

УДК 681.178

## АВТОМАТИЗАЦІЯ ДІАГНОСТУВАННЯ МОЖЛИВОСТІ ВИНИКНЕННЯ ПАРАМЕТРИЧНОГО РЕЗОНАНСУ, ЯК ЕЛЕМЕНТ УПРАВЛІННЯ ПІДНІМАЛЬНИМИ КОМПЛЕКСАМИ ШАХТ

ПОПОВ С.О.<sup>1\*</sup>, д. т. н., проф.,  
ТИМЧЕНКО Р.О.<sup>2\*</sup>, д. т. н., проф.,  
КРИШКО Д.А.<sup>3\*</sup>, к. т. н., ст. викл.

<sup>1\*</sup> Кафедра автоматизації, комп'ютерних наук і технологій, Криворізький національний університет, вул. В.Матусевича, 11, 50027, Кривий Ріг, Україна, тел. +38 (056) 409-06-39, e-mail: [ultrapost\\_2017@ukr.net](mailto:ultrapost_2017@ukr.net), ORCID iD [0000-0003-4874-997X](https://orcid.org/0000-0003-4874-997X)

<sup>2\*</sup> Кафедра промислового, цивільного та міського будівництва, Криворізький національний університет, вул. В. Матусевича, 11, 50027, Кривий Ріг, Україна, тел. +38 (056) 409-17-27, e-mail: [radomirtimchenko@gmail.com](mailto:radomirtimchenko@gmail.com), ORCID ID: 0000-0002-0684-7013

<sup>3\*</sup> Кафедра промислового, цивільного та міського будівництва, Криворізький національний університет, вул. В. Матусевича, 11, 50027, Кривий Ріг, Україна, тел. +38 (056) 409-17-27, e-mail: [dak.sf.amb@gmail.com](mailto:dak.sf.amb@gmail.com), ORCID ID: 0000-0001-5853-8581

**Анотація. Мета.** Однією з актуальних проблем, яка виникає на вітчизняних залізрудних шахтах в процесі їх виробничої діяльності, є висока вірогідність виникнення явища параметричного резонансу при русі підйомних посудів по стволах шахт. Підйомні сосуди (скіпи) представляють масивні транспортні засоби вагою разом з вантажем до 80 т, скіпи рухаються зі швидкістю 8-11 м/с, мають довжину до 25 м і площу перетину до 4 м, об'єм кузова скіпа досягає до 100,0 м<sup>3</sup>. При їх переміщенні по направляючим провідникам шахтного армування по вертикальній трасі скіпи починають коливатись у горизонтальній площині. Зазвичай ці коливання є хаотичними і при відсутності перевищення певної межі за амплітудою ці коливання не представляють небезпеки. Однак за певних умов збудження руху скіпів і стану направляючих провідників нестационарні коливання скіпів можуть перейти в режим вібраційних коливань з накопиченням енергії і швидким збільшенням амплітуди коливань. За таких умов скіп, який представляє пружну конструкцію, може вийти у стан резонансних коливань і здійснювати надто великі навантаження на армування. В результаті цього армування може зруйнуватись і виникне аварія. На даний час у практиці залізрудного гірничодобувного виробництва відсутні засоби діагностування можливості виникнення параметричного резонансу по трасі переміщення підйомних посудів по стволах шахт. Це має вкрай негативні наслідки за аварійністю роботи підйомних комплексів шахт. **Наукова новизна. Результати.** Авторами були проведені відповідні дослідження і уперше розроблений експериментальний варіант комп'ютерного діагностичного комплексу, який спроможний виявляти, за результатами вимірювань, потенційно небезпечні ділянки трас підйомних посудів за можливістю виникнення на них параметричного резонансу. **Практична значимість.** Були виконані промислові випробування цього комплексу, які показали його надійність і достовірність результатів вимірювань ознаками наявності ділянок на яких стабільно повторювались коливання вібраційного характеру, що вказує на потенційну небезпечність таких ділянок. За результатами випробувань автори продовжують роботу по удосконаленню елементів цього комплексу і розробки нормативної та експлуатаційної документації.

*Ключові слова:* автоматизація; контроль; кінематичний зазор; підйомний посуд; управління; піднімальний комплекс

## АВТОМАТИЗАЦИЯ ДИАГНОСТИКИ ВОЗМОЖНОСТИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО РЕЗОНАНСА, КАК ЭЛЕМЕНТ УПРАВЛЕНИЯ ПОДЪЕМНЫМИ КОМПЛЕКСАМИ ШАХТ

ПОПОВ С. О.<sup>1\*</sup>, д. т. н., проф.,  
ТИМЧЕНКО Р. О.<sup>2\*</sup>, д. т. н., проф.,  
КРИШКО Д. А.<sup>3\*</sup>, к. т. н., ст. преподаватель.

