

УДК 622.673.1 : 681.514.54

С.Р. Ільїн

**ВИЗНАЧЕННЯ КОНТАКТНИХ ЗУСИЛЬ У СИСТЕМІ
«ПІДЙОМНА ПОСУДИНА – ЖОРСТКЕ АРМУВАННЯ» ШАХТНИХ
СТОВБУРІВ ПРИ ДИНАМІЧНИХ ЕКСПРЕС-ВИПРОБУВАННЯХ**

Вступ

В останні десятиліття у гірничодобувній промисловості України склалася така ситуація, що одна з її основних особливостей є та, що устаткування шахтних піднімальних комплексів експлуатується в стані підвищеного зносу, який у деяких випадках перевищує 50-60%. Підприємства змушені знижувати робочу швидкість руху скіпів та клітей через підвищену аварійну небезпеку експлуатації шахтних стовбурів. У таких умовах необхідно масове проведення апаратурних експрес-випробувань та обстежень з метою оцінки фактичного рівня безпеки роботи великої кількості підйомів та розробки рекомендацій по їх відновленню до проектного стану.

Задача оперативного одержання інформації про динамічний стан системи «посудина-армування», що дозволяє виявити ступінь потенційної небезпеки роботи шахтних підйомів, здавна була однією із самих актуальних при експлуатації вертикальних стовбурів.

Кінематичний метод діагностики армування, що базується на аналізі обмірюваних апаратурою горизонтальних прискорень напрямних пристроїв підйомних посудин, активно застосовувався в різних країнах ще біля півстоліття тому. Це пояснюється тим, що для монтажу на піднімальній посудині декількох навісних датчиків лінійних прискорень і запису осцилограми їхніх показань не потрібно демонтувати робочі напрямні ковзання, що закріплені на посудині.

Монтаж комплекту акселерометрів може бути проведений протягом декількох десятків хвилин. Для реєстрації їхніх показань можуть бути використані стандартні записуючі пристрої, одночасно застосовані на шахтному підйомі для вирішення інших задач. У Німеччині, наприклад, для цього застосовувався блок з трьома каналами реєстрації від дефектоскопа сталевих шахтних канатів.

Однак, однозначне дешифрування записаної в такий спосіб інформації, та її правильна інтерпретація з точки зору визначення ступеня небезпеки роботи шахтних підйомів, виявилася набагато складніше, ніж уявлялося в той час. Це залежало від множини причин. Зокрема, від суперпозиції записаних на паперову стрічку з малою швидкістю розгорнення за часом аналогових сигналах складових коливань посудини по декількох степенях вільності, власних коливань корпусу посудини й багатозначності можливих варіантів контакту напрямних із провідниками при наявності одночасних сплесків сигналів по декількох акселерометрах, установлених на посудині з орієнтацією вимірювальних осей у взаємно перпендикулярних площинах.

При такому способі реєстрації із задовільною вірогідністю можна було виміряти тільки максимальні (пікові) значення прискорень за період одного коливання без врахування їхнього відносного зрушення по фазі, що саме по собі є дуже важливим інформативним параметром для розшифровки просторової картини коливань посудини при русі по провідниках. Тому, цілком природнім етапом розвитку цього напрямку було створення й відпрацювання технології промислової реалізації «силовимірювального» методу, при якому інформативними параметрами є контактні навантаження на провідники з боку напрямних ковзання підйомної посудини.

Визначення ступеня аварійної небезпеки експлуатаційного стану армування проводилося на підставі досить добре відпрацьованих у будівельній механіці методів деформаційно-міцністних розрахунків стрижневих систем. Однак практика показала, що в умовах інтенсивної експлуатації підйомів силовимірювальний метод, що вимагає монтажу, замість робочих, спеціальних тензометричних напрямних та їх наступного демонтажу, виявився занадто громіздким і не знайшов широкого застосування. Крім того, для рейкових провідників, які й дотепер займають основне місце у вугільних стовбурах, на відміну від коробчастих, монтування тензометрів у напрямних ковзання для промислового застосування досить проблематична.

