

Луговський О. Ф.

Фесіч В. П.

Мовчанюк А. В.

Національний
технічний
університет
України
„Київський
політехнічний
інститут”

УДК 621.647.23

ОСОБЛИВОСТІ ПОБУДОВИ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ УЛЬТРАЗВУКОВИМИ РЕЗОНАНСНИМИ ПРИВОДАМИ

Рассмотрены принципы построения схем возбуждения ультразвуковых пьезоэлектрических вибрационных приводов для различных случаев механического нагружения. Показаны способы обеспечения стабильности заданных характеристик приводов.

Principles of constructing schemes of excitation of ultrasonic vibration of piezoelectric drives for different cases of mechanical loading are considered. The ways of ensuring the stability of the given characteristics of drives are showed.

Вступ.

Ультразвукові технології широко використовуються в машинобудуванні, медицині, сільському господарстві та інших галузях. За допомогою ультразвукових коливань здійснюється вплив на металеві поверхні, на рідинне середовище, на повітряний простір та біологічні структури. Ультразвукові технології пов'язані з деформаційним зміцненням і релаксаційною обробкою металів [1,2], з явищем ультразвукової кавітації та вторинними ефектами, що її супроводжують [3-5], з процесами диспергування та коагуляції в повітряному просторі [4-5], з процесами зварювання та роз'єднання матеріалів та біологічних тканин, з процесами екстракції-гідролізу [6], з процесами знезараження рідин [7,8], тощо.

У більшості наведених технологій застосовуються ультразвукові коливання великої інтенсивності. Збудження ультразвукових коливань відбувається за допомогою резонансних приводів, в яких використовуються магнітострикційні або п'єзоелектричні перетворювачі. Останні найбільш поширені завдяки майже в 2,5 рази більшому ККД, великому різноманіттю форм, розмірів та характеристик. Ультразвукові резонансні приводи будуються за різними акустичними схемами та використовують різні форми пружних коливань [9].

В кожній ультразвуковій технології, де застосовуються названі приводи, мають місце різні види навантаження та різні режими роботи, що, безумовно, потребує використання

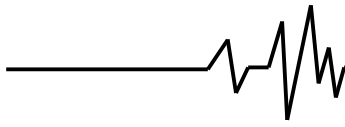
різних принципів побудови систем керування цими приводами.

Метою даної статті є аналіз схем збудження та керування ультразвуковими резонансними приводами на базі п'єзоелектричних перетворювачів.

Основна частина.

Задача джерела живлення ультразвукового приводу – підтримувати в заданих межах амплітуду механічних коливань або, в залежності від технологічного процесу, амплітуду коливальної швидкості, компенсуючи зміни умов роботи, що спричиняються зовнішніми чинниками. Для ультразвукового приводу оброблюване рідке середовище або контактуюча тверда поверхня є акустичним навантаженням, яке може змінювати характер, тобто абсолютне значення та співвідношення реактивної та активної складової в процесі роботи. Для джерела живлення ультразвуковий вібраційний п'єзоелектричний привід є електричним навантаженням активно-реактивного характеру, яке змінюється зі зміною акустичного навантаження. Якщо акустичне навантаження змінюється в широких межах (від холостого ходу до максимуму), то значно міняється і електричне навантаження. Тому, вибір схеми джерела живлення залежить, насамперед, від типу акустичного навантаження та характеру його змін в процесі роботи.

За величиною механічних коливань робочої поверхні приводи можна умовно розділити на два типи - малоамплітудні та високоамплітудні. Перші мають амплітуду



коливань на рівні 0.1-2 мкм і найчастіше використовуються в складі кавітаційних і докавітаційних ванн для дії на рідке середовище. Вони, як правило, не оснащені трансформатором швидкості і завдяки цій особливості зміна механічного навантаження у них істотно не впливає на характер електричного навантаження джерела живлення. Другий тип має робочі амплітуди коливань від одиниць до десятків мікрометрів. Для отримання необхідної амплітуди механічних коливань в таких приводах широко використовуються трансформатори швидкості (концентратори), що разом з широким діапазоном зміни акустичного навантаження спричиняє розширення меж зміни характеру електричного навантаження для джерела живлення приводу. В зв'язку з цим вимоги до джерел живлення таких приводів значно жорсткіші. Високоамплітудні ультразвукові вібраційні приводи можна в першому наближенні поділити за характером механічного навантаження:

