

ням сенсорів зображення дають можливість вимірювати одночасно декілька параметрів обертального руху, то це дає право називати такі сенсори багатопараметричними.

Запропонована узагальнена схема вимірювання параметрів обертального руху. На її основі представлений пристрій для вимірювання биття об'єктів обертання і структура оптико-електронного вимірювального перетворювача кутових параметрів. Для представлених пристроїв виведені рівняння перетворення контрольованої величини в зміщення світлової плями на сенсорі зображення.

Застосування представленого підходу дозволяє розширити область застосування та діапазон вимірювань, підвищити точність вимірювань, спростити процедуру зняття вимірювальної інформації.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Kuharchuk V., Bilynska M. Application of the CCD Camera to Measure the Parameters of Shaft Rotation // Оптикоелектронні інформаційні технології «Фотоніка-ОДС 2002». 36. тез доповідей 2-ї МНТК, м. Вінниця, 23-25 квітня 2002. — Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця. — 2002. — С. 90.
2. Don Thomas Fast Cameras meet the Need For Speed // Photonics Spectra, Vol. 34, Issue 2, February 2000. — P. 137 – 141.
3. Steven W. Meek Optical surface analyzer inspects transparent wafers // Laser Focus World, Vol. 39, No. 7, July 2003. — P. 105–108.
4. А.с. № 1635010 А1 (СССР) Способ измерения малых линейных и угловых перемещений / Е. В. Андреева, В. В. Смирнов. 1991, Бюл. № 10.
5. Кухарчук В. В., Білінська М. Й. Пристрій для вимірювання биття обертючих частин електричних машин // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Наукові праці КДПУ. — Кременчуг: КДПУ, 2002. — Вип. 1(12) — С. 315–317.
6. Пат. № 56722А, Україна, МКИ G 01 P 3/36. Пристрій для вимірювання кутової швидкості та кутового прискорення / Й. Й. Білінський, В. В. Кухарчук, М. Й. Білінська. 2003, Бюл. № 5.

Кухарчук Василь Васильович — завідувач кафедри; **Білінська Марина Йосипівна** — аспірантка.

Кафедра теоретичної електротехніки та промислової електроніки, Вінницький національний технічний університет

УДК 531.77

В. О. Поджаренко, д. т. н., проф.; В. Ю. Кучерук, к. т. н., доц.;
О. П. Войтович, асп.; А. В. Поджаренко, асп.

ОЦІНКА МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СЕНСОРІВ КУТОВОЇ ШВИДКОСТІ З АНАЛОГОВИМ ВИХІДНИМ СИГНАЛОМ

1. Постановка проблеми

Вимірювання кутової швидкості є досить важливим для визначення характеристик електромоторів. Зокрема, залежність кутової швидкості в часі є вихідною для опосередкованих вимірювань кутового прискорення, моменту інерції ротора, динамічного моменту. Тому актуальною є проблема вибору необхідного засобу вимірювань для вирішення конкретної вимірювальної задачі.

Вимірювання кутової швидкості в сучасній техніці здійснюється за допомогою сенсорів, оснований на тахометричних перетворювачах з нормованими метрологічними характеристиками. Застосування сенсорів, що здатні змінювати свої характеристики, в залежності від об'єкту вимірювання є необхідною умовою розвитку інтелектуальних засобів вимірювань. Тому таке важливе отримання сенсорів кутової швидкості з нормованими

метрологічними характеристиками, зокрема з нормованою похибкою вимірювання, що дозволяє значно розширити діапазон вимірювання.

Виходячи з режимів роботи засобів вимірювань, розрізняють їх статичні і динамічні метрологічні характеристики. До основних статичних метрологічних характеристик відносять такі: функція перетворення; статична характеристика; чутливість; адитивна та мультиплікативна похибки; похибка нелінійності.

Цих характеристик достатньо, щоб здійснити нормування точності засобів вимірювань в статичному режимі роботи.

2. Аналіз останніх досліджень

Визначення статичних та динамічних метрологічних характеристик вимірювальних каналів часто вимагає застосування різноманітного математичного апарату. Це значно ускладнює отримання необхідних характеристик для конкретного сенсору.

