

рической формы, а также размеров самого прямоугольного резонатора.

4. Капилевич Б. Ю., Требехин Е. Р. Волноводно-диэлектрические фильтрующие структуры: Справочник. – М.: Радио и связь, 1990. – 272 с.

Надійшла 25.02.2008  
Після доробки 21.03.2008

### ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

1. Хижняк Н. А. Инженерные уравнения макроскопической электродинамики. – К.: Наукова думка, 1986. – 279 с.
2. Бухаров С. В. Расчет параметров частично заполненного резонатора при измерении диэлектрической проницаемости // Радиоэлектроника. – 2007. – № 6. – С.77–80 (Изв. вузов).
3. Samoilyk S. S., Bondaryev V. P. Complex frequencies of the rectangular resonator with the arbitrary number of the dielectric heterogeneities // 6th International Conference on Antenna Theory and Techniques. Conference Proceedings. – Sevastopol, 2007. – Pp. 1252–2054.

*Розрахунок параметрів прямокутного резонатора зі складною формою діелектричного заповнення вирішується методом інтегральних рівнянь макроскопічної електродинаміки. Проведений чисельний аналіз дозволив обчислити добротності прямокутного резонатора для різних  $H_{m0n}$  типів коливань залежно від параметрів складного діелектричного заповнення.*

*The calculation of a rectangular resonator with a complex dielectric loading is solved by the method of integral equations of microscopic electrodynamics. The carried out numerical analysis enabled to calculate Q-qualities of the rectangular resonator, for various  $H_{m0n}$  types of fluctuations depending on parameters of complex dielectric filling.*

УДК 621.396.6.004: 004.942

Г. М. Шило, Д. А. Коваленко, М. П. Гапоненко

## ПРИЗНАЧЕННЯ НОРМАЛЬНИХ ДОПУСКІВ МЕТОДОМ ВІДОБРАЖЕНЬ

*Розглядаються особливості формування допускових областей при нормальному законі розподілу параметрів та дії зовнішніх чинників. Розроблено алгоритм призначення номінальних допусків з урахуванням змін параметрів елементів при зовнішніх впливах. Проведені обчислення допусків на параметри елементів смугового фільтру.*

### ВСТУП

Задача призначення допусків на параметри елементів пов'язана з забезпеченням точності і стабільності при виробництві та експлуатації апаратури. Відхилення параметрів складаються з виробничих відхилень, спричинених недосконалістю технологічних процесів і неоднорідністю матеріалів, та відхилень, що викликані старінням матеріалів та впливом зовнішніх чинників в процесі експлуатації [1].

Розробка методів обчислення відхилень параметрів проводилась переважно без урахування дії зовнішніх впливів. Використовувались геометричні методи, в яких форма допускових областей визначалась законами розподілу параметрів елементів, а розміри областей обчислювались за координатами точок дотику цих областей до меж області працездатності [2–4]. Розроблено методи призначення інтервальних допусків, в яких закон розподілу параметрів задається на інтервалі, і допусків з нормальним законом розподілу параметрів.

Врахування зовнішніх впливів проводилось для лінійних або інтервальних моделей вихідних функцій [1, 5]. Одночасна дія кількох зовнішніх впливів на елементи електронних апаратів не враховувалась. Зокрема, не вибиралися найбільш несприятливі сполучення зовнішніх чинників.

Метою роботи є розробка методу призначення нормальних допусків з урахуванням дії зовнішніх впливів. Для досягнення поставленої задачі необхідно:

- розглянути особливості формування допускових областей при нормальному законі розподілу параметрів та дії зовнішніх чинників;
- розробити метод утворення інтервальних моделей зовнішніх впливів при найбільш несприятливому сполученні зовнішніх факторів;
- розробити алгоритм призначення нормальних допусків при заданих експлуатаційних обмеженнях області працездатності та визначених коефіцієнтах зовнішніх впливів.