<sup>1\*</sup> Кафедра автоматизации, компьютерных наук и технологий, Криворожский национальный университет, ул. В.Матусевича, 11, 50027, Кривой Рог, Украина, тел. +38 (056) 409-06-39, e-mail: [ultrapost\\_2017@ukr.net](mailto:ultrapost_2017@ukr.net), ORCID ID: 0000-0002-0684-7013

<sup>2\*</sup> Кафедра промышленного, гражданского и городского строительства, Криворожский национальный университет, ул. В. Матусевича, 11, 50027, Кривой Рог, Украина, тел. +38 (056) 409-17-27, e-mail: [radomirtimchenko@gmail.com](mailto:radomirtimchenko@gmail.com), ORCID ID: 0000-0002-0684-7013

<sup>3\*</sup> Кафедра промышленного, гражданского и городского строительства, Криворожский национальный университет, ул. В. Матусевича, 11, 50027, Кривой Рог, Украина, тел. +38 (056) 409-17-27, e-mail: [dak.sf.amb@gmail.com](mailto:dak.sf.amb@gmail.com), ORCID ID: 0000-0001-5853-8581

**Аннотация. Цель.** Одна из актуальных проблем, которая возникает на отечественных железорудных шахтах в процессе их производственной деятельности состоит в высокой вероятности возникновения явления параметрического резонанса при движении подъемных сосудов по стволам шахт. Подъемные сосуда (скипы) представляют массивные транспортные средства весом вместе с грузом до 80 т, скипы двигаются со скоростью 8-11 м/с, имеют длину до 25 г и площадь

поперечного сечения до 4 м, объем кузова скипа достигает до 100,0 м<sup>3</sup>. При их перемещении по направляющим проводникам шахтной армировки по вертикальной трассе скипы начинают колебаться в горизонтальной плоскости. Обычно эти колебания являются хаотическими и при отсутствии превышения определенного ограничения по амплитуде эти колебания не представляют опасности. Однако, при определенных условиях возбуждения движения скипов и состояния направляющих проводников нестационарные колебания скипов могут перейти в режим вибрационных колебаний с накоплением энергии и быстрым увеличением амплитуды колебаний. При таких условиях скоп, который представляет упругую конструкцию, может войти в состояние резонансных колебаний и осуществлять сильные удары по армировке. В результате этого армировка может разрушиться и возникнет авария. На данное время в практике железорудного горнодобывающего производства отсутствуют средства диагностирования возможности возникновения параметрического резонанса по трассе перемещения подъемных сосудов по стволам шахт. Это имеет крайне отрицательные последствия по причине аварийности работы подъемных комплексов шахт. **Научная новизна. Результаты.** Авторами были проведены соответствующие исследования и впервые разработан экспериментальный вариант компьютерного диагностического комплекса, который способен обнаруживать, по результатам измерений, потенциально опасные участки по трассе подъемных сосудов по возможности возникновения на них параметрического резонанса. **Практическая значимость.** Были выполнены промышленные испытания этого комплекса, которые показали его надежность и достоверность результатов измерений по признакам наличия участков, на которых стабильно повторялись колебания вибрационного характера. Это указывает на потенциальную опасность таких участков. По результатам испытаний авторы продолжают работу по усовершенствованию элементов этого комплекса и разработки нормативной, а также эксплуатационной документации.

*Ключевые слова:* автоматизация; контроль; кинематический зазор; подъемный сосуд; управление; подъемный комплекс

## DIAGNOSTICS AUTOMATION THE POSSIBILITY OF PARAMETRIC RESONANCE AS AN ELEMENT OF MANAGEMENT OF THE RISING MINE COMPLEXES

POPOV S. O. <sup>1\*</sup>, *Dr.Sci.Tech, Prof.*,  
TIMCHENKO R. A. <sup>2\*</sup>, *Dr.Sci.Tech, Prof.*,  
KRISHKO D. A. <sup>3\*</sup>, *Ph.D., senior lect.*

<sup>1\*</sup> Department of automation, computer science and technology, Kryvyi Rih National University, str. V.Matusevich, 11, 50027, Kryvyi Rih, Ukraine, phone +38 (056) 409-06-39, e-mail: ultrapost\_2017@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-0684-7013

<sup>2\*</sup> Department of industrial, civil and urban construction, Kryvyi Rih National University, str. V.Matusevich, 11, 50027, Kryvyi Rih, Ukraine, phone +38 (056) 409-17-27, e-mail: radomirtimchenko@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-0684-7013

<sup>3\*</sup> Department of industrial, civil and urban construction, Kryvyi Rih National University, str. V.Matusevich, 11, 50027, Kryvyi Rih, Ukraine, phone +38 (056) 409-17-27, e-mail: dak.sf.amb@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-5853-8581

**Annotation. Purpose.** One of the urgent problems that arise in the domestic iron ore mines in the process of their production activity is the high probability of the occurrence of parametric resonance when moving the lifting vessels along the shafts. Lifting vessels (skips) represent massive vehicles weighing up to 80 tons with weight, skips moving at a speed of 8-11 m / s, have a length of up to 25 g and a cross-sectional area of up to 4 m, the volume of the skip body reaches up to 100.0 m<sup>3</sup>. When they move along the guide conductors of mine reinforcement along a vertical route, the skips begin to oscillate in a horizontal plane. Usually these oscillations are chaotic, and these oscillations are not dangerous in the absence of exceeding a certain amplitude limit. However, non-stationary oscillations of skips can go into the mode of vibration oscillations with energy accumulation and a rapid increase in the amplitude of oscillations under certain conditions for the initiation of movement of skips and the state of guide conductors. Under such conditions, the scop which is an elastic structure can enter into a state of resonant oscillations and carry out strong blows to the reinforcement. As a result, the reinforcement may collapse and an accident will occur. At this time in the practice of iron ore mining production there are no means of diagnosing the possibility of the occurrence of parametric resonance along the route of the lifting vessels along the shafts of mines. This has extremely negative consequences on the cause of the accident rate of the operation of the mine lifting systems. **Results.** The authors carried out relevant studies and for the first time developed an experimental version of a computer diagnostic complex that is able to detect, according to the results of measurements, potentially dangerous sections along the route of the lifting vessels as far as possible for the occurrence of parametric resonance on them. **Practical value.** Industrial tests of this complex were performed, which showed its reliability and validity of the measurement results on the basis of signs of the presence of areas in which vibrational vibrations were consistently repeated. This indicates the potential hazard of such areas. According to the test results, the authors continue to work on the improvement of the elements of this complex and the development of regulatory and operational documentation.

