

УДК624.012.45

**РОЗРАХУНКОВЕ ОБГРУНТУВАННЯ ВІБРАЦІЙНОГО
МОНІТОРИНГУ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ШАХТНИХ КОПРІВ**

**CALCULATON SUBSTANTION OF VIBRATION OF THE TECHNICAL
CONDITION OF MINE HEADFRAME**

Кущенко В.М., доктор технічних наук, професор, <https://orcid.org/0000-0002-5917-0093>, **Канюк В.М.**, кандидат технічних наук, доцент, **Клим А.Б.**, аспірант, <https://orcid.org/0000-0001-7871-4773>, (Національний університет «Львівська політехніка» Львів)

V.M. Kushchenco, doctor of science, professor, **V.M. Kanuk**, candidate of technical sciences, associate professor, **A.B. Klum**, postgraduate, (Lviv Politechnic National University, Lviv)

У статті наведені результати пружно-пластичного аналізу несучих конструкцій шахтного копра станкової системи, а також наведено результати чисельного моделювання впливу характерних експлуатаційних пошкоджень на спектр частот власних коливань споруди. Отримані результати пропонуються до використання в системах динамічного моніторингу технічного стану укісних шахтних копрів.

The article presents the results of the elastic-plastic analysis of the bearing structures of a steel mine headframe, as well as the results of numerical modeling of the influence of characteristic operational damages on the spectrum of frequencies of vibration of the structure. Elastic-plastic and modal analysis of the headframe structures is carried out on a bar computational model that was created in “SCAD” software complex. Based on the results of the elastic-plastic analysis of the mine headframe structures, its bearing capacity was set, and the key elements were identified, the destruction of which leads to an avalanche-like destruction of the structure. Monitoring the stress-strain state of key structural elements of a mine headframe allows for effective control of technical condition of the structure. Based on the data of previous studies of the regularities of physical wear of mine headframe structures, a numerical study of the influence of characteristic operational damages on spectrum of natural vibration frequencies of the structures under study was carried out. The effect of reducing the natural frequencies of the first five forms by 25... 47%. The results of which can be used for dynamic monitoring of the technical condition mine headframes.

Ключові слова: шахтні, копри, розрахункова, модель, пружно-пластичний, аналіз, моніторинг, пошкодження, технічний, стан headframe, design, model, elastic-plastic, analysis, monitoring, technical, condition, damages

Вступ. Шахтні копри станкової системи є найбільш розповсюдженими спорудами шахтних підйомних установок на вугільних шахтах України, в середньому термін експлуатації цих споруд складає 50...70 років, що за важких умов експлуатації означає значну ступінь їх фізичного зносу [1], а також – ризик раптової відмови цих споруд, які здебільшого відносяться до класу відповідальності СС-3. Відповідно до нормативних вимог [2], для будівельних споруд що відносяться до класу відповідальності СС-3, є необхідним їх оснащення системами технічного моніторингу.

Аналіз останніх досліджень. В роботах [1, 3] наведені результати дослідження процесів фізичного зносу конструкцій шахтних копрів з різними конструктивними і технологічними ознаками. Для копрів станкової системи визначено велику різницю в ресурсі конструкцій станка і підкорової рами (25...30 років) в порівнянні з підшківними конструкціями і укосиною (50...70 років), що обумовлено різною інтенсивністю корозійного і абразивного зносу. Необхідно відмітити скритий характер фізичного зносу конструкцій копрів, тому що деякі конструкції знаходяться за герметичною (сталевою) обшивкою, а деякі в труднодоступних місцях на висоті декілька десятків метрів, що затрудняє контроль їх технічного стану при експлуатації [3].

В публікації [4] наведені результати вимірювання вібрацій на конструкціях шахтних копрів і сформульована концепція вібраційного моніторингу яка базується на періодичних вимірюваннях параметрів власних і вимушених коливань в автоматичному режимі, а також сформульовано критерій технологічної загрози за критичним значенням амплітуди середньоквадратичного значення вібраційної швидкості.

