

УДК 621.3: 521.38

DOI: <http://dx.doi.org/10.20535/0203-377131201683588>Ю. М. Туз¹, доктор технічних наук, О. В. Козир², асистент

АВТОМАТИЗАЦІЯ АНАЛІЗУ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ

En

The design of measuring devices is based on the previous experience and supposes development of structural, functional and schematic diagrams. Transfer and error equations are used to describe them. The instrumentation unlike other technical devices have normalized metrological features established in the international, state and industry standards. The most important features are transfer function and measurement error.

Since the measurement devices general design and optimization methodology are not sufficiently developed, the conformance evaluation of the designed device is done by analyzing the number of options, modifications and re-analysis to obtain the optimal solution. Therefore, the automation of the analysis process becomes particularly relevant.

The most promising features have matrix equations through the possibility of encoding variables on their location and further displacement according to the designed algorithms. Based on determinant properties the established error equations in a matrix form have a possibility of an accurate representation of the total error regardless of the size of the component errors of the structural scheme. Also in matrix form the equations with complex coefficients are presented.

Ru

В статье рассмотрены модели измерительных устройств как объектов проектирования и их нормированные метрологические характеристики. Изложен матричный аппарат анализа измерительных устройств, погрешностей преобразования. Приведены примеры использования определителей в автоматизированном аналитическом анализе электрических цепей.

Вступ

Вимірювальні пристрої, на відміну від інших технічних пристроїв, відрізняються нормованими метрологічними характеристиками, закріпленими міжнародними, державними та галузевими стандартами. Найважливішими характеристиками є функції перетворення вимірюваних величин в їх значення та похибки вимірювання. Процес проектування вимірювальних пристроїв передбачає створення на основі попереднього досвіду структурних, функціональних та принципових схем. Для їх опису створюють рівняння перетворення та рівняння похибок. Оскільки методика загального синтезу вимірювальних пристроїв і їх оптимізація не достатньо розвинута,

¹ Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут", кафедра автоматизації експериментальних досліджень

² Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут", кафедра автоматизації експериментальних досліджень

то оцінка відповідності спроектованого пристрою проводиться шляхом аналізу ряду варіантів, внесення змін і повторного аналізу до отримання найбільш оптимального рішення. Тому автоматизація процесу аналізу стає особливо актуальною.

Найбільш перспективними з точки зору автоматизації аналізу видаються матричні рівняння через можливість кодування змінних за місцем їх знаходження і подальших переміщень відповідно до створених алгоритмів. Як відомо, матричні рівняння є апаратом, придатним для систем лінійних рівнянь. Для застосування їх для роботи з нелінійними блоками, розривними в часі структурними схемами врахований той факт, що в просторі інформаційних змінних рівняння з нелінійними членами можуть бути представлені шляхом заміни змінних у вигляді системи лінійних рівнянь і розв'язані через визначники у вигляді аналітичних залежностей. Виходячи з властивостей визначників, створені рівняння похибок в матричній формі з можливістю точного представлення сумарної похибки незалежно від розміру похибок складових структурної схеми.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Для точного аналізу вимірювального кола необхідно враховувати характер перетворювальних елементів. Методи аналізу вимірювальних кіл з двонаправленими елементами розроблені в [1]. Наразі опубліковано ряд монографій, навчальних посібників, підручників, присвячених аналізу електронних схем, інформаційних пристроїв, пристроїв автоматики [1], [2]. Для підвищення точності вимірювальних пристроїв, інформаційно-вимірювальних систем та систем автоматичного регулювання широко застосовуються структурні методи підвищення точності, які характеризуються тим, що завдяки часовій чи просторовій надлишковості зменшується питома вага похибок найбільш нестабільних блоків. У книзі [3] подано узагальнений аналіз структурних методів, перш за все, методів корекції похибок, наведені основні алгоритми корекції при часовому і просторовому розділі каналів, умови збіжності ітераційних алгоритмів, досліджено ефективність корекції випадкових похибок, описані та проаналізовані похибки різних вимірювальних пристроїв з корекцією похибки. В монографії [4] на конкретних прикладах викладено найбільш придатні методи аналізу для автоматизованого проектування вимірювальних пристроїв, приділено особливу увагу методам аналізу похибок, як найважливішій підмоделі вимірювального пристрою.

