенів свободи
$x$	$x_i, x_{inj}, \varphi_{in}, \varphi_{inj}, x_c, z_c, y_c$	27
$z$	$z_i, z_{inj}, z_{oinj}, \theta_i, \theta_{in}, \psi_i, \psi_{in}$	28
$y$	$y_i, y_{in}, y_{oinj}$	14
	Разом	69

Модернізований шарнірно-зчленований кабельний електровоз Е10, має багаторазове резервування гальмівних систем за рахунок установки на ньому декількох паралельно працюючих гальм різних типів, що реалізують гальмівну силу в точці контакту коліс з рейками. На валу приводного електродвигуна 1 ходового візка (рис. 2) тягової секції розташований трансмісійне дискове гальмо 2.

Осьові дискові гальма 3 встановлені на колісних парах, а колісно-колодкові гальма 4 на кожному колесі локомотива.

Розрахункова схема гальмування локомотива Е10 зі складом навантажених вагонеток на рейковому шляху наведена на рис. 3. До другої по ходу руху тягової секції 1 прикладена сила на зчепленні від складу навантажених вагонеток.

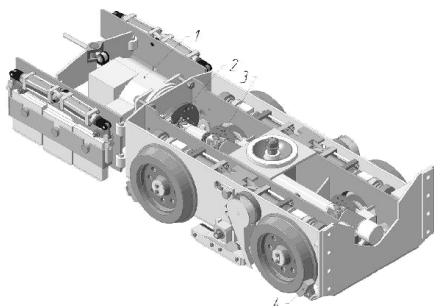
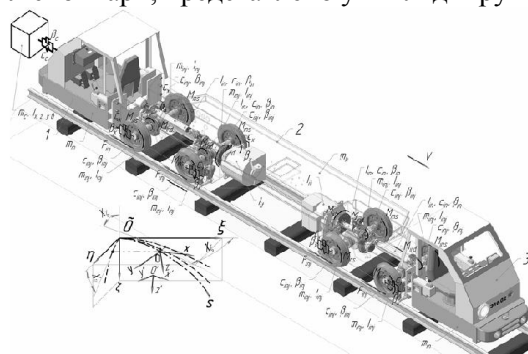


Рис. 2. Ходовий візок локомотива Е10 лісної пари, представлено у вигляді пружно дисипативних зв'язків, працюючих на кручення.



Середня секція 2, рама якої прийнята у вигляді пружно-дисипативного стрижня, що працює на стискання, з'єднує її з першою тяговою секцією 3. Колеса з півосями і зубчасте колесо другого ступеня осьового редуктора (з наведеними до нього масами і моментами інерції решти елементів трансмісії) обертаються навколо власних осей.

Короткий карданний вал у тягових секціях, що з'єднує вал тягового двигуна з осьовим редуктором найближчій колісній парі, а також довгий карданний вал, що з'єднує перший осьовий редуктор з осьовим редуктором другої колісній парі, представлено у вигляді пружно дисипативних зв'язків, працюючих на кручення.

Рис. 3. Розрахункова схема гальмування локомотива Е10 гальмами, що реалізують гальмівну силу в точці контакту колеса і рейки

Тут і далі для позначення змінних прийняті такі основні й додаткові нижні індекси, що визначають приналежність змінної до об'єкта математичної моделі:  $k$  - до середньої секції;  $i$  - до тягових секцій ( $i = 1, 2$ ), де 1 позначена перша за ходом руху у напрямі осі  $\tilde{O}\xi$  секція. Вона оснащена циліндровим шарніром для спирання середньої секції на тягову.

Секція 2 з'єднана з середньою секцією локомотива сферичним шарніром;  $in$  - до колісних пар (осьових редукторів)  $i$ -ї секції ( $n = 1, 2$ ), де 1 позначена ближня до голови потягу колісна пара;  $inj$  - до коліс  $in$ -ї пари, пружних та дисипативних елементів ( $j = 1, 2$ ), де 1 позначені ліві у напрямку до голови потягу колеса;  $ins$  - до бандажно-колодкового гальма, встановленого на  $n$ -й колісній парі ( $s = 1, 2$ ), де 1 позначено ліві у напрямку до голови потягу колодки;  $ind$  - до дискового гальма, встановленого на  $n$ -й колісній парі ( $d = 1, 2$ ) при цьому 1 позначені ліві у напрямку до голови потягу колодки;  $id$  - до дискового гальма, встановленого в трансмісії  $i$ -ї секції, при чому 1 позначено ближні у напрямку до голови потягу колодки;  $it$  - до вала тягового двигуна, встановленого на  $i$ -й тяговій секції;  $o$  - до основи (рельсова колія);  $L$  - до лівої рейки;  $R$  - до правої рейки.