В роботі [5] запропоновано метод моніторингу навантажень на шахтні копри від натягнення підйомних канатів з застосуванням тензометричного методу. В роботах [4, 6], як один з перспективних напрямків моніторингу шахтних копрів, визначено контроль спектра частот власних коливань споруди, однак на даний час відсутні результати дослідження впливу характерних експлуатаційних пошкоджень шахтних копрів на їх динамічні характеристики.

Таким чином дослідження спрямовані на розрахункове обґрунтування систем моніторингу технічного стану конструкцій шахтних копрів є актуальними і мають велике соціальне і народно-господарче значення для України.

Постановка мети і завдань досліджень. Мета роботи – визначення ключових елементів в несучій системі копрів станкової системи, руйнування

яких може спричинити непропорційне (лавино-образне) руйнування, а також встановлення впливу характерних експлуатаційних пошкоджень елементів несучих конструкцій на спектр власних частот (динамічні характеристики) споруди.

Для досягнення означеної мети вирішені наступні завдання: 1) виконано пружно-пластичний аналіз несучої системи характерного шахтного копра, станкової системи, вантажно-людського підйому (досліджуваній об'єкт); 2) виконано модальний аналіз стержньової моделі досліджуваного об'єкту результати якого було порівняно з експериментальними даними; 3) виконано модальний аналіз розрахункових моделей несучої системи об'єкту дослідження, які відображали наявність характерних експлуатаційних пошкоджень; 4) на підставі порівнянь результатів модального аналізу означених розрахункових моделей, було встановлено вплив характерних експлуатаційних пошкоджень на спектр власних частот коливань досліджуваного об'єкта.

Методика досліджень. Характеристика досліджуваного об'єкта. В якості досліджуваного об'єкта було обрано, характерний для вугільних шахт України, копер станкової системи, вантажно-людської підйомної установки, класу відповідальності СС-3 (рис. 1, а) технічні характеристики якого наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Технічні характеристики копра вантажно-людської підйомної установки

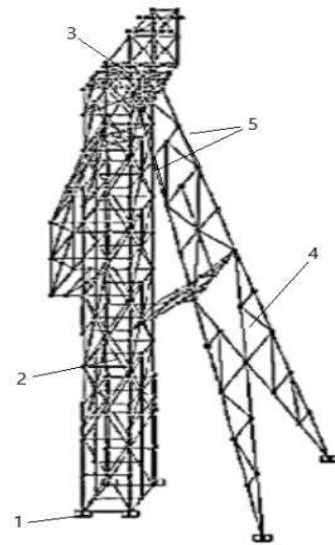
№	Найменування	Одиниці виміру	Значення
1	2	3	4
2	Підйомна машина	-	2Ц-3,5х1,8
3	Висота підйому	м	222
4	Висота копра	м	35,0
5	Головні канати (ГОСТ): розривне зусилля каната в цілому	кН	7668-80 862,3
6	Підйомна машина	-	2Ц-3,5х1,8

Досліджуваній об'єкт за конструктивною схемою представляє собою просторову стержньову систему яка складається з чотирьох основних підсистем: 1 – підкопрова рама; 2 – станок; 3 – підшківні конструкції; 4 – укосина (рис. 1, б). Взагалі, конструкції шахтного копра є конструктивною частиною механічної системи шахтної підйомної установки і служать для

обпирання напрямних шківів що встановлюються на підшківних конструкціях, через які відбувається силова взаємодія підйомних канатів і несучої системи шахтного копра (рис. 1, в). Конструкції шахтних копрів сприймають наступні навантаження: постійні; атмосферні і технологічні (навантаження від натягнення підйомних і гальмівних канатів шахтного парашута); аварійні - від розриву підйомного каната, спрацьовування шахтного парашута, «перепідйому» [7]. В основному для конструкцій шахтних копрів при проектуванні визначальними являються епізодичні навантаження від розриву підйомного каната, які представляють собою сполучання рівнодіючих від екстремального натягнення підйомних канатів, що прикладені у вузлах обпирання направляючих шківів, і які, як правило, в 6,5...9 разів перевищують навантаження нормальної експлуатації [1].