Відомо, що нелінійні диференціальні рівняння або системи з такими рівняннями, як правило, не мають аналітичних методів розв'язання. Тому застосовують чисельні методи, широкі можливості використання яких, забезпечують системи комп'ютерної математики *Mathcad*, *MATLAB* [5], [6].

На сьогодні пропонується декілька програмних пакетів моделювання

електричних схем з широкою базою компонентів [7], [8]. Як правило, результатом моделювання є масиви даних або графічні залежності. В той же час аналітичні моделі є більш змістовними для подальшого аналізу, оптимізації та оцінки отриманих результатів.

Постановка задачі

Ознайомити фахівців з проектування та розробки вимірювальних пристроїв і систем з можливостями аналізу та детермінованих випадкових похибок в автоматичному режимі отримання аналітичних і числових залежностей. Навести приклади аналізу, що характерні для вимірювальної техніки вузлів з лінійними і нелінійними блоками.

Статична характеристика вимірювальних пристроїв

У теорії автоматичного регулювання аналогом вимірювального кола є структурна схема, функціональна схема, блок-схема. В усі ці поняття загалом вкладається один і той же самий зміст, а саме – це сукупність перетворювальних елементів і джерел сигналів із зазначенням функціональних зв'язків між ними.

Універсальною моделлю перетворювального елемента є чотиріполюсник, в якому дві вхідні і дві вихідні змінні зв'язуються через параметри чотиріполюсника. Число змінних може бути скорочено, якщо користуватися різними співвідношеннями між ними. У вимірювальній техніці, автоматичній, радіотехніці найчастіше використовується відношення вихідної змінної до вхідних, що отримало назву (згідно ДСТУ 2681-94) коефіцієнта перетворення вимірювального перетворювача, рівного відношенню сигналу на виході вимірювального перетворювача, що відображає вимірювану величину, до відповідного сигналу на вході перетворювача.

Вимірювальне коло можна представити у вигляді сукупності перетворювальних елементів, в яких відбувається одна з елементарних операцій:

- пропорційної зміни;
- підсумовування;
- перемноження;
- функціонального нелінійного перетворення.

Найбільш типові структурні схеми вимірювальних пристроїв це: послідовне включення односпрямованих і двонаправлених елементів; послідовне включення елементів, що мають адитивну похибку; схеми з від'ємним зворотним зв'язком; схеми, які діють за принципом інваріантності на основі корекції похибок, що містять нелінійні елементи, які передбачають часове розділення каналів.

На рис. 1 представлено схему вольтметра ефективних значень з адитивною корекцією похибок і часовим поділом каналів. З урахуванням ча-

сового розділення каналів один і той же самий канал, що перетворює сигнал в різний час, в загальному випадку має різні коефіцієнти перетворення, тому такі канали позначаються різними індексами. Ця різниця зумовлена не тільки зміною каналів від такту до такту, а й нерівністю вхідних і вихідних імпедансів комутованих каналів.

Детермінована модель похибок вимірювальних пристроїв

Існує кілька методик отримання детермінованих моделей похибок вимірювальних пристроїв. Найбільш поширені моделі чутливості, які є частковими похідними статичної та динамічної характеристик пристрою за відповідними змінними.