- приводи-диспергатори для ультразвукового дрібнодисперсного розпилення в тонкому шарі. Механічне навантаження відносно незмінне, електричне навантаження має резонансний характер за частотою;

- приводи для деформаційного зміцнення та релаксаційної обробки металів. Акустичне навантаження змінюється в широких межах, характер електричного навантаження резонансний зі зміною добротності в широких межах;

- приводи для різання та зварювання м'яких тканин. Механічне навантаження змінюється від холостого ходу до максимальних значень. Електричне навантаження резонансного характеру, частота резонансу зсувається в процесі роботи.

- приводи для розмірної обробки та різання твердих матеріалів з використанням абразивних суспензій. Механічне навантаження змінюється в широких межах, характер електричного навантаження резонансний зі значними змінами добротності.

Таким чином, підходи до проектування джерел живлення для малоамплітудних і для високоамплітудних ультразвукових вібраційних п'єзоелектричних приводів істотно відрізняються. Для високоамплітудних приводів джерело живлення має складнішу структуру через необхідність враховувати більшу кількість параметрів коливальної системи. В зв'язку з цим, неможливо створити універсальне джерело живлення для всіх типів

високоамплітудних приводів, вимагається окремий підхід в кожній конкретній задачі.

Рамки статті не дозволяють детально розглянути все різноманіття структурних рішень, які використовуються для створення джерел живлення ультразвукових приводів. Тому, розглянемо найбільш характерні варіанти побудови джерел живлення для малоамплітудних та високоамплітудних ультразвукових вібраційних п'єзоелектричних приводів.

Найбільш поширеним варіантом схеми живлення для малоамплітудних ультразвукових вібраційних приводів є схема з використанням частотної модуляції.

Малоамплітудні ультразвукові вібраційні приводи (рис.1) мають широку полосу на характеристиці залежності інтенсивності механічних коливань від частоти напруги живлення, в якій присутня ефективна робота (рис.2.). Механічний резонанс не є яскраво вираженим (є низькодобротним). Це впливає з конструктивних особливостей приводу.



Рис. 1. Малоамплітудний ультразвуковий привід

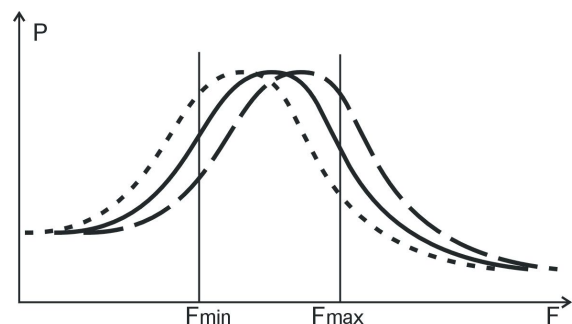
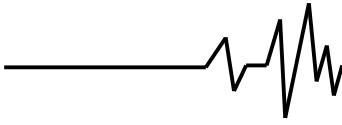


Рис. 2. Залежність амплітуди механічних коливань малоамплітудного ультразвукового вібраційного приводу від частоти



При зміні умов роботи приводу (нагрів елементів приводу, зміна реологічних властивостей технологічної рідини під дією ультразвуку та ін.) крива залежності амплітуди механічних коливань від частоти зміщується по частоті в ту чи іншу сторону. В такому випадку доцільно використовувати живлення приводу струмом, модульованим за частотою. Межі зміни частоти (F_{min} , F_{max}) вибираються так, щоб перекрити всі можливі зміни частотної характеристики приводу в процесі роботи (рис.2). Закон зміни частоти в діапазоні F_{min} - F_{max} вибирають лінійним (рис.3) для рівномірного розподілу частот, хоча можливі й інші варіанти, наприклад, синусоїдальний.

