

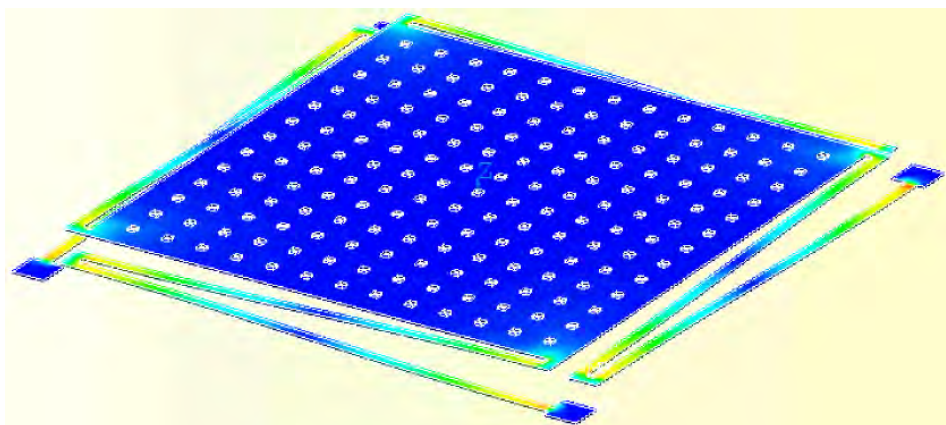


Рис. 4. Акселерометр

Висновки. У статті було розглянуто та продемонстровано на прикладах декілька основних підходів до проектування мікроструктур. Проведено порівняння систем проектування та наведені переваги використання спрощених моделей мікроструктур. Результати, отримані внаслідок проектування, демонструють можливості запропонованих САПР пакетів.

УДК 620.179.1: 621.313.333.2

Ю.З. Хліпальський

Національний університет “Львівська політехніка”

БЕЗКОНТАКТНЕ ДІАГНОСТУВАННЯ КЛІТОК РОТОРІВ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ З КОМПЕНСАЦІЄЮ ПОХИБКИ ВСТАНОВЛЕННЯ РОТОРА

© Хліпальський Ю.З., 2003

Наведено спосіб корекції сигналів, які отримують під час діагностування дефектів кліток роторів асинхронних двигунів безконтактними електромагнітними методами, для зменшення похибки, зумовленої нестабільністю повітряних проміжків між досліджуваним ротором і магнітною системою діагностичного пристрою. Для компенсації похибок встановлення ротора використано нейронну мережу та систему давачів, розташованих на елементах осердя індуктора.

The correction method to reduce an error of signals, obtained during the uncontact electromagnetic diagnosing of induction motor squirrel-cage rotor defects, caused the tested rotor and diagnosing device magnetic system air gap is introduced in the article. The neural networks and the system of sensors located on inductor core elements are used for compensation of rotor installation errors.

Постановка проблеми. З літературних джерел [1–3] відомо багато методів і засобів, що використовуються для діагностування стану кліток роторів асинхронних двигунів (АД). Залежно від умов застосування цих засобів їх поділяють на дві групи: 1) для чутливих

перетворювальних елементів приладів передбачений доступ до поверхні ротора (наприклад, в разі контролю роторів АД під час їх виготовлення); 2) без можливості доступу чутливих перетворювальних елементів до поверхні ротора, коли діагностування здійснюється на зібраних АД.

Значна частина сучасних засобів контролю та діагностування електромеханічних пристроїв, яка належить до першої групи приладів, використовує безконтактний спосіб отримання первинної інформації про стан об'єкта. При цьому достовірність технічного діагностування, яка характеризує ступінь відповідності діагнозу дійсному технічному стану об'єкта, визначається двома основними чинниками – адекватністю діагностичної моделі, за якою будується алгоритм обробки інформативних сигналів, а також точністю отримання первинної (вхідної) інформації.

За умови правильної побудови діагностичної моделі достовірність діагностування визначається, переважно, максимальною похибкою вимірювання діагностованих параметрів. Основна складова цієї похибки при електромагнітному безконтактному діагностуванні клітки АД з можливістю доступу до поверхні ротора залежить від стабільності повітряних проміжків між елементами системи індуктор – ротор – первинний вимірювальний перетворювач. Вплив цього чинника є головним обмеженням на шляху збільшення чутливості діагностичних пристроїв для виявлення дефектів у клітках роторів АД.

