

**Висновки та напрямки подальших досліджень.** Під час дослідження системи живлення дволанкових перетворювачів частоти та вивчення взаємовпливу окремих перетворювачів на мережу живлення виявлені значні спотворення форми струму та напруги, канонічні гармоніки мають досить великі значення, енергетичні показники низькі.

Виявлено, що зазначений факт обумовлений значною ємністю в ланці постійного струму. Під час вирішення задач щодо підвищення енергетичних показників запропоноване використання паралельних активних фільтрів.

Активні фільтри мають ряд переваг перед іншими, проте одночасне застосування як активного, так і пасивного фільтру дозволило б досягти більшої ефективності.

Використання активних фільтрів дозволяє значно знизити рівень основних гармонік, максимально наблизити струм до синусоїдального та компенсувати реактивну потужність. Енергетичні показники, у порівнянні зі схемою без компенсаційних пристроїв, значно вищі.

### Список літератури

1. Бурлака В.В., Гулаков С.В., Бублик С.К., Дьяченко М.Д. Параллельный активный фильтр с повышенным коэффициентом подавления высших гармоник тока / В.В.Бурлака, С.В.Гулаков, С.К. Бублик, М.Д. Дьяченко // Вестник ПГТУ. – 2009.
2. Escobar G., Stankovic A. M., Cardenas V., Mattavelli P. A controller based on resonant filters for a series active filter used to compensate current harmonics and voltage unbalance / G. Escobar, A. M. Stankovic, V. Cardenas, P. Mattavelli // Conference on Control Applications Glasgow, Scotland, U.K. September 18 – 20. – 2002. – P. 7 – 12.
3. Gaiceanu M. Active power compensator of the current harmonics based on the instantaneous power theory / M. Gaiceanu // The annals of "Dunarea de jos" university of Galati: electrotehnics, electronics, automatic control, informatics. Fascicle III, 2005. – P. 23 – 28.
4. Ucak O. Design and implementation of a shunt active power filter with reduced dc link voltage / O. Ucak, I. Kocaba, A. Terciyani // TUBITAK – Space technologies research institute, power electronics group METU campus, TR 06531, Ankara, Turkey. – 5 c

Рукопис подано редакції 25.03.16

УДК 621.771:517.9

В.П. ЛЯШЕНКО, д-р техн. наук, проф.,

Кременчуцький національний університет ім. Михайла Остроградського,

О.В. АНІСЬКОВ, ст. викладач, Криворізький національний університет

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОКАТКИ ТОНКОЇ І НАДТОНКОЇ СТРІЧКИ ІЗ ТУГОПЛАВКИХ І ВАЖКОДЕФОРМОВАНИХ МЕТАЛІВ

У роботі проведено аналіз особливостей технології виготовлення стрічки із тугоплавких і важкодеформованих металів. Запропоновано математичні моделі для визначення енергосилових параметрів процесу плющення (прокатки) тонкої і надтонкої стрічки із тугоплавких і важкодеформованих металів, які дозволяють враховувати силову дію інструмента, зокрема валків прокатного стану, та температурне поле зони підведення струму до стрічки. Розглянута узагальнена та спрощені математичні моделі. Проведені чисельні експерименти та побудовані, на основі розв'язків спрощених задач, температурні розподіли зони дії струму.

**Ключові слова:** прокатка, постійний та імпульсний струм; електро-фізико-механічні властивості

**Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями.** В даний час у сучасних умовах виробництва стрічки та дроту все більше уваги приділяється енергозберігаючим технологіям, оптимізації обладнання, точності настройки процесів регулювання з використанням апаратних і програмних можливостей сучасної електронної техніки.