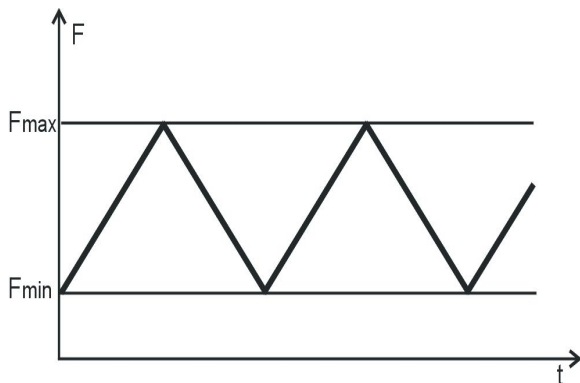
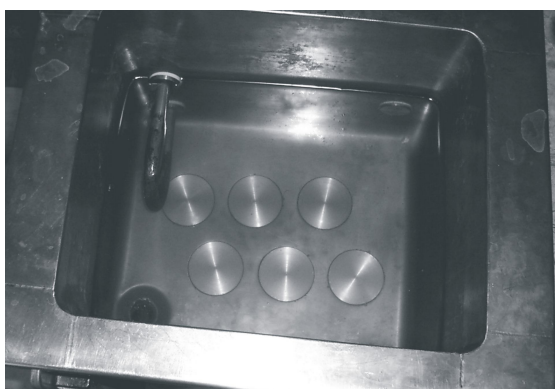


Рис. 3. Закон зміни частоти струму живлення ультразвукового вібраційного приводу в часі

Застосування частотної модуляції в схемі живлення ультразвукового приводу забезпечує створення дифузного ультразвукового поля в технологічному об'ємі рідини. При живленні ультразвукового приводу струмом незмінної частоти в технологічному об'ємі утворюються стоячі хвилі з кавітаційними прошарками, що суттєво погіршує технологічний результат.

Вказаний метод живлення також доцільно застосовувати для ультразвукових технологічних установок, які мають в своєму складі декілька ультразвукових приводів (рис.4). Однакові ультразвукові приводи з різних причин мають відмінні частотні характеристики (рис.5). Застосування окремих джерел живлення (генераторів) для кожного приводу економічно недоцільно. Для забезпечення максимально ефективної роботи всіх приводів, наприклад, в багатопривідній кавітаційній ванні, застосовують живлення



струмом з частотною модуляцією. Значення F_{min} та F_{max} вибирають з врахуванням меж розкиду частотних характеристик окремих приводів (рис.5).

Рис. 4. Ультразвукова кавітаційна ванна з декількома малоамплітудними приводами

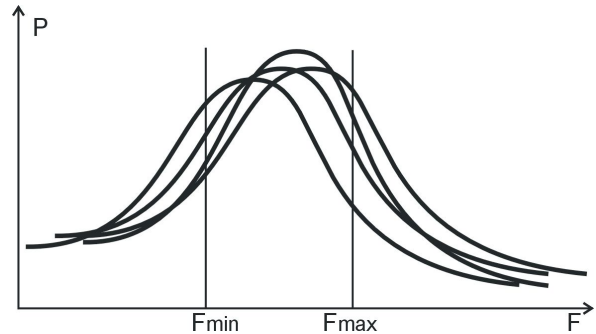
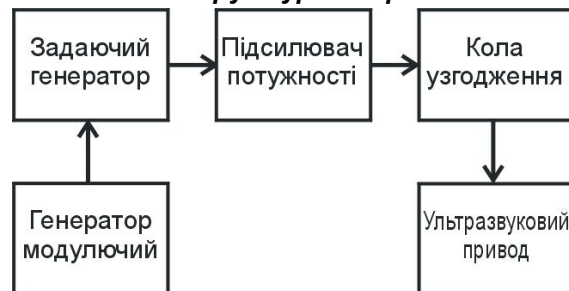


Рис. 5. Залежність амплітуди механічних коливань ультразвукових вібраційних приводів від частоти

На рис.6 показано структуру джерела живлення (генератора) ультразвукових приводів з частотною модуляцією. Задаючий генератор виробляє змінну напругу, частота якої знаходиться посередині інтервалу F_{min} - F_{max} . Модулюючий генератор змінює цю частоту за заданим законом зміни струму живлення. Модульована напруга подається на підсилювач потужності, з якого через кола узгодження живляться малоамплітудні ультразвукові вібраційні приводи.

Рис. 6. Структура джерела живлення



(генератора) ультразвукових приводів з частотною модуляцією

Високоамплітудні ультразвукові вібраційні приводи (рис.7) завдяки своїм конструктивним особливостям мають гостру, яскраво виражену резонансну характеристику залежності амплітуди механічних коливань від частоти (рис.8). Метод живлення з частотною модуляцією в даному випадку не застосовують, оскільки неможливо забезпечити відносно стабільну амплітуду коливань приводу.