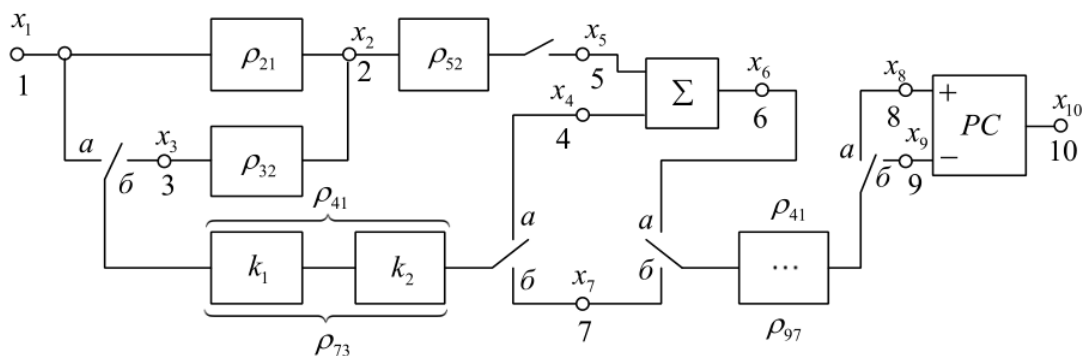


Рис. 1. Структурна схема вольтметра ефективних значень з адитивною корекцією похибок і часовим поділом каналів

Схема (рис. 1.) описується десятьма змінними. Матричне рівняння схеми наведено в табл. 1.

Таблиця 1.

Матричне рівняння схеми (рис. 1)

ij	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
1	1										x_1	x_1
2	$-\rho_{21}$	1									x_2	0
3		$-\rho_{52}$	1								x_3	0
4	$-\rho_{41}$			1							x_4	0
5		$-\rho_{52}$			1						x_5	0
6				-1	-1	1					x_6	0
7			$-\rho_{73}$				1				x_7	0
8						$-\rho_{86}$		1			x_8	0
9							$-\rho_{97}$		1		x_9	0
10								$-\rho_{10,8}$	$-\rho_{10,9}$	1	x_{10}	0

У більшості випадків використовують тільки перші похідні. Однак при цьому не тільки неточно обчислюється похибка, але виникає небезпека отримання принципово невірної висновку про функціонування пристрою.

В [1] розроблено алгебраїчний метод знаходження прирощення функції по прирощенням аргументів. Сутність цього методу полягає в тому, що будь-який як завгодно складний вираз може бути представлено каскадом елементарних функцій. Для всіх елементарних функцій знайдені вирази для повних прирощень за будь-яких прирощень аргументів. Застосовуючи послідовно ці вирази, шляхом тільки алгебраїчних перетворень можна знайти прирощення для будь якої функції, незважаючи на її складність.

В даній статті наведено методику отримання детермінованої моделі похибки, коли модель характеристики пристрою задано в матричній формі. Шукані характеристики є відношенням визначників.

Відносне прирощення відношення $z = \frac{x}{y}$ дорівнює:

$$\delta_z = \frac{\delta_x - \delta_y}{1 + \delta_y},$$

де δ_x, δ_y – відносні прирощення чисельника і знаменника. Скористаємося теоремою, відповідно до якої визначник, в якому елементи деякого стовпця являють собою суму двох величин, дорівнює сумі двох визначників того ж порядку, де відповідний стовпець першого визначника складається з перших доданків стовпця, що розглядається, а відповідний стовпець другого визначника складається з других доданків того самого стовпця. Рис. 2. ілюструє викладене на визначнику 3-го порядку.

Стохастична модель похибок засобів вимірювання

Матрична форма моделей засобів вимірювань і матрична форма детермінованого рівняння похибки дозволяють в машинопридатній формі перейти до імовірнісної моделі похибки і оцінити випадкові похибки.

Для визначення всіх нормованих характеристик випадкової похибки, відповідно до ДСТУ ГОСТ 8.009:2008, досить мати в розпорядженні такі числові показники як математичне сподівання, середньоквадратичне відхилення і закон розподілу густини імовірності, а для характеристики випадкових процесів – автокореляційну функцію і/або спектральну густину складових структурної схеми, після чого отримати відповідні показники для повної структурної схеми.

В пристроях з корекцією похибок при часовому розділенні каналів випадкова складова похибки визначається різницею інтегральних вибірок одного і того ж випадкового процесу в різні початкові моменти часу [3].

