

621.01  
Н 16



**В.М. Нагорний**

**ВВЕДЕННЯ  
В ТЕХНІЧНУ ДІАГНОСТИКУ  
МАШИН**

**В. М. Нагорний**

**Введення  
в технічну діагностику  
машин**

Навчальний посібник

Рекомендовано Міністерством освіти і науки України

Суми  
Сумський державний університет  
2011

УДК 62-251:681.5.015 539.37,669.017

ББК 34.445+22.12

Н-37

Рецензенти:

*О. Ф. Немчин* — академік НАН України; директор державного підприємства «Державний науково-дослідний і проектно-конструкторський інститут інноваційних технологій в енергетиці та енергозбереження»;

*Г. В. Цибаньов* - доктор технічних наук, зав. відділу втоми і термовтоми матеріалів Інституту проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України;

*Ю. І. Бадаєв* - доктор технічних наук, професор Київської державної академії водного транспорту

*Рекомендовано Міністерством освіти і науки України як навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів, які навчаються за спеціальністю «Динаміка та міцність машин» (лист Ns 1/11-289 від 17.01.2011)*

#### **Нагорний В. М.**

Н-37 Введення в технічну діагностику машин: навчальний посібник

/В. М. Нагорний. - Суми: Сумський державний університет, 2011. - 483 с.

ISBN 978-966-657-347-9

Посібник розрахований на студентів спеціальності «Динаміка та міцність машин», а також студентів, аспірантів та інженерів, які займаються технічною діагностикою машин. У посібнику послідовно розглянутий процес зародження дефектів машин, починаючи з мікрорівня. Розглянуті умови розвитку тріщин, циклічна міцність конструктивних елементів машин, зношування та їх зовнішній прояв. У зв'язку з цим подані динаміка машин, утворення пружних коливань, поширення їх по машині та порядок реєстрації таких коливань.

Наведені приклади, що полегшують вивчення та освоєння матеріалу.

**УДК 62-251:681.5.015 539.37,669.017**

**ББК 34.445+22.12**

ISBN 978-966-657-347-9

© Нагорний В.М., 2011

© Сумський державний університет, 2011

# Зміст

с.

<b>ВСТУП.....</b>	<b>10</b>
<b>1 КЛАСИФІКАЦІЯ ВІДМОВ.....</b>	<b>15</b>
<b>1.1 Поняття відмови.....</b>	<b>15</b>
<b>1.2 Відмови типових елементів машин.....</b>	<b>16</b>
<b>1.3 Причини втрати машиною працездатності.....</b>	<b>19</b>
1.3.1 Джерела і причини зміни початкових параметрів машини.....	19
1.3.2 Процеси, що знижують працездатність машини.....	20
1.3.3 Класифікація процесів, що діють на машину, за швидкістю їх перебігу.....	22
1.3.4 Допустимі і недопустимі види пошкоджень деталей та сполучень.....	23
1.3.5 Поступові (зношення) і раптові відмови.....	25
1.3.6 Відмови функціонування і параметричні відмови.....	29
1.3.7 Допустимі і недопустимі відмови.....	30
1.3.8 Допустима ймовірність безвідмовної роботи як міра для оцінки наслідків відмови.....	31
<b>1.4 Оцінка граничного стану машини.....</b>	<b>33</b>
1.4.1 Граничний стан за ступенем пошкодження і за вихідним параметром.....	33
1.4.2 Критерії оцінки граничного стану за вихідним параметром.....	34
1.4.3 Регламентация граничних станів у нормативно-технічній документації.....	36
<b>2 ФІЗИЧНА ПРИРОДА ВІДМОВИ МАШИН.....</b>	<b>38</b>
<b>2.1 Закономірності зміни властивостей і стану конструкційних     матеріалів за час експлуатації машини.....</b>	<b>38</b>
2.1.1 Субмікроскопічний рівень.....	40
2.1.1.1 Ідеальна міцність.....	44
2.1.1.2 Природа теплової деформації.....	47
2.1.1.3 Типові дефекти кристалів.....	49
а) Геометрія дислокацій.....	51
б) Рух дислокацій.....	56

