

КОВТУН І.І.

Хмельницький національний університет
ORCID ID: 0000-0002-1430-6479
e-mail: dr.igorkovtun@gmail.com

БОЙКО Ю.М.

Хмельницький національний університет
ORCID ID: 0000-0003-0603-7827
e-mail: boiko_julius@ukr.net

КАРПОВА Л.В.

Хмельницький національний університет
ORCID ID: 0000-0001-5015-2107
e-mail: rtlesya@gmail.com

ПЕТРИШИН В.Ю.

Хмельницький національний університет

ВПЛИВ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ФАКТОРІВ НА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТАБІЛЬНОСТІ ПАРАМЕТРІВ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЇВ

В роботі сформовано підходи до складання математичних моделей технологічного процесу конструювання радіоелектронних пристроїв. Представлено результати теоретичних досліджень, в частині вирішення проблеми технологічного проектування методики оперативної побудови математичних моделей процесів складання радіоелектронних пристроїв і вибору оптимальних параметрів їх частин. Дані рекомендації щодо впливу конструктивно-технологічних факторів на забезпечення стабільності параметрів радіоелектронних пристроїв. Досліджено практики використання принципів активного планового експерименту для цілей моделювання різноманітних технологічних процесів.

Ключові слова: радіоелектронний пристрій, технологічні параметри, математична модель, регресія, поліном.

KOVTUN IGOR I., BOIKO JULIY M., KARPOVA LESYA V., PETRYSHYN VOLODYMYR Y.
Khmelnitskyi National University

INFLUENCE OF DESIGN AND TECHNOLOGY FACTORS ON ENSURING STABILITY PARAMETERS FOR RADIO-ELECTRONIC DEVICES

The material presented in the article contains the results theoretical research, in terms of research and implementation in production technological design methods for the operational construction of mathematical models' assembly processes of electronic devices and the choice of optimal parameters of their parts. This technique is based on the statistical principles of active planned experiment, which are currently widely used in various fields of science and technology. The use of these principles, in contrast to traditional methods of conducting a passive experiment and processing the results obtained in this case, allows to drastically reduce the time and material costs for a reliable mathematical description of complex physical laws that underlie the processes of compiling modern electronic devices and choosing the parameters of the parts included in them. The proposed methodology provides for a modification of the principles of an active planned experiment, which can be used when working with electronic devices consisting of independent (explained in the text of the article), in a certain sense, functional units or cascades, the mutual influence of which on the operation of the device is known in advance. It allows you to create such statistically determined models of radio electronic devices that can significantly reduce the labour intensity and economic costs necessary for setting up an experiment. The selection of primary factors included in an active planned experiment should be based on a thorough analysis of the principles of operation and design features of assembly objects, the physical essence of a particular technological process, as well as a study of the experience of mass production and the results of previous research in the relevant areas of technology. The success of the entire active planned experiment and the possibility of effective use of the obtained mathematical model in the design and technological preparation of production almost completely depend on the successful choice of factors. The purpose of the article is related to the development of a technique for the rapid construction of mathematical models of the assembly processes of radio-electronic devices and the selection of the optimal parameters of their parts.

Keywords: electronic device, technological parameters, mathematical model, regression, polynomial.

Постановка проблеми

Фактична складність складання і налаштування сучасних радіоелектронних пристроїв (РЕП) багато в чому обумовлена вимогами до якості цих пристроїв і точністю технологічних параметрів його складових частин.

Оперативний і цілеспрямований контроль точності складання, а, отже, і стійкості вихідних параметрів РЕП стає можливим тільки за наявності візуальних і повних математичних моделей відповідних технологічних процесів [1–4].

Матеріал представлений у статті представляє результати теоретичних досліджень, в частині вирішення проблеми впровадження у виробництво технологічного проектування методики оперативної побудови математичних моделей процесів складання РЕП і вибору оптимальних параметрів їх частин [5–7].