**Аналіз досліджень і публікацій.** У металургійній промисловості і зокрема в прокатному виробництві визначальне значення має якість продукції. Технологія виробництва стрічки з дроту тугоплавких і важкодеформованих металів можлива лише при підвищених температурах 600-1000 °С. Знизити температуру прокатки (плющення) до температури 200-300°C дозволяє застосування імпульсного струму, що підводиться у зону деформації (рис.1). У роботах К.М.Клімова і І.І.Новікова, [1,2] описані процеси плющення дроту з підведенням струму до дроту тугоплавких металів з метою нагрівання у зоні деформації при температурах не більше

300°C. Описана технологія дозволяє отримувати стрічку з вольфраму і вольфрам-ренієвого сплаву ВР-27ВП з коефіцієнтом витяжки в межах 20-30% [3,4].

Застосування у зоні деформації електричного струму дозволяє підвищити ступінь одиничного обтиску матеріалу на 10-20 % [5,6]. Подальше підвищення ступеня одиничного обтиску дозволяє спосіб ультразвукового електропластического плющення дроту з тугоплавких і важкодеформованих металів і сплавів. Спосіб передбачає одночасне використання в зоні деформації електричного струму та ультразвуку [7]. При отриманні стрічки, як показано в роботі [8], можливі два режими деформування - імпульсний і неперервний, причому співвідношення між ними визначається кінематичними параметрами установки і режимами процесу плющення з мінімальним підігрівом металу. З точки зору зниження енергосилових параметрів процесу та підвищення якості стрічки імпульсний режим підведення струму у зону деформування більш ефективний, ніж неперервний. Згідно експериментам [8], існують граничні співвідношення між швидкістю протягування стрічки, величиною пружної деформації заготовки (здебільшого дроту малого діаметра) і кутом захоплення валками металу, при якому забезпечується імпульсний режим пружно-пластичного деформування.

Проектування обладнання для виробництва стрічки з тугоплавких і важкодеформованих металів вимагає визначення енергосилових параметрів процесу, які дозволяють створити оптимальні умови деформування, запобігати руйнуванню металу у процесі деформації.

Це може бути успішно реалізовано з використанням математичних моделей, які дозволяють створити систему керування процесом деформації, враховуючи особливості технології отримання стрічки. Математичні моделі теплових процесів під час термічної обробки дроту зовнішніми та внутрішніми джерелами тепла, а також блок-схеми пристроїв контролю температури описані в роботах [9-14].

**Викладення матеріалу та результати.** Розглянемо математичну модель плоскої пластичної деформації та визначення силових параметрів під час процесу прокатки стрічки між тілами, що обертаються. При побудові моделі плющення вважається, що жорстка стрічка товщиною  $h_1$  та шириною  $e$ ,  $h_1 \leq e$  рухається уздовж осі деформації  $Ox$  у напрямі, перпендикулярному осям валків (рис. 1).

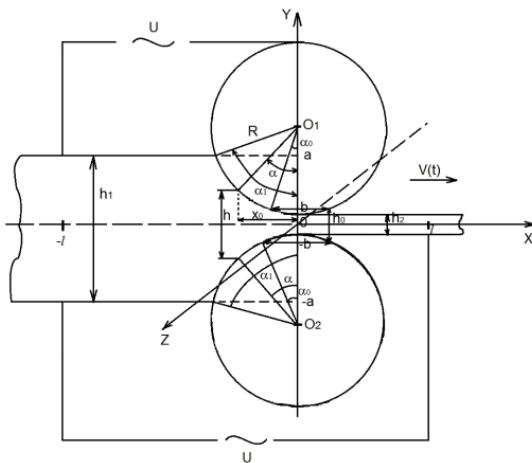


Рис 1. Схема подовжного плющення

Радіуси валків  $R$  однакові і обертаються з однаковими кутовими швидкостями, процес деформації є симетричним відносно серединної площини стрічки. Стрічка товщиною  $h_1$  на вході у валки отримує товщину  $h_2$  після виходу з них ( $h_1 < h_2$ ). Наближено приймаємо, що уся деформація стрічки відбувається між входом і виходом з валків. Решта стрічки вважається жорсткою.

Електричний струм до стрічки, як зображено на рис. 1, можна підводити за допомогою ковзких електричних контактів двома способами, а саме: у зону довжиною  $l$ , де один контакт до стрічки, а другий до валків, або обидва контакти до стрічки у

зону довжиною  $2l$ .