$$\begin{aligned}
& \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \bar{a}_{11} + \Delta_{11} & \bar{a}_{12} + \Delta_{12} & \bar{a}_{13} + \Delta_{13} \\ \bar{a}_{21} + \Delta_{21} & \bar{a}_{22} + \Delta_{22} & \bar{a}_{23} + \Delta_{23} \\ \bar{a}_{31} + \Delta_{31} & \bar{a}_{32} + \Delta_{32} & \bar{a}_{33} + \Delta_{33} \end{vmatrix} = \\
& = \begin{vmatrix} \bar{a}_{11} & a_{12} & a_{13} \\ \bar{a}_{21} & a_{22} & a_{23} \\ \bar{a}_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \Delta_{11} & a_{12} & a_{13} \\ \Delta_{21} & a_{22} & a_{23} \\ \Delta_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} = \\
& = \begin{vmatrix} \bar{a}_{11} & \bar{a}_{12} & a_{13} \\ \bar{a}_{21} & \bar{a}_{22} & a_{23} \\ \bar{a}_{31} & \bar{a}_{32} & a_{33} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \bar{a}_{11} & \Delta_{12} & a_{13} \\ \bar{a}_{21} & \Delta_{22} & a_{23} \\ \bar{a}_{31} & \Delta_{32} & a_{33} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \Delta_{11} & \bar{a}_{12} & a_{13} \\ \Delta_{21} & \bar{a}_{22} & a_{23} \\ \Delta_{31} & \bar{a}_{32} & a_{33} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \Delta_{11} & \Delta_{12} & a_{13} \\ \Delta_{21} & \Delta_{22} & a_{23} \\ \Delta_{31} & \Delta_{32} & a_{33} \end{vmatrix} = \\
& = \begin{vmatrix} \bar{a}_{11} & \bar{a}_{12} & \bar{a}_{13} \\ \bar{a}_{21} & \bar{a}_{22} & \bar{a}_{23} \\ \bar{a}_{31} & \bar{a}_{32} & \bar{a}_{33} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \bar{a}_{11} & \bar{a}_{12} & \Delta_{13} \\ \bar{a}_{21} & \bar{a}_{22} & \Delta_{23} \\ \bar{a}_{31} & \bar{a}_{32} & \Delta_{33} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \bar{a}_{11} & \Delta_{12} & \bar{a}_{13} \\ \bar{a}_{21} & \Delta_{22} & \bar{a}_{23} \\ \bar{a}_{31} & \Delta_{32} & \bar{a}_{33} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \bar{a}_{11} & \Delta_{12} & \Delta_{13} \\ \bar{a}_{21} & \Delta_{22} & \Delta_{23} \\ \bar{a}_{31} & \Delta_{32} & \Delta_{33} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \Delta_{11} & \bar{a}_{12} & \bar{a}_{13} \\ \Delta_{21} & \bar{a}_{22} & \bar{a}_{23} \\ \Delta_{31} & \bar{a}_{32} & \bar{a}_{33} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \Delta_{11} & \bar{a}_{12} & \Delta_{13} \\ \Delta_{21} & \bar{a}_{22} & \Delta_{23} \\ \Delta_{31} & \bar{a}_{32} & \Delta_{33} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \Delta_{11} & \Delta_{12} & \bar{a}_{13} \\ \Delta_{21} & \Delta_{22} & \bar{a}_{23} \\ \Delta_{31} & \Delta_{32} & \bar{a}_{33} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \Delta_{11} & \Delta_{12} & \Delta_{13} \\ \Delta_{21} & \Delta_{22} & \Delta_{23} \\ \Delta_{31} & \Delta_{32} & \Delta_{33} \end{vmatrix} \\
& \quad D_3^0 \quad D_3^1 \quad D_3^1 \quad D_3^2 \quad D_3^1 \quad D_3^2 \quad D_3^2 \quad D_3^3
\end{aligned}$$

Рис. 2. Послідовність тотожних перетворень визначника, елементи якого мають прирощення

При великому числі доданків, відповідно до граничних теорем, закон розподілу близький до нормального і повністю характеризується своїми математичним сподіванням і дисперсією.

Для стаціонарного процесу математичне сподівання і дисперсія різниці інтегральних вибірок випадкового процесу дорівнюють:

$$M\{y_i\} = 0$$

$$D\{y_i\} = \frac{2}{T_i} \int_0^{T_i} \left(1 - \frac{\tau}{T_i}\right) [2R_x(\tau) - R_x(\tau + \theta) - R_x(\tau - \theta)] d\tau$$

де T_i – час інтегрування;

$R_x(\tau)$ – автокореляційна функція;

θ – інтеграл часу між початками інтегрування двох інтегральних вибірок.