Аналіз останніх досліджень. У публікації [4] наведено конструкції індуктора та вимірювального перетворювача (давача), які зменшують вплив коливання величини повітряного проміжку між ними та досліджуваним ротором на вихідний інформативний сигнал. Неспіввісне розташування ротора відносно індуктора, яке може виникнути під час встановлення ротора в пристрій, частково компенсується тут застосуванням системи збудження з розімкненим магнітопроводом. Ефект компенсації досягається за рахунок того, що у стрижнях клітки, охоплених магнітною системою індуктора, при ексцентричному положенні ротора відбувається перерозподіл струмів, але струм у стрижнях, розташованих в зоні розриву магнітопроводу (в тому числі й у контрольованому), змінюється меншою мірою, ніж у випадку застосування інших типів індукторів.

У роботі [5] наведено результати дослідження чутливості магніторезистивних давачів до дефектів кліток роторів АД. Як видно з поданих експериментальних даних, для зменшення впливу повітряного проміжку на результати вимірювань величина проміжку між поверхнею ротора та давачем вибиралась достатньо великою (2–3 мм).

Отже, при проектуванні безконтактних електромагнітних контрольно-діагностичних пристроїв для збільшення достовірності й точності виявлення дефектів у клітках роторів стараються забезпечити: 1) таке конструктивне виконання системи індуктор – давач, при якому можливі відхилення положення ротора відносно магнітопроводів цих елементів мінімально впливатимуть на вихідний сигнал давача; 2) величини повітряних проміжків індуктор – ротор та ротор – давач вибирають достатньо великими, щоб під час перевірки роторів їх відносна зміна була незначною (приблизно декілька відсотків від номінального значення).

Постановка завдання. Вдосконалення конструкцій індукторів та вимірювальних перетворювачів може забезпечити певне підвищення точності діагностування дефектів, але воно пов'язане із необхідністю використання високоточних технологій, які зумовлюють значне подорожчання пристроїв. При цьому можливий випадок, коли при інтегральній оцінці якості нового виробу збільшення вартості розробки значно переважатиме

підвищення точності. До того ж, незмінним залишиться вплив таких чинників, як радіальне биття доріжок кочення кілець підшипників вузла, що забезпечує обертання ротора у пристрої; неточність виготовлення та поступове спрацювання поверхні вала, на який насаджуються досліджувані ротори, допуск на виготовлення циліндричної поверхні самого ротора. Проведені автором дослідження свідчать, що вибір великих величин повітряних проміжків між ротором та магнітними системами індуктора й давача призводить до зменшення чутливості пристроїв до дефектів.

Враховуючи наведене, актуальною є розробка способу, який дозволить здійснювати компенсацію похибки, зумовленої коливаннями величини повітряного проміжку між ротором і магнітною системою діагностичного пристрою.

Виклад основного матеріалу. Для корекції вихідного сигналу давача з метою зменшення згаданої похибки в загальному випадку необхідно було б мати інформацію про взаємне положення ротора і кожного з елементів магнітної системи індуктора та давача (останній може складатись з декількох первинних вимірювальних перетворювачів з окремими магнітопроводами). Крім цього, необхідно знати функцію відгуку системи, яка характеризує зміну вихідного сигналу залежно від зміни її параметрів, в цьому випадку – від зміни величин повітряних проміжків, які є чинниками, що впливають на перетворення енергії та інформації.

Побудова математичної моделі, яка б дозволила визначити функцію відгуку в нелінійній системі, якою є пристрій для діагностування разом з досліджуванним об'єктом – ротором, є достатньо складним завданням. Якщо при цьому врахувати, що внаслідок неминучих допущень похибка отримання значення функції відгуку, на якій базуватиметься корекція сигналу, може бути співвимірною або й перевищувати похибку, яку ми маємо за мету зменшити внаслідок корекції, то можна стверджувати, що такий шлях не є доцільним. До цього можна додати, що навіть у випадку отримання достатньо точного значення функції відгуку, наприклад, у вигляді аналітичного виразу чи апроксимуючої залежності, залишиться проблема – як розрізнити вплив на вихідний сигнал зміни величин повітряних проміжків та дефектів у елементах клітки ротора, оскільки можливих комбінацій останніх (за взаємним розташуванням та величиною) може бути безліч.

