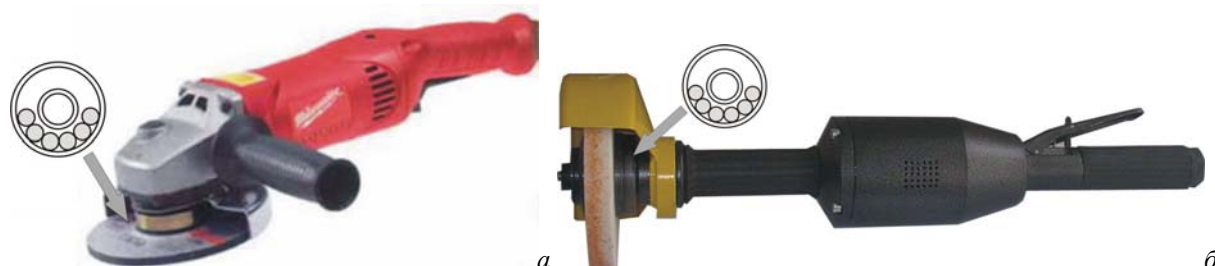


Розрахунок параметрів автобалансирів для зрівноваження дисків ручних шліфувальних машин*

Запропоновано використати автобалансири з нерухомими й рухомими перегородками для зрівноважування дисків ручних шліфувальних машин. Наведені алгоритми розрахунків основних параметрів як звичайних, так і запропонованих автобалансирів.

ротор, автобалансир, зрівноважування, дисбаланс, ручна шліфувальна машина

Ручні шліфувальні машини (РШМ) знайшли широке застосування у машино і кораблебудуванні, будівництві тощо. Під час експлуатації РШМ виникає додаткове збільшення вібрації, через встановлення нового диска з погрішністю, через його нерівномірне зношування під час виконання технологічної операції, а також при застосуванні неякісних дисків. Для усунення виникаючих додаткових вібрацій відомі фірми застосовують пасивні автобалансири (далі АБ) рис. 1 а, б, табл. 1.



а - кутова шліфувальна машина (КШМ, електрична Milwaukee AG16-150);
б - радіальна шліфувальна машина (пневматична ПШМ 47 P051-15).

Рисунок 1 - Зовнішній вигляд РШМ з АБ

Таблиця 1 - Виробники РШМ з АБ, та марки машин

Фірма	Модель РШМ
FEIN (Німеччина)	Електрична: WSB25-230X.
Kress (Німеччина)	Електрична: 2500WSB.
PROTOOL (Чехія)	Електричні: AGP 230-25 AB FF; AGP 230-5 FF; AGP 180-25 AB; AGP 150-16 Q AB FF; AGP 150-14 CEQ.
Milwaukee (США)	Електричні: AGV23-230B; AGV20-180; AGV16-180QXC; AG16-150QXC; AG16-125XC.
AtlasCopco (Швеція)	Електричні: Brazor/ESV G71 S060; Brazor/ESV G71 F060- 23; Brazor/ESV G71 F085-18; Brazor/ESV G71 F120-13. Пневматичні: GTG 21 F085-18; GTG 21 F120-13; GTG 40 S060-CS; GTG21 S085; GTG40 F066-23; GTG40 F085-18; GTG40 S060-C15; GTG40 S072-CS; GTR40 S060-15.
ПРУМА (Росія)	Пневматичні: ПШМ 47 P051-15

Застосування АБ для зрівноважування дисків РШМ вивчалось в роботах Ю.В.Агафонова [1-3], Ю.В.Агафонова, Б.Г.Гольдштейна [4], С.Н.Кладієва [5], Л.А.Пашкової [6], Алабужева П.М., Зуєва А. К., Кирнарського М. Ш. [7], Філімоніхіна Г.Б. [8], S.Emanuelsson [9], Т.Міва, К.Сузукі, Т.Кавагучі, Y.Кавакамі, S.Ohtsu [10], С.Rajalingham, R.V.Bhat, S.Rakheja [11]; Shimizu S., Lee H. S. [12], Г. Б. Філімоніхіна, В. С. Майорова [13], S. Olausson, A. Hagglund, P. Wierzba [14], та інших вчених.

У вказаних роботах немає оцінок різних способів встановлення АБ у РШМ, немає оцінок застосування різних типів АБ, методику перевірки якості їх встановлення, алгоритмів розрахунку основних параметрів АБ. В цієї роботі ця неповнота надолужується.