*Keywords:* automation; control; kinematic clearance; lifting vessel; control; lifting complex

### Актуальність проблеми

Однією з провідних галузей індустрії України є залізорудна гірничодобувна промисловість. За продуктивністю видобутку залізних руд і

виробництва з них товарних видів залізорудної продукції вона входить до групи світових лідерів і займає 7 місце з 52 країн, у яких здійснюється таке виробництво.

Зі всього обсягу залізорудної продукції до 20% в

Україні виробляється при застосуванні для розробки родовищ цих руд підземного способу (шахтами).

Необхідно відмітити, що тривала і інтенсивна розробка запасів цих руд вже на протязі більше 60 років призвела до того, що к початку 2000-х років основні вітчизняні залізородні шахти досягли великих глибин розробки 1400–1500 м, у найближчій перспективі планується їх збільшення до 1600–1800 м, а потім і до 2000 м.

В процесі здійснення розробки кожна залізородна шахта видобуває від 1,5 до 3,5 міль.т на рік залізної руди і до 10,0-20,0 тис.м<sup>3</sup> пустих порід. Вся ця гірнична маса видається з шахт на земну поверхню піднімальними комплексами по стволах шахт.

Транспортування гірничої маси по стволах здійснюється у підйомних сосудах спеціальних конструкцій – скіпах. Скіпи представляють транспортні засоби, вантажопідйомністю 60,0–80,0 т, а їх вага з вантажем досягає 80,0–120,0 т. Скіпи переміщуються по стволах зі швидкістю 8,0-11,0 м/с. За добу один скіп здійснює до 300-400 циклів «спуск/підйом», у стволі функціонує 2 скіпи.

Слід зауважити, що при подальшому збільшенні глибин розробки для підтримки необхідної продуктивності шахт швидкість руху скіпів необхідно буде збільшувати до 15–20 м/с.

Однак високі швидкості переміщення скіпів (навіть і на даний час) пов'язані з ризиком виникнення одного вкрай небезпечного явища, яке має назву «Параметричний резонанс» [6].

Це явище може виникнути в процесі руху підйомного сосуда по вертикальній трасі і полягає у непередбачуваному розвитку коливань підйомного сосуда у горизонтальній площині, які набувають форми низькочастотної вібрації зі зростаючою амплітудою і частоті 5-7 Гц. Резонанс призводять до розвитку потужних ударів підйомного сосуда по направляючим провідникам армування шахт з розвитком настільки великих зусиль, що руйнується і провідники та армування і виникає аварія. Такі аварії не раз відбувались на вітчизняних глибоких шахтах, а підвищення швидкості руху підйомних посудів збільшує ймовірність їх виникнення.

Ліквідація наслідків таких аварій є вкрай складним і небезпечним процесом, його виконання потребує здійснення тривалих ремонтних робіт в складних умовах шахтних стволів і зупинки роботи всієї транспортної системи шахти на період, тривалість якого дуже важко спрогнозувати, це залежить від масштабу аварії. Така ситуація призводить до суттєвих економічних збитків для гірничодобувних підприємств.

Необхідно відмітити, що підйомні комплекси шахт представляють масштабні і багатоелементні технічні системи зі складною схемою управління їх функціонуванням. Несподіване виникнення при їх роботі збоїв, спричинених аваріями з розвитку параметричного резонансу, суттєво ускладнює управління роботою піднімальних комплексів, призводячи до порушення на невизначений час

параметрів вантажопотоків. Втрати обсягів доставки вантажів від таких порушень необхідно потім компенсувати інтенсифікацією вантажопотоків, а це потребує ще більшого підвищення швидкості руху підйомних посудів.

Таким чином, розробка заходів з усунення небезпеки прояву параметричного резонансу і зниження ризику виникнення аварійних ситуацій при функціонуванні підйомних комплексів шахт є актуальною проблемою як чисто технічного характеру, так і проблемою сфери управління піднімальним комплексом, для стабілізації параметрів вантажопотоків по стволах. Відповідно, система управління роботою піднімальних комплексів шахт повинна обов'язково мати у своєму складі засоби діагностування можливості виникнення параметричного резонансу.

### Аналіз досліджень і публікацій

Виконаний огляд і аналіз літературних джерел з проблеми усунення ризиків виникнення параметричного резонансу при роботі піднімальних комплексів шахт показав, що нею займалась такі вчені: Н. Г. Гаркуша, В. И. Дворніков, А. О. Рубель, С. Е. Блохін, А. П. Ветров, К. А. Соломенцев, А. В. Коржук, В. И. Василькевич, С. Р. Ільїн та ряд інших [1,2,4,5]. Роботи цих дослідників основному спрямовувались на розробку теорії, яка пояснює причини виникнення і характер дії параметричного резонансу, математичного описання цього явища, розробки методів зменшення руйнівної дії резонансу та конструктивних рішень підйомних посудів і трас їх руху, які підвищують стабільність руху зі зменшенням коливальних збуджень.