В [1] розглянуто загальний підхід до отримання статичних метрологічних характеристик на основі розкладу функції в ряд Тейлора, що дозволяє значно спростити методику отримання нормованих метрологічних характеристик. Зокрема, цей підхід дозволяє отримати всі необхідні статичні характеристики на основі одного математичного апарату.

3. Цілі дослідження

Метою даної роботи є визначення статичних (номінальна функція перетворення, абсолютна та відносна похибка нелінійності, абсолютна мультиплікативна похибка по вхідних величинах, абсолютна адитивна похибка по вхідних величинах) метрологічних характеристик сенсору кутової швидкості з нормованою похибкою вимірювання.

4. Характеристика сенсору кутової швидкості

Було розроблено сенсор кутової швидкості [2, 3], оснований на фотоелектричних тахометричних перетворювачах з вихідним аналоговим сигналом, на виході якого отримується пилкоподібна вихідна напруга, що змінюється за формулою

$$\omega_r(t) = \frac{d\psi}{dt} = \frac{k dU}{dt}, \quad (1)$$

де ω_r – кутова швидкість обертання; t – час; k – коефіцієнт пропорційності; U – вихідна напруга тахометричного перетворювача.

Особливістю цього сенсору є можливість вимірювання кутової швидкості в широкому діапазоні, з нормованою похибкою. Це досягається шляхом використання матриці аналогових компараторів з змінною в залежності від похибки вимірювання кількістю інформаційних виходів.

Формула перетворення цього сенсору можна представити у вигляді

$$\omega_r = \frac{d\psi}{dt} = \frac{\varphi_0}{t_x} = \frac{\pi f_0}{Nz}, \quad (2)$$

де φ_0 – кут повороту модулятора, який відповідає мінімальній напрузі спрацювання матриці аналогових компараторів; t_x – час, за який здійснюється цей поворот; z – кількість входів аналогового компаратора, з яких зчитується інформація, f_0 – зразкова частота, N – кількість імпульсів.

Похибка сенсору кутової швидкості обчислюється за формулою

$$\delta = \frac{1}{2} t_x \cdot 100\% = \frac{1}{2} \frac{\pi}{z \cdot \omega_r} \cdot 100\%, \quad (3)$$

отже, регулювати похибку можна за допомогою зміни часу t_x . Цього можна досягти змінюючи кількість інформативних входів мікропроцесора z , тобто зчитування інформації проводиться лише з тих входів мікропроцесора, які задаються програмно.

Похибка вимірювання кутової швидкості порівнюється з заданою, якщо похибка менше заданої, то кількість інформаційних входів z зменшується, якщо – більше, то кіль-

кість входів z , з яких зчитується інформація, збільшується.

При цьому необхідно враховувати, що зчитування повинно відбуватись з рівновіддалених один від одного входів, для того, щоб кут φ_0 залишався однаковим на всіх інтервалах. Тому кількість можливих інформаційних входів z задається програмно, виходячи з апаратної кількості входів матриці аналогових компараторів. Так, наприклад, з загальною кількістю входів 24, можлива кількість інформаційних входів може бути $z = [24, 12, 8, 6, 4, 3, 2, 1]$.

Як видно з рис. 1, зі зменшення похибки вимірювання, зменшується кількість інформаційних виходів z , і з збільшення похибки вимірювання, збільшується z . В статичному режимі, коли похибка набагато менша за задану, z дорівнює 1, коли похибка збільшується до значення заданої, z дорівнює максимальному значенню 24.

Проаналізувавши рис. 1, можна зробити висновок, що чим менша похибка вимірювання, тим вища нижня межа вимірювання, і тим менша верхня межа вимірювання. Чим більша кількість інформаційних входів z , тим менше нижня межа вимірювання кутової швидкості, і тим більша верхня межа вимірювання.