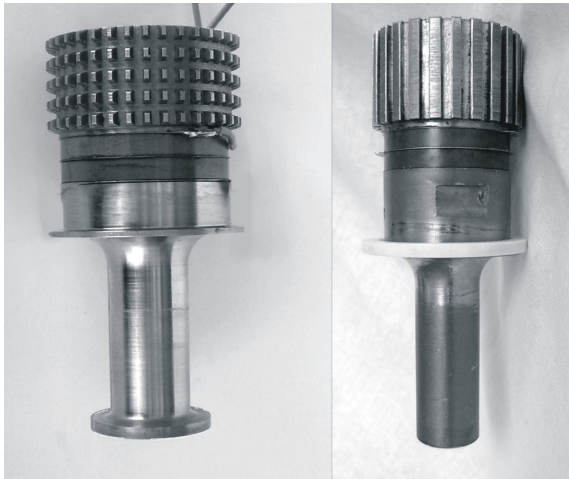
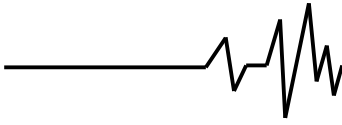


Рис. 7. Високоамплітудні ультразвукові вібраційні приводи

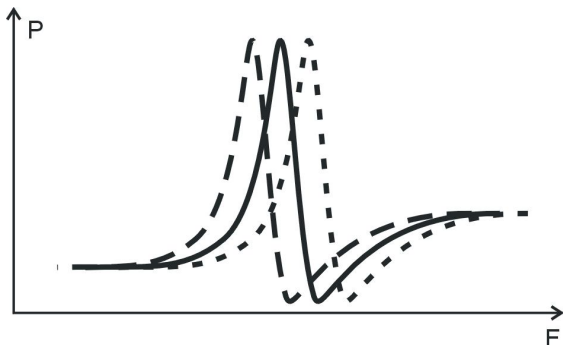


Рис.8. Залежність амплітуди механічних коливань високоамплітудного ультразвукового вібраційного приводу від частоти

Частоту напруги живлення таких приводів необхідно підтримувати рівною частоті максимуму амплітуди механічних коливань. Для цього існує ряд методів, які мають свої переваги і недоліки. Особливості високоамплітудних приводів не дають можливості використовувати одне джерело живлення для декількох приводів.

Для безперервного підлаштування частоти струму джерела живлення високоамплітудного ультразвукового приводу необхідно мати зворотній зв'язок. Існують два методи отримання сигналу зворотнього зв'язку-безпосередній акустичний та посередній електричний (рис. 9).

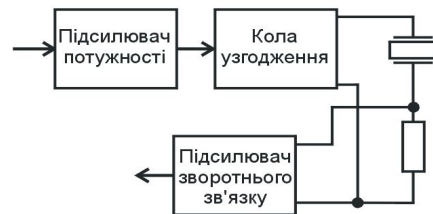
Перший метод здійснюється за допомогою акустичного давача, який знаходиться безпосередньо в робочому об'ємі або на робочій частині приводу і виробляє електричний сигнал, пропорційний амплітуді коливань тиску в рідині (рис.9,а). Цей метод

дозволяє достатньо точно підтримувати умови технологічного процесу, але не завжди технологічний процес допускає розміщення в об'ємі рідини давача.

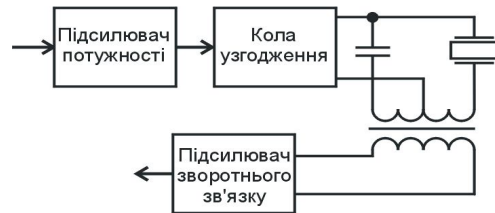
Другий метод базується на отриманні електричного сигналу зворотнього зв'язку, пропорційного одному з електричних параметрів ультразвукового приводу, що характеризує амплітуду механічних коливань робочої поверхні.



а)



б)

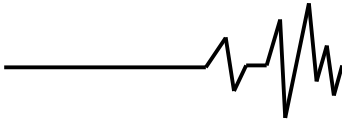


в)

Рис. 9. Методи отримання сигналу зворотнього зв'язку (а-акустичний, б-електричний за вихідним струмом, в-електричний з компенсацією реактивної складової струму)

На рис.9,б представлено схему отримання сигналу зворотнього зв'язку, який знімається з резистора, що включений послідовно з приводом і є пропорційним струму через п'єзоелементи приводу.

