

considerably shorter than that of other details. The surface of bandage is covered with forming elements – cells of lenticular shape. The increase of the productivity of roller presses used for briquetting of wastes of mining and metallurgical complexes of Ukraine was the purpose of the work. The process of briquetting of small fraction wastes of mining-metallurgical industry was studied at Volnogorsk mining-metallurgical combine. Following basic factors influencing on the performance of roller presses and on quality of product were considered: batch feeding process from the load bunker into the area of pressing; nature of damage of forming cells of working surface by width; material the band is made of and its thermal treatment; physical and mechanical properties of small fraction of industrial wastes determining their behavior during briquetting. On the basis of the conducted researches it was determined that the central

failure of roller presses is nonuniform batch feeding from the load bunker into the area of pressing. The failure results unequal damage of working surface by width and is the main cause of spoilage in production.

A new batch feeding mechanism has been developed. It allows controlling the level of batch in the area of pressing, equalizing the stream of batch, and providing filling of cavity of each cell uniformly. Due to compression of batch before it occurs on rolls the surface of its contact with band diminishes. Thus the nonuniform damage of cells decreases and the operability of roller presses increases.

Keywords: *band, wear, cell, roller presses, friction*

Рекомендовано до публікації докт. техн. наук С.Є. Блохіним. Дата надходження рукопису 30.05.11

УДК 531.3+621.313.32

**Б.В. Виноградов, д-р техн. наук, проф.,
Д.А. Федін, канд. техн. наук**

Государственное высшее учебное заведение „Украинский государственный химико-технологический университет“, г. Днепропетровск, Украина, e-mail: bvvin@mail.ru

МЕХАНИЧЕСКИЙ АНАЛОГ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

**B.V. Vinogradov, Dr. Sci. (Tech.), Professor,
D.A. Fedin, Cand. Sci. (Tech.)**

State Higher Educational Institution “Ukrainian State University of Chemical Technology”, Dnepropetrovsk, Ukraine, e-mail: bvvin@mail.ru

MECHANICAL ANALOG OF SYNCHRONOUS MOTOR

Статья посвящена теоретическому исследованию динамики синхронных двигателей барабанных мельниц. Целью работы является исследование упругой характеристики синхронных двигателей, обоснование их математической модели и составление расчетных зависимостей для определения электромагнитной жесткости. В работе представлена эквивалентная схема синхронного двигателя как осциллятора колебаний. Показано, что важнейшим параметром механической системы привода является электромагнитная жесткость синхронного двигателя. Показано, что электромагнитные характеристики синхронных двигателей существенно зависят от переходных процессов в электромагнитной системе привода. Приведена методика расчета коэффициента жесткости синхронного двигателя. Коэффициент жесткости определяется на основании исследования параметров колебаний электромагнитного момента под действием скачкообразного изменения момента сопротивления. Установлено, что в рабочем диапазоне нагрузок упругую характеристику синхронных двигателей можно аппроксимировать линейной зависимостью, характеризующейся постоянным коэффициентом жесткости. Проведены численные исследования динамики ряда синхронных двигателей. Исходные данные для расчетов получены на основании данных клиентских формуляров соответствующих двигателей. Расчеты производились путем интегрирования уравнений Парка-Горева. Представлены результаты расчета частоты собственных колебаний, коэффициента электромагнитной жесткости и коэффициента диссипации энергии колебаний соответствующих двигателей. Получены зависимости, позволяющие определить электромагнитную жесткость синхронных двигателей вблизи номинальных режимов работы в зависимости от мощности двигателя и частоты вращения ротора. Показано, что в первом приближении электромагнитная жесткость прямо пропорциональна мощности двигателя и обратно пропорциональна кубу частоты вращения. Получены также расчетные зависимости для определения угла выбега ротора и частоты собственных колебаний синхронного двигателя.