РШМ підрозділяються по розташуванню робочого диска на кутові, радіальні й джерелу живлення на електричні (рис. 1, а), пневматичні (рис. 1, б).

Розглянемо типову конструкцію КШМ з АБ та оцінемо різні схеми встановлення АБ. На рис. 2 наведена конструкція КШМ з АБ, до складу якої входять: корпус 1, АБ 2 чи 5, вал 3, захисний кожух 4, затискний фланець 5 (можливе виконання як АБ), диск 6, фланцева гайка 7. звичайний кульовий АБ 8. Останній встановлюється в РШМ на заводі-виробнику насадженням АБ на вал із натягом. Витратні матеріали (диски різних типів) балансуються на заводі-виробнику, як правило за 2-3 класом точності в залежності від якості і призначення диска.

Фірми виробники КШМ використовують на даний момент два стаціонарні місця встановлення АБ на валу машини: перед захисним кожухом (рис. 2 поз. 2); за захисним кожухом перед диском із суміщенням АБ із затискним фланцем (рис. 2 поз. 5), при цьому деталь 2 відсутня. Ми будемо додатково вивчати можливість суміщення АБ із фланцевою гайкою 7. В цьому випадку при використанні малих дисків доцільно буде застосовувати звичайну фланцеву гайку, а при використанні важких дисків – суміщену із АБ.

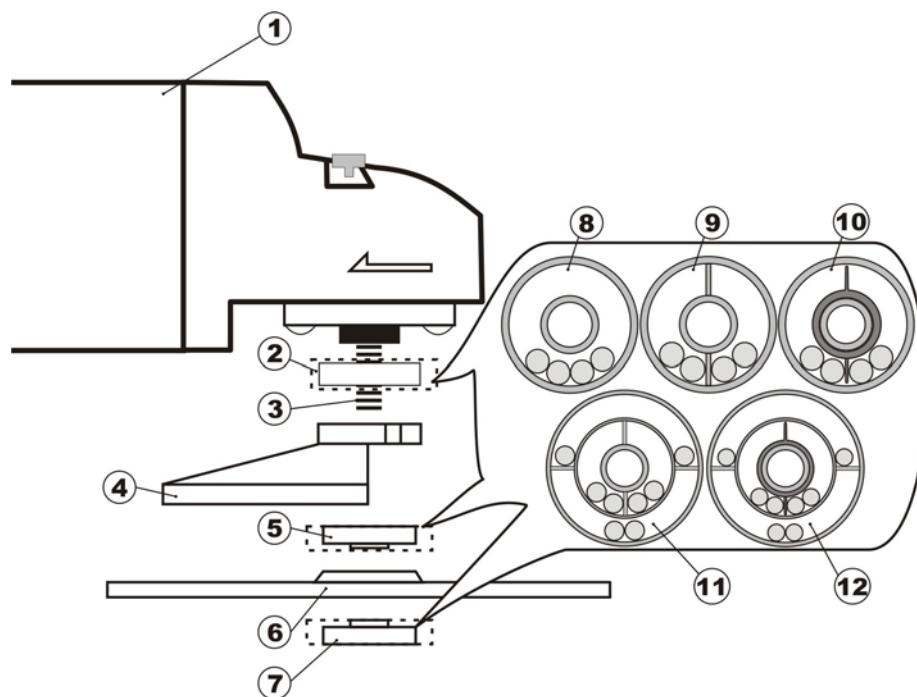


Рисунок 2 - Схематичний вид РШМ з АБ

Оцінемо різні типи АБ. Найбільшу точність забезпечують кульові АБ, які складаються зі сталевого барабана у середині якого знаходяться кулі у мастилі – рис. 3.

Недоліки звичайного АБ полягають у тому, що при різкому гальмуванні або пуску РШМ кулі збільшують вібрацію, мастило призводить до застою куль і як наслідок – до зменшення точності зрівноважування дисбалансу.

Для усунення вищеписаних недоліків пропонується використати кульові АБ:

1) з нерухомими перегородками [14] (рис. 2, поз. 9, 11);

2) з рухомими перегородками (рис. 2, поз. 10);

3) як з рухомими, так і нерухомими перегородками (рис. 2, поз. 12).

При цьому АБ з перегородками можуть бути як однорядними (рис. 2, поз. 9, 10), так і двохрядними (рис. 2, поз. 10, 11).

В АБ із нерухомими перегородками при різкій зміні швидкості обертання диска кулі виходять на перегородки й займають симетричне положення щодо диска, у наслідку чого вносять додаткового дисбалансу. Недолік цього АБ – асиметрія балансувальної ємності АБ у різних радіальних напрямках.