Для побудови процедури корекції контрольованого сигналу необхідно мати достатню, отриману з необхідною мірою точності, вхідну інформацію. При застосуванні електромагнітних методів для збудження струмів в обмотці контрольованого ротора та отримання інформативних сигналів про його стан, дані про відхилення величин повітряних проміжків можна одержати на основі інформації про зміну магнітних потоків. Зрозуміло, що контролювати потрібно ті магнітні потоки елементів магнітної системи діагностичного пристрою, які зчеплені з досліджуваним ротором.

Окреслену вище проблему можна вирішити з використанням нейронної мережі, вхідні елементи якої отримують сигнали від давачів індукційного типу, встановлених на вибраних ділянках магнітопроводу індуктора. Штучні нейронні мережі мають низку істотних властивостей, які дозволяють ефективно розв'язувати задачі в галузі діагностування [6, 7]:

- високу ефективність апроксимації довільних нелінійних залежностей;
- працездатність навіть при неповній вхідній інформації;
- високу стійкість при виникненні збурень;
- здатність паралельного перетворення вхідної інформації;
- не потребують знання математичних моделей об'єктів діагностування.

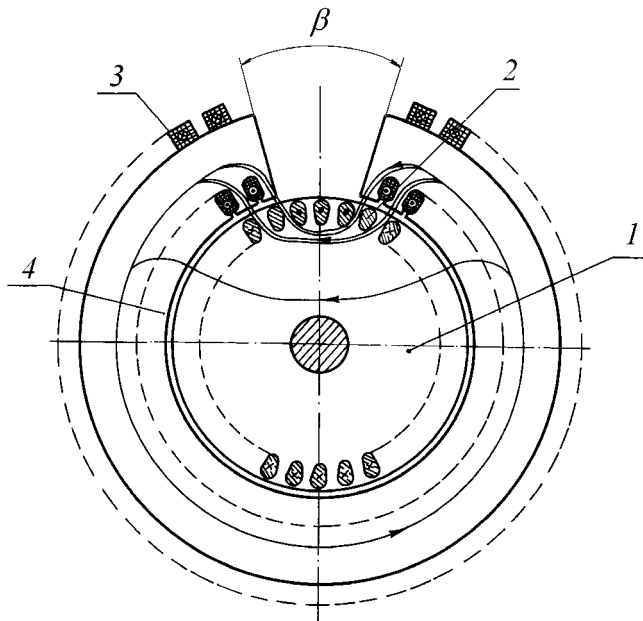


Рис. 1. Поперечний переріз індуктора з розімкненим магнітопроводом: 1 – ротор; 2 – стрижні; 3 – обмотка збудження; 4 – магнітопровід індуктора

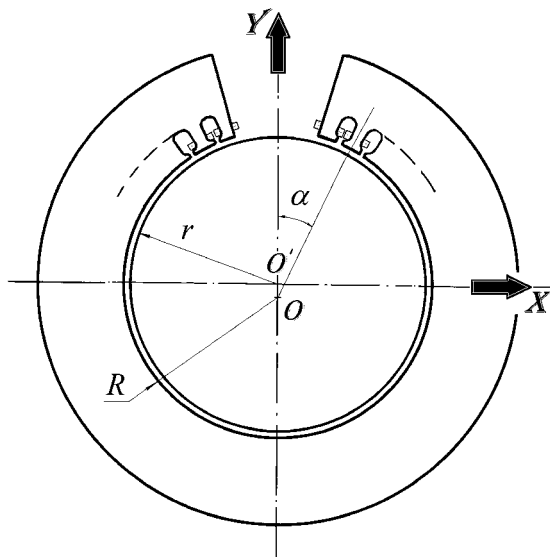


Рис. 2. До визначення величини зміщення ротора

нального положення в напрямку трьох осей координат. На рис. 2 показано лише дві осі, а вісь OZ збігається з віссю індуктора. За номінальне положення вважатимемо співвісне розташування ротора та індуктора, при якому величини повітряних проміжків між зубцями індуктора та поверхнею ротора є однаковими та рівними номінальному значенню.

Конструктивне виконання пристроїв на базі індуктора, зображеного на рис. 1, та інших відомих з літератури є таким, що практично виключене зміщення вздовж осі OZ за рахунок використання упорних елементів та електромагнітних сил, що виникають між індуктором і ротором після увімкнення магнітного поля збудження.