Це викликало необхідність розробки альтернативного напрямку, яке можна назвати «акселерометричним-силоразрохунковим» або

«кінематичним - силоразрохунковим» (термінологія автора). Воно полягає в тому, що по вимірюваних горизонтальних прискореннях напрямних корпуса піднімальної посудини розрахунковим шляхом визначаються контактні зусилля, а вже по них проводиться деформаційно-міцністний розрахунок, як при сило-вимірювальному методі.

Методи визначення контактних зусиль у промислових умовах систем «підйомна посудина жорстке армування»

Першими роботами, у яких були запропоновані аналітичні залежності між контактними зусиллями, що діють на провідники жорсткого армування, і горизонтальними прискореннями напрямних піднімальної посудини, вважаються роботи німецьких дослідників Бера, Берга, Гезельбарта [1, 2, 3, 4]. У них, на підставі експериментальних і теоретичних досліджень, для визначення максимально можливих контактних зусиль між провідником і напрямними посудини було запропоновано застосовувати наступну формулу:

$$F_{\max} = Mu \cdot A_{\max} \quad (1)$$

де Mu – коефіцієнт, що називається «масою, що бере участь в ударі», його значення за результатами різних досліджень варіюється від $0.1Mc$ до $0.3Mc$ (Mc - повна маса посудини, кг);

A_{\max} - максимальне значення вимірюваного апаратурою горизонтального прискорення напрямної посудини, м/с²;

F_{\max} - максимально можливе контактне зусилля, що діє на провідник з боку напрямної посудини, Н.

При $Mu = 0.3 \cdot Mc$ ця формула має назву - «формула Бера».

У Німеччині, в Інституті безпеки гірських робіт з 50-х років ХХ століття активно розвиваються роботи із впровадження систематичного оперативного контролю стану армування на базі апаратурних вимірів горизонтальних прискорень піднімальних посудин з використанням «кінематичного-силоразрохункового» методу для оцінки контактних навантажень на провідники по наведеній вище формулі Бера.

Незважаючи на те, що наступними дослідниками дана формула була визнана в загальному випадку не відповідної реальної дійсності, як така, що дає завищені значення контактних зусиль, простота її застосування на практиці для наближеної оцінки ступеня

динамічного навантаження провідників довгий час використовувалася фахівцями з діагностики армування шахтних стовбурів.

У Польщі в цей же час інтенсивно велися дослідження з визначення аналітичних залежностей між обмірюваними максимальними горизонтальними прискореннями крапок корпусу піднімальних посудин і контактних навантажень на провідники [5, 6]. У роботі С. Кавулока [5] для лобової площини розташування провідників пропонується наступна формула для визначення «маси, що приймає участь в ударі»:

$$Mu = \frac{1}{\frac{2a + b^2}{H \cdot Mc} + I_s} \quad (2)$$

де a , b – відповідно, відстані від верхнього та нижнього поясів посудини до її центра мас, м; H – висота посудини ($H = a + b$), м; I_z – момент інерції посудини щодо центральної осі інерції, перпендикулярної лобової площини провідників, кг*м². Зазначено, що для випадку $a = b$ виходить значення $Mu = 0.25 \cdot Mc$.

У роботі Ханзела, Кавки й Плачно [6] на основі експериментальних і теоретичних досліджень запропоновані формули для визначення коефіцієнтів «маси, що приймає участь в ударі» окремо для лобової й бічної площин провідників:

- для лобової площини провідників

$$Mu_l = \frac{Mc}{1 + H^2 \cdot \frac{Mc}{4 \cdot I_l}} \quad (3)$$

- для бічної площини провідників

$$Mu_o = \frac{Mc}{1 + H^2 \cdot \frac{Mc}{4 \cdot I_o} + A^2 \frac{Mc}{4 \cdot I_v}} \quad (4)$$