### 1 ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ ДОПУСКОВИХ ОБЛАСТЕЙ ПРИ ЗОВНІШНІХ ВПЛИВАХ

При нормальному законі розподілу параметрів допускова область приймає вигляд еліпсоїду [3]. Вплив

на параметри еліпсоїдної області одного зовнішнього фактора виражається співвідношенням [6]:

$$m = m_r d; \quad l = l_r d, \quad (1)$$

де  $m$  та  $l$  – математичні очікування параметрів елементів та напіввісі еліпсоїду при дії зовнішнього фактору;  $m_r$  та  $l_r$  – математичні очікування параметрів елементів та напіввісі еліпсоїду при нормальних умовах навколишнього середовища та відсутності старіння;  $d = 1 + cz$  – відносне відхилення параметра елемента під дією зовнішнього впливу;  $c$  – коефіцієнт зовнішнього впливу;  $z$  – ширина інтервалу зміни зовнішнього впливу.

Для формування відносних відхилень параметрів при дії кількох зовнішніх чинників необхідно розглянути перетворення допускових областей під впливом кількох зовнішніх факторів. Ці перетворення показані на рис. 1, де  $x_1$  і  $x_2$  – параметри елементів;  $\Omega_w$  і  $\Omega_r$  – область працездатності і область номінальних допусків, яка утворюється при нормальних умовах навколишнього середовища. Области  $\Omega_m$  та  $\Omega_p$  формуються при нижньому та верхньому діапазонах зміни температур. Старінню параметрів елементів відповідає область  $\Omega_s$ . Области  $\Omega_{sm}$  і  $\Omega_{sp}$  утворюються при одночасній зміні температури і старінні елементів. Гіперповерхні  $\underline{y}_r$ ,  $\bar{y}_r$ ,  $\underline{y}_e$  та  $\bar{y}_e$  формують межі області працездатності, які відповідають нижньому і верхньому номінальному та експлуатаційному відхиленню вихідної функції.

З рис. 1 видно, що зовнішні впливи призводять до дрейфу допускових областей, внаслідок чого значно розширюється область працездатності. Особливо значне розширення відбувається при сумісній дії зовнішніх факторів. Найбільш несприятливою є дія нижнього

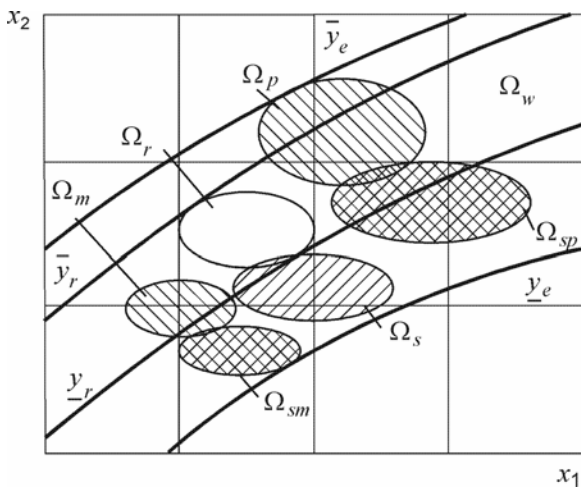


Рисунок 1 – Перетворення допускових областей при зовнішніх впливах

температурного діапазону і старіння, при якому утворюється допускova область  $\Omega_{sm}$ . Верхня експлуатаційна межа області працездатності утворюється при дії верхнього температурного діапазону та відсутності старіння.

Формування інтервальних моделей відносних відхилень параметрів елементів при зовнішніх впливах доцільно проводити в точках дотику допускової області і гіперповерхонь області працездатності. Відносні відхилення параметрів оцінюються при одночасній дії зовнішнього чинника на всі параметри елементів в точках дотику. Для верхнього значення вихідної функції верхнє відносне відхилення визначається співвідношенням:

$$\bar{d}_{ij} = \begin{cases} 1 + c_{ij}z_{mj} & \text{якщо } y(\bar{X}_{mj}) > \bar{y}_r; \\ 1 + c_{ij}z_{pj} & \text{інакше,} \end{cases} \quad (2)$$

де  $z_m$  і  $z_p$  – ширина інтервалу зміни зовнішнього впливу в нижньому та верхньому діапазонах;  $\bar{X}_{mj} = \{\bar{x}_{m1j}, \dots, \bar{x}_{mn}\}$  – множина координат точок дотику допускової області і верхньої межі області працездатності при дії  $j$ -го зовнішнього чинника;  $\bar{x}_{mij} = \bar{x}_{ri} \times (1 + c_{ij}z_{mj})$ ;  $\bar{x}_{ri}$  – значення параметрів елементів в точці дотику допускової області і верхньої межі області працездатності при відсутності зовнішніх чинників.