Наряду із цим на даний час майже відсутні розробки, які спрямовані на створення засобів, які дозволяють виявити саму потенційну можливість виникнення параметричного резонансу і ділянок трас руху підйомних посудів, на яких мають місце умови, потенційно спроможні призвести до цього явища, а це є основою для реалізації технічних, технологічних і організаційних заходів з усунення можливості прояву параметричного резонансу.

Єдиною роботою у цім напрямі, яка забезпечує певну можливість виявлення таких ділянок є розроблений в Інституті геотехнічної механіки НАН України апаратний комплекс для вимірювання горизонтальних прискорень підйомного сосуда при його русі по стволу шахти [3]. Наявність у русі сосуда збурювань і надбання ними вібраційного характеру є певною ознакою умов, здатних спровокувати параметричний резонанс.

Однак, слід відмітити, що надійно оцінити ступінь небезпечності, таких умов тільки за величиною вібраційних прискорень все ж неможливо. Це обумовлене тим, що великі горизонтальні прискорення і надбання ними характеру вібраційних коливань ще не є достатньою умовою потенційної небезпечності розвитку

резонансу, хоча це є важливою ознакою порушення нормального руху підйомного сосу́ду.

Енергія таких коливань може з успіхом гаситись засобами забезпечення плавності руху сосу́ду (амортизаторами роликів) та інерційністю самого масивного підйомного сосу́ду, адже розхитати його разом з підйомними канатами достатньо складно. Тобто, далеко не всі явища вібраційного характеру ведуть до розвитку повномасштабного явища параметричного резонансу.

У даному разі важливою ознакою наявності умов, які спроможні призвести до параметричного резонансу є не тільки величина і стабільність вібраційних прискорень, а і параметри фізичного зміщення підйомного сосу́ду у горизонтальній площині під дією змінних сил, які призводять до вібрації. Тобто має важливе значення також і амплітуда зміщень, тобто амплітуда вібрацій.

Вібраційні прискорення за певних умов можуть бути великими, а фізичне зміщення підйомного сосу́ду при цьому може бути невеликою, і навпаки, вібраційні прискорення можуть бути відносно невеликими, а амплітуда зміщення підйомного сосу́ду, при цьому, може бути настільки значною, що він починає наносити потужні удари по направляючих провідниках.

Таким чином, ведучу роль у силовій дії резонансу і ступені його небезпечності відіграє амплітуда коливань, яку розвиває підйомний сосу́д при певних параметрах вібрацій.

Наряду із вище сказаним все ж необхідно відмітити, що вібраційні прискорення, навіть і відносно невеликої інтенсивності, особливо при їх стабільних повтореннях, все ж є ознакою наявності порушень режиму руху підйомного сосу́ду, яку обов'язково необхідно враховувати при визначенні небезпечних ділянок трас їх руху за потенційною можливістю виникнення резонансу.

Ще однією складністю у виявленні умов, що спроможні призвести до потенційної небезпеки прояву параметричного резонансу, є наступне. Часто дуже складно у змінній амплітуді горизонтальних коливань підйомного сосу́ду виявити ознаки регулярності прояву окремих стабільних збурень (регулярних штовхів) на фоні масового нестабільного збурення підйомного сосу́ду за амплітудою і за частотою коливань. Безпечні коливання підйомного сосу́ду (як «шум») можуть визиватись і іншими причинами, наприклад, коливаннями канатів.

Закономірності у збуренні його руху за таких умов можна виявити тільки шляхом детального аналізу даних по зміщенні і прискорення підйомного сосу́ду методами обробки нечітких даних і тільки спеціалізованими комп'ютерними системами, побудованими на принципах штучного інтелекту, описаних в роботах [7, 8]. Такі методи дозволяють виявити певні закономірності у даних за наявності сильних «шумів», які носять нестабільний та безпечний характер, але які сильно спотворюють

загальну амплітудно-частотну характеристику коливального процесу.

Таким чином, для здійснення коректної і надійної оцінки можливості виникнення параметричного резонансу необхідно здійснювати комплексний контроль і аналіз руху підйомного сосу́ду і за амплітудою і за динамікою вібраційних прискорень.

Слід відмітити, що до теперішнього часу засобів виміру амплітуди коливань підйомних сосу́дів безпосередньо в процесі їх руху у стволах шахт не було розроблено.

### Мета роботи

Ґрунтуючись на вище викладеній інформації, авторами було поставлено за мету розробити систему, яка дозволяє виявляти умови, спроможні призвести до параметричного резонансу в процесі руху підйомних сосу́дів у стволах шахт за амплітудою їх коливань та визначати ділянки траси їх руху, на яких має місце потенційна загроза його виникнення.

### Методика

Фізична основа роботи системи, яка розроблена авторами, ґрунтується на особливостях поведінки підйомного сосу́ду за його зміщеннями у горизонтальній площині відносно вертикальної осі при русі підйомного сосу́ду по направляючим провідникам.

Ці особливості полягають у наступному. Параметри і характер сил, які діють при русі скіпа по направляючим провідниками і його горизонтальних зміщень в основному залежать від трьох факторів, а саме: швидкості руху; стану провідників (ступені їх лінійності) і маси скіпа з вантажем, пр. цьому слід враховувати і масу підйомних канатів.