де $I_l \approx I_b \approx 0.08Mc \cdot H^2$, $I_v \approx 0.1 \cdot Mc \cdot A^2$ - для клітей;

$I_l \approx I_b \approx 0.15Mc \cdot H^2$, $I_v \approx 0.15 \cdot Mc \cdot A^2$ - для порожніх скіпів;

$I_l \approx I_b \approx 0.11Mc \cdot H^2$, $I_v \approx 0.11 \cdot Mc \cdot A^2$ - для повних скіпів;

A – довжина бічної стінки скіпа, м.

Використання «кінематичного-силоразрохункового» методу для оперативного апаратурного контролю динаміки системи «посудина-армування» шляхом застосування навісного комплексу датчиків для

виміру горизонтальних прискорень напрямних піднімальних посудин і портативного цифрового реєстратора з наступним аналітичним розрахунком напружень в елементах армування (провідниках і розстрілах) є найбільш перспективним і економічно доцільним для вирішення цієї задачі у промислових умовах.

В Інституті геотехнічної механіки НАН України (м. Дніпропетровськ) розроблений варіант «кінематичного-силоразрохункового» методу діагностики армування, що застосовується при експрес-випробуваннях систем «посудина-армування» вертикальних стовбурів [7,8].

Відповідно до цього методу, на основі рішення системи диференціальних рівнянь просторових коливань посудини, що рухається по парі жорстких провідників однобічного або двобічного розташування, контактні навантаження на провідники розраховуються по вимірюваних миттєвих значеннях горизонтальних прискорень напрямних піднімальної посудини (на відміну від максимальних значень прискорень на проміжку руху посудини між суміжними ярусами, використовуваним іншими дослідниками).

Контактні навантаження, що діють по кожній напрямній посудини в кінематичній парі «напрямна-провідник», визначаються у вигляді суми членів, у які входять вимірювані одночасно миттєві значення прискорень всіх напрямних посудини зі своїми ваговими коефіцієнтами, що залежать від геометричних параметрів посудини й твердості вузлів системи «посудина-армування», які можуть бути визначені з достатнім ступенем точності до проведення динамічних вимірів по технічній документації або уточнені перед тестуванням експериментальним шляхом з урахуванням фактичного стану елементів устаткування.

Природно, що оцінка точності кожного із зазначених аналітичних методів, можлива тільки шляхом постановки спеціального комплексного промислового експерименту з одночасною реєстрацією всіх миттєвих прискорень напрямних посудини й контактних навантажень на провідники. Такий експеримент є досить громіздким та дорогим. Тому доцільно проводити оцінку точності отриманих співвідношень методом математичного моделювання на відповідність результатам апробованих математичних моделей і верифіцированих комп'ютерних програмам. Одним з таких еталонів є

математична модель динаміки системи «посудина-армування» професора В.И. Дворнікова [9], реалізована програмним комплексом «Армування шахтного стовбура» («АШС») [10].

Відповідно до методу, після визначення контактних навантажень динамічні напруги в провідниках і розстрілах по всій глибині стовбура автоматично розраховуються програмним комплексом АШС, визначаються фактичні динамічні запаси міцності елементів металоконструкцій. Виміри й реєстрація прискорень повинні вироблятися високошвидкісний багатоканальною цифровою апаратурою з наступною програмною розшифровкою й обробкою результатів запису, новітнім сучасним зразком якої є мікропроцесорний програмно-апаратний комплекс ТЕХНО-МАК, розробки ІГТМ НАН України, з убудованим портативний комп'ютером.

Нижче наведені результати порівняльних розрахунків контактних зусиль по розробленому й еталонному методах для тих самих параметрів системи «посудина-армування» із двома нитками коробчастих провідників двостороннього розташування щодо скіпа одного з рудних стовбурів України.