а - Milwaukee (AGV23-230B); б - PROTOOL (AGP 230-5 FF); в - Kress (2500WSB);
г - AtlasCopco (GTG40 S072-CS).

Рисунок 3 - Відомі АБ фірм виробників РШМ

АБ з рухомими перегородками зберігає переваги АБ з нерухомими перегородками і додатково має симетрію балансувальної ємності. До того ж в ньому рухома втулка з перегородками відіграє роль демпфера крутильних коливань. Але цей АБ дещо чутливий до зміни швидкості обертання шліфувального диска.

Комбінований АБ має ті ж самі переваги і недоліки, що і АБ з нерухомими перегородками, але може зменшувати крутильні коливання більш ефективно, завдяки рухомій втулці з перегородками.

Розглянемо методику розрахунку основних параметрів різних типів АБ для РШМ. Вона полягає у тому, що знаючи масу диска РШМ, його максимальну кутову швидкість обертання, клас точності балансування, та величину найбільшого розбалансування в класах точності, яка може виникнути в процесі роботи диска, можна визначити максимальний дисбаланс диска РШМ після розбалансування. Після цього по його величині і по радіусу від центра обертання до центра мас кулі можна визначити параметри певного типу АБ, який усуне даний дисбаланс. Порядок розрахунку такий.

Алгоритм – 1 розрахунку найбільшого дисбалансу після розбалансування диска РШМ.

1. Введення розрахункових даних: M – маса диска РШМ; k – клас точності балансування диска до початку експлуатації РШМ; Δk – найбільше можливе розбалансування диска під час експлуатації у класах точності балансування; $\omega_{e\max}$ – максимальна кутова швидкість обертання диска.

2. Визначення віброшвидкості за класом точності k :

$$V_{\max} = 0,4 \cdot 2,5^{k-1}. \quad (1)$$

3. Визначення найбільшого залишкового ексцентриситету диска після його зрівноваження, під час виготовлення (до експлуатації)

$$e_{cm} = V_{\max} / \omega_{e\max}. \quad (2)$$

4. Визначення максимального залишкового дисбалансу після зрівноваження до початку експлуатації

$$S_3 = M e_{cm}. \quad (3)$$

5. Визначення максимального дисбалансу диска, виникаючого після експлуатації РШМ

$$S_{\max} = S_3 \cdot 2,5^{\Delta k}. \quad (4)$$

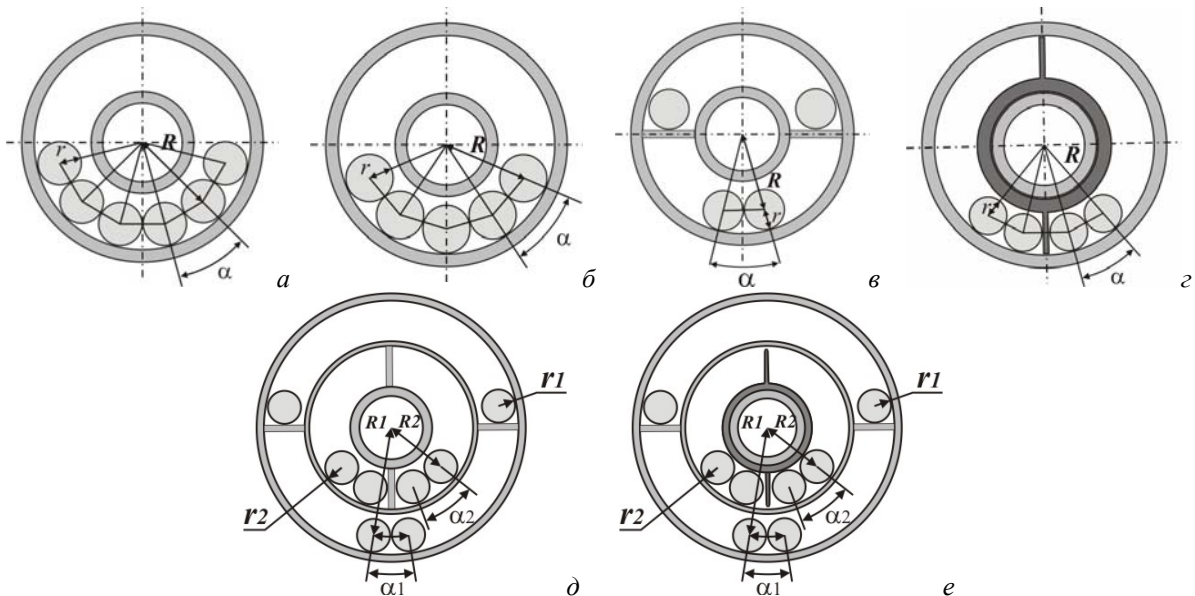
Алгоритм – 2 розрахунку параметрів різних типів однорядних АБ. Спільні для різних типів АБ етапи розрахунків об'єднуємо спільними пунктами.