Скіп представляє масивну конструкцію з високою інерційністю. У перетині скіп площу до 3-4 м<sup>2</sup>, а його довжина до 25 м. Для наглядного представлення масштабності цієї конструкції на рис. 1 наведений загальний вид 60-тонного скіпа, де: 1 – вантажний короб скіпа; 2 – завантажувальна горловина; 3 – оглядова площадка; 4 – підйомний канат; 5 – кріплення роликів, що амортизують; 6 – несучий пояс скіпа; 7 – розвантажувальна горловина.

Схема дії сил, які виникають при русі скіпа, наведена на рис. 2, де  $P$  – сила тяги від приводу підйомної машини;  $F_1$  – сила зміщення верхньої частини підйомного сосу́ду перпендикулярно вісі розташування направляючих провідників;  $F_2$  – сила зміщення верхньої частини підйомного сосу́ду у напрямі вісі розташування направляючих провідників;  $F_3, F_3$  – відповідні сили зміщення у верхньої частини підйомного сосу́ду навпроти напрямів сил  $F_1$  і  $F_2$ ;  $S_1, S_2, S_3, S$  – аналогічні сили у нижній частині підйомного сосу́ду.

При переміщенні скіпа по вертикальній трасі він знаходиться у застиглому стані між двома направляючими провідниками 2 і 3 (рис. 2). На них

опираються ролики з амортизаторами, встановлені на кріплення 5 (рис. 1). Між поверхнею провідника і запобіжними башмаками підйомного сосуда є певний простір, ширина якого за нормативом становить всього 15 мм (сумарний зазор з обох боків підйомного сосуда складає 30 мм). Цей зазор дозволяє зміщуватись сосуду на відповідну величину у горизонтальній площині.

Система «Підйомний сосуд – роликоопори – направляючі провідники» амортизують зусилля  $F_1, F_2, F_3, F_4, S_1, S_2, S_3, S_4$ . Це виконують пружні амортизатори, які надають всій цій системі властивості пружності. Відповідно ця система працює в режимі пружних коливань поки не буде повністю вибраний зазор 15 мм з одного боку.

В результаті відштовхування підйомного сосуду від провідників у точках розташування роликоопор виникають його бокові зміщення. Кожний силовий вплив роликоопор на провідник  $F_1, F_3, S_1, S_3$  визиває в пружинах і провідниках реакцію  $F'_1, F'_3, S'_1, S'_3$ , тобто генерує зусилля, яке спрямоване підйомний сосуд у протилежну сторону.

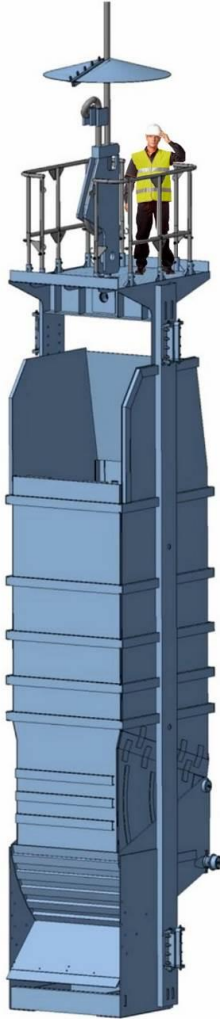


Рис. 1. Загальний вигляд шахтного скіпа / General view of mine skip

В результаті цього виникає аналогічний вплив на

протилежний провідник і протилежна роликоопора та провідник також реагують відповідним образом (рис. 3 а). В результаті підйомний сосуд починає розхитуватись. Траса руху скіпа не є ідеально рівною і на нього діють і інші сили. Це призводить до того, що коливання скіпа зазвичай не є стабільними за характеристиками, але є постійними за самим проявом коливань.

При цьому, за певних умов може скластись ситуація, при якій силовий вплив на підйомний сосуд з обох боків на певний період часу стають рівними, чи близькими за параметрами. В результаті цього нестационарні коливання підйомного сосуду переходять у режим вібраційного характеру. Таке явище виникає коли частота спонтанних коливань підйомного сосуду співпадає з власною частотою коливань пружної системи «Підйомний сосуд – роликоопори – провідники», саме такий режим і призводить до параметричного резонансу.

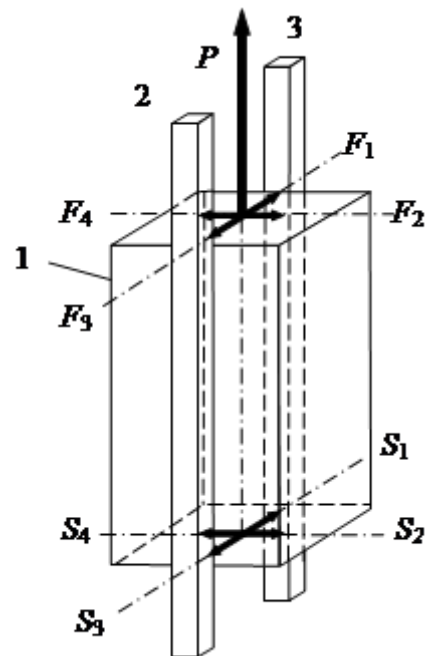


Рис. 2. Основні сили, які виникають в процесі руху підйомного сосуду у стволі / The main forces that arise during the movement of the lifting vessel in the trunk

Однак, сам по собі параметричний резонанс ще не призводить до небезпеки. Наприклад, на відносно невеликих швидкостях руху підйомного сосуду, або при невеликих порушеннях лінійності провідників, пружності амортизаторів достатньо для погашення енергії резонансних коливань і вони не наростають за амплітудою до значень, які є небезпечними.

