

О. М. Яхно, О. В. Узунов,
О. Ф. Луговський, В. А. Ковальов,
А. В. Мовчанюк, І. В. Коц, О. П. Губарев

**Прикладна гідроаеромеханіка
і механотроніка**

**Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»
Вінницький національний технічний університет**

**О. М. Яхно, О. В. Узунов,
О. Ф. Луговський, В. А. Ковальов,
А. В. Мовчанюк, І. В. Коц, О. П. Губарев**

Прикладна гідроаеромеханіка і механотроніка

Рекомендовано Міністерством освіти і науки України як
підручник для студентів вищих навчальних закладів

УНІВЕРСУМ – Вінниця 2015

УДК532.5-533.6; 62-552.2, 525; 681.5; 62-82:658; 621.372
ББК 30.123:32.966
Я 90

Рецензенти:

В. Д. Акіншин, доктор фізико-математичних наук, професор (Головний науковий співробітник Академії пожежної безпеки МНС України)

С. А. Бичков, доктор технічних наук, професор (Головний інженер ДП «Антонов»)

С. І. Криль, доктор технічних наук, професор (Завідувач відділом Інституту Гідромеханіки НАН України)

З. Я. Лур'є, доктор технічних наук, професор (Професор кафедри гідравлічних машин Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»)

Рекомендовано до видання Міністерством освіти і науки України
Лист № 1/11-1135 від 29 січня 2014 р.

Яхно О. М.

Я 90 Прикладна гідроаеромеханіка і механотроніка. Підручник. – О. М. Яхно, О. В. Узунов, О. Ф. Луговський, В. А. Ковальов, А. В. Мовчанюк, І. В. Коц, О. П. Губарев (Під редактуванням О. М. Яхна) – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2015. – 698 с.

ISBN 978-966-641-614-1

В підручнику проаналізовані основні закони механіки механіки і гідроаеромеханіки. Показано принцип дії та використання ультразвукових кавітаційних нових пристроїв, розглянуті питання принципів побудови, моделювання і проектування електронно-механічних систем та устаткування, наведені дані стосовно сенсорних засобів контролю і комп'ютерного управління систем механотроніки, розглянуті приклади розв'язання практичних задач. Підручник рекомендується для поглибленого вивчення студентами різних форм навчання, магістрантами та аспірантами напрямків підготовки фахівців ряду спеціальностей та спеціалізацій, зокрема: «Прикладна гідроаеромеханіка і механотроніка», «Гідравлічні і пневматичні машини», «Прикладна механіка», «Теплоенергетика», «Теплогазопостачання», «Інженерна механіка», «Машинобудування» та інших, чий фах орієнтований на створення і використання автоматизованих виробничих систем та інтелектуальної техніки в складних експлуатаційних та виробничих процесах.