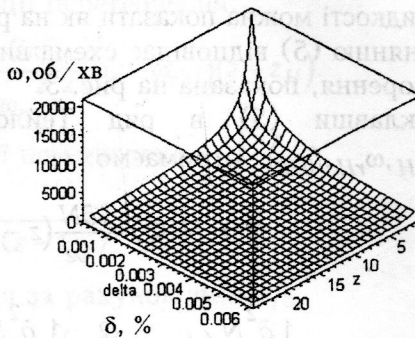


Рис. 1. Залежність меж вимірювання від похибки δ та z

5. Статичні метрологічні характеристики

На результат вимірювань діють, крім безпосередньо, інформативного параметра $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ також величини $f = f(f_1, f_2, \dots, f_m)$, які викликають появу неінформативних складових (додаткових похибок) вимірювального перетворення. Тому в загальному випадку функція перетворення опосередкованого вимірювання матиме вигляд

$$y = f(x, f) = f(x_1, x_2, \dots, x_n, f_1, f_2, \dots, f_m) = f(v_1, v_2, \dots, v_{n+m}) = f(v). \quad (4)$$

Розглянемо статичні метрологічні характеристики вимірювального каналу кутової швидкості. Рівняння перетворення (2) із використанням описаного вище сенсора кутової швидкості з врахуванням вимірювання часового інтервалу засобами мікропроцесора прийме вигляд

$$N = \frac{2\pi f_0}{z\omega_r}, \quad (5)$$

де N – кількість імпульсів; f_0 – частота квантування мікропроцесора.

Статична характеристика показана на рис. 2а. На рис. 2б показана зміна похибки в залежності від кутової швидкості, а також зміна z . Проаналізувавши отримані графіки, можна зробити висновок, що зміна похибки відбувається в межах від заданої максимальної похибки до заданої мінімальної похибки, крім ділянок при $\omega_k < 200$ об/хв.

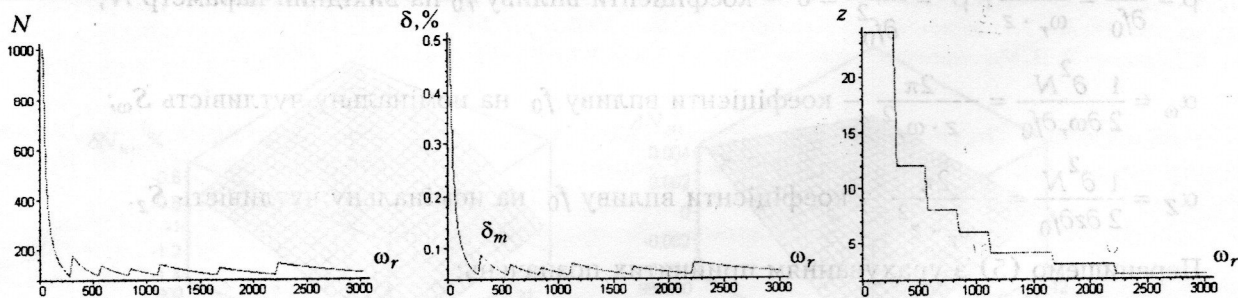


Рис. 2. а) Статична характеристика; б) зміна похибки; в) зміна z .

Як математичний апарат дослідження статичних метрологічних характеристик вимірювального перетворення кутової швидкості використовуємо розклад функції перетворення в ряд Тейлора [1].

В робочих умовах вимірювальний канал моменту здійснює функційне перетворення інформативного параметра ω у бінарний код N в залежності від z . Крім інформативного сигналу, на такий засіб вимірювання діють такі впливні величини $\bar{f} = (f_0)$, які мають зв'язок з вихідною величиною N і спричиняють виникнення неінформативних складових перетворення. В цьому випадку вимірювальний перетворювач кутової швидкості можна показати як на рис. 3.

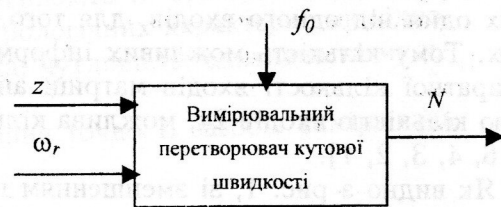


Рис. 3. Узагальнена структурна схема вимірювального каналу кутової швидкості

Рівнянню (5) відповідає схема вимірювального перетворення, показана на рис. 3.

