

РОЗРАХУНОК ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМАХ ШАХТНИХ ПІДЙОМНИХ МАШИН

Михальченко Є. А., Клімченкова Н. В.

С целью уменьшения динамических нагрузок и увеличения долговечности эксплуатации подъемных установок применяют тахограммы со сглаженными отрезками переходов между скоростями, без скачкообразного изменения ускорения. При таком подходе ограничивается рывок. Величина рывка не только формирует динамические нагрузки в элементах подъемной системы, но и влияет на ощущения человека в клеті. Оптимальной тахограммой движения груза, при которой отсутствуют колебания, является трапецеидальный закон изменения ускорения системы. В статье выполняется расчет динамических процессов в электромеханических системах шахтных подъемных машин с двигателями постоянного тока, в которых реализуется трапецеидальный закон изменения ускорения. Рассмотренная методика расчета динамических процессов в электромеханических системах шахтных подъемных машин с двигателями постоянного тока позволит наладчикам и исследователям шахтных подъемных установок сформулировать новые требования и создать современные системы регулирования.

З метою зменшення динамічних навантажень і збільшення довговічності експлуатації підйомних установок застосовують тахограми зі згладженими відрізкамі переходів між швидкостями, без стрибкоподібного змінення прискорення. При такому підході обмежується ривок. Величина ривка не тільки формує динамічні навантаження в елементах підйомної системи, а й впливає на відчуття людини в кліті. Оптимальною тахограмою руху вантажу, при якій відсутні коливання, є трапецеїдальний закон зміни прискорення системи. В статті виконується розрахунок динамічних процесів у електромеханічних системах шахтних підйомних машин з двигунами постійного струму, в яких реалізується трапецеїдальний закон зміни прискорення. Розглянута методика розрахунку динамічних процесів у електромеханічних системах шахтних підйомних машин з двигунами постійного струму дозволить наладчикам і дослідникам шахтних підйомних установок сформулювати нові вимоги і створити сучасні системи регулювання.

In the article, features of mathematical representation in the asynchronous engine as the generalized electric has been presented. In order to reduce the dynamic loads and increase the longevity of the lifting plants operation, tachogram with smooth segments between speeds, without a jump-like change in acceleration, are used. With such an approach, the tug is limited. The size of the tug has not only generates dynamic loads in the elements of the lifting system, but also affects the feelings of a person in the cage. The optimal tachogram of cargo movement, in which there is no fluctuation, is the keystone of the law changing the acceleration in the system. The article deals with the calculation of dynamic processes in electromechanical systems of mine lifting machines with DC motors, which implements the trapezoidal law of acceleration changes. The method of calculation in dynamic processes electromechanical systems of mine lifting machines with DC motors is considered. It will allow installers and researchers of mine lifting plants to formulate new requirements and create modern control systems.

Клімченкова Н. В.

канд. техн. наук, доц. каф. ЕСА ДДМА

Михальченко Є. А.

магістр каф. ЕСА ДДМА
evgeshahouse@gmail.com

УДК 622.6:62-523

Михальченко Є. А., Клімченкова Н. В.

РОЗРАХУНОК ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМАХ ШАХТНИХ ПІДЙОМНИХ МАШИН

Підйомна установка складається з підйомного обладнання і гірничотехнічних споруд. До підйомного устаткування відносяться: підйомні машини, підйомні посудини і канати, розвантажувальні і завантажувальні пристрої.

Сучасний привод підйомних машин і лебідок є електричним. На підйомних машинах з потужністю електроприводу 250 кВт і менше застосовуються низьковольтні двигуни, а при більшій потужності – високовольтні двигуни напругою 6 кВ.

Шахтні підйомні машини працюють, як правило, в так званому повторно-короткочасному режимі, а це означає, що, наприклад, протягом робочої зміни двигун безліч разів вмикається і вимикається. В інтервалах між цими подіями двигун виконує рутинну роботу: розганяє масивну машину до необхідної швидкості, змушує рухатися всю систему з цією постійною швидкістю, потім змушує всю систему рухатися з уповільненням до стопоріння. Звичайно, такий режим викликає підвищене нагрівання силових обмоток двигуна (хоча в ньому є, як правило, примусова вентиляція), а це, в свою чергу, веде до передчасного «старіння» ізоляції і в кінцевому підсумку – до виходу з ладу двигуна в цілому. Тому дослідження динамічних процесів електромеханічних системах шахтних підйомних машин є актуальною науково-технічною проблемою.