2.1.2	Мікроскопічний рівень.....	61
2.1.2.1	Напруження.....	61
2.1.2.2	Деформація.....	62
2.1.2.3	Головне напруження і деформації.....	63
2.1.2.4	Співвідношення між напруженням і деформацією.....	65
2.1.2.5	Вимірювання деформацій і напруження.....	66
2.1.2.6	Деформації при накладанні зсувних зусиль.....	68
2.1.2.7	Пружна і пластична деформації.....	70
	а) Геометрія пластичних зрушень.....	71
	б) Ковзання.....	72
	в) Двійникування.....	77
	г) Ковзання по межах зерен.....	78
	д) Вплив меж зерен у полікристалах.....	78
	е) Вплив швидкості деформації.....	79
2.1.2.8	Руйнування.....	80
	а) В'язке руйнування.....	80
	б) Крихке руйнування.....	81
2.1.3	Макроскопічний рівень.....	82
2.1.4	Закони стану і старіння.....	88
2.1.4.1	Закони стану.....	89
2.1.4.1	Закони старіння.....	90
<b>3</b>	<b>ВІДМОВИ ЗА ПАРАМЕТРАМИ МІЦНОСТІ.....</b>	<b>93</b>
3.1	Кінетика розвитку втомних тріщин.....	94
3.1.1	Кінетика тріщин за Гріффітсом.....	97
3.1.1.1	Ідеалізовані схеми навантаження і їх опис.....	101
3.1.1.2	Швидкість розвитку тріщини.....	111
3.1.2	Кінетика тріщин за Шенлі.....	117
3.1.3	Узагальнена крива (діаграма) втоми.....	120
3.1.3.1	Стадії розвитку тріщин.....	127
3.1.3.2	Вид зламів під час руйнування деталей.....	133
3.1.4	Експериментальне визначення характеристик втомної міцності.....	140
3.1.4.1	Характеристика змінного навантаження.....	141
3.1.4.2	Характеристики граничних станів, виду навантаження і форми циклу.....	143
3.1.4.3	Форма циклу і коефіцієнт його асиметрії.....	144
3.1.4.4	Види кривих втоми.....	148

3.1.5	Процес механічного руйнування твердих тіл.....	159
<b>3.2</b>	<b>Часова залежність міцності твердих тіл (повзучість і тривала міцність матеріалів).....</b>	<b>164</b>
3.2.1	Первинна крива повзучості і її отримання.....	165
3.2.1.1	Силова деформація і стадії повзучості.....	166
3.2.2	Аналітичні вирази для кривих повзучості.....	168
3.2.2.1	Вплив напруження і температури на повзучість матеріалів.....	169
a)	Опір (границя) повзучості.....	169
b)	Границя тривалої міцності.....	170
3.2.3	Гіпотези повзучості.....	171
3.2.3.1	Гіпотеза старіння.....	172
3.2.3.2	Гіпотеза течії.....	173
3.2.3.3	Гіпотеза зміцнення.....	173
3.2.4	Часові залежності для міцності.....	173
3.2.5	Віброповзучість і віброрелаксація.....	175
3.2.6	Не пружні явища при коливаннях.....	176
3.2.7	Елементи теорії лінійної в'язкопружності.....	178
<b>4</b>	<b>ВІДМОВИ ТРИБОЛОГІЧНІ.....</b>	<b>182</b>
4.1	Загальні положення.....	182
4.2	Класифікація видів зношування.....	183
4.3	Класифікація процесів зношування за швидкістю проходження елементарних актів руйнування.....	186
4.4	Процеси, що проходять при контакті поверхонь.....	188
4.4.1	Класифікація процесів зносу.....	188
4.4.2	Види локальних пошкоджень поверхонь.....	190
4.5	Оцінка ступеня пошкодження матеріалу деталі.....	192
4.5.1	Про необхідність чисельної оцінки ступеня пошкодження.....	192
4.5.2	Методи оцінки ступеня пошкодження.....	192
4.5.2.1	Інтегральні методи.....	194
4.5.2.2	Диференціальні методи.....	194
4.6	Основні закономірності зношування.....	195
4.6.1	Показники зносу.....	195
4.6.1.1	Залежність зносу від тиску і швидкості ковзання.....	196