Ключевые слова: *синхронный двигатель, осциллятор колебаний, математическая модель, крутильная жесткость*

Постановка проблемы. Электромагнитные характеристики синхронных двигателей существенно влияют на переходные процессы в электромеханических системах приводов технологического оборудования [1]. Наиболее полно электромагнитные про-

цессы синхронных двигателей описываются уравнениями Парка-Горева, которые в относительных единицах выглядят следующим образом [1]

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d\psi_d}{dt} &= U_m \sin \theta - i_d r_a - \psi_q \omega, \\ \frac{d\psi_q}{dt} &= U_m \cos \theta - i_q r_a + \psi_d \omega, \\ \frac{d\psi_f}{dt} &= U_f - i_f r_f, \\ \frac{d\psi_{\varepsilon d}}{dt} &= -i_{\varepsilon d} r_{\varepsilon d}, \\ \frac{d\psi_{\varepsilon q}}{dt} &= -i_{\varepsilon q} r_{\varepsilon q}, \\ M_{\varepsilon m} &= \psi_q i_d - \psi_d i_q, \\ \frac{d\omega}{dt} &= \frac{1}{H} [M_{\varepsilon m} - M_c], \\ \frac{d\theta}{dt} &= 1 - |\omega|, \end{aligned} \right. \quad (1)$$

где

$$\begin{aligned} i_d &= \frac{\psi_d}{X''_d} - \frac{\psi_f}{X''_{df}} - \frac{\psi_{\varepsilon d}}{X''_{d\varepsilon d}}; \\ i_q &= \frac{\psi_q}{X''_q} - \frac{\psi_{\varepsilon q}}{X''_{q\varepsilon q}}; \\ i_f &= \frac{\psi_f}{X''_f} - \frac{\psi_d}{X''_{df}} - \frac{\psi_{\varepsilon d}}{X''_{f\varepsilon d}}; \\ i_{\varepsilon d} &= \frac{\psi_{\varepsilon d}}{X''_{\varepsilon d}} - \frac{\psi_d}{X''_{d\varepsilon d}} - \frac{\psi_f}{X''_{f\varepsilon d}}; \\ i_{\varepsilon q} &= \frac{\psi_{\varepsilon q}}{X''_{\varepsilon q}} - \frac{\psi_q}{X''_{q\varepsilon q}}, \end{aligned}$$

где Ψ_d, Ψ_q – потокосцепление обмотки статора по продольной и поперечной оси соответственно; Ψ_f – потокосцепление обмотки возбуждения; $\Psi_{\varepsilon d}, \Psi_{\varepsilon q}$ – потокосцепление демпферной обмотки по продольной и поперечной оси соответственно; U_m – амплитуда фазного напряжения; U_f – напряжение обмотки возбуждения; ω – угловая скорость вала; H – момент инерции; $M_{\varepsilon m}$ – электромагнитный момент двигателя; M_c – момент сопротивления; θ – угол между вектором приведенной в статоре е.д.с. от тока возбуждения и вектором напряжения сети; $r_a, r_f, r_{\varepsilon d}, r_{\varepsilon q}$ – активные сопротивления фазы статора, обмотки возбуждения, демпферной обмотки по продольной и поперечной оси соответственно; $X_d, X_f, X_{\varepsilon d}, X_{df}, X_{d\varepsilon d}, X_{f\varepsilon d}, X_q, X_{\varepsilon q}, X_{q\varepsilon q}$ – сверхпереходные сопротивления.

Интегрирование уравнений (1) позволяет получить зависимость от времени как электрических, так и механических параметров привода. Однако возникают значительные трудности при подготовке исходных данных в связи с их отсутствием в справочной литературе. Поэтому в ряде случаев, в частности при исследовании динамических процессов в механической системе привода, целесообразно представить синхронный двигатель в виде осциллятора механических колебаний.

Анализ исследований. Известно, что синхронный двигатель представляет собой осциллятор коле-

баний, динамические параметры которого определяются упругой характеристикой электромагнитной связи ротора со статором [1], эквивалентная динамическая схема которого представлена на рис. 1, где J – момент инерции ротора, $c_{\partial \varepsilon}$ – электромагнитная жесткость двигателя. Однако, в литературе отсутствуют рекомендации по определению электромагнитной жесткости синхронных двигателей.

Постановка задачи. Целью данной работы является исследование упругой электромагнитной характеристики синхронных двигателей, обоснование их математической модели и установление расчетных зависимостей для определения крутильной жесткости двигателей.

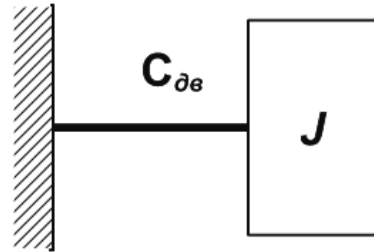


Рис. 1. Механическая модель синхронного двигателя

Методика проведения исследований и анализ результатов. Для подтверждения адекватности принятой модели был проведен ряд численных экспериментов, целью которых являлось определение динамических параметров для разного типа двигателей.