З метою зменшення динамічних навантажень і збільшення довговічності експлуатації підйомних установок застосовують тахограми зі згладженими відрізками переходів між швидкостями, без стрибкоподібного змінення прискорення [1]. При такому підході обмежується ривок. Величина ривка не тільки формує динамічні навантаження в елементах підйомної системи, а й впливає на відчуття людини в кліті. Вплив цього фізіологічного фактора залежить не від величини швидкості, і не стільки від величини прискорення, скільки від темпу зміни прискорення, тобто від ривка [2]. У відповідності до досліджень [3] оптимальною тахограмою руху вантажу, при якій відсутні коливання, є трапецеїдальний закон зміни прискорення системи. При цьому періоди наростання і зменшення прискорення рівні періоду власних коливань гілки канату з навантаженою посудиною, розташованою у крайньому нижньому положенні. Справедливість цього твердження підтверджено щодо динамічних процесів при гальмуванні шахтних підйомних установок [4].

Метою роботи є виконання розрахунку динамічних процесів у електромеханічних системах шахтних підйомних машин з двигунами постійного струму, в яких реалізується трапецеїдальний закон зміни прискорення.

Для шахтних підйомних установок, у відповідності до вимог ОНТП-5-86 [5], прискорення в період основного розгону не повинно перевищувати $1,0 \text{ м/с}^2$, при цьому в початковий момент зрушення прискорення повинно бути менше $0,3 \text{ м/с}^2$. Виходячи з умови отримання мінімальних динамічних навантажень при пуску, ці рівні прискорень повинні формуватися за час, кратний періоду коливань навантаженої гілки канату. При цьому, коливальний процес в порожній гілці канату не буде мінімізований. Оскільки рівень навантажень в порожній гілці приблизно в два рази менше ніж в навантаженої, питання про отримання мінімальних навантажень в порожній гілці на даному етапі не ставиться. Отже, прискорення $0,3 \text{ м/с}^2$ повинно бути досягнуто впродовж часу, що дорівнює періоду коливань, залишаючись рівним цій величині до тих пір, поки не буде пройдено шлях, що дорівнює довжині розвантажувальних кривих. Після цього прискорення від величини $0,3 \text{ м/с}^2$ повинно зрости

до заданої верхньої межі впродовж часу, що дорівнює періоду вільних коливань. При наближенні швидкості машини до максимальної прискорення повинно зменшитися до нуля впродовж періоду вільних коливань. При високих швидкостях руху шлях розгону може досягати значної величини. В результаті періоди коливань на початку і в кінці процесу розгону можуть відрізнятися. Цей факт необхідно враховувати при формуванні рушійного зусилля і при чисельному інтегруванні динамічного процесу.

Для здійснення рушійного зусилля необхідно сформулювати відповідний закон зміни напруги U , що підводиться до електродвигуна. Через наявність індуктивності обмоток, привод постійного струму має електромагнітну сталю часу. Вплив сталої часу необхідно врахувати при формуванні завдання. Електромагнітна стала часу електродвигуна визначається в основному індуктивністю і активним опором обмотки збудження. Для приводу шахтного підйому, в робочому циклі, магнітний потік обмотки збудження двигуна – постійна величина. Отже, електромагнітна стала часу приводу постійного струму буде визначатися в основному сталою часу джерела напруги. Якщо в якості регульованого джерела напруги застосовується генератор постійного струму, то електромагнітна стала часу визначиться параметрами обмотки збудження генератора:

$$\tau_{\text{э}} = \frac{L_{\text{э}}}{R_{\text{э}}},$$

де $L_{\text{э}}$ – індуктивність обмотки збудження;

$R_{\text{э}}$ – активний опір обмотки збудження.

Величина електромагнітної сталої часу для потужних машин може досягати 3 с [2]. Електромагнітна стала часу обмотки якоря в багато разів менше сталої часу обмотки збудження і, як правило, першою можна знехтувати. Для зменшення електромагнітної сталої часу обмотки збудження в її коло включається додатковий активний опір.