Ця методика заснована на статистичних принципах активного планового експерименту, які в даний час широко використовуються в різних галузях науки і техніки. Використання цих принципів, на відміну від традиційних методів проведення пасивного експерименту і обробки отриманих при цьому результатів, дозволяє різко скоротити час і матеріальні витрати на достовірний математичний опис складних фізичних

законів, що лежать в основі процесів складання сучасних РЕП і вибору параметрів включених в них деталей.

Запропонована методика передбачає модифікацію принципів активного планового експерименту, яка може застосовуватися при роботі з РЕП, що складаються з незалежних (пояснюється в тексті статті) в певному сенсі функціональних вузлів або каскадів, взаємний вплив яких на роботу пристрою відомий заздалегідь. Вона дає можливість створювати такі статистично визначені моделі РЕП, які дозволяють значно знизити трудомісткість і економічні витрати, необхідні для постановки експерименту [1].

Мета статті пов'язана із розробкою методики для швидкої побудови математичних моделей процесів складання РЕП і вибору оптимальних параметрів їх деталей.

Аналіз останніх джерел

Під математичною моделлю технологічного процесу складання розуміється такий його математичний опис, який з необхідною для даних виробничих умов точністю відображає закономірності формування виробу, що збирається, і (або) його вихідних контрольованих характеристик [6].

В цілому, математична модель збірки може бути представлена як:

$$y = F(q_i), \quad (1)$$

де y – модельована вихідна характеристика об'єкту (процесу) складання, наприклад, потужність вихідного сигналу, його частота, механічні напруження в деталях та ін.; q_i – первинні конструктивно-технологічні фактори, які визначають вихідну характеристику, яка моделюється ($i = 1, 2 \dots n$); F – функціонал, тобто математичний символ перетворення, зумовлений конкретним видом математичної моделі.

В даний час існує досить умовний поділ математичних моделей технологічних процесів, в тому числі процесів складання, на детерміновані і статистичні (імовірнісні) [8–10].

Детерміновані моделі будуються на основі теоретичного опису однозначних функціональних взаємозв'язків між вихідними характеристиками об'єктів (процесів) складання і первинними структурно-технологічними факторами. Ці математичні моделі часто є системами алгебраїчних і (або) диференціальних рівнянь.

Детерміновані математичні моделі складання дозволяють ще на етапі проектування РЕП отримати найбільш загальні для цілого класу виробів конструктивно-технологічні рішення в частині обґрунтованого вибору методів управління точністю розглянутих технологічних процесів.

Найпростішим прикладом детермінованої математичної моделі збірки є рівняння розмірного ланцюга, що дозволяє прогнозувати точність отримання останньої ланки як в партії виробів, так і для кожного конкретного екземпляра складальної одиниці, і знаходити за необхідності необхідну величину і напрямком компенсації сумарної похибки.

Детермінований підхід до побудови математичних моделей збірки РЕП пов'язаний з необхідністю теоретичного опису процесів, що в них протікають, може потребувати неприпустимо великих витрат часу на технологічне проектування.

Статистичні моделі технологічних процесів складання в загальному випадку є математичним описом зв'язків між параметрами законів розподілу вихідних характеристик виробів, які складаються та параметрами законів розподілу первинних конструктивно-технологічних факторів.

Прикладами первинних конструктивно-технологічних факторів стосовно завдань моделювання процесів складання можуть служити розмірно-геометричні та функціонально-фізичні параметри складових частин виробів, які складаються з чистоти обробки поверхні, зусилля запресовування, притиску і т.д.

Статистичні моделі технологічних процесів складання зазвичай подаються у вигляді рівнянь регресії або автокореляційних функцій [10].

Детермінований і статистичний підхід до побудови математичних моделей збірки не тільки не виключають один одного але, навпаки, органічно пов'язані між собою, так як достовірність детермінованих моделей зазвичай підтверджується статистичною обробкою експериментальних даних, а статистичні моделі формуються з урахуванням теоретичних передумов про фізичну сутність того чи іншого технологічного процесу [5].