Аналогічно визначаються нижні значення відносних відхилень при зовнішніх впливах:

$$\underline{d}_{ij} = \begin{cases} 1 + c_{ij}z_{mj} & \text{якщо } y(\underline{X}_{mj}) < \underline{y}_r; \\ 1 + c_{ij}z_{pj} & \text{інакше,} \end{cases} \quad (3)$$

де  $\underline{X}_{mj} = \{\underline{x}_{m1j}, \dots, \underline{x}_{mn}\}$  – множина координат точок дотику допускової області і нижньої межі області працездатності при дії  $j$ -го зовнішнього впливу;  $\underline{x}_{mij} = \underline{x}_{ri} \cdot (1 + c_{ij}z_{mj})$ ;  $\underline{x}_{ri}$  – значення параметрів в точці дотику допускової області і нижньої межі області працездатності при відсутності зовнішніх чинників.

Загальна відносна зміна параметрів елементів для кожної із меж області працездатності при сумісній дії кількох зовнішніх впливів має вигляд:

$$d_i = \prod_{j=1}^q d_{ij}, \quad (4)$$

де  $q$  – кількість зовнішніх впливів.

Співвідношення (2)–(4) дозволяють визначити відносні відхилення параметрів елементів при найбільш несприятливому сполученні зовнішніх чинників і мо-

жуть використовуватись в алгоритмах призначення номінальних допусків з урахуванням зовнішніх впливів.

## 2 СИНТЕЗ ДОПУСКІВ

Призначення номінальних допусків з урахуванням зовнішніх впливів відбувається при заданих експлуатаційних обмеженнях області працездатності, номінальних значеннях параметрів елементів, коефіцієнтах і діапазонах зміни зовнішніх впливів. Обмеження області працездатності може задаватись або межовими значеннями вихідної функції, або шириною інтервалу зміни вихідної функції впродовж життєвого циклу електронного апарату.

Коли призначаються допуски для заданого межового експлуатаційного значення вихідної функції, експлуатаційна межа гіперповерхня області працездатності є дотичною до еліпсоїдної допускової області, параметри якої сформовано з урахуванням дії зовнішніх впливів. При відсутності зовнішніх чинників точка дотику відображається на межу, що відповідає номінальному відхиленню вихідної функції. На початку процедури призначення допусків ця точка є невідомою. Тому для її визначення використовується алгоритм, геометрична інтерпретація якого при заданій верхній експлуатаційній межі області працездатності наведена на рис. 2.

Обчислення розпочинаються із визначення відхилень при межовому значенні вихідної функції  $\bar{y}_e$ . Для цього використовується алгоритм призначення нормальних допусків із заданим критерієм оптимізації [3]. Одночасно визначаються координати точки дотику  $\bar{B}_d$

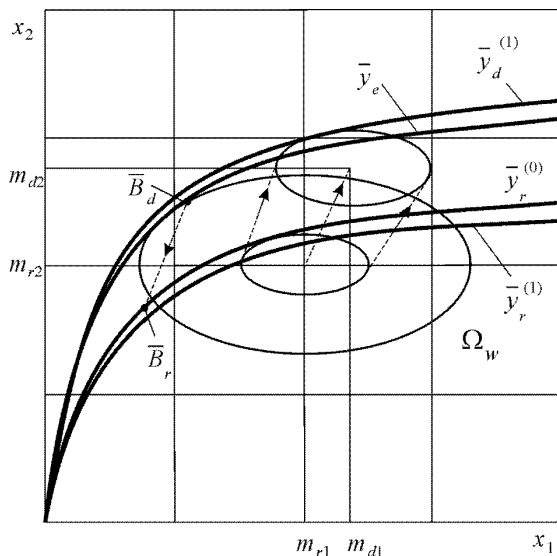


Рисунок 2 – Геометрична інтерпретація призначення допусків при зовнішніх впливах

граничної допускової області та межової гіперповерхні області працездатності:

$$\bar{X}_b = \{\bar{x}_{b1}, \dots, \bar{x}_{bn}\}.$$

Далі проводиться обчислення координат точки  $\bar{B}_r$  при відсутності дії зовнішніх чинників:

$$\bar{x}_{bri} = \bar{x}_{bi}/\bar{d}_i, \quad (5)$$

де значення  $\bar{d}$  визначається з використанням співвідношень (2), (4).