Якщо на обмотку збудження, що має індуктивність $L_{\text{э}}$ і активний опір $R_{\text{э}}$, подано напругу $U_{\text{э}}(t)$, то зміна струму в такому колі характеризується відомим рівнянням [2]:

$$i' = \frac{1}{\tau_{\text{э}} \cdot R_{\text{э}}} \cdot U_{\text{э}}(t) - \frac{1}{\tau_{\text{э}}} \cdot i.$$

Між струмом i та напругою генератора U існує пряма пропорційність, тому:

$$U = k_y \cdot i,$$

де k_y – коефіцієнт підсилення.

Зусилля, що розвивається електродвигуном:

$$F_{\text{дв}}(x') = \frac{1}{R_{\text{я}} \cdot I_{\text{н}}} \cdot \left(k_y \cdot i - \frac{60 \cdot C_e \cdot \Phi}{\pi \cdot D} \cdot x' \right) \cdot F_{\text{н}},$$

де $F_{\text{н}} = 2 \cdot g \cdot 975 \cdot \frac{N_{\text{н}}}{n_{\text{н}} \cdot D}$ – номінальне зусилля двигуна, Н.

Динамічні процеси шахтної підйомної установки, представлена трьох масовою механічною системою з в'язкопружними зв'язками характеризується системою рівнянь [6, 7]:

$$\begin{cases} m_x \cdot x'' + \mu_y \cdot (x' - y') + \mu_z \cdot (x' - z') + c_y \cdot (x - y) + c_z \cdot (x - z) = -F_{cm}(x) - F_m(t) + F_{\delta\delta}(x'); \\ m_y \cdot y'' + \mu_y \cdot (y' - x') + c_y \cdot (y - x) = -P_y \cdot \text{sign}(y'); \\ m_z \cdot z'' + \mu_z \cdot (z' - x') + c_z \cdot (z - x) = -P_z \cdot \text{sign}(z'), \end{cases}$$

де x, y, z – відповідно координати переміщень органу навивки, навантаженої і порожньої судини;

m_x, m_y, m_z – відповідно маси обертових частин машини, навантаженої і порожньої судини, з урахуванням маси канатів, обчислених, використовуючи принцип Релея; $F_{cm}(x) = g \cdot (k \cdot m_n + p \cdot H_n - 2 \cdot p \cdot x)$ – функція, що характеризує зміну статичних опорів в залежності від координати переміщення машини x ;

$F_m(t)$ – функція, що характеризує зміну гальмівного зусилля в залежності від значення поточного часу t ;

c_y, c_z, μ_y, μ_z – коефіцієнти, що характеризують жорсткість і дисипативні властивості гілок канатів [8];

P_y, P_z – сили шкідливого опору для завантаженої і порожньої гілок, Н;

sign – функція Кронеккера, яка показує, що при зміні знаку швидкості змінюється напрямок сили опору.

Таким чином, для вивчення динамічних процесів шахтної підйомної установки з приводом постійного струму з незалежним збудженням необхідно розв'язати наступну систему диференціальних рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} i' = \frac{1}{\tau_\delta R_\delta} \cdot U_\delta(t) - \frac{1}{\tau_\delta} \cdot i \\ x'' = \frac{1}{m_x} \cdot \left\{ (y' - x') \cdot \frac{\delta}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot F_k}{l_y - y} \cdot \left[m_{cy} + \frac{1}{3} p \cdot (l_y - y) \right]} + (z' - x') \cdot \frac{\delta}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot F_k}{l_z + z} \cdot \left[m_{cz} + \frac{1}{3} p \cdot (l_z + z) \right]} + \right. \\ \left. + (y - x) \cdot \frac{E \cdot F_k}{l_y - y} + (z - x) \cdot \frac{E \cdot F_k}{l_z + z} - F_{cm}(x) - F_m(t) + \frac{1}{R_\delta \cdot I_n} \cdot \left(k_y \cdot i - \frac{60 \cdot C_e \cdot \Phi}{\pi \cdot D} \cdot x' \right) \cdot F_n \right\}; \\ y'' = \frac{1}{m_{cy} + \frac{1}{3} p \cdot (l_y - y)} \cdot \left\{ (x' - y') \cdot \frac{\delta}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot F_k}{l_y - y} \cdot \left[m_{cy} + \frac{1}{3} p \cdot (l_y - y) \right]} + (x - y) \cdot \frac{E \cdot F_k}{l_y - y} - P_y \cdot \text{sign}(y') \right\}; \\ z'' = \frac{1}{m_{cz} + \frac{1}{3} p \cdot (l_z + z)} \cdot \left\{ (x' - z') \cdot \frac{\delta}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot F_k}{l_z + z} \cdot \left[m_{cz} + \frac{1}{3} p \cdot (l_z + z) \right]} + (x - z) \cdot \frac{E \cdot F_k}{l_z + z} - P_z \cdot \text{sign}(z') \right\}. \end{array} \right.$$