4.6.1.2	Математичний опис інтенсивності.....	197
4.6.1.3	Класи зносостійкості.....	201
4.6.2	Залежність зносу від механічних характеристик металу.....	204
4.6.2.1	Зв'язок між зносостійкістю і діаграмою «напруження - деформація».....	204
4.6.2.2	Втомна природа зношування.....	210
4.6.3	Проходження зносу в часі.....	211
4.6.3.1	Форма кривої зносу.....	213
<b>5</b>	<b>ЗБУДЖЕННЯ І ПОШИРЕННЯ КОЛИВАНЬ У МАШИНАХ.....</b>	<b>217</b>
<b>5.1</b>	<b>Машина є комплексом взаємозв'язаних.....</b>	<b>217</b>
<b>5.2</b>	<b>Методи дослідження машини як джерела вібрацій.....</b>	<b>222</b>
<b>5.3</b>	<b>Математичне моделювання.....</b>	<b>225</b>
5.3.1	Моделі машини в низькочастотному діапазоні.....	228
5.3.5.1	Динамічна модель компресорної установки.....	230
5.3.2	Моделі для середньочастотного діапазону.....	237
5.3.3	Моделі для високочастотного діапазону.....	239
5.3.4	Нелінійні моделі.....	253
5.3.5	Регресійна модель.....	260
5.3.5.1	Перевірка значущості рівняння регресії і коефіцієнтів рівняння регресії.....	264
5.3.6	Структурно-наслідкова модель.....	265
<b>5.4</b>	<b>Фізичне моделювання.....</b>	<b>268</b>
<b>6</b>	<b>МАШИНА - ДЖЕРЕЛО ВІБРАЦІЙ.....</b>	<b>271</b>
<b>6.1</b>	<b>Типові джерела вібрацій роторних машин.....</b>	<b>271</b>
6.1.1	Розбалансування машин ..	271
6.1.2	Неспіввісність, несиметричні навантаження, механічні зазори.....	273
6.1.3	Кріплення машин до фундаменту.....	277
6.1.4	Резонансні коливання.....	280
<b>6.2</b>	<b>Вібрації, що генеруються вентиляторами і лопатковими машинами.....</b>	<b>281</b>
6.2.1	Основні джерела і частоти вібрації.....	281

6.6.2 Розрахункова оцінка характеристик вібрацій і шуму аеродинамічного походження.....	284
6.6.2.1 Вібрації, що генеруються коливаннями робочих коліс турбомашин.....	284
а) Випромінювання шуму в каналі.....	291
б) Випромінювання шуму від декількох коліс.....	292
в) Випромінювання шуму внаслідок взаємодії робочих коліс.....	292
г) Випромінювання шуму від облопачуваного ротора.....	292
<b>6.3 Аналіз і класифікація основних джерел вібрації гідродинамічного походження.....</b>	<b>293</b>
6.3.1 Причини та джерела вібрацій.....	293
6.3.2 Явище кавітації.....	296
6.3.3 Вихроутворення в потоці робочого середовища.....	298
6.3.4 Турбулентні пульсації тиску в потоці.....	300
6.3.5 Розрахункова оцінка шуму, що генерується гідравлічним и джерелами.....	300
6.3.5.1 Фізичні процеси при яких утворюється звук.....	301
а) Монополь.....	301
б) Диполь.....	302
в) Квадруполь.....	304
6.3.5.2 Реальні джерела звуку.....	305
6.3.5.3 Математичні вирази для джерел шуму.....	306
6.3.5.4 Безрозмірні вирази.....	308
<b>6.4 Електрична машина як джерело вібрації.....</b>	<b>312</b>
6.4.1 Вібрація, що генерується електромагнітними джерелами .....	312
6.4.2 Вібрація, що генерується механічними джерелами.....	319
<b>6.5 Двигун внутрішнього згорання як джерело вібрації.....</b>	<b>320</b>
6.5.1 Джерела вібрації двигунів.....	320
6.5.1.1 Джерела вібрації механічного походження.....	322
а) Зіткнення в шатунних підшипниках.....	324
б) Зіткнення в зчленуванні шатуна з поршнем.....	326
6.5.1.2 Джерела вібрації газодинамічного походження.....	328
а) Вібрації, що порушуються згоранням палива в циліндрі.....	328
б) Вібрації, що порушуються впусканням, міжступінчастими комунікаціями і випусканням газів.....	329
в) Вібрації, що генеруються паливною системою двигуна.....	332
6.5.2 Розрахункова оцінка характеристик вібрацій, що.....	333