Прикладом вдалого застосування теорії нейронних мереж до проблем діагностики АД з клітковим ротором може бути робота [8], в якій, зокрема, наведено структуру нейронного детектора для виявлення пошкоджень клітки ротора зібраного двигуна на підставі інформації про зміни спектра гармонік струму статора.

Нижче описано спосіб корекції сигналів, що отримуються під час діагностування дефектів кліток роторів з використанням індуктора з розімкненим магнітопроводом, який показано на рис. 1. На цьому рисунку не показаний давач інформативного сигналу, який може знаходитись або в зоні розриву магнітопроводу індуктора (над контрольованим стрижнем на осі симетрії приладу), або ж з торця ротора навпроти цього ж стрижня біля короткозамикального кільця.

Розробка нейронної мережі пов'язана з вибором її типу та структури, а також визначенням вагових коефіцієнтів під час навчання. Для вирішення перших двох завдань в літературі [6] існують лише загальні рекомендації, які проєктант має врахувати при роботі з конкретним об'єктом. Тому попередньо розглянемо можливі відхилення положень ротора відносно індуктора, які впливають на результуючу похибку.

У загальному випадку, при встановленні ротора в індуктор може відбутись його зміщення відносно номі-

Для аналізу відхилень ротора по двох інших осях, визначимо його максимально можливе зміщення, спричинене такими чинниками, як:

- радіальне биття δ_d доріжок кочення кілець підшипників, що визначають положення осі $O'O'$ ротора ;
- максимальне значення проміжку δ_n в посадці вал – ротор ;
- максимальне відхилення δ_r зовнішнього радіуса ротора в межах його допуску .

Отже, величина максимального зміщення довільної точки поверхні ротора і радіально роташованої відносно неї точки внутрішньої поверхні індуктора

$$\delta_{\max} = \delta_d + \delta_n + \delta_r . \quad (1)$$

Радіальне биття доріжок підшипників 5–4 класів точності для приладів знаходиться в межах 5–10 мкм. Високу точність встановлення ротора на вал можуть забезпечити посадки з мінімальним проміжком типу Н8/н7 або Н8/н5. Максимальний проміжок у такій посадці при діаметрі вала до 30 мм становитиме приблизно 40 мкм. Якщо прийняти, що зовнішній діаметр виготовленого необробленого ротора знаходиться в межах допуску на цей розмір при проведенні операції штампування осердя, яке можна виконати за 8-м квалітетом точності, то, наприклад, для роторів АД типу ДАО–131-120 з зовнішнім діаметром 62 мм максимально можлива різниця радіусів поверхні становитиме не менше 25 мкм. Отже, максимальне зміщення поверхні ротора відносно індуктора, визначене за виразом (1) для розглянутого конкретного випадку, становить $\delta_{\max} = 70$ мкм.

Отже, якщо б при розробці конструкції індуктора пристрою закласти таке номінальне значення величини повітряного проміжку між ним та ротором δ_n , щоб відносна зміна проміжку при максимальному зміщенні $\delta_{\max}$ не перевищувала 1%, то для роторів згаданого вище типу δ_n повинно було б становити 7 мм. Зрозуміло, що таке рішення значно погіршило б як енергетичні показники пристрою, так і вартість його виготовлення за умови отримання заданого значення струму в контрольованому стрижні ротора. Для ефективного використання осердя статора як магнітопроводу індуктора (в розглянутому випадку індуктор (рис. 1) виконаний на базі статора двигуна ДАО), величина повітряного проміжку в основному не повинна перевищувати 2 мм.

Для цього індуктора розрахунок за допомогою моделі, описаної у [9], показав, що при $\delta_n \leq 2,5$ мм і максимальному зміщенні недефектного ротора у встановлених вище межах по осі OX струм в контрольованому стрижні ротора практично не змінюється. Пояснюється це симетрією магнітної системи індуктора відносно осі OY , при якій картина розподілу магнітного поля в повітряному проміжку не порушується. Збільшення магнітного опору повітряного проміжку під одним зубцем індуктора компенсується відповідним зменшенням опору повітряного проміжку під симетрично розташованим відносно осі OY зубцем, через який проходить той самий магнітний потік (рис. 1). Отже, основна похибка у разі такої конструкції індуктора виникає лише за рахунок зміщення ротора по осі OY .