Найбільш відомим статистичним методом побудови математичних моделей технологічних процесів є апарат множинної кореляції, який досить ефективно зарекомендував себе в умовах масового і крупносерійного виробництва.

Застосування методу множинної кореляції дозволяє, як правило, представити математичну модель процесу складання в наочній формі лінійного полінома (ряду):

$$y = A_0 + A_1 q_1 + A_2 q_2 + \dots + A_n q_n, \quad (2)$$

де y – характеристика технологічного процесу або об'єкту складання, яка моделюється; q_n – первинні конструктивно-технологічні фактори $A_0 + A_1 q_1 + A_2 q_2 + \dots + A_n q_n$ – постійні для даного процесу або об'єкту складання коефіцієнти, які розраховуються за результатами статистичної обробки експериментальних даних.

При використанні вказаного методу для кожного i -го первинного фактору та модельованої вихідної характеристики « y » необхідно мати зазвичай не менше 50–100 пар спостережних значень, отриманих шляхом реалізації масивного експерименту.

За малої серійності випуску РЕП, а також неможливості побудови представницьких кореляційних полів в межах технологічного розкиду таких первинних факторів, як чистота обробки поверхонь, зусилля притиску деталей і т.д., істотно ускладнюється використання методу множинної кореляції для цілей оперативної побудови моделей, які цікавлять нас, навіть в умовах налагодженого виробництва РЕП.

Розглянутий метод побудови математичних моделей принципово непридатний на етапах відпрацювання конструкції нових виробів, підготовки їх серійного випуску, тобто за відсутності необхідних представницьких статистичних даних.

Вказаних принципіальних недоліків практично позбавлені статистичні методи активного планового експерименту (АПЕ), які набули поширення на даний час в різних галузях науки та техніки.

Методика проведення повного факторного експерименту типу 2^k

Практика використання принципів АПЕ для цілей моделювання різноманітних технологічних процесів, в тому числі і процесів складання розглянутих РЕП, показує, що при відносно невеликих варіаціях первинних конструктивно-технологічних факторів для адекватної апроксимації невідомої нам функції виду (1) можна обмежитися неповним квадратичним поліномом.

$$y = B_0 + \sum_{i=1}^K B_i q_i + \sum_{i \neq j}^K B_{ij} q_i q_j \tag{3}$$

Для побудови математичних моделей процесів складання в формі (3) найбільш ефективним є АПЕ, в якому первинні конструктивно-технологічні чинники q_i варіюються тільки на двох рівнях.

АПЕ, у якому фактори q_i варіюються тільки на двох рівнях, називається повним факторним експериментом (ПФЕ) типу 2^k .

Для реалізації вказаного ПФЕ та розрахунку коефіцієнтів «В» полінома (3) необхідно провести не більше N дослідів, причому:

$$N = 2^k \tag{4}$$

Кількість коефіцієнтів «В» моделі (3), які розраховуються за результатами проведення ПФЕ типу 2^k , також дорівнює N .

Первинні фактори q_i , що включаються в ПФЕ типу 2^k , відбираються з урахуванням проведеного ретельного аналізу принципів дії і конструктивних особливостей об'єктів складання, фізичної сутності того чи іншого технологічного процесу, а також на основі вивченого досвіду серійного виробництва і результатів раніше проведених досліджень у відповідних областях технології.

При цьому для кожного фактору визначається, виходячи з поставленого завдання, його можливе в даному АПЕ максимальне і мінімальне значення.

Для формалізації правил проведення ПФЕ типу 2^k та полегшення процедури обчислення коефіцієнтів «В» полінома (3) первинні конструктивно-технологічні фактори кодуються в безрозмірну форму.