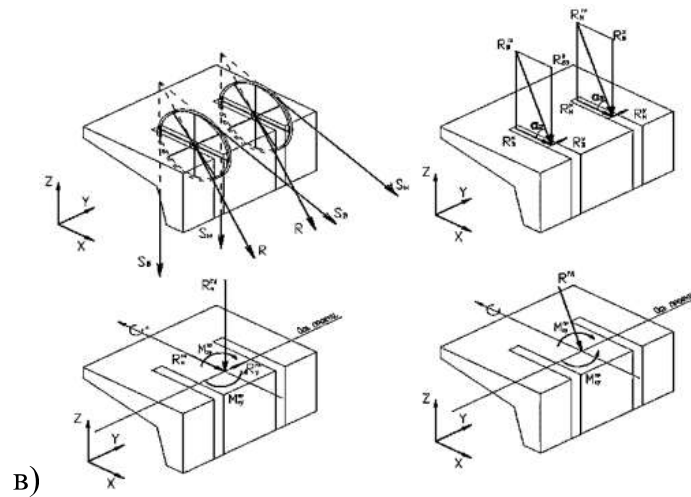
Згідно галузевих норм [7] екстремальні зусилля в підйомних канатах визначались в наступному порядку: а) в одній з гілок підйомного каната зусилля приймалось таким, що дорівнює значенню статичного еквівалента розривного зусилля підйомного каната в цілому; б) в суміжній гілці зусилля приймалося таким, що дорівнює значенню подвійного робочого натягнення. Для інтерпретації результатів пружно-пластичного аналізу конструкцій шахтного копра, аварійні навантаження приводились до головного вектору (рис. 1, в) і будувались діаграми залежності переміщення точки приведення головного вектору по мірі його зростання (рис. 3).

Адекватність розрахункової моделі дійсної роботі шахтного копра була встановлена порівнянням результатів модального аналізу з даними вимірювання параметрів вібрації споруди при вільних коливаннях, який показав, що відхилення розрахункових значень частот власних коливань від експериментальних, для перших 6-ти форм, не перевищує 12%. Вимірювання параметрів вібрацій споруди при вимушених і вільних коливаннях здійснювалось при збудженні поривом вітру, віброаналізатором «Асистент», віброперетворювачі якого розташовувалися на підшківних конструкціях. Також вимірювалися параметри вимушених коливань в процесі повних технологічних циклів роботи підйомної установки. Віброшвидкість вимірювалась низькочастотними акселерометрами. На підставі гармонійного аналізу встановлювалися спектри частот власних і вимушених коливань. В подальшому при аналізі динамічної поведінки споруди при чисельних експериментах розглядалися перші п'ять власних форм коливань споруди по згинальних та згинально-крутильних формах.



а)

б)



в)

Рис.1 Копер вантажно-людської підйомної установки: а – загальний вигляд; б – розрахункова модель несучих конструкцій шахтного копра в програмному комплексі «SCAD (1 – підкопрова рама; 2 – станок; 3 – підшківні конструкції; 4 – укосина; 5 – ключові елементи укосини); в– схема приведення головного вектору аварійного навантаження від розриву підйомного каната

Якщо в процесі збільшення навантаження коефіцієнт використання за несучою здатністю якого небудь елемента перевищував одиницю, його стержньова апроксимація змінювалась за наступними принципами: а) в згинальних елементах в перерізах з граничним моментом встановлювались шарніри і прикладались два зосереджених моменти, які за напрямками і значенням відповідали внутрішнім моментам утворення шарнірів пластичності; б) розтягнуті стержні при переході через граничний стан видалялись з системи, а їх вплив на напружено-деформований стан конструкцій копра враховувався прикладанням до вузлів зовнішніх зосереджених сил які відповідали векторам граничних внутрішніх повздовжніх сил і прикладались до вузлів вилучених елементів; г) центрально і позacentрово-стиснуті елементи після переходу через граничний стан (втрата стійкості) видалялись із розрахункової моделі. На