Індуктор з розімкненим магнітопроводом переважно виготовляють зі статора видаленням з нього 1–2-х зубців, при цьому величина повітряного проміжку між i -м зубцем індуктора та ротором у випадку максимального зміщення ротора по осі OY визначиться з виразу

$$\delta_i = (R - r) \pm \delta_{\max} \cdot \cos \alpha_i , \quad (2)$$

де R і r – внутрішній радіус індуктора та зовнішній радіус ротора, відповідно; α_i – кут між віссю OY та серединою i -го зубця індуктора (рис. 2).

Знак $(-)$ у виразі (2) відповідає зміщенню ротора по осі OY в бік зони розриву магнітопроводу, а $(+)$ – зміщенню в протилежну сторону.

Розрахунок на основі отриманих значень δ_i для двох можливих максимальних зміщень ротора по осі OY , проведений аналогічно до згаданого вище, показав, що струм в контрольованому стрижні може змінюватись в межах 5–15 %, де більші значення відхилення відповідають меншим значенням δ_n . Отже, зміна контрольованого параметра сигналу давача при лінійному перетворенні сигналу буде такою самою і визначатиметься не наявністю дефекту в стрижні клітки, а неінформативним чинником, яким тут виступає повітряний проміжок.

У випадку індуктора з непарною кількістю зубців через зубець, розташований на осі OY навпроти зони розриву магнітопроводу, магнітний потік практично не проходить. Тому кількість вимірювальних котушок k , які встановлюються на зубцях індуктора (рис. 2), можна вибрати на одиницю меншою від кількості зубців. У протилежному випадку вона дорівнює кількості зубців z . Відповідно, вхідний шар нейронної мережі матиме таку саму кількість елементів і отримуватиме вхідний вектор сигналів u розмірності k (рис.3).

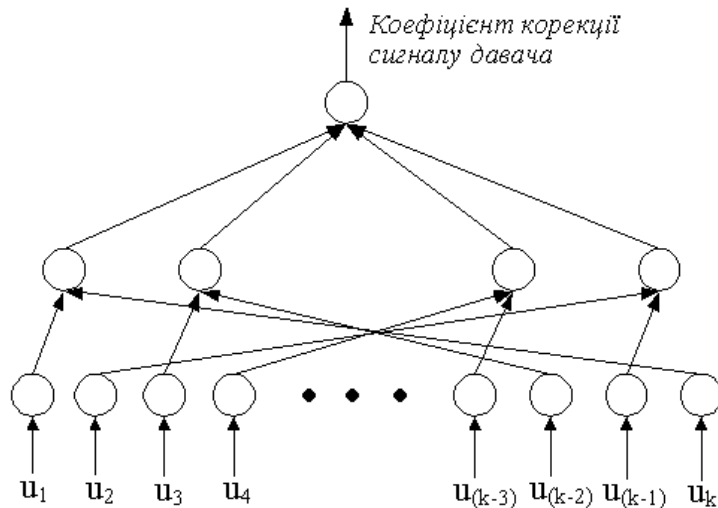


Рис. 3. Схема нейронної мережі

Враховуючи завдання, яке має вирішувати нейронна мережа, а також особливості магнітної системи індуктора, серед багатьох існуючих алгоритмів вибрано багатoshарову односторонню мережу, яка навчається методом з використанням вчителя (*supervised learning*). Істотною проблемою тут є вибір кількості прихованих шарів та кількості нейронів у кожному з них. Проведений аналіз похибок встановлення й діагностування ротора, а також розгляд декількох альтернативних варіантів показали, що хороший результат при

визначенні коефіцієнта корекції сигналу давача отримується в тришаровій мережі.

Вхідний шар із парною кількістю k нейронів сполучений з прихованим шаром, в якому є $k/2$ нейронів. У вихідному шарі є 1 нейрон, на виході якого формується значення коефіцієнта корекції сигналу давача. Структура зв'язків між нейронами вхідного і прихованого шару показана на рис. 3. Кожний з нейронів прихованого шару отримує інформацію від двох нейронів, які сполучені з вимірювальними обмотками, що розташовані на зубцях симетрично відносно осі OY магнітопроводу індуктора. Логіка такої структури пояснюється тим, що через симетрично розташовані зубці проходять практично однакові магнітні потоки, які мають свій “ваговий внесок” в індукування системи струмів у роторі та, відповідно, струму контрольованого стрижня.