Розглянемо модель холодної прокатки стрічки. Закон зміни товщини стрічки у зоні деформації, що залежить від кута  $\alpha$  (рис. 1) визначається за формулою

$$h = h_2 + 2R(1 - \cos \alpha), \quad (1)$$

де  $R$  - радіус деформованої поверхні кругового циліндричного валка.

Абсциса поточної точки уздовж дуги контакту пов'язана з кутом  $\alpha$  співвідношенням

$$x = R \sin \alpha \quad (2)$$

Довжина зони деформації  $l = R \sin \alpha_1$ ,  $\alpha_1$  - кут захоплення стрічки валками ( $\max \alpha$ ). Радіус деформованої поверхні валка пов'язаний з його радіусом до деформації формулою Хітчкока [15]

$$R = R_0 [1 + P_y / (C \Delta h)],$$

де  $C = \pi E / [16(1 - \mu^2)]$ ,  $E$  - модуль пружності;  $\mu$  - коефіцієнт Пуассона;  $P_y$  - проекція на вертикальну вісь  $Oy$  сил, що діють на одиницю довжини валка,  $\Delta h = h_1 - h_2$  - зміна товщини стрічки при плющенні.

Приймаємо, що деформація у напрямі ширини стрічки дорівнює нулю, тобто деформація смуги є плоскою [16]. Тоді за умови, що стрічка нестискувана маємо наступний закон зміни середніх швидкостей  $v$  у напрямі плющення (осі  $Ox$ )

$$v = v_1 h_1 / h = v_2 h_2 / h, \quad (3)$$

де  $v_1$  і  $v_2$  - середні швидкості на вході у валки і на виході з них;  $h$  - товщина стрічки в поточному перетині, що визначається кутом  $\alpha$ .

З формули (3) слідує, що у міру просування через валки середня швидкість  $v$  збільшується, і якщо в околі входу, у валки середня швидкість менше колової швидкості валків, то в околі виходу з валків вона зазвичай більша за неї. Тому на початковій від входу ділянці контакту стрічки і валків сили тертя, що діють на стрічку, направлені у бік руху металу, а потім на ділянці виходу у зворотну боці. На рисунку 1 кут  $\alpha_0$  відповідає координаті точки, в якій сили тертя змінюють знак. Нейтральний перетин висотою  $h_0$  визначається кутом  $\alpha_0$ . Частина зони деформації від входу у валки до нейтрального перетину називається зоною відставання, а інша частина від нейтрального перетину до виходу з валків зоною випередження.

Припустивши, що деформація плоска, матеріал ідеально жорстко-пластичний, прийнявши, що перетини перпендикулярні напрямку плющення залишаються плоскими, а деформації і напруження не змінюються по товщині стрічки, можна спростити умову пластичності, та звести двовимірну задачу до одновимірної. Для спрощення розв'язку приймемо, що тертя на всій поверхні контакту підкоряється закону Кулона зі сталим коефіцієнтом пропорційності  $f$  по усій поверхні контакту

$$q = fp \quad (4)$$

Припустимо, що напруги по товщині стрічки залишається незмінною. Тоді рівняння рівноваги елемента  $\Delta x = dx$  стрічки, розташованого між кутами  $\alpha$  і  $\alpha + d\alpha$  перпендикулярними осі  $Ox$  має вигляд

$$(\sigma_x + d\sigma_x)(h + dh)b - \sigma_x hb + 2pRbd\alpha \sin \alpha \mp 2qRd\alpha \cos \alpha = 0, \quad (5)$$

де  $\sigma_x$ ,  $p$  - напруга у напрямі осі  $Ox$  та контактний тиск відповідно;  $q$  - інтенсивність сил тертя; при чому верхній знак "+" для зони відставання, а нижній - для зони випередження.