кожному етапі пружно-пластичної трансформації конструктивної системи, вона перераховувалась, і при цьому здійснювався контроль забезпеченості її стійкості як єдиної пружної системи. Вичерпання несучої здатності пружно-пластичної розрахункової моделі визначалося за наступними критеріями: а) втрата загальної стійкості як єдиної пружної системи; б) прогресуюче руйнування до переходу конструкції в механізм, або в миттєво геометрично змінювану систему. За результатами пружно-пластичного аналізу конструкцій шахтного копра встановлювалась його несуча здатність за умовою граничної рівноваги, а також встановлювались ключові елементи, вичерпання несучої здатності яких, приводить до прогресуючого руйнування споруди.

Методика дослідження впливу характерних експлуатаційних пошкоджень на динамічні характеристики конструкцій копра. На підставі аналізу даних робіт [1, 3] було встановлено що в процесі експлуатації, в наслідок абразійне-корозійних впливів, частіше за все, пошкоджуються елементи з'єднувальної решітки станка і підкопрової рами. Ці пошкодження мають вигляд руйнування окремих елементів, а також руйнування кутових зварних швів в місцях кріплення розкосів і розпірок до вузлових фасонки. При аварійному характері цих пошкоджень, виникає загроза втрати загальної стійкості стояків станка і наступного прогресуючого руйнування всієї споруди. Відповідно до наведених даних, було створено ряд розрахункових моделей, в яких відмова окремих вузлів примикання елементів решітки до стояків станка, моделювалося вилученням означених елементів решітки з розрахункової моделі (рис. 2). Для означених розрахункових моделей пошкоджених конструкцій шахтного копра виконувався модальний аналіз. Отримані результати порівнювались з результатами модального аналізу і розрахунку вихідної розрахункової моделі (рис. 4). В результаті встановлювався зв'язок між характерними пошкодженнями конструкцій і змінами спектру власних частот коливань. Означені зміни власних частот відповідно до концепції вібраційного моніторингу являються діагностичними ознаками технічного стану споруди.

Результати пружно-пластичного аналізу

Результати перевіркового розрахунку конструкцій шахтного копра на проектні аварійні навантаження від розриву підйомного канату показали, що найбільший коефіцієнт використання (0,66...0,69) є характерним для позацентрово-стиснутих елементів гілок укосини, які розташовані в межах другій зверху панелі ферми укосини, відповідно для навантаження «розрив верхнього канату» - лівої гілки укосини, а для «розриву нижнього канату» - правої гілки укосини (рис. 1, б).

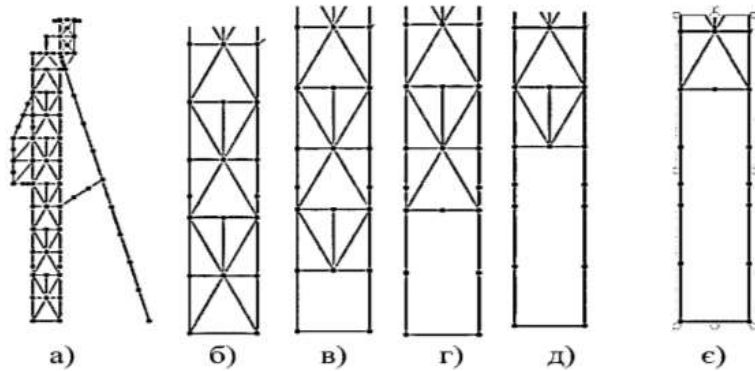


Рис. 2. Змінення розрахункової схеми конструкцій шахтного копра для моделювання експлуатаційних пошкоджень в нижній частині станка: (а) розрахункова модель конструкцій без пошкоджень; (б) фрагмент розрахункової моделі копра без пошкоджень; (в, г, д, е) фрагменти розрахункової моделі, які моделюють руйнування вузлів станка

Стійкість конструкцій шахтного копра як єдиної пружної системи при означених аварійних навантаженнях – забезпечена з коефіцієнтом запасу 1,77. Таким чином було встановлено, що першим елементом пружно-пластичної трансформації розрахункової схеми є верхня частина однієї з гілок укосини, причому коефіцієнт збільшення приведенного головного вектору аварійного навантаження, необхідний для початку трансформації, для двох варіантів аварійних навантажень, складає: 1,46 і 1,53 (рис. 1, б).