УДК 532.5-533.6; 62-552.2, 525; 681.5;
62-82:658; 621.372

ББК 30.123:32.966

ISBN 978-966-641-614-1

© Яхно О. М., 2015 Мовчанюк А. В.,
2015

Узунов О. В., 2015 Луговський О. Ф., 2015

Ковальов В. А., 2015 Коц І. В., 2015

Губарев О. П., 2015

ЗМІСТ

ВСТУП	13
ЧАСТИНА І ТЕХНІЧНА ГІДРОДИНАМІКА	16
РОЗДІЛ 1 РОБОЧІ РІДИНИ ТА ЇХ ВЛАСТИВОСТІ	16
1.1 В'язкість робочих рідин	17
1.2 Поверхневий натяг і поверхнева енергія	23
1.3 Густина робочої рідини	25
Література для самостійного вивчення розділу 1	29
РОЗДІЛ 2 ЯВИЩЕ ПЕРЕНЕСЕННЯ В ГІДРОМЕХАНІЦІ	30
2.1 Перенесення кількості руху	31
2.2 Перенесення енергії, загальні рівняння енергії.....	34
2.3 Дисипація енергії в рідині	36
Література для самостійного вивчення розділу 2	39
РОЗДІЛ 3 ЛАМІНАРНИЙ РУХ В'ЯЗКОЇ РІДИНИ	40
3.1 Течія Куетта	40
3.2 Рух рідини в циліндричному каналі	41
3.3 Рух рідини в зазорі між коаксіальними циліндрами	42
3.4 Ламінарний нестабілізований рух в'язкої рідини.....	44
Література для самостійного вивчення розділу 3	48
РОЗДІЛ 4 ТУРБУЛЕНТНИЙ РУХ В'ЯЗКОЇ РІДИНИ	49
4.1 Нестабілізований турбулентний рух	51
4.2 Перехід від ламінарного руху рідини до турбулентного	52
Література для самостійного вивчення розділу 4	53
РОЗДІЛ 5 ГІДРОДИНАМІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ І ПОДІБНІСТЬ РУХУ В'ЯЗКИХ РІДИН	54
5.1 Одержання гідродинамічних критеріїв подібності на основі π-теореми.....	56
5.2 Подібність електромагнітних явищ в гідродинаміці	59
5.3 Особливості руху рідини в магнітному полі	62
Література для самостійного вивчення розділу 5	68
РОЗДІЛ 6 ВЗАЄМОДІЯ ПОТОКУ РІДИНИ З ТВЕРДИМИ ТІЛАМИ	70
6.1 Загальна характеристика взаємодії.....	70
6.2 Характерні особливості взаємодії потоку з твердим тілом	71

6.2.1 Відрив потоку від поверхні аеродинамічного профілю	72
6.2.2 Взаємодія потоку з твердими тілами з різною геометрією	77
6.2.3 Відрив потоку в каналах	81
6.3 Гідравлічні струмені	85
6.3.1 Занурені струмені	85
6.3.2 Незанурені струмені низького тиску	87
6.3.3 Взаємодія струменів з поверхнями	90
6.4 Гідравлічні струмені в системах гідропневмоавтоматики	90
6.5 Газові струмені	97
6.6 Гідравлічні струмені високого тиску	103
6.7 Взаємодія струменів з твердою поверхнею	105
6.7.1 Визначення лобового опору пластини струменю	107
6.8 Рідинні плівки	108
Література для самостійного вивчення розділу 6	113

РОЗДІЛ 7 ПАРАДОКСИ ГІДРОМЕХАНІКИ

7.1 Парадокс оборотності	115
7.2 Парадокс Даламбера і ефект Магнуса	115
7.3 Парадокс рівнянь Нав'є – Стокса	116
7.4 Парадокс неаналітичності	116
7.5 Парадокс турбулентності	117
7.6 Парадокс примежового шару	117
7.7 Парадокси Ейфеля і Дюбуа	117
7.8 Парадокс Стокса	118
7.9 Ковзання рідини	118
7.10 Парадокс бульбашки	118
Література для самостійного вивчення розділу 7	119
Література до частини I	119

ЧАСТИНА II ВСТУП ДО МЕХАНОТРОНІКИ

РОЗДІЛ 1 МЕХАНІКО-ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ

1.1 Задачі і об'єкти механотроніки	122
1.2 Склад і будова систем	128
1.3 Виконавчі пристрої систем мехатроніки	133
1.4 Задачі і технічні можливості сучасної електроніки	148
1.4.1 Сенсори – засоби збирання і передачі інформації	150
1.4.2 Апаратне забезпечення мехатронних систем	153
1.5 Особливості моделювання і проектування об'єктів механотроніки	156
1.6 Особливості механіки в задачах керування	165
1.7 Питання для самоперевірки	172

Література та інформаційні ресурси до розділу 1 172

РОЗДІЛ 2 ЗАКОНИ МЕХАНІКИ В СИСТЕМАХ МЕХАНОТРОНІКИ.. 176

2.1 Досягнення і основоположники гідромеханіки 176

2.2 Закони механіки..... 176

2.2.1 Явища і види переносу в механотронних системах 176

2.2.2 Сили, що діють на матеріальне тіло..... 180

2.2.3 Закони Ньютона 182

2.2.4 Закон збереження маси..... 184

2.2.5 Закон збереження імпульсу 184

2.2.6 Енергія і закон збереження енергії..... 186

2.2.7 Накопичення та дисипація енергії..... 188

2.2.8 Теорема про зміну кількості руху 190

2.2.9 Реологічні закони 191

2.3 Закони гідромеханіки..... 195

2.3.1 Основні закони рідини, що знаходиться в стані спокою 195

2.3.2 Рух в'язкої рідини 195

2.3.3 Закон Д. Бернуллі..... 197

2.3.4 Режимми руху рідини..... 199

2.3.5 Основні закони ламінарного руху рідини 200

2.3.6 Основні закони турбулентного руху рідини 203

2.3.7 Закони гідравлічного тертя 204

2.3.8 Місцеві втрати енергії..... 207

2.4 Закони газової і магнітної динаміки, що використовуються в механотроніці..... 207