1. Введення розрахункових даних: R – радіус від центра обертання до центра мас кулі; S_{\max} – максимальний дисбаланс, виникаючий після експлуатації РШМ.

2. Введення r – радіуса кулі і розрахунок її маси m .

3. Визначення величини допоміжного кута α

$$\alpha = 2 \arcsin(r/R) \text{ (рад)}, \quad \alpha \cdot 180/\pi \text{ (град)}. \quad (5)$$



а - звичайний АБ із парною кількістю куль; б - звичайний АБ із непарною кількістю куль; в - АБ з фіксованими перегородками; г - АБ з рухомими перегородками; д – дворядний АБ з фіксованими перегородками; е - дворядний комбінований АБ з фіксованими та рухомими перегородками

Рисунок 4 – Кульові АБ

4. Визначаємо балансувальну ємність АБ для n куль.

4.1. Звичайний АБ, парна кількість куль (рис. 4, а), або АБ з рухомими перегородками (рис. 4, г, товщиною перегородок нехтуємо):

$$S(n) = 2mR \sum_{i=1}^{n/2} \cos[\alpha/2 + (i-1)\alpha], \quad n \geq 2. \quad (6)$$

4.2. Звичайний АБ, непарна кількість куль (рис. 4, б):

$$S(n) = mR + 2Rm \sum_{i=1}^{(n-1)/2} \cos(i\alpha), \quad n \geq 3. \quad (7)$$

4.3. Однорядний АБ з нерухомими перегородками (рис. 4, в):

Визначення дисбалансу куль під перегородками:

$$S_1(n) = 2mR \sum_{i=1}^{n/2} \cos[(i-1)\alpha + \alpha/2]. \quad (8)$$

Визначення дисбалансу куль над перегородками:

$$S_2(n) = 2mR \sum_{i=1}^{n/2} \sin[(i-1)\alpha + \alpha/2]. \quad (9)$$

Визначення ємності АБ:

$$S(n) = S_1(n) - S_2(n), \quad / n = 4, 8, 12 / . \quad (10)$$

5. Перевіряємо найближчу до S_{\max} ємність АБ $S_{\text{нб}}$

$$\eta\% = 100 \cdot (S_{\text{нб}} - S_{\max}) / S_{\max}, \quad 3n\% \leq \eta\% \leq 20\%, \quad (11)$$

де $3n\%$ – запас ємності, якщо він потрібен. Якщо точність забезпечена, то зупиняємо розрахунки, якщо – ні то проводимо розрахунки з п. 2 при новому радіусі кулі.

Алгоритм 3 – розрахунку дворядних АБ з перегородками (рис. 4, д, е).

1. Введення розрахункових даних: R_1 – радіус від центра обертання до центра мас кулі зовнішнього АБ; R_2 – радіус від центра обертання до центра мас кулі внутрішнього АБ; S_{\max} – максимальний дисбаланс, виникаючий після експлуатації РШМ.

2. Введення r_1 – радіуса кулі зовнішнього АБ і розрахунок її маси m_1 , r_2 – радіуса кулі внутрішнього АБ і розрахунок її маси m_2 .

3. Визначення величини кутів α_1, α_2

$$\alpha_1 = 2\arcsin(r_1 / R_1) \text{ (рад)}, \quad \alpha_1 \cdot 180 / \pi \text{ (град)}. \quad (12)$$

$$\alpha_2 = 2\arcsin(r_2 / R_2) \text{ (рад)}, \quad \alpha_2 \cdot 180 / \pi \text{ (град)}. \quad (13)$$

4. Визначаємо балансувальну ємність АБ для n_1 куль зовнішнього АБ, та n_2 куль внутрішнього АБ.

Визначення дисбалансу зовнішнього АБ.