Після цього виконується перевірка умови реалізації алгоритму:

$$\bar{y}_r^{(0)} = y(\bar{X}_r^{(0)}) > y(m_r), \quad (6)$$

де  $\bar{X}_r^{(0)} = \{\bar{x}_{br1}, \dots, \bar{x}_{brn}\}$ .

Виконання умови (6) дозволяє призначити в першому наближенні номінальні допуски для меж області працездатності  $\bar{y}_r^{(0)}$ . Далі уточнюються результати з використанням ітераційного алгоритму, який містить кроки:

1. Отримані значення параметрів допускової області відображаються з допомогою співвідношень (1) в область зовнішніх впливів:

$$\bar{m}_{di} = m_r \bar{d}_i; \quad \bar{l}_{di}^{(k)} = l_{ri}^{(k)} \bar{d}_i.$$

2. Визначається граничне значення вихідної функції  $\bar{y}_d^{(k)}$

$$\bar{y}_d^{(k)} = y(\bar{X}_d^{(k)}),$$

де  $\bar{X}_d^{(k)}$  – точка дотику допускової області при зовнішніх впливах та межі області працездатності.

При цьому використовується алгоритм аналізу нормальних допусків [3].

3. Перевіряється умова завершення алгоритму:

$$\left| \frac{\bar{y}_d^{(k)} - \bar{y}_e}{\bar{y}_e} \right| \leq \varepsilon, \quad (7)$$

де  $\bar{y}_e$  – межове експлуатаційне значення вихідної функції;  $\varepsilon$  – точність обчислень.

При виконанні умови (7) – кінець роботи алгоритму.

4. Уточнюються значення номінальних меж області працездатності з допомогою співвідношень:

$$\Delta \bar{y}_d^{(k)} = \bar{y}_d^{(k)} - \bar{y}_e; \quad \bar{y}_r^{(k)} = \bar{y}_r^{(k-1)} - \frac{\Delta \bar{y}_d^{(k)}}{\bar{d}_y^{(k)}}, \quad (8)$$

де  $\bar{d}_y^{(k)} = \bar{y}_d^{(k)} / \bar{y}_r^{(k-1)}$ .

5. Призначаються номінальні параметри елементів. Використовується алгоритм призначення нормальних допусків.

6. Перехід до кроку 1.

Алгоритм призначення допусків при заданій нижній експлуатаційній межі області працездатності має аналогічний вигляд. Змінюється тільки умова реалізації алгоритму:

$$\underline{y}_r^{(0)} = y(\underline{X}_r^{(0)}) < y(m_r), \quad (9)$$

де  $\underline{X}_r^{(0)} = \{x_{br1}, \dots, x_{brn}\}$ ;  $x_{bri} = x_{bi}/d_i$ ;  $\{x_{b1}, \dots, x_{bn}\}$  – координати точки дотику нижньої межі області працездатності та еліпсоїдної допускової області, сформованої при відсутності зовнішніх впливів, які забезпечуються межовими значеннями вихідної функції  $\underline{y}_e$ .

У випадку, коли обмеження області працездатності задається шириною інтервалу зміни вихідної функції, умова реалізації контролюється для кожної із меж області працездатності. Тоді алгоритм призначення номінальних допусків при нормальному законі розподілу параметрів набуває вигляду:

1. Призначаються відхилення параметрів елементів при заданій експлуатаційній ширині інтервалу зміни вихідної функції  $w_{ye} = \bar{y}_e - \underline{y}_e$ . Використовується алгоритм синтезу допусків із заданим критерієм оптимізації [2]. Одночасно визначаються координати точок дотику  $\underline{B}_d$  та  $\bar{B}_d$  граничної допускової області та межових гіперповерхонь області працездатності.

2. Проводиться відображення координат точок дотику в область номінальних значень з використанням співвідношень:

$$x_{bri} = \frac{x_{bi}}{d_i}; \quad \bar{x}_{bri} = \frac{\bar{x}_{bi}}{\bar{d}_i}.$$

Потім виконується перевірка умов реалізації (6) і (9).

3. Призначаються номінальні допуски в першому наближенні при заданих обмеженнях ширини інтервалу зміни вихідної функції:

$$w_{yr} = \bar{y}_r - \underline{y}_r, \quad (10)$$

де  $\underline{y}_r = y(\underline{X}_r)$ ,  $\bar{y}_r = y(\bar{X}_r)$ .