В таблице приведены основные характеристики исследованных двигателей. Исходные данные для расчетов взяты из клиентских формуляров соответствующих двигателей.

Методика определения коэффициента жесткости $c_{\partial \varepsilon}$ заключалась в следующем.

На вал двигателя подавался момент сопротивления M_c , изменяющийся плавно по линейному закону. В некоторый момент времени, после вхождения двигателем в синхронный режим, момент сопротивления скачком увеличивается до значения $0,8M_{НОМ}$, $1 M_{НОМ}$ и $1,5 M_{НОМ}$, в результате чего в системе возникают свободные колебания. На рис. 2 приведены графики изменения величины $M_{\varepsilon m}$ от времени для двигателя №7 (таблица).

Из рис. 2 видно, что при внезапном приложении статической нагрузки на вал двигателя изменение момента $M_{\varepsilon m}$ имеет характер затухающих колебаний с собственной частотой k относительно равновесного значения. Анализ результатов расчета показал, что в рассматриваемом диапазоне прилагаемых нагрузок частота и период колебаний практически не зависят от амплитуды колебаний, что указывает на линейный характер упругой характеристики двигателя. Этот факт позволил определить частоту собственных колебаний k по расчетному значению периода колебаний T [1]

$$k = \frac{2\pi}{T},$$

где T – период свободных колебаний электромагнитного момента двигателя.

Характеристики синхронних двигателів

№	Тип двигателя	Мощность, N, кВт	Частота вращения ротора, n, об/мин	Момент инерции, Н×10 ⁴ , кг·м ²	Частота собственных колебаний электромагнитного момента, k, с ⁻¹	Кoeff. электр. жесткости, c _{дв} ×10 ⁷ , Н·м	Кoeff. диссипации энергии колебаний, ψ	Угол закручивания (деформации) магнитного поля, θ, рад
1	СДКП 2-21-46-20 ФУ4	5000	300	1,39	10,89	0,16	0,92	0,82
2	СДНЗ 2-21-64-40 У4	3150	150	1,93	35,30	2,41	0,83	0,27
3	СДНЗ 2-18-64-12 ФУ4	2500	500	0,35	17,21	0,10	0,79	0,56
4	СДМЗ 2-21-91-40УХА4	4000	150	3,0	28,95	2,52	0,88	0,38
5	СДМЗ 2-24-59-80	4000	75	25,0	23,27	13,5	0,83	0,25
6	СДС 19-56-40	2500	150	1,28	34,52	1,52	0,73	0,35
7	СДС 19-46-40	2000	150	1,28	30,21	1,16	0,71	0,38

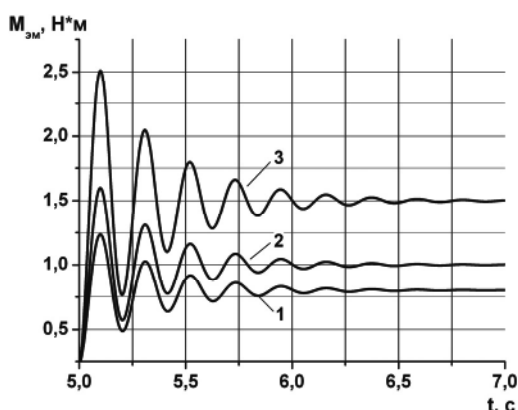


Рис. 2. Зависимость электромагнитного момента двигателя (M_{эм}) от времени (t) при скачкообразном изменении момента сопротивления: 1–M_C=0,8 M_{НОМ}; 2–M_C=1 M_{НОМ}; 3–M_C 1,5 M_{НОМ}

Учитывая, что

$$k^2 = \frac{c_{дв}}{J},$$

где J – момент инерции, получаем выражение для расчета величины коэффициента электромагнитной жесткости двигателя, Н·м

$$c_{дв} = k^2 J. \tag{2}$$

Следуя принятой модели, одновременно определялся коэффициент диссипации энергии колебаний ψ момента по формуле [1]

$$\psi = 1 - A_{n+1}^2 / A_n^2,$$

где A_n, A_{n+1} – амплитуды следующих друг за другом колебаний момента.