При наступному етапі навантаження пружно-пластичного аналізу (коефіцієнт збільшення головних векторів аварійних навантажень для розриву «верхнього» і «нижнього» канату - відповідно: 1,5; 1,6) указані елементи гілок укосини вилучались з розрахункової моделі, як такі, що втратили загальну стійкість, після чого виконувався перевірочний розрахунок за зміненою розрахунковою схемою.

Результати перевірочного розрахунку конструкцій шахтного копра, після першої трансформації розрахункової моделі, показали збільшення внутрішніх повздовжніх зусиль і моментів в елементах укосини в 2,2...2,3 рази, внаслідок чого одна з гілок укосини втрачає стійкість, після чого подальший пружно-пластичний аналіз показав непропорційний (лавиноподібний) характер руйнування споруди (рис. 3).



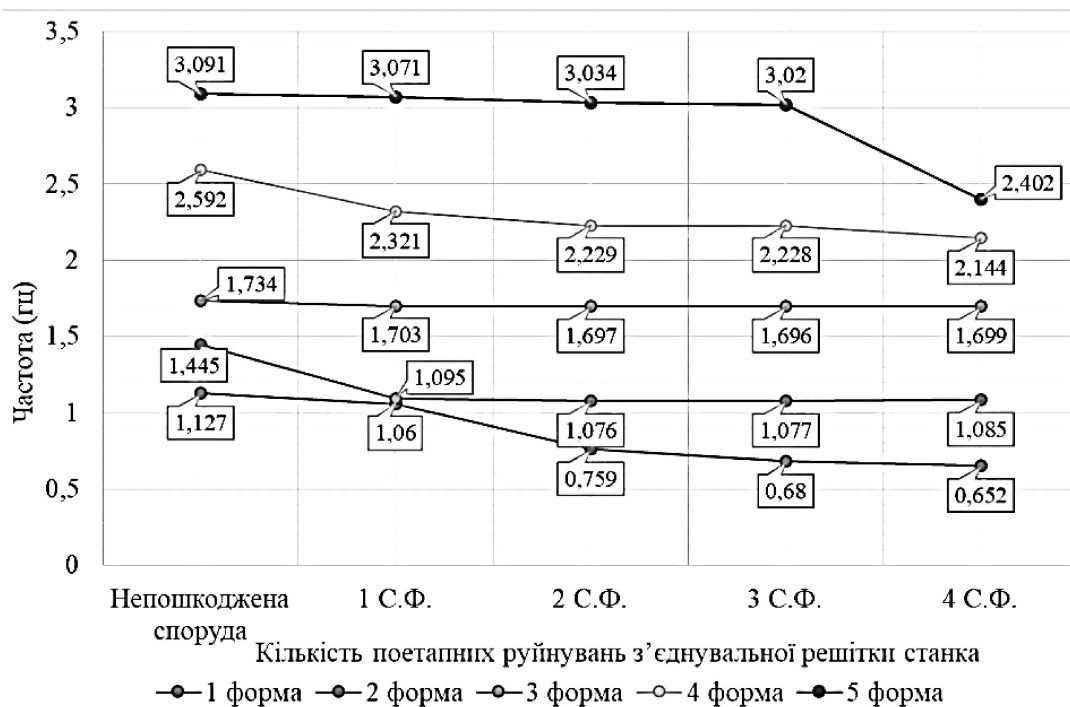
Рис. 3. Діаграма переміщення точки приведення головного вектора аварійного навантаження (розрив верхнього канату) в процесі пружно-пластичного аналізу: \bar{R} – змінне значення головного вектора аварійного навантаження; \bar{R}_{mf} – граничне розрахункове значення головного вектора від розриву підйомного канату

Таким чином було встановлено, що ключовими елементами конструкції шахтного копра являються гілки ферми укосини в межах другої зверху панелі (рис. 1, б). Виявлені ключові елементи є важливими для завдань технічного моніторингу конструкцій шахтного копра, оскільки їх відмова є критичною для живучості багаторазово статично-невизначеної конструктивної системи.