Відповідно до рішень, представленими в роботі [8], миттєві значення лобових контактних навантажень на провідники визначаються по формулах:

$$\begin{aligned} Fv(t) &= M_{1,1} \cdot Wv(t) + M_{1,2} \cdot Wn(t) \\ Fn(t) &= M_{2,1} \cdot Wv(t) + M_{2,2} \cdot Wn(t) \end{aligned} \quad (5)$$

де $Wv(t)$, $Wn(t)$ - миттєві лобові прискорення відповідно верхній і нижній пояси посудини, де встановлені запобіжні напрямні; t – поточний час; $M_{i,j}$ – коефіцієнти, що визначаються по формулах, отриманих у роботі [11].

На відміну від рішення (5), у бічній площині провідників задача носить статично невизначений характер, тому, розрахунок по формулах [11] дає декілька кінематично можливих варіантів набору значень розподілу миттєвих контактних навантажень між всіма напрямними посудини і їхніх робочих граней. Уточнення результатів вимагає наявності додаткової вимірювальної інформації. Для однозначності розшифровки результатів розрахунку необхідно мати в масиві обмірюваних даних, одночасно зі значеннями миттєвих прискорень, дані про те, які саме напрямні і по яким робочим граням

контактували із провідниками в момент зняття показань із датчиків-акселерометрів. Якщо вимірювальна апаратура оснащена відповідними датчиками, то розрахунок миттєвих бічних контактних навантажень проводиться по наступних формулах:

$$\begin{aligned} F_{x,1} &= \sum_{i=1}^5 Mb1_i \cdot W_i & F_{x,2} &= \sum_{i=1}^5 Mb2_i \cdot W_i \\ F_{x,3} &= \sum_{i=1}^5 Mb3_i \cdot W_i & F_{x,4} &= \sum_{i=1}^5 Mb4_i \cdot W_i \end{aligned} \quad (6)$$

де $W1, W2$ – миттєві бічні прискорення напрямних відповідно верхнього й нижнього поясів посудини, що контактують із провідником № 1;

$W3, W4$ – миттєві бічні прискорення напрямних відповідно верхнього й нижнього поясів посудини, що контактують із провідником № 2;

$W5 = Wv, W6 = Wn$; Mbi - коефіцієнти, обумовлені по формулах, наведеним у роботі [11].

При розрахунках коефіцієнтів ураховуються наступні параметри піднімальної посудини: моменти інерції посудини щодо центральних осей інерції; маса посудини; відстань від верхнього пояса посудини до його центра мас; відстань між верхнім і нижнім поясами посудини.

При розшифровці результатів розрахунку враховується орієнтація датчиків-акселерометрів, установлюваних для виміру миттєвих прискорень напрямних верхнього й нижнього поясів посудини залежно від обраної системи координат.

Як об'єкт для порівняльного розрахунку обрана скіпова піднімальна установка із двостороннім розташуванням жорстких провідників коробчастого типу з роликівими двох важільними амортизаторами. Програма розраховує динамічні параметри системи (миттєві контактні зусилля, лобові й бічні прискорення напрямних і т.п.) і видає в зовнішній файл із квантом за часом 0.001 сек, що відповідає дискретності даних, одержуваних мікропроцесорною вимірювальною апаратурою в стовбурі. Всі вихідні дані з розрахунку (параметри системи) у моделі (5) і в програмі «АШС» збігаються.

При проведенні тестування методів розрахунку на підставі вихідних даних програми «АШС» у кожний момент часу відомо, які саме із напрямних ковзання контактували із провідниками, тому що

програма окремо видає миттєві значення зусиль і в роликівих амортизаторах і на напрямних ковзання. Якщо контакту напрямних ковзання із провідником не має, то контактне зусилля на відповідній робочій грані напрямної дорівнює нулю. Тому тестування формул (6) для бічних граней провідників по цій програмі так само є однозначним.