4. Значення параметрів допускової області відображаються в області зовнішніх впливів з використанням співвідношень:

$$\underline{m}_{di} = m_{ri}d_i; \quad \underline{l}_{di}^{(k)} = l_{ri}^{(k)}d_i; \\ \bar{m}_{di} = m_r\bar{d}_i; \quad \bar{l}_{di}^{(k)} = l_{ri}^{(k)}\bar{d}_i.$$

5. Визначаються граничні значення  $\underline{y}_d^{(k)}$ ,  $\bar{y}_d^{(k)}$  і ширина відхилення вихідної функції при зовнішніх впливах:

$$w_{yd}^{(k)} = \bar{y}_d^{(k)} - \underline{y}_d^{(k)}.$$

Використовується алгоритм аналізу нормальних допусків [2].

6. Перевіряється умова завершення алгоритму:

$$\left| \frac{w_{yd}^{(k)} - w_{ye}}{w_{ye}} \right| \leq \varepsilon. \quad (11)$$

7. Уточнюється номінальне значення ширини вихідної функції:

$$\Delta w_{yd}^{(k)} = w_{yd}^{(k)} - w_{ye}; \quad w_{yr}^{(k)} = w_{yr}^{(k-1)} - \frac{\Delta w_{yd}^{(k)}}{d_{wy}^{(k)}}, \quad (12)$$

де  $d_{wy}^{(k)} = w_{yd}^{(k)} / w_{yr}^{(k-1)}$ .

8. Призначаються номінальні відхилення параметрів для зміненої номінальної ширини інтервалу вихідної функції. Використовується алгоритм призначення нормальних допусків [2].

9. Перехід до кроку 4.

Розроблені алгоритми дозволяють проводити обчислення допусків при заданих обмеженнях вихідної функції і найбільш несприятливому сполученні зовнішніх впливів. Можливе одностороннє обмеження експлуатаційного значення вихідної функції або обмеження експлуатаційної ширини інтервалу вихідної функції.

### 3 ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ

З використанням розробленого методу призначались допуски на параметри елементів активного смугового фільтра, схема якого надається на рис. 3.

Коефіцієнт загасання фільтра обчислюється з допомогою співвідношень [7]:

$$a(\omega) = \frac{1 + C_1/C_2}{\left(\frac{R_1}{R_2} \cdot \frac{C_1}{C_2}\right)} \sqrt{\left(\frac{1}{b_1\omega} - \frac{b_2}{b_1}\right)^2 + 1}; \\ b_1 = (C_1 + C_2) \cdot \frac{R_0 R_2}{R_0 + R_2}; \quad b_2 = R_1 R_0 C_1 C_2,$$

де  $\omega = 2\pi f$  – кутова частота;  $R_i$ ,  $C_i$  – параметри елементів.

Номінальні значення параметрів елементів задавались у нормованому вигляді:  $R_0 = 2$ ,  $R_1 = 2$ ,  $R_2 = 0,3$ ,  $C_1 = 0,25$ ,  $C_2 = 1$ . Коефіцієнт загасання обчислювався на кутовій частоті  $\omega = 1,6$ . Забезпечувалась ширина експлуатаційного відхилення вихідної функції  $w_{ye} = 10\%$ . Враховувалась дія двох зовнішніх чинників: температури та старіння. Верхнє допустиме значення температури задавалось  $60^\circ\text{C}$ , а нижнє –  $-40^\circ\text{C}$ . Тем-

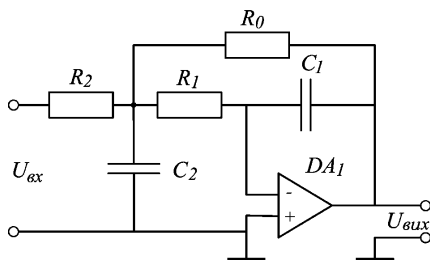


Рисунок 3 – Схема смугового фільтра

пературні коефіцієнти опору резисторів мали значення  $100 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$ , а температурні коефіцієнти ємності конденсаторів –  $-30 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$ . Мінімальний час напрацювання на відмову становив 15000 годин. Відхилення від номінальних значень параметрів резисторів і конденсаторів протягом часу напрацювання не перевищували 1 %.