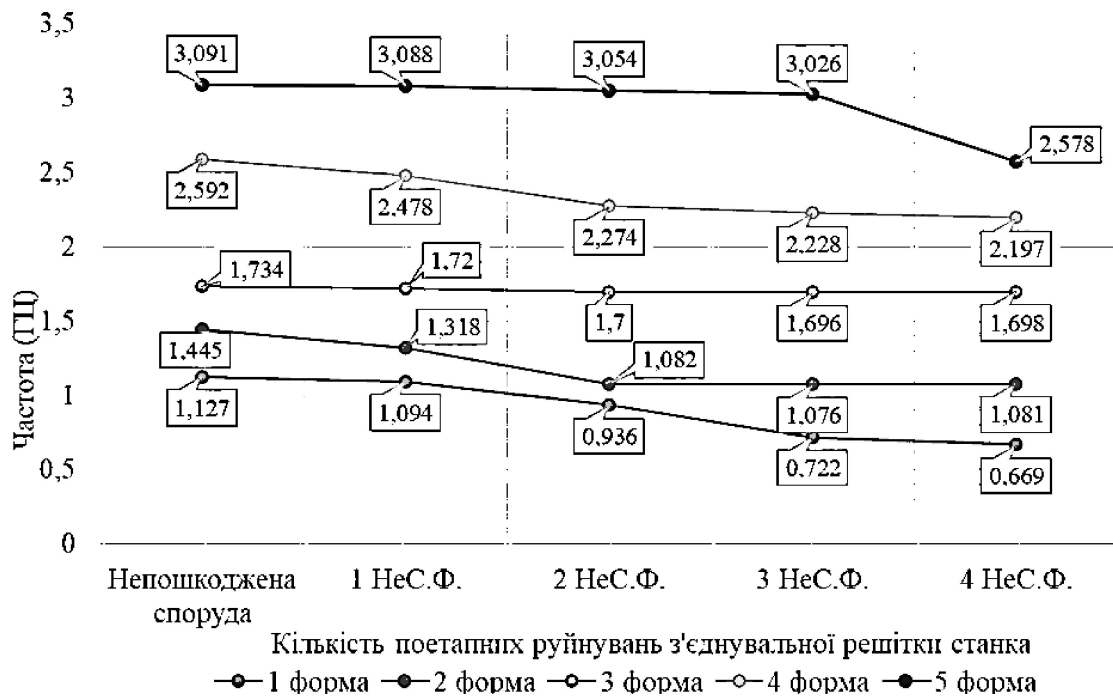
Результати аналізу впливу характерних експлуатаційних пошкоджень конструкцій копра на спектр власних частот

В результаті натурного експерименту і модального аналізу розрахункової моделі копра, було встановлено еталонний спектр власних частот, який відповідає конструкціям шахтного копра без експлуатаційних пошкоджень. Спектр власних частот коливань щільний і представлений згинальними та крутильними формами коливань, які за виключенням основного тону представлено крутильною формою коливань (1,127 Гц), наступні чотири форми власних коливань є послідовним чередуванням згинальних і крутильних (1,45...3,1 Гц) і починаючи з шостої по десяту форму коливання відбуваються за згинально-крутильною формами (3,5...6,1 Гц), така сама тенденція зберігається і для більш високих форм власних коливань.

В результаті чисельних експериментів було встановлено вплив характерних пошкоджень конструкцій шахтних копрів на спектр частот власних коливань для перших п'яти форм (рис. 4.).