Дисбаланс від куль під перегородками

$$S_{\text{зовн1}}(n_1) = 2m_1R_1 \sum_{i=1}^{n_1/2} \cos[(i-1)\alpha_1 + \alpha_1/2]. \quad (14)$$

Дисбаланс від куль над перегородками

$$S_{\text{зовн2}}(n_1) = 2m_1R_1 \sum_{i=1}^{n_1/2} \sin[(i-1)\alpha_1 + \alpha_1/2]. \quad (15)$$

Балансувальна ємність зовнішнього АБ

$$S_{\text{зовн}}(n_1) = S_{\text{зовн1}}(n_1) - S_{\text{зовн2}}(n_1). \quad (16)$$

Визначення дисбалансу внутрішнього АБ

$$S_{\text{внутр}}(n_2) = 2m_2R_2 \sum_{i=1}^{n_2/2} \cos[(\alpha_2/2) + (i-1)\alpha_2]. \quad (17)$$

Балансувальна ємність АБ

$$S(n_1, n_2) = S_{\text{внутр}}(n_2) + S_{\text{зовн}}(n_1), \quad / n = 2, 4, 8, 12 / . \quad (18)$$

5. Перевіряємо найближчу до S_{max} ємність АБ $S_{нб}$ за формулою 11. Якщо точність забезпечена, то зупиняємо розрахунки, якщо – ні то проводимо розрахунки з п. 2 при нових радіусах куль.

Розглянемо приклад розрахунку параметрів різних типів АБ для РШМ середньої потужності Expert 230 фірми Expert.

Розрахунок найбільшого дисбалансу після розбалансування диску (алгоритм 1).

1. Розрахункові данні: $M = 580$ гр.; $k=3$; $\Delta k=3$;

$$\omega_{e_{max}} = \pi \cdot n / 30 = 3,14 \cdot 6000 / 30 = 628 \text{ рад/с.}$$

$$2. V_{max} = 0,4 \cdot 2,5^{3-1} = 2,5 \text{ мм/с.}$$

$$3. e_{cm} = 2,5 / 628 = 0,0039 \text{ мм.}$$

$$4. S_3 = M e_{cm} = 580 \cdot 0,0039 = 2,26 \text{ гр}\cdot\text{мм.}$$

$$5. S_{max} = S_3 \cdot 2,5^3 = 2,26 \cdot 15,625 = 35,43 \text{ гр}\cdot\text{мм.}$$

Розрахунок параметрів однорядного АБ з нерухомими перегородками (рис. 4, в, алгоритм 2).

1. Приймаємо радіус від центра обертання до центра мас кулі $R = 20$ мм.

2. Початково приймаємо 4 кулі масою $m = 0,705$ г і радіусом $r = 2,78$ мм.

$$3. \alpha = 2 \arcsin(r / R) = 2 \arcsin(2,78 / 20) = 0,31 \text{ рад}, \quad 0,31 \cdot 180 / \pi = 17,77 \text{ град.}$$

$$4. S_1(4) = 2 \cdot 0,705 \cdot 18 \sum_{i=1}^{4/2} \cos [(i-1) \cdot \alpha + \alpha / 2] = 53,69 \text{ гр}\cdot\text{мм.}$$

$$S_2(4) = 2 \cdot 0,705 \cdot 18 \sum_{i=1}^{4/2} \sin [(i-1) \cdot \alpha + \alpha / 2] = 15,37 \text{ гр}\cdot\text{мм}$$

$$S(4) = S_1(4) - S_2(4) = 53,69 - 15,37 = 38,31 \text{ гр}\cdot\text{мм.}$$

$$5. \eta\% = 100 \cdot (38,31 - 35,43) / 35,43 = 8,13\%, \quad 0 < 8,13\% < 20\% .$$

Розрахунок параметрів комбінованого АБ з рухомими і нерухомими перегородками (рис. 4, е, алгоритм 3).

1. Приймаємо радіуси від центра обертання до центра мас кулі $R_1 = 27$ мм, $R_2 = 17$ мм, $S_{max} = 35,43$ гр·мм.

2. Початково приймаємо 4 кулі (на доріжку) масами $m_1 = 0,37$ гр., $m_2 = 0,705$ гр. і радіусами $r_1 = 2,25$ мм, $r_2 = 2,78$ мм.

$$3. \alpha_1 = 2 \arcsin(r_1 / R_1) = 2 \arcsin(2,25 / 17) = 0,329 \text{ рад}, \quad 0,329 \cdot 180 / \pi = 18,82 \text{ град.}$$

$$\alpha_2 = 2 \arcsin(r_2 / R_2) = 2 \arcsin(2,78 / 27) = 0,167 \text{ рад}, \quad 0,167 \cdot 180 / \pi = 9,5 \text{ град.}$$

4. $n_1=4$ кулі, $n_2=4$ кулі.