Небезпечних характеристик ці коливання набувають тільки за таких умов. Сила  $P$ , яку розвиває підйомна установка передається на підйомний сосуд і розкладається на вертикальні зусилля  $P_{11}, P_{21}$  і бокові складові  $P_{10}, P_{20}$  (Рис. 3 б). Саме бокова складова розхитує підйомний сосуд між провідниками.

Якщо енергію цих коливань не зможуть повністю поглинути амортизатори роликоопор вона почне накопичуватись у описаній пружній системі.

Таке явище виникає при точному співпадінні величини сил впливу підйомного сосуда  $F(S)$  на провідник і реакції роликоопор на цей вплив  $F'(S')$ , а також співпадінні лінії, по якій діє сила впливу підйомного сосуда з лінією, по якій діє реакція амортизаторів. Відповідно це призводить до збільшення амплітуди коливань. Дуже швидко ця амплітуда набуває таких значень, що пружини роликоопор вже не спроможні амортизувати навантаження від скіпа. В результаті, скіп починає бити запобіжними башмаками по провідниках.

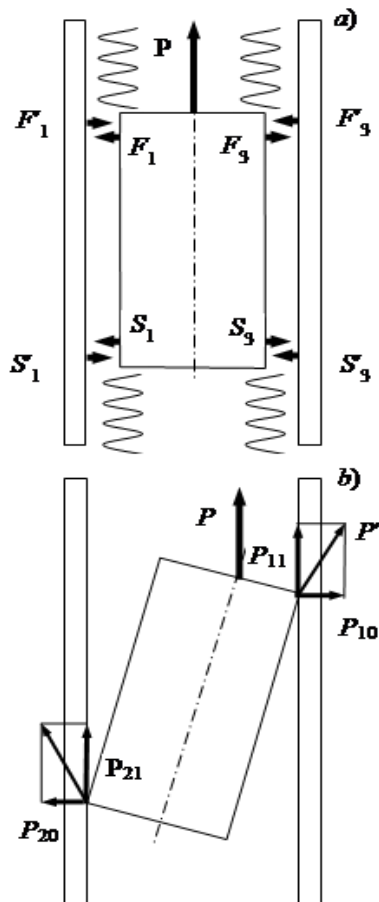


Рис. 3. Поведінка скіпа при параметричному резонансі / Skip behavior under parametric resonance

За таких жорстких ударів сила реакції провідників зростає на порядки і підйомний посуд за долі секунд входить в режим потужних резонансних коливань. При цьому скіп різко гальмується і розвиваються великі навантаження  $P'$ ,  $P''$  на провідники і  $P$  на підйомний канат (Рис. 3 б).

Наслідки цього явища є вкрай важкими, вони проявляються у майже миттєвому розривному руйнуванні чи значній деформуванні провідників, елементів конструкції підйомних посудів, балок армування, розриви підйомного канату, заклинюванні підйомних посудів між провідниками.

Для того щоб запобігти виникненню такого явища необхідно заздалегідь виявити (діагностувати) можливість і ділянки траси руху підйомного посуду, на яких мають місце умови, спроможні призвести до параметричного резонансу.

Потенційна можливість виникнення цього явища може бути встановлена за параметрами вібраційного зміщення підйомного посуду відносно провідників. Тобто, на таких ділянках амплітуда його зміщень буде переходити від спонтанних неупорядкованих коливань до стабільних коливань за амплітудою коливань близької до синусоїди, а також регулярних коливань з наростаючою амплітудою зміщення.

Для виявлення таких ділянок необхідно проаналізувати характер зміни амплітуди коливань підйомного посуду, який рухається на робочій швидкості, на всьому протязі траси його переміщення по стволу шахти. При цьому, величина зміщень повинна контролюватись у двох взаємоперпендикулярних напрямках відносно кожного провідника по осі розташування пари провідників і перпендикулярно цій осі.

Якщо виявлені таким чином ділянки співпадуть з ділянками, на яких будуть виявлені також вібраційні прискорення які повторюються на різних циклах підйом-спуск, можна буде з високою достовірністю говорити про небезпечність таких ділянок за потенційною можливістю виникнення на них параметричного резонансу.

Для реалізації можливості такого діагностування авторами була розроблена спеціальна вимірювально-аналітична комп'ютеризована система, принципова блок-схема якої наведена на рис. 4.

Вказана система включає такі елементи: детектори зміщення 1, 2 (лазерні триангуляційні датчики), які охоплюють провідник з трьох сторін. Детектори встановлюються на підйомному посуді напроти провідника для вимірювання зміщення у лобовому і боковому напрямках; датчик пройденого шляху 3 (лічильник балок армування, дистанція між якими становить 3,0 або 4,0 м); система зчитування даних 4 з детекторів; система запису даних вимірювань 5; система аналізу результатів вимірювання і виявлення потенційно небезпечних ділянок 6 по трасі руху підйомного посуду; система 7 відображення результатів аналізу у вигляді графіка.