а)



б)

Рис. 4. Графіки зміни власних частот (по перших п'яти формах): а - для симетричного розташування пошкоджень лівої і правої фасадної стінки станка; б - для несиметричного розташування пошкоджень по фасадних стінках станка; (1...4) С.Ф. – кількість симетрично пошкоджених панелей ферм станка; (1...4) НеС.Ф. – кількість асиметрично пошкоджених панелей ферм станка; напрямок нумерації власних форм – знизу догори

Аналіз графіків наведених на рис.4 показує загальну тенденцію зменшення частот перших п'яти форм власних коливань при пошкодженні конструкцій станка. Для симетричних пошкоджень конструктивних елементів станка перших трьох панелей є характерним зменшення частот другої і четвертої форми (згинальне-крутильні коливання) на 25...47%. Для пошкоджень чотирьох панелей в нижній частині станка (як симетричних так і асиметричних) є характерним зменшення частоти п'ятої форми (згинальні коливання) на 14...20%.

Висновки та рекомендації. В результаті пружно-пластичного аналізу розрахункової моделі конструкцій сталевих шахтного копра станкової системи було встановлено відношення головного вектору граничної рівноваги до головного вектору граничних значень різних варіантів аварійних навантажень в межах 1,46...1,53, що в цілому відображає резерви несучої здатності, які були закладені при проектуванні об'єкта дослідження. При цьому, багато разів статична невизначуваність конструкцій шахтного копра, суттєво на живучість споруди не впливає, оскільки лавиноподібне руйнування розпочинається відразу після втрати стійкості однієї з гілок укусини (в залежності від виду аварійного навантаження) (рис. 1, б) за

наявності суттєвої залишкової статичної зв'язності. Означені елементи гілок укосини являються ключовими елементами, цілісність яких, в першу чергу, визначає живучість конструктивної системи в цілому. Ключові елементи укосини уявляють собою важливе джерело інформації відповідно до технічного стану шахтного копра, яку можливо отримати в результаті тензометричного контролю їх напружено-деформованого стану в процесі експлуатації. Крім того спектральний аналіз діаграм динамічних напружень означених ключових елементів, які відповідають циклам роботи підйомної машини, дозволяє в режимі реального часу здійснювати контроль спектра власних частот коливань споруди [6].

Порівняння експериментальних значень власних частот конструкцій шахтного копра з результатами модального аналізу показав достатню точність динамічного розрахунку на просторовій стержневій моделі (відхилення до 12%).

При розрахунковому аналізі впливу характерних експлуатаційних пошкоджень конструкцій станка на спектр власних частот споруди, в якості значущих ефектів пропонується розглядати зміни власних частот споруди понад 20%.

Вимірювання параметрів вібрацій шахтних копрів в режимі вільних коливань, рекомендується здійснювати віброперетворювачами з нижнім порогом вимірювань від 1 Гц (наприклад - акселерометр MTN 7200), які доцільно розміщувати на рівні підшківних площадок відповідно до схеми наведеної на рис. 5.

Чисельні експерименти в середовищі ПК SCAD по моделюванню впливу, характерних для об'єкта дослідження, корозійних руйнувань елементів з'єднувальної решітки в нижній частині станка шахтного копра, показали загальну тенденцію зменшення частот перших п'яти форм власних. Для симетричних пошкоджень конструктивних елементів станка перших трьох панелей є характерним зменшення частот другої і четвертої форми (згинальне-крутильні коливання) на 25...47%. Для пошкоджень чотирьох панелей в нижній частині станка (як симетричних так і асиметричних є характерним зменшення частоти п'ятої форми (згинальні коливання) на 14...20%. Виявлені ефекти впливу корозійного руйнування елементів з'єднувальної решітки станка на спектр частот власних коливань, можна використовувати як діагностичні ознаки для вібраційного моніторингу технічного стану конструкцій шахтних копрів.