$$S_{зовн1}(4) = 2 \cdot 0,37 \cdot 27 \cdot \sum_{i=1}^{4/2} \cos [(i-1)\alpha_1 + \alpha_1 / 2] = 19,91 \text{ гр}\cdot\text{мм},$$

$$S_{зовн2}(4) = 2 \cdot 0,37 \cdot 27 \cdot \sum_{i=1}^{4/2} \sin [(i-1)\alpha_1 + \alpha_1 / 2] = 1,66 \text{ гр}\cdot\text{мм},$$

$$S_{зовн}(4) = S_{зовн1}(4) - S_{зовн2}(4) = 19,91 - 1,66 = 18,24 \text{ гр}\cdot\text{мм},$$

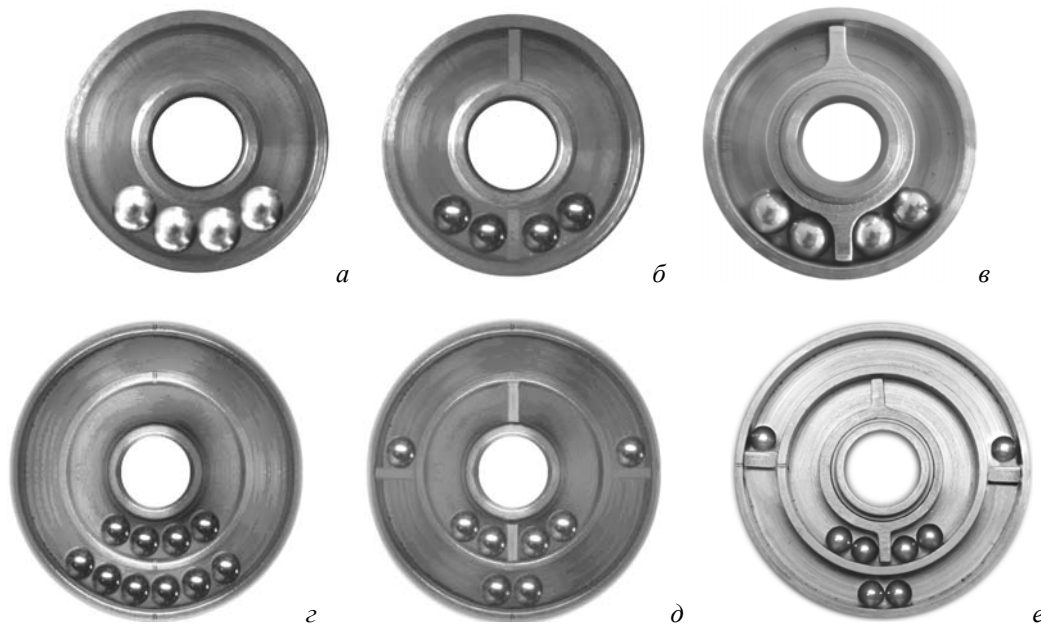
$$S_{внутр}(4) = 2 \cdot 0,705 \cdot 17 \cdot \sum_{i=1}^{4/2} \cos [(i-1) \cdot \alpha_2 + \alpha_2 / 2] = 23,64 \text{ гр}\cdot\text{мм},$$

$$S(4) = S_{внутр}(4) + S_{зовн}(4) = 23,64 + 18,24 = 41,89 \text{ гр}\cdot\text{мм},$$

$$5. \eta\% = 100 \cdot (41,89 - 35,43) / 35,43 = 18,21\%, \quad 0 < 18,21\% < 20\% .$$

За результатами розрахунків були спроектовані і виготовлені дві дослідні моделі кульових АБ для РШМ Expert 230. Перша модель конструктивно розроблена таким

чином, що одночасно може використовуватися як звичайний кульковий АБ (рис. 5, а), кульковий АБ з фіксованими перегородками (рис. 5, б), та АБ з рухомими перегородками (рис. 5, в). Друга дослідна модель представляє собою дворядний АБ з можливістю використання як звичайного двохрядного АБ (рис. 5, г), АБ з фіксованими перегородками (рис. 5, д), АБ з рухомими і нерухомими перегородками (рис. 5, е), та при видаленні куль з зовнішньої доріжки забезпечується перетворення другої моделі на однорядний АБ з можливостями першої дослідної моделі. У виготовлених АБ є можливість змінювати кількість і розміри куль, та сили в'язкого опору, що діють на кулі і рухому втулку з перегородками.