Розклавши (5) в ряд Тейлора в точці $\Phi = (z_H, \omega_{rH}, f_{0H})$, отримаємо:

$$N = N(\Phi) + \frac{\partial N}{\partial z}(z - z_H) + \frac{\partial N}{\partial \omega_r}(\omega_r - \omega_{rH}) + \frac{\partial N}{\partial f_0}(f_0 - f_{0H}) + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 N}{\partial z^2}(z - z_H)^2 + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 N}{\partial z \partial f_0}(z - z_H)(f_0 - f_{0H}) + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 N}{\partial \omega_r^2}(\omega_r - \omega_{rH})^2 + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 N}{\partial \omega_r \partial f_0}(\omega_r - \omega_{rH})(f_0 - f_{0H}) + \frac{\partial^2 N}{\partial f_0^2}(f_0 - f_{0H})^2 + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 N}{\partial z \partial \omega_r}(z - z_H)(\omega_r - \omega_{rH}).$$

Прийmemo такі позначення:

$$S_{\omega_r} = \frac{\partial N}{\partial \omega_r} = -\frac{2\pi f_0}{z \omega_r^2} \text{ - номінальний коефіцієнт перетворення (чутливість } N \text{ по } \omega_r);$$

$$S_z = \frac{\partial N}{\partial z} = -\frac{2\pi f_0}{\omega_r z^2} \text{ - номінальний коефіцієнт перетворення або чутливість } N \text{ по } z;$$

$$S_{\omega_r}^1 = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 N}{\partial \omega_r^2} = \frac{2\pi f_0}{z \omega_r^3} \text{ - зміна чутливості } S_{\omega} \text{ по діапазону перетворення};$$

$$S_z^1 = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 N}{\partial z^2} = \frac{2\pi f_0}{\omega_r z^3} \text{ - зміна чутливості } S_z \text{ по діапазону перетворення};$$

$$\gamma = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 N}{\partial z \partial \omega_r} = -\frac{2\pi f_0}{\omega_r z^2} \text{ - коефіцієнт спільного впливу параметрів } \omega_r \text{ і } z \text{ на швидкість зміни } N;$$

$$\beta = \frac{\partial N}{\partial f_0} = \frac{2\pi}{\omega_r \cdot z}; \quad \beta^1 = \frac{\partial^2 N}{\partial f_0^2} = 0 \text{ - коефіцієнти впливу } f_0 \text{ на вихідний параметр } N;$$

$$\alpha_{\omega} = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 N}{\partial \omega_r \partial f_0} = -\frac{2\pi}{z \cdot \omega_r^2} \text{ - коефіцієнти впливу } f_0 \text{ на номінальну чутливість } S_{\omega};$$

$$\alpha_z = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 N}{\partial z \partial f_0} = -\frac{2\pi}{\omega_r \cdot z^2} \text{ - коефіцієнти впливу } f_0 \text{ на номінальну чутливість } S_z.$$

Перепишемо (5) з урахуванням прийнятих позначень:

$$N = N(\Phi) + S_z(z - z_H) + S_{\omega}(\omega_r - \omega_{rH}) + \beta(f_0 - f_{0H}) + S_z^1(z - z_H)^2 + \alpha_z(z - z_H)(f_0 - f_{0H}) + S_{\omega}^1(\omega_r - \omega_{rH})^2 + \alpha_{\omega}(\omega_r - \omega_{rH})(f_0 - f_{0H}) + \beta^1(f_0 - f_{0H})^2 + \gamma(z - z_H)(\omega_r - \omega_{rH}) + \dots \quad (6)$$

Таким чином, номінальна функція перетворення:

$$N = N(\Phi) - \frac{2\pi f_0}{\omega_r z} (z - z_H) - \frac{2\pi f_0}{z \omega_r} (\omega_r - \omega_{rH}) + \frac{2\pi f_0}{\omega_r z} (z - z_H)^2 + \frac{2\pi f_0}{z \omega_r} (\omega_r - \omega_{rH})^2 + \frac{2\pi f_0}{z \omega_r} (z - z_H)(\omega_r - \omega_{rH}). \quad (7)$$

Абсолютна похибка нелінійності номінальної функції перетворення:

$$\Delta N_H = \frac{2\pi f_0}{z \omega_r} (z - z_H)^2 + \frac{2\pi f_0}{\omega_r z} (\omega_r - \omega_{rH})^2 + \frac{2\pi f_0}{z \omega_r} (z - z_H)(\omega_r - \omega_{rH}). \quad (8)$$