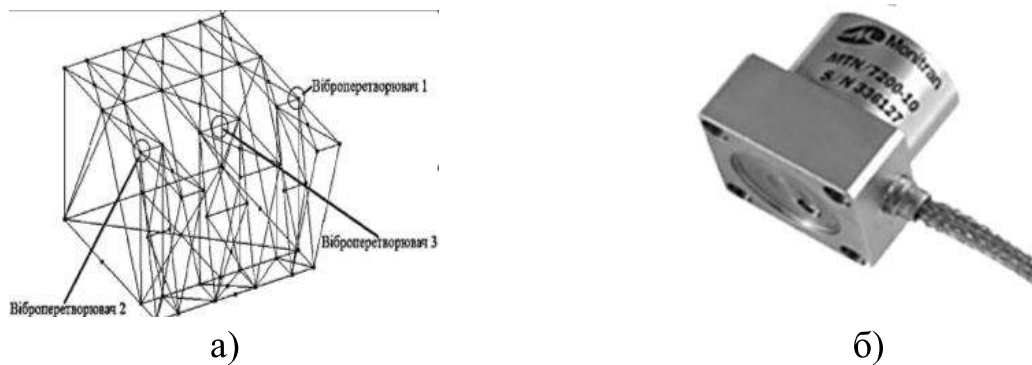


Рис. 5. Рекомендована схема вимірювання вібрацій: а - розміщення віброперетворювачів на підшківних конструкціях шахтного копра; б - низькочастотний акселерометр MTN 7200

1. Кущенко, В. Н. Обеспечение безопасности строительных конструкций укосных шахтных копров [Текст] : Монография / В. Н. Кущенко ; Донбасская нац. акад. стр. и арх. – Макеевка : ДонНАСА, 2006. – 202 с. : ил., табл.

Kushchenko, V. N. Obespechenye bezopasnosti stroytelnykh konstruktsiy ukosnykh shakhtnykh koprov [Tekst] : Monohrafiya / V. N. Kushchenko ; Donbasskaia nats. akad. str. y arkh. – Makeevka : DonNASA, 2006. – 202 s. : yl., tabl.

2. ДБН В.1.2-14: 2018 Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд. Київ: Міністерство розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2018 -30 с.

DBN V.1.2-14: 2018 Zahalni pryntsyvy zabezpechennia nadiinosti ta konstruktyvnoi bezpeky budivel i sporud. Kyiv: Ministerstvo rozvytku, budivnytstva ta zhytlovo-komunalnoho hospodarstva Ukrainy, 2018 -30 s.

3. Кущенко В.Н., Кулиш В.А. Анализ повреждаемости и аварийные состояния укосных шахтных копров. Уголь Украины – 2011 №10. – С. 39-43.

Kushchenko V.N., Kulysh V.A. Analyz povrezhdaemosti y avaryinie sostoianiya ukosnykh shakhtnykh koprov. Uhol Ukrainy – 2011 №10. – S. 39-43.

4. Kushchenko V.M., Khomitskyi. Vibration Monitoring of Steel Shaft Headgears/ Springer Nature Switzerland AG 2020/ Z. Blikharsky (ED): Eco CEE 2019, LNCE 47, pp 227-234.

5. Kushchenko V.M., Nechytailo O. Monitoring of Dynamic Loads on Steel Headframes/ Springer Nature Switzerland AG 2020/ Z. Blikharsky (ED): Eco Comfort 2020, LNCE 100, pp 245-252.

6. Кущенко В.Н. Применение динамических испытаний для технической диагностики строительных конструкций укосных шахтных копров. Металлические конструкции. – 2007. – т.13, № 2. – с. 113-122.

Kushchenko V.N. Prymenenye dynamycheskykh uspytanyi dlia tekhnicheskoi dyahnostyky stroytelnykh konstruktsiy ukosnykh shakhtnykh koprov. Metallycheskye konstruktsyy. – 2007. – t.13, № 2. – s. 113-122.

7. РД 12.005-94. Металлические конструкции шахтных копров. Требования к эксплуатации. – К: Госуглепром Украины, 1994. – 68 с.

RD 12.005-94. Metallycheskye konstruktsyy shakhtnykh koprov. Trebovaniya k yekspluatatsyy. – K: Hosuhleprom Ukrainy, 1994. – 68 s.