На рис. 1 наведені графіки миттєвих лобових контактних навантажень на провідники, розрахованих по формулах (5), і графіки миттєвих лобових навантажень, отриманих моделюючою програмою «АПС». Нерозривна крива ілюструє результати розрахунку по наближеній аналітичній моделі (5), маркіровані крапки - дані розрахунку програмою «АПС».

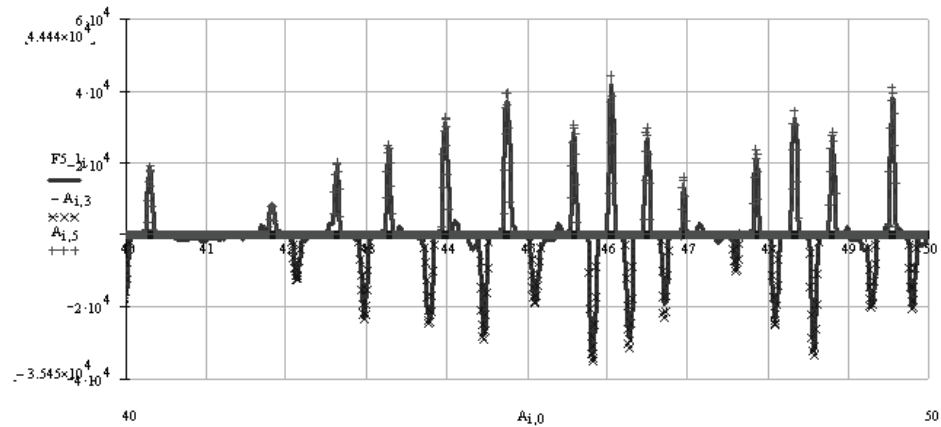
Порівняння двох графіків показує задовільний збіг отриманих результатів. Розбіжності в пікових значеннях не перевищують декількох відсотків і викликані тим, що модель (5) не враховує вплив миттєвих кінематичних зазорів, які складно й недоцільно вимірювати в промислових умовах та вплив моментів від сил натягу каната, що є малим у порівнянні з динамічними параметрами в режимі ударно-циклічної взаємодії посудини з армуванням.

Якщо апаратура має тільки датчики-акселерометри, застосування формул (6) для розрахунку бічних навантажень у задачах діагностики по обмірюваних прискореннях, вимагає більше складного підходу. У цьому випадку необхідно при програмній обробці даних вимірів перебрати всі можливі варіанти контакту напрямних, щодо кінематичної можливості у кожний момент часу виміру, та із всіх варіантів вибрати максимальні значення отриманих навантажень для кожної з напрямних ковзання. Ці значення можна прийняти в якості «оцінних зверху» для розрахунку максимальних напружень у провідниках. Вони будуть свідомо трохи більше, ніж фактичні, але ближче до реальних, ніж отримані по «одночленних» формулах (1) - (4).

Оцінка параметрів технічного стану армування при такому підході дає трохи занижені, у порівнянні з реальними значеннями, динамічні запаси міцності провідників. Це підвищує безпеку роботи підйомів при плануванні ремонтних робіт в стовбурі бо створює запас за рівнем залишкової міцності провідників в бічній площині при відбракуванні дефектних ділянок. При цьому істотно скорочується