Вхідні сигнали у скритому та вихідному шарах визначаються за загальноприйнятим правилом підсумовування, що враховує вагові коефіцієнти зв'язків. Функція активності вибрана сігмоїдальною біполярною $f(x) = \text{th}(\beta x)$, де параметр β визначається експериментально.

Навчання мережі, як і її тестування, достатньо легко реалізується за допомогою даних, отриманих під час випробувань зрізцевих дефектних та бездефектних роторів. Проведені попередні дослідження показали, що застосування запропонованої нейронної мережі дозволяє принаймні вдвічі зменшити похибку, зумовлену нестабільністю повітряних проміжків в системі індуктор – ротор.

Представлену роботу можна розглядати як початковий аналіз можливостей використання алгоритмів штучних нейронних мереж при розв'язанні задач діагностування дефектів роторів АД під час їх виготовлення. Напрям досліджень можна розширити за рахунок врахування похибки розташування ротора відносно давача контрольованого сигналу та збільшення вихідної інформації мережі стосовно досліджуваного ротора. Наприклад, можна реалізувати алгоритм визначення відповідності діаметра ротора заданим граничним значенням.

Висновки. Застосування індукційних давачів, встановлених на елементах магнітної системи електромагнітного пристрою для діагностування кліток роторів АД, та штучної нейронної мережі багатоваріаційного типу дозволяє ефективно розв'язувати задачу зменшення похибки діагностування, зумовленої нестабільністю повітряних проміжків між індуктором і ротором. До суттєвих переваг такого методу вирішення проблеми можна зарахувати можливість легкої адаптації давачів та нейронної мережі до різних конструкцій магнітних систем індукторів, які переважно характеризуються симетрією. Крім цього, така система корекції володіє здатністю до перенастроювання, яке необхідно здійснювати, наприклад, з метою врахування спрацювання поверхні вала під час роботи пристрою, збільшення радіального биття підшипників тощо.

1. Таран В.П. *Диагностирование электрооборудования*. – К., 1983. – 200 с.
2. Kratochwil Z. *Wykrywanie uszkodzeń uzwojeń klatkowych silników indukcyjnych* // *Wiadomości elektrotechniczne*. – 1985. – № 15–16. – S. 355–359.
3. Gąsiorowski T. *Metody diagnozowania klatek wirników* // *Międzynarodowe XI Sympozjum “Mikromaszyny i serwonapędy”*. – T. II. – Malbork, 1998. – S. 274–281.
4. J. Czuczman, J. Chlipalski *Metody diagnozowania uzwojenia klatkowego wirników silników indukcyjnych* // *Materiały konferencyjne BOBRME. Maszyny elektryczne. Zeszyty problemowe № 64/2002*. – Katowice (Polska), 2002. – S. 121–126.
5. Matras A., Nykliński A., Rad M., Rams W. *Kontrola klatek wirników silników indukcyjnych z wykorzystaniem czujników magnetorezystancyjnych* // *Materiały konferencyjne BOBRME. Maszyny elektryczne. Zeszyty problemowe № 64/2002*. – Katowice (Polska), 2002. – S. 117–120.
6. Osowski S. *Sieci neuronowe do przetwarzania informacji*. – Warszawa, 2000. – 327 s.
7. *Diagnostyka procesów. Modele. Metody sztucznej inteligencji. Zastosowania* / Pod red. J. Korbicza, J.M. Kościelnego, Z. Kowalczyka, W. Cholewy – W., 2002. – 828 s.
8. Kowalski C.T. *Zastosowanie sztucznych sieci neuronowych do wykrywania uszkodzeń w silnikach indukcyjnych klatkowych* // *Materiały konferencyjne BOBRME. Maszyny elektryczne. Zeszyty problemowe № 64/2002*. – Katowice (Polska), 2002. – S. 201–208.
9. Хліпальський Ю.З. *Діагностування дефектів кліток роторів асинхронних двигунів з закритими пазами: Автореф. дис... канд. техн. наук: 05.09.01 / Національн. унів-т “Львівська політехніка”*. – Львів, 2000. – 19 с.