Вигляд цієї системи, наведений на рис. 5, де: 1, 2 – триангуляційні датчики; 3 – лічильник балок армування; 4 – мікроконтролерний блок; 5 – ноутбук



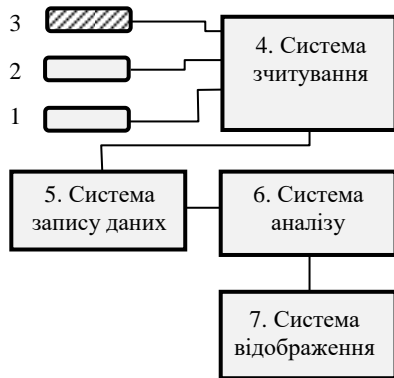


Рис. 4. Принципова схема системи контролю параметрів руху підйомного сосуду / Schematic diagram of the control system parameters of the lifting vessel movement

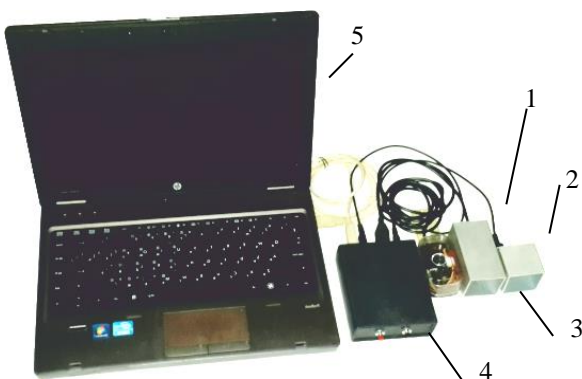


Рис. 5. Загальний вигляд системи виміру зміщень підйомних сосудів / General view of the displacement measurement system for lifting vessels

Описана система була випробувана у промислових умовах на шахті «Тернівська» ЧАТ «Кривбасзалізрудком». Випробування проводяться на головному рудопідйомному стволі цієї шахти глибиною 1500 м, на скіпу при його руху зі швидкістю 11 м/с. Результати вимірювань і аналізу даних випробувань, наведені на графіку рис. 6

На цьому графіку представлені величини амплітуди зміщення верхньої частини скіпа у лобовому напрямі одного з провідників по всій довжині його руху після усунення «шумів» і автоматизованого аналізу форми зміни амплітуди коливань підйомного сосуду. Такі зйомки виконувались 4 рази в режимі спуск/підйом.

З наведеного графіка видно, що амплітуда коливань скіпа на всьому протязі його руху не перевищує припустимого зміщення за зазором  $\pm 15$  мм). Відповідно амортизаційних властивостей роликкоопор достатньо для погашення його енергії.

Наряду із цим необхідно відмітити, що автоматизований аналіз результатів цієї зйомки показав, що по трасі скіпа у межах горизонтів 650-693 м (тобто на дистанції  $L=43$  м) має місце ділянка, на якій декілька раз було зафіксовано синусоїдальний характер амплітуди коливань скіпу з величиною біля 11 мм, але без зростання величини цієї амплітуди.

Це говорить про те, що ця ділянка траси має умови спроможні призвести до параметричного резонансу, але при регламентованому режимі руху підйомного сосуду амортизаційної спроможності пружних роликкоопор поки достатньо для протидії регулярним збудженням сосуду. Але це говорить про те, що на вказаній ділянці все ж має місце потенційна небезпека і за певних умов на ній може виникнути повномасштабний параметричний резонанс, особливо у разі збільшення швидкості руху підйомного сосуду підйому.

Таким чином, на цю ділянку траси необхідно звернути увагу і виконати більш детальне обстеження стану армування стволу на ній і іншими методами, регламентованими правилами обслідування армування.

### Висновки

В результаті виконаних досліджень і розробок авторів можна зробити такі висновки.

1. Проблема забезпечення безаварійної експлуатації підйомних комплексів глибоких залізрудних шахт є вкрай актуальною для України в результаті великого значення їх стабільного і ефективного функціонування для економіки і промисловості країни.

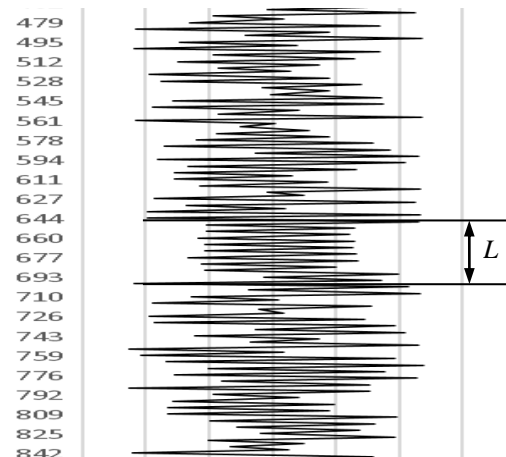


Рис. 6. Результати зйомки / Shooting results

Ця проблема загострюється у зв'язку із тим, що основні шахти вказаної галузі досягли великих глибин розробки, які будуть у подальшому збільшуватись, що суттєво ускладнює контроль стану трас руху підйомних сосудів в них.

2. Елементи армування і підйомних комплексів шахт, а саме направляючі провідники і підйомні сосуди функціонують у вкрай складних умовах при підвищених навантаженнях на них. Ці умови призводять до частого виникнення ситуацій, які можуть призвести до аварій. Найбільш небезпечною формою таких аварій є «Параметричний резонанс» при руху підйомного сосуду на великих швидкостях в контакт з направляючими провідниками.

3. Вірогідність виникнення такого явища

обумовлена тим, що до теперішнього часу були відсутні засоби, які дозволяють виявити ділянки трас руху підйомних судів, стан яких і характеристики руху підйомних судів на яких формують умови, що можуть призвести до параметричного резонансу.