Схема з компенсацією реактивної складової імпедансу приводу (рис.9,в) має переваги перед попередньою. Використання диференційного трансформатора дозволяє скомпенсувати статичну ємність п'єзоелементів приводу в широкому діапазоні частот. Сигнал зворотнього зв'язку є пропорційним струму, який, в свою чергу, пропорційний амплітуді коливальної швидкості приводу. Це дозволяє



схемі керування виробляти напругу живлення приводу з частотою механічного резонансу. Також присутня гальванічна ізоляція між вихідними високовольтними колами та низьковольтною схемою керування. Така схема найчастіше використовується в джерелах живлення ультразвукових високоамплітудних вібраційних приводів.

Для підтримування частоти напруги живлення приводу, що відповідає його механічному резонансу, застосовують дві наступні схеми. Перша схема (рис.10) використовує метод знаходження екстремуму. Вона має в своєму складі генератор, керований напругою (ГКН). Частота його вихідної напруги лінійно залежить від величини вхідної напруги керування U_c . До напруги керування, яка повільно змінюється в часі, додається модулююча напруга синусоїдальної форми відносно невеликої амплітуди. В результаті отримуємо на виході ГКН напругу, модульовану за частотою. Ця напруга підсилюється і подається на привід. Одним з вище згаданих способів отримуємо сигнал зворотного зв'язку. Залежність напруги зворотного зв'язку від частоти відповідає залежності амплітуди коливань приводу від частоти (рис.11). Таким чином маємо напругу зворотного зв'язку, модульовану за амплітудою. Після амплітудного детектора отримуємо огинаючу U_m , яка подається на фазовий детектор. На другий вхід фазового детектора подається модулюючий сигнал U_z . Як видно з рис. 11, коли частота напруги живлення нижча від резонансної, фаза U_m співпадає з фазою U_z , коли вона вища - фаза U_m протилежна фазі U_z .

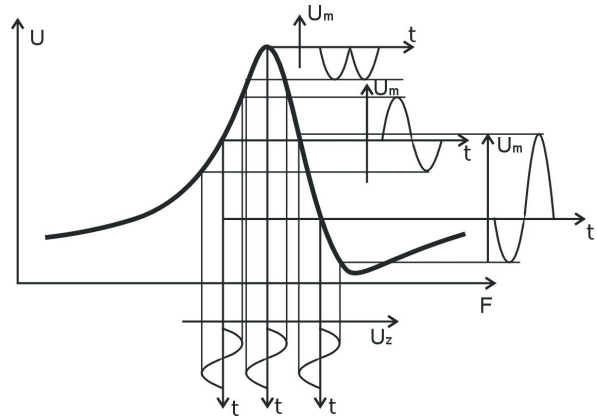


Рис. 11. Отримання вхідного сигналу фазового детектора

Відповідно, після інтегратора отримуємо підвищення або зниження напруги керування ГКН. Коли ця частота дорівнює частоті резонансу, напруга керування не змінюється. Так відбувається знаходження резонансу і утримання на ньому приводу.

В другій схемі (рис. 12) напруга зворотного зв'язку подається на смуговий фільтр, смуга якого відповідає діапазону можливих змін резонансної частоти приводу. Таким чином відфільтровуються завади. Далі сигнал подається на фазообертаючу схему, яка компенсує фазові зсуви, що виникають на шляху сигналу. Після цього сигнал підсилюється і подається на привід. Так підтримується баланс фаз для створення автогенерації. Таким чином, підтримується резонансний режим роботи приводу. Стабілізація амплітуди струму через привід відбувається за амплітудою першої гармоніки сигналу зворотного зв'язку (рис.12).