Відносна похибка нелінійності номінальної функції перетворення:

$$\delta N_H = \frac{\Delta N_{rH}}{S_\omega (\omega_r - \omega_{rH}) + S_z (z - z_H)}. \quad (9)$$

Абсолютна мультиплікативна похибка перетворення за рахунок зміни f_0

$$\Delta N_M = \alpha_z (f_0 - f_{0H})(z - z_H) + \alpha_\omega (f_0 - f_{0H})(\omega_r - \omega_{rH}) = - \left(\frac{2\pi \cdot f_0}{\omega_r z} (f_0 - f_{0H})(z - z_H) + \frac{2\pi \cdot f_0}{\omega_r z} (f_0 - f_{0H})(\omega_r - \omega_{rH}) \right). \quad (10)$$

Абсолютна адитивна похибка перетворення за рахунок зміни f_0

$$\Delta N_A = \beta (f_0 - f_{0H}) = - \frac{2\pi}{\omega_r z} (f_0 - f_{0H}). \quad (11)$$

Результати моделювання отримані за допомогою середовища Maple [4] наведені на рис. 4 – 10.

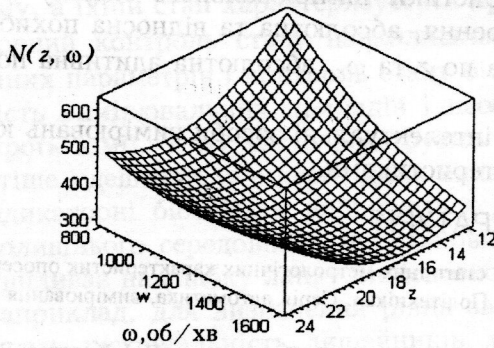


Рис. 4. Номінальна функція перетворення $N(z, \omega)$

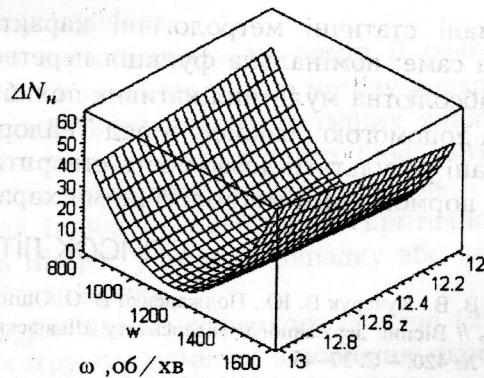


Рис. 5. Абсолютна похибка нелінійності $\Delta N_H(z, \omega)$

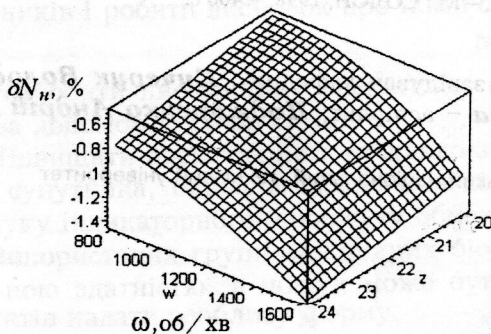


Рис. 6. Відносна похибка нелінійності $\delta N_H(z, \omega)$, %

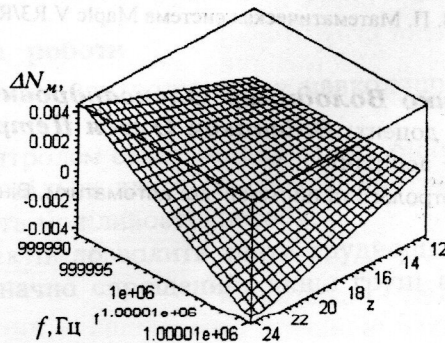


Рис. 7. Абсолютна мультиплікативна похибка по z $\Delta N_M(z, f)$

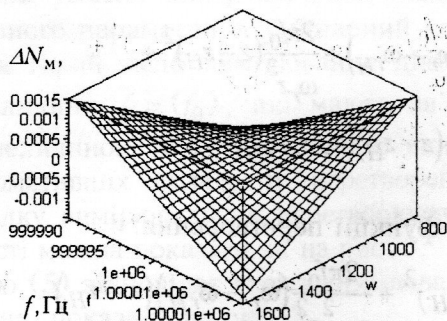


Рис. 8. Абсолютна мультиплікативна похибка по ω_r , $\Delta N_M(f, \omega_r)$

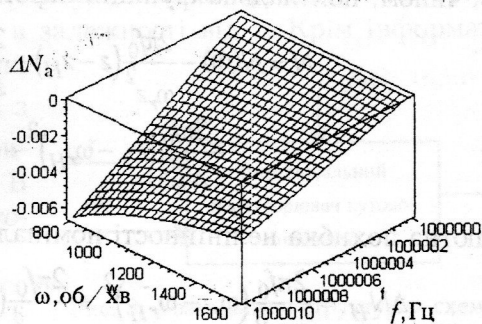


Рис. 9. Абсолютна адитивна похибка по ω_r , $\Delta N_a(f, \omega_r)$

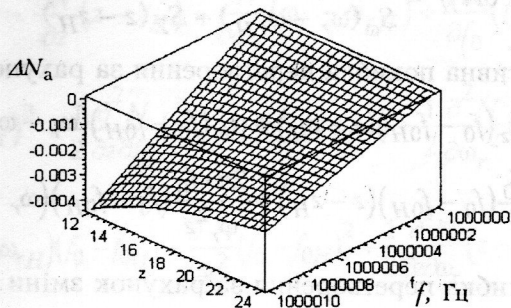


Рис. 10. Абсолютна адитивна похибка по z , $\Delta N_a(f, z)$

6. Висновки

1. Отримані статичні метрологічні характеристики вимірювального каналу кутової швидкості, а саме: номінальна функція перетворення, абсолютна та відносна похибка нелінійності, абсолютна мультиплікативна похибка по z та ω_r , абсолютна адитивна похибка по z та ω_r , за допомогою розкладу в ряд Тейлора.