У цій системі перше рівняння характеризує зміну струму в обмотці збудження при подачі на її затискачі напруги $U_\delta(t)$. Друге рівняння характеризує прискорення машини з урахуванням зміни статичних опорів $F_{cm}(x)$, гальмівного зусилля $F_m(t)$, рушійного зусилля в залежності від струму i та швидкості машини x' , яке визначається останнім членом функції x'' . Жорсткості c_y, c_z , і коефіцієнти дисипації μ_y, μ_z , (коефіцієнти при $(y - x), (z - x), (y' - x'), (z' - x')$) змінюються в динаміці і залежать від переміщень y

навантаженої і z порожньої судин. Значення l_y і l_z – довжини канатів навантаженої і порожньої гілок на початку процесу пуску. Третє і четверте рівняння характеризують зміну прискорень y'' і z'' , при цьому враховуються зміни кінцевих мас, жорсткостей та коефіцієнтів дисипації.

Період вільних коливань навантаженої судини визначиться за формулою:

$$T_y = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{m_x \cdot m_y}{c_y \cdot (m_x + m_y)}}.$$

Для шахтної підйомної машини 2Ц5х2,8 на початку процесу розгону $l_y = 509$ м, $T_y = 1,808$ с. Щоб визначити вимоги до закону формування рушійного зусилля, яке забезпечує мінімальні динамічні навантаження, розрахуємо кінематичні параметри установки в період розгону.

Прискорення машини повинно змінюватися по характеристикам, показаним на рис. 1. Періоди часу t_0 , t_2 і t_4 повинні бути рівними періодам вільних коливань навантаженої судини, відповідно в ці моменти часу. Так як переміщення вантажу на ділянках t_0 і t_1 дорівнює шляху в розвантажувальних кривих $h_0 = 2,17$ м, частоти коливань практично не змінюються. Прийнемо $t_0 = t_2 = T_y$. Прискорення на початку процесу розгону зростає до величини $a_0 = 0,3 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ за час $T_y = 1,808$ с.