В кодованих значеннях первинних факторів шукана математична модель набуває вигляду:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^K b_i x_i + \sum_{i \neq j} b_{ij} x_i x_j, \tag{5}$$

де b_0, b_i, b_{ij} – коефіцієнти моделі, записаної в кодованих значеннях факторів; x_i – кодоване (безрозмірне) значення i -го первинного конструктивно-технологічного фактору.

При цьому:

$$x_i = \frac{q_i - q_{oi}}{J_{qi}} \tag{6}$$

$$J_{qi} = \frac{1}{2} (q_{imax} - q_{imin}) \tag{7}$$

$$q_{oi} = \frac{1}{2} (q_{imax} + q_{imin}) \tag{8}$$

де q_{imax} – максимальне значення i -го первинного фактору (верхній рівень фактору); q_{imin} – мінімальне значення i -го первинного фактору (нижній рівень фактору); J_{qi} – інтервал (крок) варіювання i -го первинного фактору; q_{oi} – середнє (номінальне) значення i -го фактору, тобто його основний рівень.

Якщо первинні конструктивно-технологічні фактори варіюються відповідно до граничних допустимих відхилень на розмірно-геометричні та функціонально-фізичні параметри складових частин РЕП, то

$$J_{qi} = \frac{1}{2} \delta_{qi}, \tag{9}$$

де δ_{qi} – поле допуску на відповідний параметр (фактор). При цьому величина q_{oi} співпадає з координатою середини поля допуску.

Зі співвідношень (6)–(9) випливає, що при будь-якій розмірності первинних факторів q_i , тобто незалежно від фізичної сутності об'єкта, що моделюється і (або) процесу збирання:

$$\left. \begin{aligned} x_{imax} &= +1 \\ x_{imin} &= -1 \\ x_{oi} &= 0 \end{aligned} \right\} \tag{10}$$

де $x_{imax}, x_{imin}, x_{oi}$ – відповідно кодовані значення верхнього, нижнього та основного рівня первинних конструктивно-технологічних факторів.

Для якісних факторів звичайно порядок рівнів не має значення, тобто один з них довільно позначається +1, а другий –1.

Після відбору первинних факторів q_i , які включаються в даний ПФЕ типу 2^k , дані про їх рівні та інтервали варіювання необхідно звести в спеціальну таблицю, форма заповнення якої ілюструється таблицею 1.

Таблиця 1

Вихідні дані первинних конструктивно-технологічних факторів, які включаються в ПФЕ типу 2^k

№ з/п	Найменування, позначення і розмірність фактору	Рівні факторів			Інтервал варіювання J_{qi}
		Верхній $q_{imax}(+1)$	Нижній $q_{imin}(-1)$	Основний $q_{oi}(0)$	
	2	3	4	5	6
1	$q_1(x_1)$				
2	$q_2(x_2)$				
...
i	$q_i(x_i)$				
...
k	$q_k(x_k)$				

Формалізована стратегія проведення ПФЕ типу 2^k представляється у вигляді матриці, правила заповнення якої на прикладі 3-х первинних факторів, тобто коли у відповідності з формулою (4) $N=8$, ілюструється табл. 2

Насамперед, заповнюється стовпець фіктивної змінної $x_0 = +1$, яка не впливає на результати проведення ПФЕ і необхідна лише для обчислення коефіцієнта b_0 полінома.

Заповнюються стовпці кодованих факторів x_1, x_2, x_3 які безпосередньо приймають участь в реалізації ПФЕ. Для x_1 знаки при одиниці чергуються через один; для x_2 – через два; для x_3 – через чотири. У загальному випадку для « K » факторів чередування знаків при одиниці у кожному стовпці x_i ведеться по ступеням 2^{i-1} , ($i=1,2,\dots,k$)