Використавши умову пластичності  $\sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2} = 2\tau_T$  [17] та знехтувавши другим доданком під радикалом у порівнянні з першим,  $\sigma_x - \sigma_y = 2\tau_T$  отримаємо звичайне диференціальне рівняння для плоскої деформації у вигляді

$$\frac{d\sigma_x}{dh} + \frac{\sigma_x + p}{h} \mp \frac{q}{htg\alpha} = 0, \quad (6)$$

де  $\tau_T$  - дотична напруга на стрічку. При цьому ми поклали, що  $\frac{dh}{d\alpha} = 2R \sin \alpha$  та врахували співвідношення (1). Скориставшись рівнянням  $\sigma_x - \sigma_y = 2\tau_T$ , та законом Кулона, диференціальне рівняння (6) спрощується

$$\frac{dp}{dh} \pm \frac{f}{htg\alpha} p - \frac{2\tau_T}{h} = 0. \quad (7)$$

Рівнянням (7) є лінійне диференціальне рівняння першого порядку із змінними коефіцієнтами. Його загальні розв'язки у зонах відставання та випередження відповідно мають вигляд

$$p = \frac{e^{I_1(\xi_0)}}{e^{I_1(\xi)}} \{ C_1 + 2\tau_T [I_2(\xi) - I_2(\xi_0)] \} \quad (8)$$

$$p = \frac{e^{I_1(\xi)}}{e^{I_1(1)}} \{ C_2 + 2\tau_T [I_3(\xi) - I_3(1)] \}, \quad (9)$$

де

$$I_1(\xi) = \int_1^\xi \frac{f da}{atg\alpha} = \frac{f}{tg\alpha} \ln \xi, \quad I_2(\xi) = \int_0^\xi \frac{e^{I_1(\xi)} d\xi}{e^{I_1(\xi_0)} \xi}, \quad I_3(\xi) = \int_0^\xi \frac{e^{I_1(1)} d\xi}{e^{I_1(\xi)} \xi}, \quad (10)$$

де  $\xi = h/h_2$ ,  $\xi_0 = h_0/h_2$ ,  $\xi_1 = h_1/h_2$

Сталі  $C_1$ ,  $C_2$  і  $h_0$  визначаються із відповідних граничних умов та співвідношення  $\sigma_x - \sigma_y = 2\tau_T$ ,

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x(h_1) &= N_1 / (bh_1), \quad a \quad p = p_1 = 2\tau_T - \sigma_{x1}, \\ \sigma_x(h_2) &= N_2 / (bh_2), \quad a \quad p = p_2 = 2\tau_T - \sigma_{x2}, \\ p^{(1)}(h_{0+}) &= p^{(2)}(h_{0-}), \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

де  $\sigma_{x1}, \sigma_{x2}, N_1, N_2, p_1, p_2$  - напруга, сили і контактний тиск на вході у валки і на виході з них;  $P^{(1)}$  і  $P^{(2)}$  - контактний тиск в зонах відставання і випередження відповідно.

З граничних умов (11) отримаємо три рівняння для визначення сталих  $C_1$ ,  $C_2$  і  $\xi_0$

$$p_1 = \frac{e^{I_1(\xi_0)} d\xi}{e^{I_1(\xi_1)} \xi} \{C_1 + 2\tau_T [I_2(\xi_1) - I_2(\xi_0)]\}, \quad p_2 = C_2, \quad C_1 = \frac{e^{I_1(\xi_0)} d\xi}{e^{I_1(1)} \xi} \{C_2 + 2\tau_T [I_3(\xi_0) - I_3(1)]\}$$

Після визначення контактного тиску і інтенсивності сил тертя можна обчислити силу і момент, що діють на валки.

Прокатка з підігрівом. Розглянемо математичну модель температурного поля стрічки, до якої електроконтактним способом підводиться постійний або імпульсний струм. Або обидва разом, у зону довжиною  $l$ , де один контакт до стрічки, а другий до валків [5,7]. Нехай тонка стрічка товщиною  $h_1 \rightarrow 0$  зі швидкістю  $v(t)$  рухається у напрямі осі  $Ox$ . Математична модель температурного поля області  $\Omega_t = \{0 < x < l, |z| < h_1, t > 0\}$  має вигляд