Розрахунки проводились для максимального об'єму допускової області. Точність обчислень складала  $\epsilon = 0,0001$ . Оцінювання значень відхилень проводили при дії кожного зовнішнього чинника окремо та їх найбільш несприятливого сполучення. Через те, що номінальні відхилення резисторів та конденсаторів мають відповідати стандартизованим значенням за рядами перевагових чисел, далі призначали стандартизовані допуски. Для їх обчислення використовували алгоритм із ранжуванням відхилень і перерахунком їх неперевних значень [2].

Результати обчислень допусків наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Призначення допусків при зовнішніх впливах

Зовнішні впливи	Відхилення параметрів елементів, %				
	$R_0$	$R_1$	$R_2$	$C_1$	$C_2$
Відсутні	1,648	4,687	10,251	4,500	1,438
Температура	1,411	4,016	8,780	3,853	1,231
Старіння	0,966	2,755	6,020	2,644	0,843
Температура та старіння	0,729	2,080	4,544	1,996	0,636
Температура та старіння (стандартизовані допуски)	0,5	2,0	5,0	2,0	0,5

Як видно з табл. 1, дія зовнішніх впливів збільшує вимоги до точності елементів. Урахування зміни температури призводить до зменшення допусків на параметри в середньому на 14 % порівняно з випадком, коли впливи не враховуються. Якщо враховувати тільки старіння, то звуження допусків становить 41 %. Зменшення на 56 % відбувалось при комбінованій дії старіння та зміни температури.

## ВИСНОВКИ

Розроблена інтервальні модель відносних відхилень параметрів, яка враховує одночасну дію зовнішнього впливу на всі елементи радіоелектронного пристрою. Ці моделі відповідають найбільш несприятливо-му сполученню дії зовнішніх чинників.

Призначення номінальних допусків відбувається з допомогою ітераційного алгоритму, в якому використовується відображення номінальних допускових областей в простір зовнішніх впливів. Корегування номінальної допускової області проводиться з урахуванням відносного відхилення вихідних функцій при зовнішніх впливах. Обчислюються нормальні допуски при нормальному законі розподілу параметрів, характерному для серійного виробництва електрорадіоелементів.

Результати обчислення допусків на параметри активного фільтра нижніх частот показали, що дія зовнішніх впливів призводить до зменшення допусків на параметри елементів порівняно з допусками, призначеними без урахування зовнішніх чинників. Найбільш впливає на зменшення допусків старіння елементів.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Львович Я. Е., Фролов В. Н. Теоретические основы конструирования, технологии и надежности РЭА: Учеб. пособие для вузов. – М.: Радио и связь, 1986. – 192 с.
2. Воропай А. Ю., Гапоненко Н. П., Шило Г. Н. Назначение интервальных допусков с учетом особенностей элементной базы // Электроника и связь. – 2006. – № 2. – С. 11–15.
3. Шило Г. Н., Воропай А. Ю., Гапоненко Н. П. Расчет и назначение допусков методом касательных // Известия вузов «Радиоэлектроника». – 2006. – № 2. – С. 43–52.
4. Шило Г. Н. Геометрические методы назначения допусков // Проблемы управления и информатики. – 2007. – № 2. – С. 118–126.
5. Кришук В. М., Шило Г. М., Намлинський А. О., Гапоненко М. П. Вибір елементів при компенсації зовнішніх впливів // Радіоелектроніка. Інформатика. Управління. – 2004. – № 2. – С. 36–41.
6. Шило Г. М., Коваленко Д. А. Особливості компенсації зовнішніх впливів при призначенні нормальних допусків // Радіоелектроніка. Інформатика. Управління. – 2007. – № 1. – С. 44–47.
7. Знаменский А. Е., Теплюк И. Н. Активные RC-фильтры. – М.: Связь, 1970. – 280 с.

Надійшла 4.03.2008  
Після доробки 18.03.2008

*Рассматриваются особенности формирования допусковых областей при нормальном законе распределения параметров и воздействию внешних факторов. Разработан алгоритм назначения номинальных допусков с учетом изменений параметров элементов при внешних воздействиях. Проведены расчеты допусков на параметры элементов полосового фильтра.*

*Tolerance regions forming peculiarities under the normal distribution law and the external factors influence are being considered. An algorithm of a nominal tolerance assignment has been designed taking into account variations of elements parameters under external influences. The parameters tolerances calculations of active band-pass filter elements have been made.*