Таблиця 2

Матриця ПФЕ 2^3

№ Досл.	x_0	План			Впливи				Експеримент			Розрахунк. дані			
		x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$	y_{u1}	y_{u2}	y_{um}	\bar{y}_u	$\delta^2\{y_u\}$	\hat{y}_u	Δy
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	y_{11}	y_{12}	y_{1m}	\bar{y}_1	$\delta^2\{y_1\}$	\hat{y}_1	Δy
2	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	y_{21}	y_{22}	y_{2m}	\bar{y}_2	$\delta^2\{y_2\}$	\hat{y}_2	Δy
3	+1	+1	-1	-1	-1	+1	-1	-1	y_{31}	y_{32}	y_{3m}	\bar{y}_3	$\delta^2\{y_3\}$	\hat{y}_3	Δy
4	+1	-1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	y_{41}	y_{42}	y_{4m}	\bar{y}_4	$\delta^2\{y_4\}$	\hat{y}_4	Δy
5	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	y_{51}	y_{52}	y_{5m}	\bar{y}_5	$\delta^2\{y_5\}$	\hat{y}_5	Δy
6	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	y_{61}	y_{62}	y_{6m}	\bar{y}_6	$\delta^2\{y_6\}$	\hat{y}_6	Δy
7	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	y_{71}	y_{72}	y_{7m}	\bar{y}_7	$\delta^2\{y_7\}$	\hat{y}_7	Δy
8	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	-1	y_{81}	y_{82}	y_{8m}	\bar{y}_8	$\delta^2\{y_8\}$	\hat{y}_8	Δy

Стовпці взаємодій факторів ($x_1x_2, x_1x_3, x_2x_3, x_1x_2x_3$ в табл. 2) отримуються простим формальним перемноженням символів +1 і -1 для x_i у кожному $u^{му}$ рядку матриці.

З метою спрощення записів при формуванні матриць ПФЕ типу 2^k замість кодованих значень факторів +1 і -1, а також їх взаємодій зазвичай використовуються відповідні їм позначення «+» або «-», а стовпець фіктивної змінної $x_0 = +1$ умовно опускається.

Можливі поєднання рівнів +1 і -1 утворюють вершини квадрата ($N=4$), всередині якого і розташована область даного експерименту. Для $K=3$ область експерименту обмежується вершинами куба ($N=8$).

У загальному випадку (при $K>3$) для геометричного визначення області експерименту, в якій будується цікавий для нас математичний опис процесу (об'єкта) складання, вводиться умовне поняття гіперкуба ($N>8$).

Матриці ПФЕ типу 2^k задовольняють цілому ряду умов, виконання яких повинно обов'язково перевірятися в кожному конкретному випадку.

Умова симетричності матриць ПФЕ типу 2^k записується як:

$$\sum_{u=1}^n x_i u = 0, \quad (11)$$

де u – номер дослідження (рядка) ($u=1,2,\dots,N$); i – номер первинного фактору ($i=1,2,\dots,k$), тобто номер стовпця x_i .

Виконання умови [4] означає, що алгебраїчна сума елементів кожного стовпця повинна дорівнювати нулю, тобто кількість символів +1 має дорівнювати кількості символів -1 в кожному стовпці x_i .

Умова нормування матриць ПФЕ типу 2^k має вигляд:

$$\sum_{u=1}^N x_i^2 u = N \quad (12)$$

Виконання умови (12) обумовлюється тим, що елементами кожного i -го стовпця ПФЕ типу 2^k є символи +1 і -1.

Умова ортогональності матриць ПФЕ типу 2^k записується як

$$\sum_{u=1}^N x_{iu} x_{ju} = 0; \quad (13)$$

де під i і j розуміються номери факторів (стовпців).

Умова (13) має задовольнятися і для взаємодій факторів вищого порядку (наприклад, потрійного $x_1x_2x_3$ – в табл. 2).