Для опису руху локомотива по реальній рейковій колії виберемо нерухому систему координат  $\tilde{O}\xi\eta\zeta$ , а для кожного твердого тіла екіпажа по дві рухомі системи координат - природну

$Oxyz$  в полюсі обертання тіла і  $O'x'y'z'$  в його центрі мас. Тому  $O'x'$ ,  $O'y'$ ,  $O'z'$  - головні центральні осі інерції тіла. Усі системи координат вибрані правими. Осі природної системи координат направлені відповідно по дотичній, нормалі та бінормалі до осі колії, а її положення щодо нерухомої системи координат характеризується дуговою координатою уздовж осі колії  $S$ , і направляючими кутами  $\chi_\xi, \chi_\eta, \chi_\zeta$  між відповідними осями нерухомої системи координат  $\tilde{O}\xi, \tilde{O}\eta, \tilde{O}\zeta$  і дотичними до проєкцій осі колії  $S$  на відповідні площини (горизонтальну, бічну, фронтальну). Кривизна колії в кожній точці шляху в горизонтальній площині визначається як  $\chi_\xi$  або радіусом  $R$ , у вертикальній площині як  $\sqrt{\chi_\eta^2 + \chi_\zeta^2}$  або поздовжнім ухилом шляху  $i_p$ , а також поперечним ухилом колії  $i_s$ . Останній параметри можна також задавати кутом поперечного ухилу колії  $\theta_h$ , який дорівнює  $\arctg i_s$  або  $i_s$  в радіанах, оскільки цей кут малий (не більше  $3^\circ$ ).

Швидкість руху локомотива уздовж осі шляху є швидкість руху початку природної системи координат його першої секції з урахуванням поздовжнього ковзання  $\varepsilon_x$ , тобто  $S = S_1 = vt(1 - \varepsilon_x)$ .

Беручи до уваги конструктивні особливості шарнірно-зчленованого локомотива можна записати наступні рівняння зв'язку між природними системами координат тіл, що належать локомотиву

$$S_2 = S_1 - s_k; \quad S_k = S_1 - \frac{S_k}{2}; \quad S_{in} = S_i - (-1)^n \frac{S_b}{2}.$$

перша по ходу руху ходова секція з'єднана з рамою проміжної секції циліндричним шарніром, а друга - сферичним, тому кут поперечного гойдання  $\theta_k = \theta$ . кут рискання (вильяння) середньої секції дорівнює  $\psi_k = \arcsin(y_2 - y_1 / s_k)$ , а її кут галопування (поздовжнього гойдання) знаходять як  $\varphi_k = \arcsin(z_2 - z_1) / s_k$ . для практичних цілей зазвичай цікаві переміщення елементів шахтного поїзда щодо осі шляху  $S$ , тому систему рівнянь будемо будувати відповідно.

рейковий шлях представлений у вигляді двох балок нескінченної довжини, що лежать на пружній основі, яка підпорядковується гіпотезі власова.

При складанні математичної моделі гальмування шахтного локомотива гальмами, що реалізують гальмівну силу в точці контакту колеса з рейкою, прийняті наступні допущення:

усі жорсткості й розсіювання енергії системи лінійні;

склад вагонеток, прикріплених до локомотива на зчепленні, представлений у вигляді одного тіла з еквівалентними масо-інерційними характеристиками;

поздовжні переміщення рейкових ниток і основи шляху не враховуються;

навантаження, що переміщують одну нитку рейкової колії не роблять впливу на іншу, а взаємні переміщення рейок і основи на контактній поверхні відсутні.

**Висновки.** Розбиваючи складну механічну систему на декілька систем по межах їх взаємодії, є можливість отримати узагальнені координати для кожної з них, наприклад, – і для локомотива і для рейкової колії. Таким чином, обидві системи рівнянь можна вирішувати спільно з однаковими початковими умовами, при цьому сили взаємодії коліс з рейками будуть не внутрішніми, а зовнішніми для кожної із зазначених систем. У результаті, в загальному випадку неголономні зв'язки між колесом і рейкою можуть бути замінені за принципом Д'Аламбера-Лагранжа їх реакціями на кожну систему так, що траєкторія руху звільненої системи залишиться незмінною в просторі та в часі. При цьому компоненти реакцій зв'язків представляють собою міри Лебега-Стілтьєса. Складено розрахункову схему руху шарнірно-зчленованого локомотива із складом навантажених вагонеток по ділянці шахтної рейкової колії із наперед вимірними геометричними параметрами.

#### Список літератури

1. Мишин В. В. Математическая модель шахтного секционного локомотива в кривой / В. В. Мишин, О. Б. Зайцева // Изв. вузов: Горный журнал, 1992. – № 4. – С. 71–74.
2. Блохин С. Е. К вопросу об исследовании вертикальных и горизонтальных колебаний тягового агрегата / С. Е. Блохин, И. В. Данович, Ю. Н. Корсаков // Динамика, прочность и надежность транспортных машин: сб. науч. тр. – Брянск, 1986. – С. 137 – 141.
3. Сорокина О. В. Принцип Даламбера-Лагранжа в механических системах с односторонними связями / О. В. Сорокина, Е. И. Кугушев. – М., 2002. – 20 с. (Препринт / ИПМ им. М.В. Келдыша РАН).