2. Отримані результати дозволяють створити інтелектуальні засоби вимірювань кутової швидкості з нормованими метрологічними характеристиками.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Кухарчук В. В., Кучерук В. Ю., Поджаренко В. О. Оцінка статичних метрологічних характеристик опосередкованих вимірювань // Вісник державного університету «Львівська Політехніка». Серія автоматика, вимірювання та керування. – 2001. – № 420. – С. 37–45.
2. Пат. № 57333А, Україна МКИ G 01 P 3/44. Сенсор кутової швидкості / В. О. Поджаренко, П. І. Кулаков, В. Ю. Кучерук, О. П. Войнович. Бюл. № 6, 2003.
3. Поджаренко В. О., Кучерук В. Ю., Войнович О. П., Поджаренко А. В. Дослідження характеристик сенсора кутової швидкості // Вісник Технологічного університету Поділля. – 2003. – Т.2, № 3. – С. 129–133.
4. Дьяконов В. П. Математическая система Maple V R3/R4/R5. – М.: СОЛОН, 1998. – 400 с.

Поджаренко Володимир Олександрович – завідувач кафедри; **Кучерук Володимир Юрійович** – доцент; **Войтович Олеся Петрівна** – аспірант; **Поджаренко Андрій Володимирович** – аспірант.

Кафедра метрології та промислової автоматики, Вінницький національний технічний університет

1. Кухарчук В.В., Кучерук В.Ю., Поджаренко В.О. Оцінка статичних метрологічних характеристик опосередкованих вимірювань // Вісник державного університету "Львівська політехніка". Серія автоматика, вимірювання та керування. - 2001. - №420. - с. 37-45.
2. Пат. №57333А, Україна МКИ G 01 P 3/44. Сенсор кутової швидкості / В.О. Поджаренко, П.І. Кулаков, В.Ю. Кучерук, О.П. Войтович. Бюл. №6, 2003.
3. Поджаренко В.О., Кучерук В.Ю., Войтович О.П., Поджаренко А.В. Дослідження характеристик сенсора кутової швидкості // Вісник Технологічного університету Поділля. - 2003. - Т. 2, №3, с. 129-133.
4. Дьяконов В.П. Математическая система Maple V R3/R4/R5. - М.: СОЛОН, 1998. - 400 с.