4. В результаті виконаних авторами досліджень була розроблена автоматизована систем на основі мікропроцесорної техніки, яка дозволяє виконувати діагностику характеру взаємодії підйомний суд-направляючі провідники і по характеру їх взаємодії виявити потенційно небезпечні ділянки трас за можливістю виникнення параметричного резонансу.

5. Випробування цієї системи у промислових

умовах показало її надійність і точність отриманих результатів діагностування характеристик систем підйомний суд-направляючі провідники.

6. Розробка пристрою для вимірювання зміщень підйомного суду і його частин в процесі його руху по направляючим провідникам і методики обробки результатів таких вимірювань надає змогу у подальшому розроблення повної автоматизованої системи комплексного діагностування потенційних загроз для функціонування піднімального комплексу шахт та необхідної нормативної бази для здійснення такого діагностування, як елемента системи управління роботою піднімальних комплексів.

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гаркуша Н. Г. Уравнения движения шахтного подъёмного сосуда, как одномерной упругой конструкции / Н.Г. Гаркуша, В.И. Дворников // Прикладная механика. – К., 1969. – Вып. 12. – Т. 5 – С. 125-132.
2. Гаркуша Н. Г. Рациональный выбор параметров подъёмных сосудов и жёсткой к армировки вертикальных стволов / Н.Г. Гаркуша, В.И. Дворников // Шахтное строительство. – М.: 1968. – №1. – С. 12-16.
3. Ильин С. Р. Механика шахтного подъема / С.Р. Ильин, С.С. Ильина, В.И. Самуся / Монография. – Днепропетровск: НГУ, 2014. – 246 с.
4. Рубель А. А. О возможности совершенствования оборудования шахтных стволов путем создания армировок, обладающих непараметрическими свойствами / А.А. Рубель // Зб. науч. тр. «Автоматика та електромеханіка». – Дніпропетровськ, 1999. – № 2 (61). – С.47-49.
5. Рубель А. А. Обоснование влияния применения резиновых демпферов в конструктивных элементах системы “сосуд – армировка” / А.А. Рубель // Междунар. симпозиум. «Механика эластомеров – 2001». – Днепропетровск, 2001. – С. 27.
6. Якубович В. А. Параметрический резонанс в линейных системах / В.А. Якубович, В.М. Старжинский. – М.: Наука, 1987. – 328 с.
7. Juang C.-F., Ku S.-J., Huang H.-J. Fuzzy temporal sequence processing by recurrent neural fuzzy network // Systems man and cybernetics 2004. IEEE International conference, vol. 6, 5847-5851 (2004)
8. Thomas R., Friend D., DaSilva L., MacKenzie A. Cognitive networks: Adaptation and learning to achieve end-to-end performance objectives. IEEE Communications magazine, 12 (44), 21 (2006).

#### REFERENCES

1. Garkusha N.G. and Dvornikov V.I. *Uravneniya dvizheniya shakhtnogo podemnogo sosuda, kak odnomernoy uprugoy konstruktssii* [Equations of motion of a mine lifting vessel, as a one-dimensional elastic structure]. *Prikladnaia mekhanika* [Mechanics applied]. – Kiyev, 1969, Vol. 12, issue 5, pp. 125-132. (in Russian).
2. Garkusha N.G. and Dvornikov V.I. *Ratsionalnyy vybor parametrov podemnykh sosudov i zhestkoy k armirovki vertikalnykh stvolov* [Rational choice of parameters of lifting vessels and rigid to reinforcement vertical shafts]. *Shakhtnoe stroitelstvo* [Mine construction] – Moscow, 1968, no 1, pp. 12-16. (in Russian).
3. Ilin S.R., Ilina S.S. and Samusia V.I. *Mekhanika shakhtnogo podema* [Mine lifting mechanics], Dnepropetrovsk: NGU, 2014, 246 p. (in Russian).
4. Rubel A.A. *O vozmozhnosti sovershenstvovaniya oborudovaniya shakhtnykh stvolov putem sozdaniya armirovok, obladayushchikh neparametricheskimi svoystvami* [About the possibility of improving the equipment of mine shafts by creating reinforcement with non-parametric properties]. *Avtomatika ta elektromekhanika* [Automatics and electrical mechanics]. – Dnipropetrovsk, 1999, no 2(61), pp.47-49. (in Russian).
5. Rubel A.A. *Obosnovaniye vliyaniya primeneniya rezinovykh dempferov v konstruktivnykh ehlementakh sistemy “sosud – armirovka”* [Justification of the influence of the use of rubber dampers in the structural elements of the system “vessel - reinforcement”]. *Mekhanika elastomerov – 2001* [Mechanics of elastomers – 2001], Dnepropetrovsk, 2001, P. 27. (in Russian).
6. Yakubovich V.A. and Starzhinskiy V.M. *Parametricheskyy rezonans v lineynykh sistemakh* [Parametric resonance in linear systems], Moscow, Nauka, 1987, 328 p. (in Russian).
7. Juang C.-F., Ku S.-J., Huang H.-J. Fuzzy temporal sequence processing by recurrent neural fuzzy network // Systems man and cybernetics 2004. IEEE International conference, vol. 6, 5847-5851 (2004)
8. Thomas R., Friend D., DaSilva L., MacKenzie A. Cognitive networks: Adaptation and learning to achieve end-to-end performance objectives. IEEE Communications magazine, 12 (44), 21 (2006).