4. **Проців В. В.** Визначення сил опору руху та направляючих зусиль шахтного шарнірно-зчленованого локомотива в режимі гальмування / **В. В. Проців** // Збірник наукових праць НГУ, 2009. – № 33. – Т. 1 – С. 96– 02.  
Рукопис подано до редакції 19.03.13

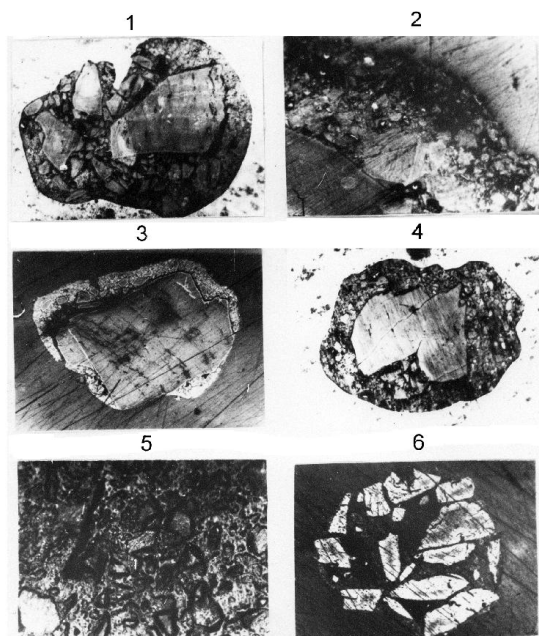
УДК 622.765.063.24

В.С. БІЛЕЦЬКИЙ, П.С. СЕРГЄЄВ, доктори техн. наук, проф.  
Донецький національний технічний університет

## СЕЛЕКТИВНА АГРЕГАЦІЯ ВУГІЛЛЯ

Стаття стосується спеціальних методів збагачення і зневоднення тонко- і дрібнодисперсного вугілля - селективної масляної агломерації та флокуляції вугілля латексами, які можуть використовуватися як самостійно, так і в комплексі з флотацією. Мета роботи - на основі результатів проведених досліджень викласти особливості цих технологічних процесів, зокрема, фізико-хімічні основи механізму масляної агломерації та латексної флокуляції вугілля; охарактеризувати основні чинники впливу на процеси.

*Фізико-хімічні основи механізму масляної агломерації вугілля.* В основі всіх різновидів масляної агломерації вугілля лежить процес селективного розділення дрібнозернистої вугільної мінеральні суміші, який складається з послідовних технологічних стадій [1,2]: адгезійної взаємодії між вугіллям і масляними фракціями, емульгування з утворенням первинних вуглемасляних флокул та їх аутогезійного структурування у відносно тверді гранули (рис. 1).



**Рис. 1.** Зразки аншлифів вуглемасляних агломератів: 1-4 - структура „ядро-оболонка”; 5 - вугілля у масляній краплі; 6 - вуглемасляна флокула

Адгезійна взаємодія деяких вуглеводневих рідин з вугіллям різних стадій метаморфізму досліджена сучасними фізико-хімічними методами.

Встановлено, що адгезія в між фазній зоні зв'язуюче-субстрат обумовлюється фізичними зв'язками (сили Ван-дер-Ваальса), а також можливі водневі і хімічні зв'язки. Позитивну роль відіграють компланарні структури масляного агента.

Емульгування має місце як в процесі агломерації розбавлених суспензій вугілля, де взаємодія зв'язуючого і вугілля супроводжуються селективним захопленням тонких частинок вугілля на поверхні масляної фази, так і у випадку агломерації концентрованих суспензій, коли відносне зниження об'єму води і наявність твердих гідрофільних і гідрофобних частинок створюють умови для формування зворотного емульсії. У

цілому, утворення вуглемасляних флокул обумовлено дією твердого емульгатора, який представлений дисперсним органічним компонентом твердої фази агломерованої суспензії з розвинутою поверхнею.

Зафіксовано регулярність аутогезійних контактів первинних вуглемасляних структур, залежність міцності агломерату на співвідношення адсорбційних і об'ємних шарів зв'язуючого, а також залежність розміру гранул від інтенсивності гідродинамічних впливів та інших технологічних параметрів агломераційного процесу.

Виявлені закономірності агломераційних механізмів і фізико-хімічні особливості вуглемасляної взаємодії, є основою для розробки і створення промислових комплексів для масляної агломерації кам'яного вугілля, які були апробовані авторами на деяких підприємствах вугільної промисловості та енергетики (рис. 2).