Реалізація ПФЕ, подібно наданому в табл. 2 означає, що в першому досліді первинні конструктивно-технологічні фактори встановлюються на рівнях $q_{1\max}$, $q_{2\max}$, $q_{3\max}$ після чого вимірюється модельована характеристика «у» об'єкту (процесу) складання; у другому досліді реалізуються рівні факторів $q_{1\min}$, $q_{2\max}$, $q_{3\max}$, в третьому досліді – $q_{1\max}$, $q_{2\min}$, $q_{3\max}$ і т.д. у відповідності з кодованими значеннями факторів +1 і -1 в кожному рядку матриці.

Для наступної оцінки впливу неврахованих конструктивно технологічних факторів і (або) випадкових перешкод кожен дослід ($u = 1, 2, \dots, N$) відтворюються m разів.

Для виключення впливу на результати експерименту помилок, викликаних зовнішніми умовами, наприклад, зміною в часі температури навколишнього середовища, дрейфом параметрів вимірювальної установки, можливими варіаціями хімічного складу однієї і тієї ж марки технологічного матеріалу і т.д., досліді необхідно рандомізувати в часі [10].

Рандомізація порядку проведення дослідів АПЕ забезпечується шляхом використання таблиці випадкових чисел.

Наприклад, для ПФЕ 2^8 ($N = 8$) в будь-якому випадковому місці цієї таблиці, нехай це буде в даному випадку 5-й рядок 3-го стовпця, послідовно виписуються числа з 1 по 8 з відкиданням чисел більше 8 і вже виписаних. У кожному прикладі виходить така послідовність; 8, 5, 2, 1, 3, 7, 4, 6. Це означає, що першим реалізується досвід № 8, другим – досвід № 5, третім – дослід № 2 і т.д.

При проведенні ПФЕ типу 2^k на вже існуючій в розпорядженні дослідника детермінованій математичній моделі об'єкта і (або) процесу збирання під реалізацією u -го досліді розуміється результат обчислення вихідної характеристики «у» і функції фактичних значень $q_{i\max}$ и $q_{i\min}$ для кожної u -ї комбінації цих первинних факторів. Очевидно, що в подібних випадках реалізацій ПФЕ нема необхідності рандомізувати такі умовні досліді.

Первинні конструктивно-технологічні чинники повинні відповідати вимозі сумісності. Іншими словами, всі можливі в даному АПЕ комбінації рівнів первинних факторів повинні бути здійснені без порушення фізичної цілісності об'єктів складання і прийнятними з точки зору техніки безпеки.

Від вдалого вибору факторів практично повністю залежить успіх проведення всього АПЕ і можливість ефективного використання отриманої математичної моделі при конструкторській та технологічній підготовці виробництва.

Висновки

У статті розглянуто вплив конструктивно-технологічних факторів на забезпечення стабільності параметрів радіоелектронних пристроїв. Сформовано вимоги до формалізованої стратегії проведення ПФЕ типу 2^k . Дані рекомендації щодо встановлення вихідних даних первинних конструктивно-технологічних факторів, які включаються в ПФЕ типу 2^k . Встановлено, що первинні фактори q_i , що включаються в ПФЕ типу 2^k , відбираються з урахуванням проведеного ретельного аналізу принципів дії і конструктивних особливостей об'єктів складання, фізичної сутності того чи іншого технологічного процесу, а також на основі вивченого досвіду серійного виробництва і результатів раніше проведених досліджень у відповідних областях технології РЕА.