генеруються двигуном внутрішнього згорання.....	333
6.5.6.1 Динаміка кривошипно-шатунного механізму .....	336
6.5.6.6. Перекладання поршня.....	342
<b>7 ГЕНЕРУВАННЯ ВІБРАЦІЙ ТИПОВИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ РІЗНОМАНІТНИХ ЗА КОНСТРУКЦІЯМИ І ПРИЗНАЧЕННЯМ МАШИН.....</b>	<b>350</b>
<b>7.1 Генерування вібрацій у процесі зіткнень деталей у кінематичних парах.....</b>	<b>350</b>
7.1.1 Зіткнення деталей.....	351
7.1.2 Взаємодія деталей у момент зіткнення.....	355
<b>7.2 Вібрації, що генеруються підшипниками кочення.....</b>	<b>361</b>
7.2.1 Феноменологічні дані про вібрації, що генеруються підшипниками кочення.....	361
7.2.2 Розрахункова оцінка природи вібрацій, що генеруються підшипником кочення.....	367
7.2.2.1 Прецесія вала, що обертається в підшипниках кочення з радіальним зазором.....	367
7.2.2.2 Ударні імпульси в підшипниках кочення.....	374
<b>7.3 Вібрації, що генеруються підшипниками ковзання.....</b>	<b>380</b>
<b>7.4 Вібрації, що генеруються зубчастими передачами.....</b>	<b>383</b>
7.4.1 Причини виникнення вібрацій.....	383
7.4.2 Частоти і форми власних згинальних коливань зубчастих коліс.....	385
7.4.3 Згинальні коливання зубчастих коліс.....	386
7.4.4 Розрахункова оцінка характеристик вібрацій, що генеруються зубчастими передачами.....	388
<b>8 МОДЕЛІ ВІБРАЦІЙ, ЩО ГЕНЕРУЮТЬСЯ МАШИНАМИ.....</b>	<b>400</b>
<b>8.1 Гармонічна модель.....</b>	<b>400</b>
<b>8.2 Полігармонічна модель.....</b>	<b>402</b>
<b>8.3 Ускладнені моделі вібрацій.....</b>	<b>405</b>
8.3.1 Квазіполігармонічна модель.....	405
8.3.2 Імпульсна модель вимушених коливань.....	406
8.3.3 Обвідна полігармонічного процесу.....	412

8.3.4 Обвідна випадковою вузькосмугового процесу.....	415
8.3.5 Випадкові процеси.....	416
8.3.5.1 Закони розподілу щільності випадкового процесу.....	418
<b>9 МЕТОДОЛОГІЯ ПРОВЕДЕННЯ ДІАГНОСТИЧНИХ ВІБРОВИМІРЮВАНЬ.....</b>	<b>423</b>
<b>9.1 Машина як набір вібровимірювальних каналів.....</b>	<b>423</b>
<b>9.2 Реєстрація вібросигналу.....</b>	<b>426</b>
9.2.1 Визначення просторових коливань машини в контрольній точці.....	428
9.2.2 Налаштування параметрів вимірювального каналу.....	431
<b>9.3 Вплив місця установки датчика на достовірність     вимірювань.....</b>	<b>434</b>
<b>9.4 Віброконтролепридатність машини.....</b>	<b>437</b>
<b>9.5 Контрольні точки вимірювань вібрації.....</b>	<b>438</b>
<b>9.6 Місця розміщення датчиків.....</b>	<b>443</b>
9.6.1 Способи кріплення датчика на поверхні.....	445
<b>9.7 Проведення вимірювань.....</b>	<b>448</b>
9.7.1 Поточне контрольне вимірювання.....	449
9.7.2 Повне контрольне вимірювання вібрації.....	449
9.7.3 Спеціальні діагностичні обстеження.....	452
9.7.4 Обстеження зупиненого агрегату.....	453
9.7.5 Періодичність вимірювань вібрації.....	453
<b>ВИСНОВОК.....</b>	<b>456</b>
<b>СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....</b>	<b>462</b>
<b>АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК.....</b>	<b>478</b>