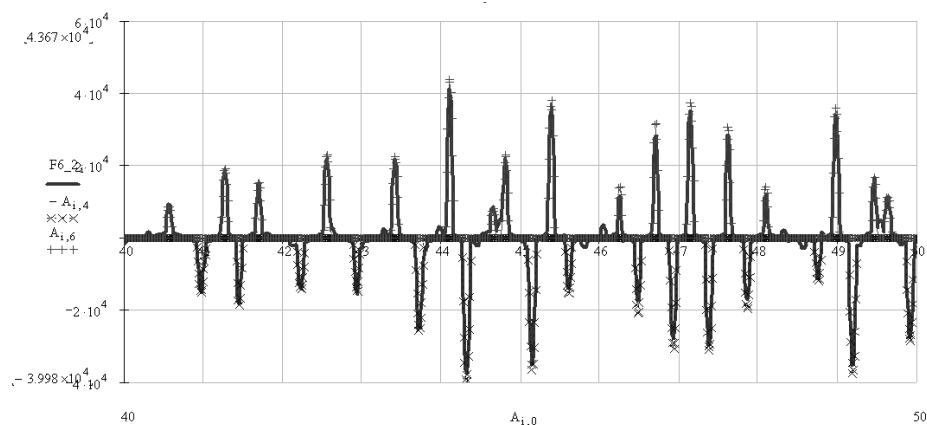
час зупинки підйому на проведення випробувань і їхня вартість у порівнянні із прямим виміром навантажень із застосуванням контактних силовимірювальних датчиків.

(верхній пояс посудини)



а)

(нижній пояс посудини)



б)

Рисунок 1 - Графіки миттєвих контактних навантажень на провідники в від 40 до 50 сек руху посудини

На оцінку напружень у розстрілах армування, що несуть головну долю навантаження, ця наближеність визначення навантажень у бічній площині практично не впливає, тому що, хоча бічні навантаження на провідники стосовно розстрілу прикладені уздовж його осі з деяким плечем, приблизно рівним половині ширини провідника, і створюють додатковий згинальний момент під провідником у перетині розстрілу, його внесок у величину повної напруги істотно менше, ніж від лобових навантажень і може не враховуватися при оцінці стану армування.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вдр S. Die Beanspruchung der Einbauten von Fцrderschachten durch waagerechte Krafte- //Gluckauf. –1953. –7/8. –S.28-39.
2. Вдр S. Forshritte der Fцrdertechnik auf dem Gebeiet der Schachrforderung. -//Schldgel und Eisen. – 1958. – 9. – S. 43-58.
3. Berg G. Berechnung der am Stob zwischen Forderfaben und Schachteinbauten beteiligten Masse. Bergakademie 19 (1967) 12 8. S.725-726.
4. Hesslbart F. Beanspruchung der Schahtenbarten und des Drahtseiles bei der Schachtforderung. Dissertation an der Section Phisik der Martin-Luter-Universitate, Halle, Marz. – 1973. – S.214.
5. Kawulok S. Dynamika naczinia wycagowego, przejezdzajacego wzdluz pojedynczych nierownosci na prowadnikac. Zeszyty naukowe politechniki slakiej. Ser. Gornictwo. z.80. 1977. –с.179-195.
6. Hansel J. Kawka G. Placno M. An estimation of mine conveyances guiding. /Mechanika. Widawnictwo AGN. t.4. z. 2. Krakov 1985. pp. 115-128.
7. Ильин С.Р. Метод динамических экспресс-испытаний систем «подъемный сосуд-армирование» вертикальных стволов шахт и рудников // ИГТМ НАН Украины. Геотехническая механика. Межвед. Сб-к науч. тр. Вып. 56, Днепропетровск.- 2005, -с.149-156.
8. Ильин С.Р. Взаимосвязь силовых и кинематических параметров динамического взаимодействия подъемных сосудов с проводниками жесткой армировки шахтных стволов //Вибрации в технике и технологиях. – 1998. - №3(7). –С.82-83.
9. Дворников В.И. Кърцелин Е.Р. Теоретические основы динамики шахтного подъемного комплекса. София. 1997. –С.363.
10. Ильин С.Р. Дворников В.И. Кърцелин Е.Р. Программный комплекс “армирование шахтного ствола” // Сб. научных трудов НГА Украины. №13. т.3. Днепропетровск. –С.40-43.
11. Методика расчета контактных нагрузок при движении клеток по измеренным ускорениям башмаков./ИГТМ НАНУ. Разработал С.Р.Ильин. Утвердил зам. директора ИГТМ НАНУ В.В.Виноградов. Днепропетровск, 1996. -40С.

Одержано 28.02.2009р.