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} - \lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + c\rho v(t) \frac{\partial T}{\partial x} = w(t, T), \quad T(x, z, 0) = T_0, \quad T(0, z, t) = T_0, \quad T(l, z, t) = T_l, \quad (12)$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=\pm h_1/2} = \pm \left[ \alpha_2 (T - T_c) + \varepsilon \sigma (T^4 - T_c^4) \right]$$

де  $w(t, T) = \frac{I^2(t) \rho_0 (1 + \beta T)}{S^2}$  щільність джерел тепла,  $\alpha, \beta, \lambda, \rho, c$  - теплофізичні параметри стрічки та середовища,  $S$  - площа поперечного перетину стрічки.

Проведемо спрощення моделі (12), перейшовши до розгляду середньої, по товщині стрічки, температури

$$T(x, z, t) \cong T(x, t) = \frac{1}{h_1} \int_{-h_1/2}^{h_1/2} T(x, z, t) dz, \quad (13)$$

Провівши усереднення (13) та зваживши на граничні умови, будемо мати математичну модель у вигляді одновимірної нелінійної початково-крайової задачі для рівняння теплопровідності

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} - \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + c\rho v(t) \frac{\partial T}{\partial x} + \left[ \frac{2\alpha}{h_1} (T - T_0) + \frac{\varepsilon\sigma}{h_1} (T^4 - T_c^4) \right] = W(x, t, T), \quad 0 < x < l, \quad t > 0; \quad (14)$$

$$T(x, 0) = T_0, \quad T(0, t) = T_0, \quad T(l, t) = T_l$$

Знехтувавши перерозподілом тепла за рахунок теплопровідності, поклавши  $\lambda = 0$ , та втра- тами тепла з поверхні випромінюванням, поклавши  $\varepsilon = 0$  та  $I(t, T) = I = const$ ,  $v(t) = v = const$  отримаємо більш спрощену модель (14) у вигляді задачі Коші для звичайного диференціального рівняння першого порядку

$$\frac{dT}{dx} - \theta_1 u = -\chi_1, \quad 0 < x < l, \\ T(0) = T_0$$

$$\text{де } \chi_1 = \frac{-I^2 \rho_0 + 2\alpha T_0 s \sqrt{s}}{s^2 v c \rho_n}, \quad \theta_1 = \frac{\beta \rho_0 I^2 + 2\alpha s \sqrt{s}}{s^2 v c \rho_n}.$$

розв'язок якої має вигляд

$$T(x) = \frac{\chi_1}{\theta_1} + \left(T_0 - \frac{\chi_1}{\theta_1}\right) e^{\theta_1 x} \quad (15)$$

Використавши розв'язок (15) у якості початкової умови, чисельно-аналітичним методом, отримано розв'язок більш складної задачі в області  $\Omega_t = \{0 < x < l, t > 0\}$  поклавши у (14)  $\lambda = 0$ .

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} + c\rho v(t) \frac{\partial T}{\partial x} + \left[ \frac{2\alpha}{h_1}(T - T_0) + \frac{\varepsilon\sigma}{h_1}(T^4 - T_c^4) \right] = W(x, t, T), \quad T(0, t) = T_0, \quad T(x, 0) = \frac{\chi_1}{\theta_1} + \left(T_0 - \frac{\chi_1}{\theta_1}\right) e^{\theta_1 x} \quad (16)$$

При побудові математичної моделі (12) вважаємо, що у кожному перетині у напрямі осі  $Ox$  температурне поле залишається сталим.

Проведено чисельні експерименти та визначено температурні розподіли для конкретних технологічних процесів виготовлення стрічки.

На рис. 2 зображено температурні розподіли, отримані із розв'язків задачі (14), зони нагрівання постійно діючими внутрішніми джерелами тепла для різних значень параметра керування температурним полем – сили струму  $I$  при умові, що  $I(t, T) = I = const$ ,  $v(t) = v = const$ .