2.4.1 Закони газової динаміки 207

2.4.2 Закони магнітної гідродинаміки..... 210

2.5 Питання для самоперевірки 214

Література до розділу 2..... 215

РОЗДІЛ 3 УЛЬТРАЗВУКОВА КАВІТАЦІЯ В МЕХАТРОННИХ СИСТЕМАХ 216

3.1 Застосування ультразвукової кавітації в технологічних процесах 216

3.1.1 Природа та особливості ультразвукової кавітації 217

3.1.2 Технологічні процеси із використанням ультразвукових коливань великої інтенсивності..... 225

3.1.3 Ультразвукова технологія отримання дрібнодисперсного аерозолю..... 227

3.1.4 Ультразвукова кавітаційна технологія вилучення пектину з рослинної сировини 232

3.1.5 Ультразвукова кавітаційна технологія знезараження води 238

3.2 Мехатронні системи та обладнання для реалізації ультразвукових кавітаційних технологій	241
3.2.1 Обладнання для ультразвукового розпилення рідин	241
3.2.1.1 Особливості ультразвукового розпилення рідин	241
3.2.1.2 Фізична модель процесу ультразвукового розпилення в тонкому шарі	254
3.2.1.3 Системи постачання рідини та регулювання продуктивності ультразвукових диспергаторів	257
3.2.1.4 Особливості побудови багатоточкових мехатронних систем ультразвукового розпилення.....	260
3.2.2 Приклади мехатронних систем із застосуванням ультразвукових диспергаторів	268
3.2.2.1 Ультразвукові диспергатори в системах підготовки паливно-повітряної суміші до двигунів внутрішнього згорання.....	268
3.2.2.2 Автоматична система ультразвукового розпилення рідини в парогенераторі потужністю 1 МВт	273
3.2.2.3 Мехатронні системи штучного мікроклімату в медицині та сільському господарстві	274
3.3 Обладнання для ультразвукової кавітаційної обробки рідин та очищення поверхонь	278
3.3.1 Особливості проектування та використання відкритих кавітаційних ванн з плоскими поверхнями	278
3.3.2 Методики проектування та особливості застосування циліндричних кавітаційних камер.....	289
3.3.3 Приклади застосування ультразвукових кавітаційних камер в мехатронних системах	296
3.3.3.1 Ультразвукова кавітація в технологічному процесі ферментного гідролізу відходів деревини та сільського господарства.	296
3.3.3.2 Ультразвукова кавітаційна обробка пластової води в технологічному процесі видобування нафти	298
3.3.3.3 Апаратні засоби для ультразвукового кавітаційного очищення деталей	300
3.4 Запитання для самоконтролю	301
Література до розділу 3.....	303
РОЗДІЛ 4 ОСНОВИ СЕНСОРНОЇ ТЕХНІКИ.....	315
4.1 Безконтактні сенсори	316
4.2 Ультразвукові сенсори.....	322
4.3 Сенсори з інфрачервоним випромінюванням	325
4.4 Тепловізори.....	326
4.5 Сенсори температури.....	328

4.6 Анемометричні сенсори	330
4.7 Сенсори положення – позиціонери	332
4.8 Сенсори тиску	334
4.9 Сенсори дальності (наближення)	336
4.10 Сенсори рівня	338
4.11 Сенсор кута повороту	341
4.12 Тахометричні сенсори	344
4.13 Перспективи розвитку сенсорної бази систем мехатроніки	346
Література до розділу 4	352