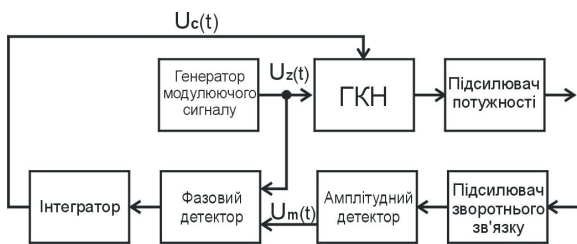


Рис. 10. Система підтримування на резонансі методом знаходження екстремуму

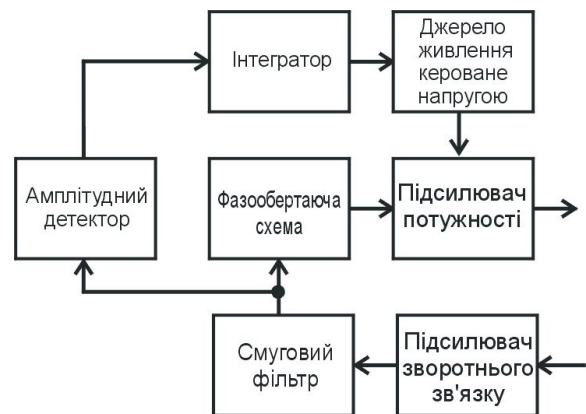
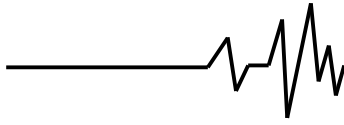


Рис. 12. Система автогенерації з підтриманням балансу фаз



Обидві схеми мають свої переваги й недоліки. Першу краще використовувати у випадку, коли привід має паразитні механічні резонанси, а навантаження приводу змінюється в широких межах. Але ця схема більш складна в налаштуванні та вимагає термостабільних компонентів.

Друга схема добре працює з приводами, навантаження яких змінюється в малих межах, а побічні механічні резонанси знаходяться далеко по частоті.

Висновки

Розглянуто принципи побудови джерел живлення ультразвукових вібраційних п'єзоелектричних приводів при різних видах електричного навантаження. Показано, що ультразвуковий привід є складним непостійним навантаженням для джерела живлення. Тому, для забезпечення заданих характеристик ультразвукової системи необхідне безперервне переналаштування параметрів джерела живлення (частоти та амплітуди вихідного струму). Для цього необхідний зворотній зв'язок, типи якого розглянуті, та система обробки сигналів зворотнього зв'язку для вироблення сигналів керування силовими каскадами.

Представлені найбільш поширені для ультразвукових приводів способи механічного навантаження, які істотно впливають на електричні параметри приводів і які необхідно враховувати при визначенні електричного навантаження джерела живлення.

Література

1. Прокопенко Г.И., Луговской А.Ф., Чорный В.И. и др. Упрочнение проволоки

ультразвуковой виброударной обработкой. Вестник НТУУ „КПИ”. Серия машиностроение. Вып. 49, - Київ, 2006, с.98-103.

2. Y. Kudryavtsev, J. Kleiman, A. Lugovskoy, G. Prokopenko. Industrial Application of Ultrasonic Peening for Fatigue Life Improvement of Welded Elements and Structures. International Institute of Welding. IIW Document XIII-2173-07. 2007. 15 p.

3. Новицкий Б.Г. Применение акустических колебаний в химико-технологических процессах (Процессы и аппараты химической и нефтяной технологии). - М.: Химия, 1983. - 192 с.

4. Луговской А.Ф., Чухраев Н.В. Ультразвуковая кавитация в современных технологиях.-К. Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 2007-244с.

5. Эгнадиосянц О.К. Получение аэрозолей. - В кн.: Физические основы ультразвуковой технологии. Под ред. Л.Д. Розенберга. - М.: Наука, 1970. - С. 339-392.

6. Луговський О.Ф., Берник І.М. Використання фізичних полів для гідролізу пропектину рослинної сировини. Вібрації в техніці та технологіях. № 3 (52), -Вінниця, ВДАУ, 2008, с.92-100

7. Эльпинер И.Е. Ультразвук. Физико-химическое и биологическое действие. - М., Физматиз, 1963 -430с.

8. Луговской А.Ф., Мовчанюк А.В., Гришко И.А. Оценка методов обеззараживания воды. - Вестник НТУУ «КПИ», Серия машиностроение, Вып.52. - Київ, 2008, с.103-111.

9. Луговской А.Ф., Фесич В.П., Мовчанюк А.В. Ультразвуковые приводы для кавитационных технологий. Промислова гідраліка і пневматика, № 4 (22),-Вінниця, 2008, с. 28-34.