Расчетные значения коэффициента электромагнитной жесткости и коэффициента диссипации энергии колебаний рассматриваемых двигателей приведены в таблице. На рис. 3 и 4 представлена зависимость коэффициента электромагнитной жесткости двигателя c_{дв} от его номинального момента и частоты вращения по данным машинного эксперимента.

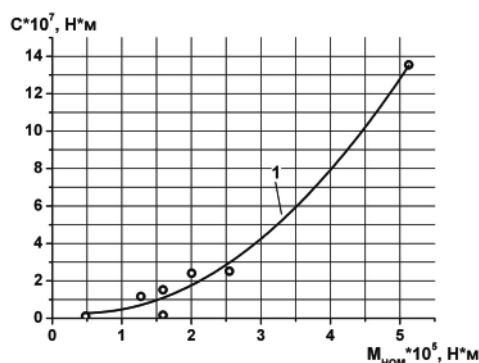


Рис. 3. Зависимость коэффициента жесткости двигателя (C) от величины номинального момента (M_{НОМ}): ○ – данные численного эксперимента; 1 – кривая аппроксимации данных зависимости (3)

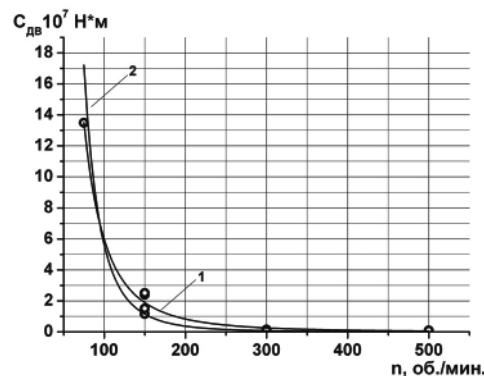


Рис. 4. Зависимость коэффициента жесткости двигателя (C_{дв}) от частоты вращения ротора (n): ○ – данные численного эксперимента; 1 – кривая аппроксимации данных эксперимента зависимостью (4); 2 – расчетные значения по формуле (6)

Данные зависимости могут быть аппроксимированы следующими функциями

$$c_{дв} = 3,76 - 50M_{НОМ} + 5,97M_{НОМ}^2; \tag{3}$$

$$c_{дв} = 2,76 \cdot 10^{13} / n^{-2,83}. \tag{4}$$

Одновременно устанавливалась зависимость угла выбега $\Theta_{ЭЛ}$ от частоты вращения ротора двигателя. С этой целью ротор статически нагружался моментом сопротивления, величина которого изменялась от нуля до величины номинального момента $M_{НОМ}$. При этом угол выбега $\Theta_{ЭЛ}$ определялся как разница значений $\omega_{\theta}t - \varphi$, где $\omega_{\theta}t$ – угол поворота магнитного поля, а φ – угол поворота ротора за время изменения момента сопротивления от нуля до $M_{НОМ}$.

На рис. 5 показана зависимость угла выбега $\Theta_{ЭЛ}$, выраженная в электрических радианах, от частоты вращения ротора n , об/мин.

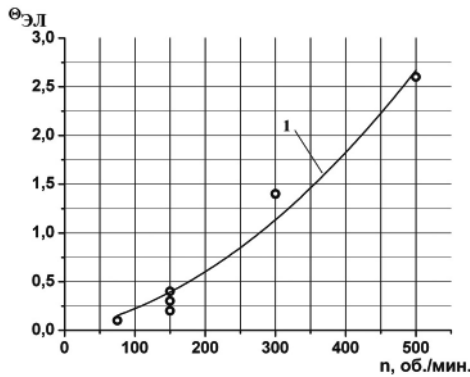


Рис. 5. Зависимость угла закручивания магнитного поля $\Theta_{ЭЛ}$ от частоты вращения ротора (n) при номинальном моменте: \circ – данные численного эксперимента; 1 – кривая аппроксимации данных эксперимента зависимостью (5)

Данная зависимость может быть аппроксимирована полиномом второго порядка

$$\Theta_{ЭЛ} = 0,001n + 7,7 \cdot 10^{-6} n^2 \quad (5)$$

Тогда электромагнитная жесткость двигателя

$$c_{дв} = \frac{M_{НОМ} p}{\Theta_{ЭЛ}} \quad (6)$$

где p – число пар полюсов, равное $p = 2\pi f / \omega_0 = 314 / \omega_0$ (ω_0 – угловая синхронная скорость двигателя).