а - звичайний АБ; б – з фіксованою перегородкою; в - з рухомою перегородкою;
г - звичайний двохрядний кульовий АБ; д - дворядний АБ з фіксованими перегородками; е - дворядний АБ з фіксованими та рухомими перегородками.

Рисунок 5 – Фото дослідних моделей АБ

Для перевірки ефективності роботи різних типів АБ був розроблений стенд на базі КШМ середньої потужності фірми Einhell 125 (Германія), та на базі КШМ великої потужності фірми Expert 230 (Росія, на рис. не приведена). На рис. 6 зображений розроблений стенд, до складу якого входять: монітор 1, блок керування 2, датчики 3, КШМ 4, розроблений АБ 5, станина 6. Стенд дозволяє змінювати дисбаланс диска КШМ, частоту обертання диска за допомогою перетворювача й визначити частоту обертання за допомогою стробоскопа-тахометра DA-5100 або тахометра ЦАТ 3М, спостерігати за відносними рухами куль за допомогою DA-5100 або стробоскопа MULTITRONICS SC/10, вимірювати рівень вібрації системи за допомогою двох датчиків віброприскорень ADXL150/ADXL250, які вимірюють вібрації у двох площинах і які з'єднані з персональним комп'ютером через аналогово-цифрову плату ADXL202EB-232A з RS-232 інтерфейсом, спостерігати за коливаннями КШМ за допомогою лазерного променя спрямованого по осі ротора.

Проведені дослідження дозволяють зробити наступні висновки.

1. Використання для зрівноважування РШМ АБ з нерухомими й рухомими перегородками може зменшити вібрації машини при розгоні, гальмуванні й різкій зміні швидкості обертання диска, а також може підвищити точність зрівноважування диска за рахунок зменшення в'язкості мастила в АБ.

2. Основні параметри кулькових АБ - звичайних, з нерухожими, рухомими перегородками, та комбінованих можуть бути розраховані за запропонованими алгоритмами.

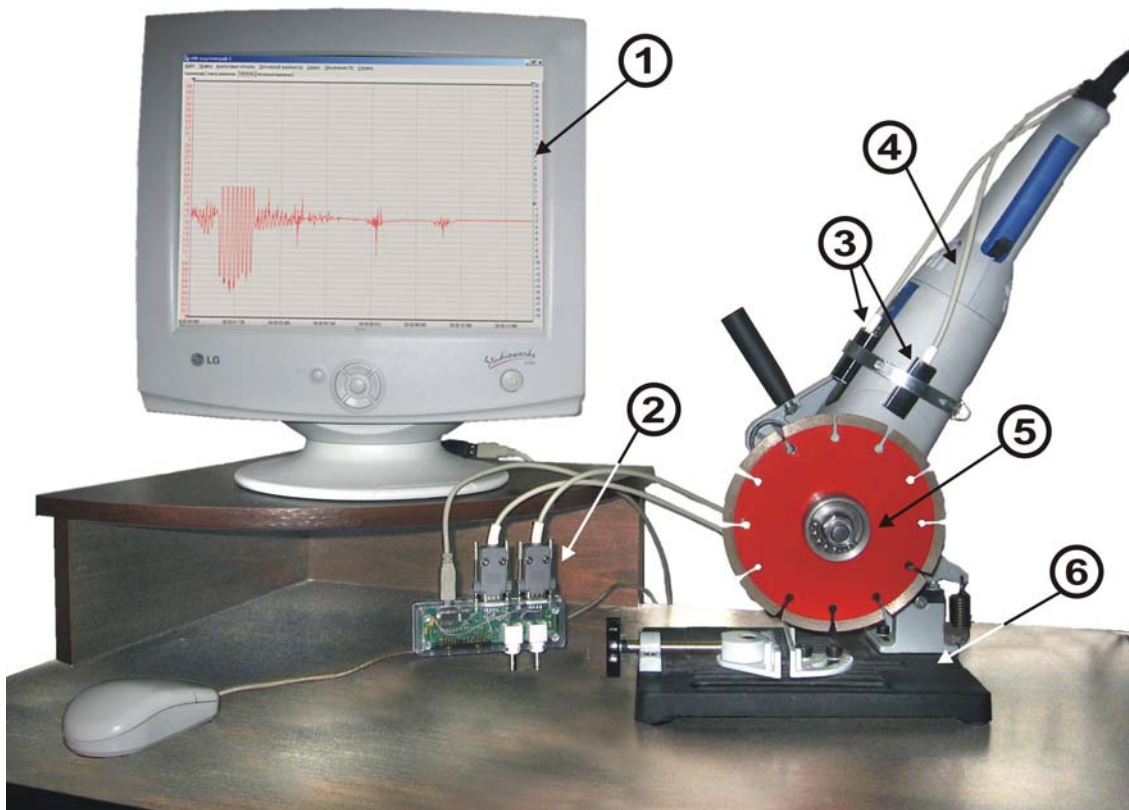


Рисунок 6 - Дослідницький стенд

3. Для оцінки ефективності роботи різних типів АБ необхідно дослідити динаміку дослідних моделей АБ на створеному стенді.

