

### ЛЕКЦІЯ 3

## РОЗБАЛАНСУВАННЯ МАШИН, НЕСПІВВІСНІСТЬ, НЕСИМЕТРИЧНІ НАВАНТАЖЕННЯ, МЕХАНІЧНІ ЗАЗОРИ

Робота машини супроводжується паразитною вібрацією, що знижує ККД машини та викликає її відмову. Першоджерелом вібрацій є робочий орган машини. За виглядом здійснюваного ним руху машини діляться, в основному, на роторні (обертальний рух) і поршневі (зворотно-поступальний рух).

Нижче розглянуті особливості генерування вібрацій даними типами машин.

#### **Типові джерела вібрацій роторних машин . Розбалансування машин**

Розбалансування машин є одним із найбільш енергопотужних джерел їх вібрацій. У спектрі вібрації розбаланс виявляється на частоті обертання. Високі рівні вібрації на частоті обертання призводять до втомних руйнувань деталей і сполучень, погіршення якості технологічних процесів, шкідливої дії на фізіологію людини.

Причиною того, що ротор стає джерелом вібрації, є недосконалість його конструкції, технології виготовлення, складання і експлуатації. Неврівноваженість сил інерції ротора, що обертається (статична та динамічна неуврівноваженість), обумовлена тим, що вісь обертання ротора (вала) не є його головною центральною віссю інерції.

Залежно від взаємного розміщення вказаних осей розрізняються такі неуврівноваженості жорсткого ротора: *статична, моментна і динамічна* (рис.6.1).

*При статичній неуврівноваженості* вісь обертання ротора паралельна головній центральній осі інерції.

*При моментній неуврівноваженості* вісь ротора і головна центральна вісь інерції перетинаються в центрі мас ротора.

*При динамічній неуврівноваженості* вісь ротора і головна центральна вісь інерції перетинаються не в центрі мас.

Різні особливості мають місце також у гнучкому роторі, в якому необхідний додатковий облік сил, обумовлений його прогином.

Рівень вібрації на частоті обертання ротора визначається величиною залишкової неуврівноваженості ротора.

Вібрація машин, що порушується розбалансом, практично не піддається розрахунку через неможливість попередити розподіл залишкової неуврівноваженості у всьому об'ємі деталей ротора. Тому залишковий небаланс усувається в зібраній машині шляхом установки додаткових вантажів, компенсуючих накопичені в системі неточності. Точність балансування характеризується добутком питомого небалансу на максимальну експлуатаційну кутову швидкість  $e_{ст} \cdot \omega$  мм/с. Для кожного з 11 класів, на які ділять машини за точністю балансування, встановлюються інтервали значень добутків  $e_{ст} \cdot \omega$  або відповідні інтервали значення ексцентриситету залежно від частоти обертання ротора.

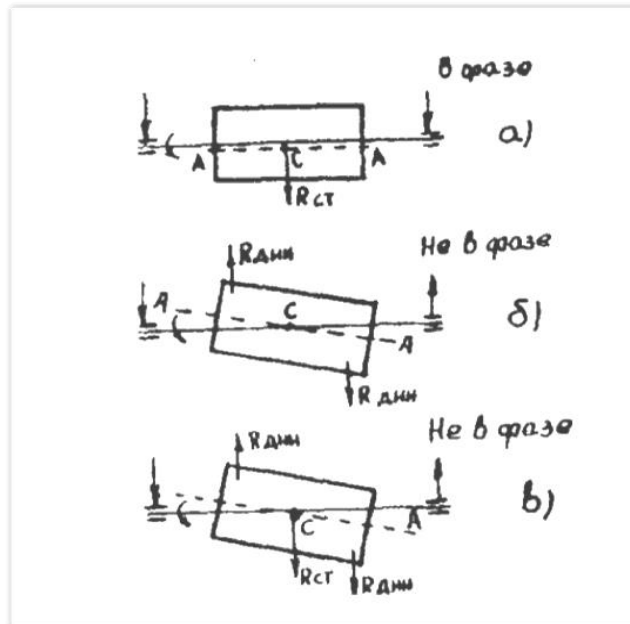


Рисунок 6 - Приклади небалансу ротора

Крім залишкової неврівноваженості ротора, підвищена вібрація на частоті обертання може бути викликана:

- роз'єднанням посадок деталей, закріплених на роторі, і коловим переміщенням цих деталей, що порушує балансування ротора;
- неоднаковою вигинистою жорсткістю вала по головних осях інерції;
- неякісною центрівкою машини з приводом при жорсткому їх з'єднанні;
- магнітною асиметрією машини через ексцентричне положення статора щодо ротора;
- неоднорідністю матеріалів ротора і статора машин;
- неперпендикулярністю площини опорної поверхні ротора (дисків підп'ятника) осі обертання, що викликає так звані маятникові коливання ротора;
- неякісність виконання підшипників кочення;
- гідродинамічним самозбудженням підшипників ковзання;
- еліптичністю шийки ротора;
- неякісним (із зазорами) кріпленням машини до фундаменту.

Неспіввісність, несиметричні навантаження, механічні зазори

Через те, що допускаються при виготовленні, монтажі та експлуатації машин відступи від встановлених норм центрівки, зсуву і зламу лінії валів у площині сполучення муфт, викликаються додаткові коливання роторів у підшипниках. Сили пружності, що періодично змінюються з частотою обертання, викликаються вигином валу при податливих опорах, спричинюють відповідне переміщення підшипників і підшипникових корпусів. Неправильні сполучення в лінії валів називається неспіввісністю, або розцентруванням.

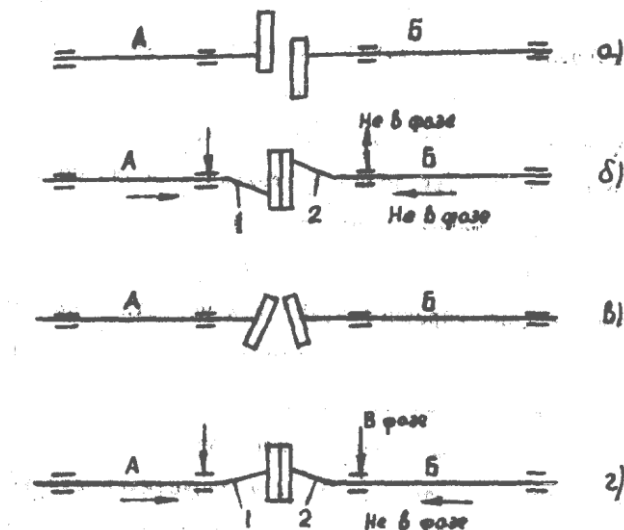
**Н е с п і в і с н і с т ь .**

Різновидами неспіввісності є:

- *погнутий вал;*
- *неспіввісність розточувань отворів у корпусах під підшипники;*
- *неспіввісність стійок підшипників і самих підшипників у корпусах;*
- *неспіввісність між валами зчленування машин.*

Неспіввісність викликає коливання машини на подвійній частоті обертання. Неправильні сполучення в лінії валів, що найчастіше зустрічаються на практиці, виникають у випадках:

- *центрування виконане за дефектними напівмуфтами з поворотом роторів або напівмуфти не виправлені перед їх стягненням (рис.7 а,б,в,г);*
- *центрування виконане за дефектними напівмуфтами без повороту роторів (рис. 7а,б,в,г);*
- *центрування валів і з'єднання напівмуфт виконані правильно, але в процесі експлуатації змінилися (встановлене при центруванні) взаємне положення підшипників (рис. 7 а,б).*



Рисункок 7 - Схема центрування лінії валів за дефектними напівмуфтами з поворотом ротора

- а) осі напівмуфт зміщені щодо осей своїх валів;
- б, г) вигину валу 1,2 після з'єднання несправних муфт;
- в) напівмуфти, не перпендикулярні до осей обертання валів;

У всіх випадках порушення центрування лінії валів з'являються статична (при перекосі муфт) або моментна невідповідності (при зсуві їх осей), що викликають вигинисте напруження в роторі і вібропереміщення податливих підшипників, що змінюються з частотою обертання. Моменти, що діють у площині перекоосу або зсуву валів, можуть перевершити допустиме для валів втомне напруження. Вимушені перерозподіли навантажень на окремі підшипники призводять до неприпустимих перевантажень (рис.9), до виходу з ладу підшипників і аварії, а неприпустиме розвантаження - до коливань роторів, що самозбуджуються на масляній плівці. Крім того, при перерозподілі навантажень, що діють на підшипники, змінюються більшою чи меншою мірою рівні вібрації окремих ділянок валу. У результаті цього робоча частота обертання даної машини може наблизитися

до критичної частоти. У зв'язку з цим можливе виникнення підвищеної резонансної вібрації.