На рис. 4 показана зависимость электромагнитной жесткости от частоты вращения, посчитанная по формулам (4) и (6). Сравнение кривых 1 и 2 на рис. 4 показывает адекватность двух подходов к определению электромагнитной жесткости синхронных двигателей и подтверждает, что угол $\Theta_{ЭЛ}$ характеризует „деформацию“ магнитного поля.

Приближенный анализ зависимости электромагнитной жесткости от частоты вращения сделаем, линеаризуя зависимость (5). Тогда выражение (5) примет вид $\Theta_{ЭЛ} = \nu n$, где ν – коэффициент пропорциональности. Подставляя значение $\Theta_{ЭЛ}$ в выражение (6), получим

$$c_{дв} = \mu \frac{N}{n^3},$$

где $\mu = (314 \cdot 10^3) / \nu$ (при $f = 50$ Гц).

Выводы. Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. Установлено, что в рабочем диапазоне нагрузок упругую характеристику синхронных двигателей можно аппроксимировать линейной зависимостью, характеризующейся постоянным коэффициентом жесткости $c_{дв}$.

2. Получены зависимости, позволяющие определить электромагнитную жесткость синхронных двигателей вблизи номинальных режимов работы.

3. Можно утверждать, что в первом приближении электромагнитная жесткость прямо пропорциональна мощности двигателя и обратно пропорциональна кубу частоты вращения.

Список литературы / References

1. Виноградов Б.В. Динамика барабанных млинів: монографія / Виноградов Б.В. – Дніпропетровськ: УДХТУ, 2004. – 127 с.

Vynogradov, B.V. (2004), *Dynamika barabannykh mlyniv* [The Dynamics of Tumbling Mills] monograph, USUCT, Dnipropetrovsk, Ukraine, 127 p.

Стаття присвячена теоретичному дослідженню динаміки синхронних двигунів барабаних млинів. Метою роботи є дослідження пружної характеристики синхронних двигунів, обґрунтування їх математичної моделі й складання розрахункових залежностей для визначення електромагнітної жорсткості. У роботі представлена еквівалентна схема синхронного двигуна як осцилятора коливань. Найважливішим параметром системи є електромагнітна жорсткість синхронного двигуна. Показано, що електромагнітні характеристики синхронних двигунів істотно залежать від перехідних процесів в електромагнітній системі приводу. Наведено методику розрахунку коефіцієнта жорсткості синхронного двигуна. Коефіцієнт жорсткості визначається на підставі дослідження параметрів коливань електромагнітного моменту під дією стрімкої зміни моменту опору. Встановлено, що в робочому діапазоні навантажень пружну характеристику синхронних двигунів можна апроксимувати лінійною залежністю, що характеризується постійним коефіцієнтом жорсткості. Проведено чисельні дослідження динаміки ряду синхронних двигунів. Вихідні дані для розрахунків отримані на підставі даних клієнтських формулярів відповідних двигунів. Розрахунки проводилися шляхом інтегрування рівнянь Парка-Горева. Представлено результати розрахунку частоти власних коливань, коефіцієнта електромагнітної жорсткості та коефіцієнта дисипації енергії коливань відповідних двигунів. Отримано залежності, що дозволяють визначити електромагнітну жорсткість синхронних двигунів поблизу номінальних режимів роботи залежно від потужності двигуна й частоти обертання ротора. Показано, що в першому наближенні електромагнітна жорсткість прямо пропорційна потужності двигуна й зворотно пропорційна кубу частоти обертання. Отримано також розрахункові залежності для визначення кута вибігу ротора й частоти власних коливань синхронного двигуна.

Ключові слова: синхронний двигун, осцилятор коливань, математична модель, крутильна жорсткість

The article is devoted to study of tumbling mill synchronous drive dynamics. The goals of the research are the follows: determination of synchronous drive elastic characteristic, foundation of their mathematical model and making up of dependences for the definition of electromagnetic rigidity. The equivalent scheme of synchronous drive as an oscillator is presented in the article. It is shown, that the electromagnetic rigidity of synchronous drive is the major parameter of the drive mechanical system. It is shown, that the electromagnetic characteristics of synchronous drives are essentially depended on transition processes in the drive electromagnetic system. The calculation technique of synchronous drive electromagnetic rigidity coefficient is presented. The coefficient of rigidity is determined by the investigation of electromagnetic moment oscillations under the action of drag torque which is varied stepwise. It is founded, that the elastic characteristic of synchronous drive can be approximated by linear dependence with constant value of rigidity coefficient. The numerical investigations of the dynamics of several synchronous drives are carried out.