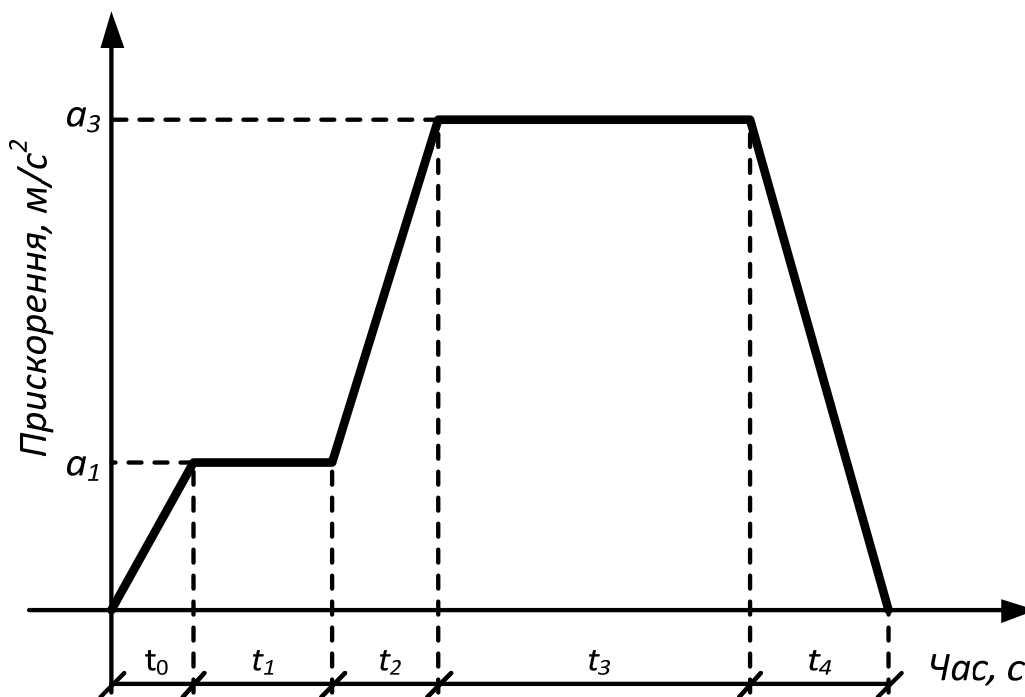


Рис. 1. Змінення прискорення у електромеханічній системі підйомної машини

Поточне значення кінематичних параметрів на цьому відрізку часу:

$$x'' = \rho_0 \cdot t; \quad x' = \rho_0 \cdot \frac{t^2}{2}; \quad x = \rho_0 \cdot \frac{t^3}{6}.$$

В цих розрахунках $\rho_0 = \frac{a_1}{T_y} = \frac{0,3}{1,808} = 0,166 \text{ м/с}^3$ – ривок. При $t = T_y$ прискорення,

швидкість і переміщення набувають відповідно $a_1 = 0,3 \text{ м/с}^2$, $v_0 = 0,271 \text{ м/с}$, $x_0 = 0,327 \text{ м}$. Досягнувши прискорення a_1 , машина рухається рівноприскорено до моменту, поки підйомна судина не вийде з розвантажувальних кривих, тобто $y = h_0$. Для укрупненого розрахунку, на даному етапі прийемо $x \approx y$. Отже, кінематичні параметри періоду t_1 наступні:

$$x'' = a_1; \quad x' = v_0 + a_1 \cdot t; \quad x = x_0 + v_0 \cdot t + \frac{1}{2} \cdot a_1 \cdot t^2.$$

В цих розрахунках поточне значення часу t змінюється від нуля, тобто дійсний час, для даного періоду, більше на T_y . Такий підхід дає можливість записати нижче наведені вирази менш громіздко. В кінці періоду t_1 :

$$x_1'' = a_1; \quad x_1' = v_0 + a_1 \cdot t_1; \quad x_1 = h_0 = x_0 + v_0 \cdot t_1 + \frac{1}{2} \cdot a_1 \cdot t_1^2.$$

Цей період рівноприскореного руху повинен тривати до моменту, поки маса m_y не пройде шлях $y = h_0$. З останнього рівняння:

$$t_1 = \sqrt{\left(\frac{T_y}{2}\right)^2 + \frac{2}{a_1 \cdot (h_0 - x_0)}} - \frac{T_y}{2} = 2,7 \text{ с}.$$

Отже, швидкість виходу з розвантажувальних кривих $v_1 = v_0 + a_1 \cdot t_1 = 1,08 \text{ м/с}$, тобто менше допустимої $1,5 \text{ м/с}$. На відрізку часу t_2 кінематичні параметри мають наступні характеристики:

$$\rho_2 = \frac{a_3 - a_1}{T_y}; \quad x'' = a_1 + \rho_2 \cdot t; \quad x' = v_1 + a_1 \cdot t + \rho_2 \cdot \frac{t^2}{2}; \quad x = x_1 + v_1 \cdot t + a_1 \cdot \frac{t^2}{2} + \rho_2 \cdot \frac{t^3}{6}.$$

Підставивши час $t = t_2 = T_y$, отримаємо значення кінематичних параметрів в кінці періоду t_2 :

$$\rho_2 = 0,36 \text{ м/с}^3; \quad a_3 = 0,95 \text{ м/с}^2; \quad v_2 = 2,8 \text{ м/с}; \quad x_2 = 4,613 \text{ м}.$$