Для збільшення допустимих перекосів валів застосовуються пружні пальцьові і зубчаті муфти. При обертанні валів, зв'язаних муфтами рухомого з'єднання, без перекосів і зсувів осей, а також при точному виготовленні муфт всі зубці або пальці останніх навантажені рівномірно, і на сполучені вали діють моменти, що тільки обертають. За наявності неточностей у кроках і формі зачеплень або похибки виготовлення втулок і пальців навантаження на зубці або пальці розподіляється нерівномірно. У результаті цього на кожну з напівмуфт діє невідносна радіальна сила, що обертається разом із муфтою. У граничному випадку момент, що обертається, передається одним зубцем або одним пальцем. При цьому невідносна сила, що діє на вал, досягає найбільшого значення.

На додаток до вказаних невідноснах сил, що діють на співвісні вали при їх обертанні, перекоп або зсув осей валів викликає сили тертя, що перешкоджають відносному переміщенню напівмуфт. Ці сили створюють момент, який періодично змінюється з частотою обертання, що згинає вали в площині перекопу або зсуву їх осей, викликає вібропереміщення підшипників, а також вигинисте напруження, що періодично змінюється на валах.

На вібропереміщення основної частоти накладаються високочастотні вібропереміщення, які викликані нерівномірною роботою зубців або пальців. Муфти рухомого з'єднання, робочі поверхні яких знаходяться у гарному стані, забезпечують нормальну роботу під час розцентрування, що досягає значення 0,2 - 0,3 мм.

Проте, розцентрування призводить до швидкого зносу таких муфт. При цьому тертя в муфтах різко зростає, зростає вібрація уздовж подовжньої осі ротора, а в деяких випадках це призводить і до заклинювання напівмуфт з перетворенням гнучкого з'єднання на жорстке.

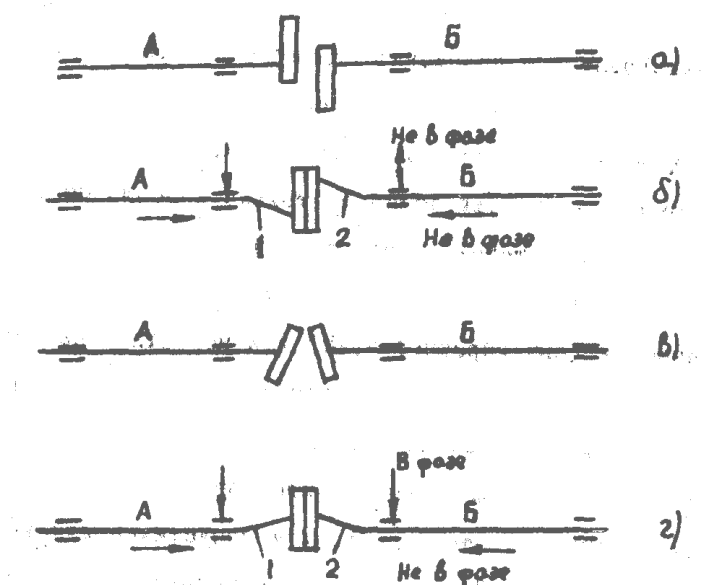
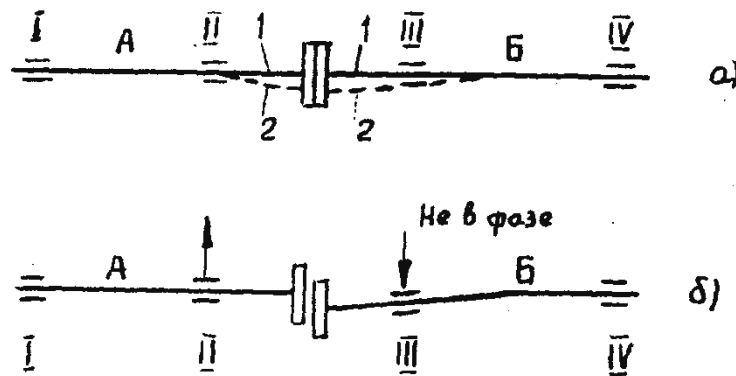