The input data for calculations are obtained on the basis of corresponding drive logbooks. The calculations are carried out by integration of Park-Horev equations. The calculation results of characteristic oscillation frequency, electromagnetic rigidity coefficient and energy dissipation coefficient of corresponding drives are presented. The dependences are obtained which allow determining the electromagnetic rigidity of synchronous drive at nominal conditions of work taking into account the drive power and the rotor rotation frequency. It is shown, that to a first approximation the electromagnetic rigidity is in direct proportion to drive power and is inverse proportion to rotation frequency in third order. The calculated dependencies for determination of angle of rotor departure and characteristic oscillation frequency are obtained.

Keywords: *synchronous motor, oscillator, mathematical model, torsion rigidity*

*Рекомендовано до публікації докт. техн. наук
В.П. Франчуком. Дата знаходження рукопису 08.09.11*

УДК 622.673.1

**К.С. Заболотний, д-р техн. наук, проф.,
О.Л. Жупієв, Є.М. Сосніна**

Державний вищий навчальний заклад
„Національний гірничий університет“, м. Дніпропетровськ,
Україна, e-mail: mmf@ua.fm

ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ РОЗРІЗНИХ БАРАБАНІВ ШАХТНИХ ПІДНІМАЛЬНИХ МАШИН

**K.S. Zabolotnyi, Dr. Sci. (Tech.), Professor,
O.L. Zhupiyev, Ye.M. Sosnina**

State Higher Educational Institution "National Mining University",
Dnipropetrovsk, Ukraine, e-mail: mmf@ua.fm

STUDY OF DEFLECTED MODE OF MINE WINDER SPLIT DRUMS

Вітчизняні шахтні піднімальні машини у порівнянні із зарубіжними аналогами мають більшу вагу за рахунок різноманітних підкріплень та менший термін служби. Тому дослідження напружено-деформованого стану (НДС) – це актуальна наукова задача. Шахтна піднімальна машина (ШПМ) з розрізним барабаном має дві частини барабана, на поверхню якого намотуються дві гілки канату. Щоб канат безперешкодно рухався по оболонці барабана, усі можливі підкріплення необхідно розміщувати всередині барабана. Тому необхідно дослідити вплив декількох видів підкріплень розрізного барабана шахтної піднімальної машини на його НДС. Причому, для дослідження важливу роль грає навантаження на барабан. Навантаження може бути вісесиметричним або несиметричним. До першого виду відноситься тиск на канавки обичайки від намотаного каната. Другий вид навантаження включає у себе: навантаження на гальмові поля від гальма при аварійному та робочому режимах, зосереджені сили від намотуваного та змотуваного канатів, власна вага барабана з намотаним канатом, відцентрова сила. Виявлено, що несиметричне навантаження незначно впливає на НДС барабана, а розрахунок при цьому сильно ускладнюється. Рекомендовано використовувати лише тиск від каната на обичайку з урахуванням коефіцієнта ослаблення натягу в намотаних витках каната. Потрібно визначити найбільш раціональну схему прикладення тиску від витків намотаного каната до обичайки барабана, адже можливо не враховувати коефіцієнт ослаблення натягу в намотаних витках каната. При комп'ютерному моделюванні барабана ШПМ необхідно звернути увагу ще й на те, що деякі зварні з'єднання виконані без обробки кромок, тобто з непроваром кореня шва, і дослідити його вплив на НДС барабана. Беручи до уваги вищезазначене, потрібно навести рекомендації щодо підвищення терміну служби барабана піднімальної машини.

Ключові слова: *шахтна піднімальна машина, розрізний барабан, зварний шов з непроваром кореня, концентратори напружень, стрингерне підкріплення*

Досліджувалася шахтна піднімальна машина (ШПМ) ЦР-6х3, 4/0, 6.

Вихідні дані: статичний натяг каната у вантажній гілці 363 кН; розрахунковий натяг у вантажній гілці каната з урахуванням динаміки руху при прискоренні 1 м/с – 400 кН; статичний натяг каната в порожняко-