У період t_3 машина рухається рівноприскорено з прискоренням $a_3 = 0,95 \text{ м/с}^2$. Отже:

$$x'' = a_3; \quad x' = v_2 + a_3 \cdot t; \quad x = x_2 + v_2 \cdot t + a_3 \cdot \frac{t^2}{2}.$$

Розгін машини з прискоренням a_3 повинен здійснюватися до швидкості v_3 , яка вибирається такою, щоб машина досягла максимальної швидкості за час $t_4 = T_y$ за умови, що за цей час прискорення знизиться до нуля. Для визначення періоду коливань на цьому відрізку часу з урахуванням зміни довжини канату завантаженої гілки і еквівалентних мас m_y і m_z можна прийняти:

$$v_3 = V_{max} = 10,68 \text{ м/с}; t_3 = \frac{V_{max} - v_2}{a_3} = 8,47 \text{ с}; x_3 = x_2 + v_2 \cdot t_3 + a_3 \cdot \frac{t_3^2}{2} = 62,406 \text{ м.}$$

Тоді період коливань навантаженого судини на цій ділянці буде

$$T_y = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{(m_y + \frac{p \cdot x}{3}) \cdot (m_x + \frac{p \cdot x}{3})}{\frac{E \cdot F}{l_{y-x}} \cdot (m_x + \frac{p \cdot x}{3} + m_y + \frac{p \cdot x}{3})}} = 1,723 \text{ с, а кінематичні параметри будуть наступними:}$$

$$t_4 = 1,723 \text{ с}; \rho_4 = -\frac{a_3}{t_4}; x'' = a_3 - \rho_4 \cdot t; x' = v_3 + a_3 \cdot t - \rho_4 \cdot \frac{t^2}{2}; x = x_3 + v_3 \cdot t + a_3 \cdot \frac{t^2}{2} - \rho_4 \cdot \frac{t^3}{6}.$$

ВИСНОВКИ

Розглянута методика розрахунку динамічних процесів у електромеханічних системах шахтних підйомних машин з двигунами постійного струму дозволить налагоджувати і дослідникам шахтних підйомних установок сформулювати нові вимоги і створити сучасні системи регулювання [9]. Реалізація цих розробок дозволить підвищити надійність і безпеку експлуатації шахтних підйомних установок, в тому числі покращить надійність зчеплення канатів з барабаном тертя багатоканатних машин. Всі виконані розрахунки можуть бути досить просто інтерпретовані у вигляді як спеціалізованого програмного коду, так і у вигляді документів математичних програмних пакетів Mathcad та MATLAB.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Тулин В. С. *Электропривод и автоматика многоканатных подъёмных машин* / В. С. Тулин. – М. : Недра, 1964. – 194 с.
2. Гейлер Л. Б. *Электропривод в тяжелом машиностроении* / Л. Б. Гейлер. – М. : Машигиз, 1958. – 587 с.
3. Киричок Ю. Г. *Привод шахтных подъёмных машин большой мощности* / Ю. Г. Киричок, В. М. Чермалых. – М. : Недра, 1972. – 336 с.
4. Степанов А. Г. *Динамика машин* / Ю. Г. Киричок, В. М. Чермалых ; Российская академия наук. – Екатеринбург, 1999. – 392 с.
5. *Общесоюзные нормы технологического проектирования шахтных подъёмных установок. ОНТП-5-86. Минуглепром СССР. – М., 1986. – 27 с. – (Изменения 1987. – 19 с.).*
6. Малиновский А. К. *Автоматизированный электропривод машин и установок шахт и рудников : Учебник для вузов* / А. К. Малиновский. – М. : Недра, 1987. – 277 с.
7. Белов М. П. *Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов : учебник для вузов* / М. П. Белов, В. А. Новиков, Л. Н. Рассудов. – М. : Издательский центр «Академия», 2004. – 576 с.
8. *Шахтный подъем : научно-производственное издание* / Бежок В. Р., Дворников В. И., Манец И. Г., Пристром В. А. ; общ. ред. Б. А. Грядущий, В. А. Корсун. – Донецк : ООО «Юго-Восток, Лтд», 2007. – 624 с.
9. Самородов А. И. *Повышение надежности подъёмных установок, находящихся в длительной эксплуатации* / А. И. Самородов // *Уголь Украины. – 1997. – № 11. – С. 10–12.*