Література

1. Петрушин В.Н. Планирование экспериментального исследования трудоёмкости алгоритмов на основе бета-распределения / В.Н. Петрушин, М.В. Ульянов // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2008. – № 2. – С. 81–91.
2. Блинова Е.И. Планирование и организация эксперимента / Е.И. Блинова. – Минск : БГТУ, 2010. – 130 с.
3. Монтгомери Д.К. Планирование эксперимента и анализ данных / Д.К. Монтгомери. – Ленинград : Судостроение, 1980. – 380 с.
4. Джонсон Н. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. Методы обработки данных / Н. Джонсон. – Москва : Мир, 1981. – 520 с.
5. Кислий В.М. Організація наукових досліджень : навч. посібник / В.М. Кислий. – Суми : Університетська книга, 2011. – 224 с.
6. Засименко В.М. Основи теорії планування експерименту : навч. посібник / В.М. Засименко. – Львів : Видав. ДУ «ЛП», 2000. – 205 с.
7. Важинський С.Е. Методика та організація наукових досліджень : навч. посіб. / С. Е. Важинський, Т. І. Щербак. – Суми : СумДПУ імені А. С. Макаренка, 2016. – 260 с.
8. Kovtun I., Boiko J., Petrashchuk S. Nondestructive strength diagnostics of solder joints on printed circuit boards. 2017 International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo). IEEE, 2017. P. 1–4.

9. Kovtun I., Boiko J., Petrashchuk S., Kałaczyński T. Theory and practice of vibration analysis in electronic packages. MATEC Web of Conferences. EDP Sciences, 2018. T. 182. C. 02015.

10. Бойко Ю. М. Науково-прикладні питання забезпечення роздільної здатності і ефективності обробки сигналів у радіотехнічних та телекомунікаційних системах за наявності завод : монографія / Ю. М. Бойко, О. М. Шинкарук, Л. В. Карпова, І. І. Чесановський. – Хмельницький : ХНУ, 2019. – 218 с.

References

1. Petrushin V.N. Planirovanie eksperimentalnogo issledovaniya trudoyomkosti algoritmov na osnove beta-raspredeleniya / V.N. Petrushin, M.V. Ulyanov // Informacionnye tehnologii i vychislitelnye sistemy. – 2008. – № 2. – S. 81–91.

2. Blinova E.I. Planirovanie i organizaciya eksperimenta / E.I. Blinova. – Minsk : BGTU, 2010. – 130 s.

3. Montgomeri D.K. Planirovanie eksperimenta i analiz dannyh / D.K. Montgomeri. – Leningrad : Sudostroenie, 1980. – 380 s.

4. Dzhonson N. Statistika i planirovanie eksperimenta v tehnike i nauke. Metody obrabotki dannyh / N. Dzhonson. – Moskva : Mir, 1981. – 520 s.

5. Kyslyi V.M. Orhanizatsiia naukovykh doslidzhen : navch. posibnyk / V.M. Kyslyi. – Sumy : Universytetska knyha, 2011. – 224 s.

6. Zasymenko V.M. Osnovy teorii planuvannia eksperymentu : navch. posibnyk / V.M. Zasymenko. – Lviv : Vydav. DU «LP», 2000. – 205 s.

7. Vazhynskiy S.E. Metodyka ta orhanizatsiia naukovykh doslidzhen : navch. posib. / S. E. Vazhynskiy, T. I. Shcherbak. – Sumy : SumDPU imeni A. S. Makarenka, 2016. – 260 s.

8. Kovtun I., Boiko J., Petrashchuk S. Nondestructive strength diagnostics of solder joints on printed circuit boards. 2017 International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo). IEEE, 2017. R. 1–4.

9. Kovtun I., Boiko J., Petrashchuk S., Kałaczyński T. Theory and practice of vibration analysis in electronic packages. MATEC Web of Conferences. EDP Sciences, 2018. T. 182. S. 02015.

10. Boiko Yu. M. Naukovo-prykladni pytannia zabezpechennia rozdilnoi zdatnosti i efektyvnosti obrobky syhnaliv u radiotekhnichnykh ta telekomunikatsiynykh systemakh za naiavnosti zavod : monohrafiia / Yu. M. Boiko, O. M. Shynkaruk, L. V. Karpova, I. I. Chesanovskiy. – Khmelnytskyi : KhNU, 2019. – 218 s.

Рецензія/Peer review : 23.09.2021 р.

Надрукована/Printed : 10.10.2021 р.