На рис. 3 зображено температурні розподіли, отримані із розв'язків задачі (16), зони нагрівання імпульсними внутрішніми джерелами тепла  $j = 10^7 \left[ \frac{A}{m^2} \right]$ ,  $\alpha = 1 \left[ \frac{W}{m^2 K} \right]$ ,  $v = 0,1 \left[ \frac{m}{c} \right]$ ,  $h_1 = 0,2 \cdot 10^{-4} [m]$ ,  $l = 0,5 \times 10^{-2} [m]$ .

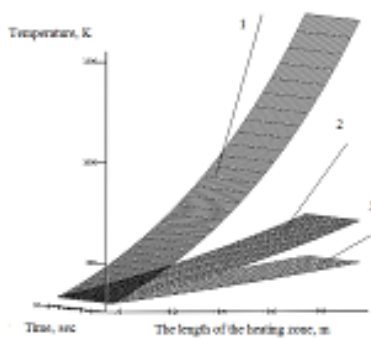


Рис. 2. Температурні розподіли отримані із розв'язків задачі (16). Крива 1-  $I=12A$

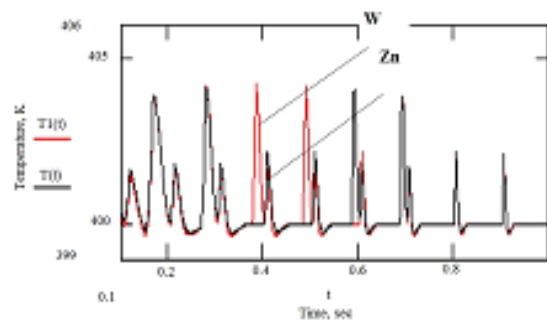


Рис. 3. Графіки температурних розподілів отримані для цинку та вольфраму із розв'язків (14), (16) при значеннях параметрів крива 2-  $I=8A$ , крива 3-  $I=6A$

**Висновки та напрямок подальших досліджень.** Побудовані математичні моделі для визначення енергосилових параметрів процесу плющення (прокатки) тонкої і надтонкої стрічки з тугоплавких і важкодеформованих металів, які дозволяють враховувати силову дію інструмента, зокрема валків прокатного стану, та температурний вплив дію струму та на стрічку. Проведені чисельні експерименти та побудовані, на основі розв'язків спрощених задач, температурні розподіли у зоні дії струму. Подальші дослідження будуть спрямовані на об'єднання математичних моделей (7)-(11) та (14), (16) з метою визначення оптимальних параметрів керування процесом прокатки тонкої і надтонкої стрічки.

#### Список літератури

1. Климов К.М. и др. Об электропластичности металлов // ж. ДАН СССР, 1974 т. 219, №2, С. 323-325.
2. Климов К.М. и др. Использование эффекта электропластичности для плющения проволоки// Приборы и системы управления, 1975, №10. - С. 5-53.
3. Климов К.М. и др. Изменение пластичности вольфрама под влиянием электрического тока// МТОМ, №1, с. 56-57, 1977.
4. Климов К.М. и др. Электропластическая прокатка проволок в ленту микронных сечений из вольфрама и его сплава с рением// Известия АН СССР, сер Металлы, №4, 1975. - С. 143-145.
5. Троицкий О.А. Новые направления фундаментальных и прикладных исследований электропластической деформации металлов// под. ред. В.Е. Громова. – Новокузнецк: Изд-во «СибГИУ», 2013. – С. 39-50
6. Жмакин Ю.Д., Кузнецов В.А., Романов Д.А. и др. Аппаратурное обеспечение экономических технологических процессов использующих электропластическую эффект// под. ред. В.Е. Громова. – Новокузнецк: Изд-во «СибГИУ», 2012. – С. 287 – 293