Рисунок 8 - Центрування за дефектними напівмуфтами без повороту ротора

- а, в) спарені вали після центрування за несправними напівмуфтами;
- б, г) положення валів після їх роз'єднання;
- 1 - 1 - лінія валів після центрування за напівмуфтами;

- 2 - 2 - кінці валів зігнуті після повороту на 180°;
- 3 - 3 - положення валів після їх роз'єднання і повороту на 180°.



Рисункок 9 - Зсув одного з підшипників агрегату

а,б) лінія валу А і Б при з'єднанні муфтою і відповідно роз'єднаних після зсуву підшипника ІІІ;

1-1 - лінія валу, що складається з правильно зцентрованих і правильно сполучених валів А і Б;

2-2 - лінія валів після зсуву підшипника ІІІ, наприклад, осіданням фундаменту, нагріванням підшипників і так далі

Пошкодження деталей муфт генерують коливання в радіальному напрямку в основному на таких частотах:

- під час розцентрування муфт  $f=k \cdot f_0$ ;
- під час неспіввісності в одному напрямку  $f=2 \cdot f_0$
- під час неспіввісності в двох напрямках  $f=4 \cdot f_0$ ;
- дефект пальцевої муфти  $f=z_{II} \cdot f_0$ ;
- дефект зубчатої муфти  $f=z_M \cdot f_0$ ;
- дефект шліцьових з'єднань  $f=z_{III} \cdot f_0$

де  $f_0$  - частота обертання;

$z_{II}$  - число пальців;

$z_M$  - число зубів муфти;

$z_{III}$  - число шліців,  $k = 1, 2, \dots$  гармоніки.

Контроль величини зазору в шліцах механізмів, що сполучаються, проводять шляхом різкого гальмування ведучого валу, тоді в шліцьовому з'єднанні завдяки дії сил інерції при виборі зазору виникає удар. Енергія удару залежить від величини зазору.

**Несиметричне навантаження** генерує односпрямовану вібрацію, величина якої змінюється при зміні навантаження.

Прикладом є вібрація, що виникає за наявності ремінної передачі на ексцентричному шківі або зношеності ременя, муфти з веденим пальцем, консольної зубчатої передачі, коли виникають вібрації з частотою, яка дорівнює швидкості обертання, що можна сплутати з розбалансом.

*Несправності ремінної передачі:*

- змінна жорсткість ременя;
- похибки кроку ременя;
- збудження, яке обумовлено пробігом ременя, викликають підвищені вібрації на частоті

$$f = ink,$$

де  $k = f_M / f_{ш}$  ;

$f_M$  - частота, обумовлена зміною жорсткості ременя, Гц;

$f_{ш}$  - частота обертання шківів, Гц ;

$n$  - оберти валу,  $i = 1, 2, 3..$  - номери гармонік.

Напрямок вібрації - крутильний, односторонній.

**Механічні зв'язки.** Наявність зазорів у місцях функціональних рухів деталей механізмів неминуче. Разом з тим зазори є джерелом радіальної і подовжньої вібрації при посадках деталей у корпус і на вал. Зазори генерують вібрації на частоті обертання, оскільки при цьому створюються кращі умови для прояву розбалансу.

Відмінна особливість вібрації, що порушується за наявності зазорів, - зміст вищих гармонік 2,3,4 і вище, фаза яких нестабільна. Ослаблення механічних зв'язків генерує коливання так само на міжгармоніках оборотної частоти, тобто на «половинних», «полупторних» гармоніках: 0.5; 1.5; 6.5 і так далі.