Список літератури

1. Агафонов Ю.В. Исследование устойчивости шарикового автобалансира роторной системы на упругих опорах // Машиноведение. 1976. -№6, - С. 3-7.
2. Агафонов Ю. В. Исследование ручных угловых шлифовальных машин под действием неуравновешенности шлифовальных кругов. — В кн.: Колебания и динамическая прочность элементов машин. М.: Наука, 1976, с. 130—135.
3. Агафонов Ю. В. Автоматическое балансирующее устройство для ручных шлифовальных машин // Вестник машиностроения. 1976.-№9. -С. 36-38.
4. Агафонов Ю. В. Гольштейн Б.Г. Автоматическое балансирующее устройство для ручных шлифовальных машин // Строительные и дорожные машины. 1976. -№3. —С. 15-17.
5. Кладиев С.Н. Автобалансирующие устройства ручных шлифовальных машин: Автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. техн. наук: 01.02.06. -Томск, 1996. - 21 с.
6. Пашкова Л.А. Влияние автобалансирующих устройств на износ шлифовальных кругов и качество обрабатываемой поверхности: Автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. Техн. наук: 01.02.06. —Томск, 1999. -24 с.
7. Алабужев П.М., Зуев А. К., Кирнарский М. Ш. Использование систем почти постоянного усилия для защиты от вибрации в ручных инструментах. — В кн.: Пути снижения вибрации и шума ручных машин. М.: ЦНИИТЭстроймаш. 1973, с. 70.
8. Філімоніхін Г.Б. Зрівноваження і віброзахист роторів автобалансирами з твердими коригувальними вантажами: Монографія (за спеціальністю 05.02.09 - динаміка та міцність машин). - Кіровоград: КНТУ, 2004. - 352 с.

9. Emanuelsson S. Introducing Automatic Balancing as a Means to Reduce Imbalance Induced Vibrations in Electrical and Air-Powered Hand-Held Angle Grinders (Power Tools) // Proceeding, 49th International Appliance Technique Conference, 1998, pp. 282-293.
10. Miwa T, Suzuki K, Kawaguchi T, Kawaguchi Y, Ohtsu S, Date O Reduction of grinder vibration by balancing // *Industrial Health*, 1984, 22, pp. 59-74.
11. Rajalingham C., Rakheja S. Whirl suppression in handheld power tool rotors using guided rolling balancers // *J. Sound Vibr.*, 1998, 217(3), pp. 453-466.
12. Shimizu S., Lee H. S., Basic study of Self-automatic Balancer for High Speed Spindles // London: Institution of Mechanical Engineers, 1992, preprint IMechE C432/050, pp. 569-574.
13. Автобалансирующий пристрій: Пат. № 75189 Україна, МКІ G01M 1/38 / Г. Б. Філімоніхін, В. С. Майоров (Україна); Г. Б. Філімоніхін, В. С. Майоров. - № 2002032408; Заявл. 27.03.2002; Опубл. 15.03.2006, Бюл.№3.
14. Patent 2002/0056338 A1 US. Cost effective and reliable automatic balancer for high speed applications: patent 2002/0056338 A1 US, / Stefan Olausson, Anders Hagglund, Paul Wierzba. Appl. No. - 60/216,152. Filed Jul. 3, 2000. Patented May 16, 2002.

Предложено использовать автобалансиры с недвижими и подвижными перегородками для уравновешивания дисков ручных шлифовальных машин. Приведен алгоритм расчетов основных параметров как обычных, так и предложенных автобалансиоров.

It is offered to use autobalancers with immovable and mobile partitions for balancing of disks of the manual grinding machine. The algorithm of key parameters calculations of ball-type autobalancers is resulted.

***Філімоніхін Г.Б., Коваленко О.В. Розрахунок параметрів автобалансирів для зрівноваження дисків ручних шліфувальних машин // Загальнодержавний міжвідомчий н.-т. збірник "Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин", КНТУ, 2007. Вип. № 37.**