7. Северденко В.Н., Клубович В.В., Степаненко А.В., Обработка металлов давлением и ультразвуком// Минск, Наука и техника, 1973. - 288 с.
9. Ляшенко В.П. Температурное поле бесконечного цилиндра с движущимся источником тепла // Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, серія «Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління. – Харків: ХНУ, 2013. – Вип. 21 (№ 1058). – С. 97-103.
10. V. Lyashenko, T. Hryhorova Generalized Mathematical Model of Thermal Diffusion in Powder Metallurgy // AIP Conference Proceedings. – Sophia (Bulgaria), 2014. – 85(2014), P. 85 – 93.
11. V. Lyashenko, E. Kobilskaya Control of Heat Source in a Heat Conduction Problem // AIP Conference Proceedings. – Sophia (Bulgaria), 2014. – 85(2014), P. 94 – 101.
12. Victor Lyashenko, Tetiana Bryl, Elena Kobylskaya, Aleksandr Aniskov System of control of pulse processing with hyperfine wire during electroplastic deformation // XV International PhD Workshop OWD 2013. Conference archives PTEPIS, vol.33., 19-22 october. – Wisla, 2013. – P. 74 – 79.
13. Victor Lyashenko, Aleksandr Aniskov, Elena Kobilskaya. The process control of electroplastic deformation ultrafine wire // Proceeding of scientific and student's works in the field of Industrial Electrical Engineering. – Kosice, may 2013. – Volume 2, part 1. – P. 87-90.
14. Хилл Р. Математическая теория пластичности// М., Гостехтеоретиздат, 1956 г.
15. Ford H. Advanced mechanics of materials// E. Horwood ; New York : Halsted Press, 1977.
16. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести// М., Изд-во Машиностроение 1975г

Рукопис подано до редакції 08.04.16

УДК 622.625.28-83

И.О. СИНЧУК, А.Б. СЁМОЧКИН, кандидаты техн. наук, доц.,  
В.А. ФЕДОТОВ, ст. преподаватель, Криворожский национальный университет

## О ПРИНЦИПАХ МИНИМАЛЬНО СОУДАРЯЕМОГО И МАКСИМАЛЬНО ТОЧНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЕМ ВАГОНЕТОК РУДНИЧНЫХ ЭЛЕКТРОВЗОСОСТАВОВ

При разгрузке-погрузке шахтный электропоезд передвигается рывками, при этом в сцепных устройствах возникают удары, снижающие их срок службы, а точность позиционирования оставляет желать лучшего. В работе авторами выявлены закономерности движения поезда, и выведено выражение, позволяющее с минимальными ударами в сцепках рассчитывать перемещение вагонетки в функции тахограммы скорости электровоза, а также наличия руды в вагонетках. Точность позиционирования вагонеток при перемещении на 0,6 м составляет для 1-й вагонетки не более 4%, а для восьмой вагонетки – не более 13%.

**Ключевые слова:** шахтный электропоезд, сцепное устройство, упругие удары, точность

**Проблема и ее связь с научными и практическими заданиями.** Железородная промышленность и ее базовая технологическая слагаемая - горнорудная, являются основным источником пополнения валютных запасов Украины [1,2]. В последние 5-8 лет акцент в выборе способа добычи железорудного сырья (ЖРС) делается на подземный (шахтный) [3].

К сожалению, в силу естественного понижения глубин добычи ЖРС в отечественных железорудных шахтах ниже проектных 1500-2000 м себестоимость его имеет постоянную тенденцию к росту [3]. Весомой слагаемой себестоимости является способ доставки ЖРС от места добычи до подъема его на дневную поверхность, В отечественных железорудных шахтах, как впрочем и в большинстве зарубежных, доставка ЖРС осуществляется электровозосоставами (ВШТ), ведомыми специальными видами двухосных электровозов [4].

**Анализ исследований и публикаций.** Как следует из результатов исследований ряда авторов, показатели функционирования (ВШТ) отечественных железорудных шахт оставляют желать лучшего [5-8]. Все те же исследования подтверждают существующее априорное мнение, что реальным способом повышения эффективности функционирования ВШТ является его автоматизация, что для железорудных шахт в отличие других подземных предприятий подразумевает создание базовых локальных систем (подсистем) управления движением электровозосоставов по отдельным видам горных выработок [9]. Как установлено [9], режим движения электровозосоставов в подземных горных выработках определяется их видом, и это определяет режим работы тягового электропривода электровоза (ТЭП). На рис. 1 представлены осцилло-