Для нестационарного процесу математичне сподівання і дисперсія дорівнюють:

$$\begin{aligned}
M\{y_i\} &= \frac{1}{T_i} \left[\int_{t_0}^{t_0+T_i} M\{x(t) + m(t)\} dt - \int_{t_0+\theta}^{t_0+\theta+T_i} M\{x(t) + m(t)\} dt \right] = \\
&= \frac{1}{T_i} \int_{t_0}^{t_0+T_i} m(t) dt - \frac{1}{T_i} \int_{t_0+\theta}^{t_0+\theta+T_i} m(t) dt,
\end{aligned}$$

$$D\{y_i\} = \frac{1}{T_i^2} \iint_{t_0}^{t_0+T_i} R(t_1, t_2) dt_1 dt_2 + \frac{1}{T_i^2} \iint_{t_0+\theta}^{t_0+\theta+T_i} R(t_1, t_2) dt_1 dt_2 - \frac{2}{T_i^2} \int_{t_0}^{t_0+T_i} \int_{t_0+\theta}^{t_0+\theta+T_i} R(t_1, t_2) dt_1 dt_2$$

Динамічні характеристики засобів вимірювань

Як зазначалося вище, згідно ДСТУ ГОСТ 8.009:2008, в якості динамічних характеристик засобів вимірювань вибирається одна з наступних повних характеристик: диференціальні рівняння, перехідна характеристика, імпульсна перехідна характеристика або амплітудно-фазочастотна характеристика. У більшості випадків нормуються часткові динамічні характеристики – час встановлення, амплітудно-частотна характеристика, фазочастотна характеристика, параметри вхідного імпедансу.

Перехідна характеристика є функцією часу і становить собою вихідний сигнал лінійної ланки при дії на вході сигналу у вигляді одиничної ступінчастої функції за нульових початкових умов.

В операторній формі:

$$y(p) = \frac{x_0}{p} W(p),$$

де $\frac{x_0}{p}$ - зображення стрибка вхідного сигналу;

$W(p)$ - функція вимірювального кола.

Передавальна функція, при нульових початкових умовах, може бути отримана в матричній формі аналогічно тому як отримані статичні характеристики засобів вимірювань, якщо коефіцієнти передачі перетворювальних елементів представити в операторній формі.

Маючи передавальну функцію, знаходимо зображення вихідного сигналу, а застосувавши зворотне перетворення, знаходимо перехідну характеристику

Висновки

Розроблена методика створення математичних рівнянь перетворення детермінованих і випадкових похибок вимірювальних пристроїв з лінійними, нелінійними і розривними каналами при будь-яких розмірах похибок в статичному і динамічному режимах.

Список використаної літератури

1. *Пампура В. И.* Прогнозирование стабильности информационных устройств. – К.: Техніка, 1978. – 248 с.
2. *Сигорский В. П.* Математический аппарат инженера. – К.: Техніка, 1975. – 768 с.
3. *Туз Ю. М.* Структурные методы повышения точности измерительных устройств. – К.: Выща шк. Головное изд., 1976. – 256 с.
4. *Туз Ю. М.* Автоматизація аналізу вимірювальних пристроїв. Монографія / Ю. М. Туз, Ю. С. Шумков, О. В. Козир. – К.: Корнійчук, 2014. – 172 с.
5. *Дьяконов В. П.* Mathcad 11/12/13 в математике. Справочник. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 958 с.
6. *Cesar P. L.* MATLAB mathematical analysis. – Apress, 2014. - 386 p.
7. Micro-CAP 9. Electronic Circuit Analysis Program Reference Manual. Copyright 1982-2008 by Spectrum Software 1021 South Wolfe Road Sunnyvale, CA 94088. – 916 s. – <http://www.spectrum-soft.com>.
8. *David Báez-López, Félix E. Guerrero-Castro.* Circuit Analysis with Multisim (Synthesis Lectures on Digital Circuits and Systems). - Morgan & Claypool Publishers, 2011. – 198 p.