РОЗДІЛ 5 МОДЕЛЮВАННЯ І ПРОЕКТУВАННЯ ЕЛЕКТРОННО-МЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ

5.1 Моделювання об'єктів мехатроніки	355
5.1.1 Моделі: застосування, поняття і типи	355
5.1.2 Моделювання в мехатроніці	359
5.1.3 Приклад розв'язання задачі моделювання	361
5.1.4 Особливості застосування циклічно-модульного підходу до задачі моделювання	372
5.1.5 Приклад моделювання гідромеханічного перетворювача з допомогою циклічно-модульного підходу	377
5.1.6 Загальні зауваження	382
5.2 Проектування об'єктів мехатроніки	383
5.2.1 Будова об'єкту і підходи до проектування	383
5.2.2 Циклічно-модульний підхід для побудови об'єктів мехатроніки	391
5.2.3 Оцінювання ефективності застосування циклічно-модульного підходу	399
5.2.4 Зміст етапів проектування об'єкта	404
5.2.5 Проектування запобіжного клапана	446
5.3 Питання для самоперевірки	455
Література до розділу 5	456

РОЗДІЛ 6 СТРУКТУРНИЙ СИНТЕЗ І ОСОБЛИВОСТІ БУДОВИ СИСТЕМ

6.1 Особливості будови систем	460
6.1.1 Передумови структурної будови систем	460
6.1.2 Будівельний склад мехатронічних систем	462
6.1.3 Системний елемент об'єктів мехатроніки	464
6.1.4 Функції модульної станції	466
6.1.5 Зміст виробництва об'єднує модульні станції в систему	468
6.1.6 Зворотний зв'язок в модульній системі	471
6.1.7 Перехід від міркування до формальної логіки	475

6.1.8	Впорядкування умовних позначень і логічних виразів	480
6.2	Структура системи: підходи, методи і моделі	483
6.2.1	Як вибрати кращий підхід або модель для Вашої задачі.....	483
6.2.2	Таблиці станів і переходів (кінцевий автомат)	488
6.2.3	Часові і крокові діаграми або циклограми	500
6.2.4	Причинно-наслідкова модель	506
6.2.5	Мережі Петрі	517
6.2.6	Функціональний план і комунікаційні мережі (мережі зв'язку).....	529
6.3	Приклади і поради.....	535
6.3.1	Поради загального плану	535
6.3.2	Приклад (завдання на модернізацію системи).....	537
6.3.3	Станція №1 (використання циклограми).....	540
6.3.4	Станція №2 (використання функціонального плану).....	547
6.3.5	Станція №3 (використання використання причинно- наслідкової моделі)	557
6.3.6	Побудова структури одного модуля	566
6.3.7	Поради та рекомендації	573
6.4	Питання для самоперевірки	575
	Література до розділу 6.....	577

РОЗДІЛ 7 АПАРАТНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА АЛГОРИТМИ КЕРУВАННЯ СИСТЕМ МЕХАТРОНІКИ	584
7.1 Методи та засоби обробки сигналів сенсорів	585
7.1.1 Аналого-цифровий та цифро-аналоговий перетворювачі сигналів..	585
7.1.2 Компаратори	587
7.1.3 Мультиплексори.....	588
7.1.4 Вільно програмовані контролери	590
7.2 Апаратне забезпечення систем мехатроніки на базі мікропроцесорів.....	595
7.2.1 Кодери та декодери	595
7.2.2 Енкодери	598
7.2.3 Сенсорні панелі	600
7.2.4 Панельні робочі станції	604
7.2.5 Навігаційні системи	606
7.2.6 Розподілені системи керування	608
7.2.7 Виробничі мережі систем керування	610
7.2.8 Модулі розпізнавання зображень	612
7.2.9 Мобільні лабораторії	615
7.3 Основи управління електроприводом.....	618
7.3.1 Загальні відомості про керований електропривод.....	618
7.3.2 Елементна база для побудови систем керування електроприводом	624

7.3.3 Принципи побудови функціональних вузлів систем керування електроприводом	627
7.4 Мови програмування керуючих модулів	633
7.5 Складання алгоритмів програм керування для електро-гідро-пневмо-механічних систем дискретної дії.....	643
7.5.1 Про організацію керування в системі	643
7.5.2 Про механічні алгоритми функціонування	649
7.5.3 Перехід від алгоритмів функціонування до алгоритмів керування..	655
7.5.4 Готуємо інструмент для побудови алгоритму	670
7.5.5 Приклад: складаємо алгоритми програми	681
7.6 Питання для самоперевірки	702
Література та інформаційні посилання до розділу 7	704