

УДК 621.391

О. Р. ЖУКОВА, ст. викладач;

Б. М. ЗАЛЕВСЬКИЙ, аспірант,

Державний університет телекомунікацій, Київ

DOI: 10.31673/2412-9070.2023.024347

ПАРАМЕТРИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РАДІОТЕХНІЧНИХ ПРИСТРОЇВ НА ЕТАПІ СИСТЕМНОГО ПРОЄКТУВАННЯ

Системне проєктування передбачає розв'язання завдання порівняльного аналізу та вибору оптимального варіанта побудови радіотехнічного пристрою. Його основним результатом мають стати структурна схема виробу та оцінювання ефективності її реалізації. Під час проєктування радіотехнічних пристроїв певного класу кількість можливих структурних варіантів їхньої реалізації обмежена, тому пошук оптимального варіанта багато в чому визначається витратами на його реалізацію за безумовного виконання вимог технічного завдання.

Основним способом зниження витрат на розроблення пристроїв є максимальне використання в проєктованому виробі модулів високої готовності, під якими розуміють електронні модулі, що пройшли певні етапи розроблення або мають, як мінімум, робочу конструкторську документацію. Тоді завдання системного проєктування зводиться до розв'язання задачі покриття заданих структур модулів високої готовності, причому ефективність її розв'язання багато в чому залежить від кількості можливих альтернатив.

Розглянуто методику використання параметричного моделювання для вибору оптимального варіанта побудови радіотехнічного пристрою (системи). Запропоновано використовувати інформаційний підхід для оцінювання ступеня збігу параметричних моделей модулів високої готовності зі значеннями параметрів, заданих у технічному завданні за підтримання заданого рівня надійності. Ступінь збігу оцінюється за трьома критеріями: інформативністю, адекватністю і точністю. Показано, що розглянута методика дає змогу розв'язати задачу параметричного синтезу ефективної структури радіотехнічного пристрою із підтриманням його заданої надійності.

Здобуті варіанти вирізняються високою вірогідністю, оскільки оцінювання витрат здійснюють реальні розробники. Із нагромадженням інформації щодо реальних витрат на можливі доопрацювання модулів високої готовності процедуру попереднього оцінювання витрат можна буде автоматизувати.

Ключові слова: радіотехнічні пристрої; параметричне моделювання; модуль високого ступеня виробничої готовності; інформаційна ентропія; надійність радіотехнічного пристрою.

Вступ

Етап системного проєктування передбачає розв'язання завдання порівняльного аналізу та вибору оптимального варіанта побудови радіотехнічного пристрою (системи). Його основним результатом мають стати структурна схема виробу та оцінювання ефективності її реалізації. У процесі проєктування радіотехнічних пристроїв (РТП) певного класу кількість можливих структурних варіантів їхньої реалізації обмежена, тому пошук оптимального варіанта багато в чому визначається витратами на його реалізацію за безумовного виконання вимог технічного завдання (ТЗ). Основним способом зниження витрат на розроблення [1; 2] є максимальне використання в проєктованому виробі модулів високої готовності (МВГ), під якими розуміють електронні модулі, що пройшли певні етапи розроблення або мають, як мінімум, робочу конструкторську документацію (РКД), зареєстровану в архівах. Тоді завдання системного проєктування зводиться до розв'язання задачі покриття заданих структур МВГ, причому ефективність її розв'язання багато в чому залежить від кількості можливих альтернатив МВГ. Дослідження таких завдань описано в працях [1-3], проте в них не розглянуто механізм порівняльного кількісного оцінювання ефективності покриття структури МВГ із параметрами, що різняться. Розв'язанню цього завдання і присвячено статтю.

Основна частина

Завдання системного проєктування РТП полягає у визначенні оптимального варіанта відображення його структури (структур) $\{S_i\}$ на допустимі множини варіантів $\{M_{kj}\}$ реалізації пристроїв, що входять до складу РТП (структурних елементів РТП). Результатом відображення є діапазон допустимих розв'язків P , межі якого визначаються параметрами РТП, а кількість точок, що належать до нього, — кількістю варіантів реалізації РТП у межах заданих обмежень, тобто $\forall P_i \in P$ справедливо $\{O_z\}_i < \{O_z\}_{\text{доп}}$, де O_z , $O_{\text{доп}}$ — відповідно z -те обмеження (вимога), що висувається до РТП, і її допустиме значення.

Отже, завдання системного проєктування може бути подано у вигляді

$$\{S_i\}_{\text{opt}} \rightarrow \{M_{kj}\}; \quad B_{\text{opt}} = \min B_i, \quad (1)$$

© О. Р. Жукова, Б. М. Залевський, 2023

де i — варіант структури РТП, $i = \overline{1, n}$; n — загальна кількість структур РТП; k — пристрої, що входять до складу РТП, $k = 1, l$; l — загальна кількість пристроїв, що належать до РТП; j — варіант реалізації пристрою k , $j = \overline{1, m}$; m — загальна кількість варіантів реалізації пристрою k ; B_i — витрати на розроблення i -го варіанта структури РТП.

Вихідними даними для розв’язання цієї задачі є параметри структури РТП, заданої впорядкованим масивом структурних елементів (таблиця, граф, мережа Петрі тощо) і матрицею значень стикувальних параметрів p_{ij} (табл. 1) [4]. Звідси U_k — k -й структурний елемент, що входить до складу РТП; $P_k = \{p_{k1}, \dots, p_{ki}, \dots, p_{kn}\}$ — вектор параметрів, які характеризують структурний елемент U_k .

Як визначено в [3], РТП має бути відображено на множину варіантів $\{M_{kj}\}$ реалізації його структурних елементів. Оскільки ця множина є сукупністю МВГ, розроблених раніше, завдання системного проектування зводиться до розв’язання задачі покриття структурних елементів РТП, формування можливих структур і вибору ефективного варіанта із дотриманням вимог заданої надійності. Доримання таких вимог досягається різними методами, зокрема і структурним резервуванням [5]. У цьому разі формування моделі РТП та розрахунок параметрів потрібно здійснювати з огляду на структурні дублювальні елементи.

Для розв’язання задачі покриття пропонується використовувати параметричне моделювання структурних елементів РТП та МВГ, що зумовлює можливість порівняння їхніх параметрів із параметрами відповідного структурного елемента РТП (див. табл. 1).

Оскільки ефективність розв’язання задачі покриття визначається діапазоном охоплення можливих альтернатив (архів РКД підприємства, корпорації, галузі тощо), доцільно використовувати автоматизовану інформаційну систему вибору виробів високої виробничої готовності [5]. Ця система, реалізована на основі сучасної СКБД, дає змогу за заданими параметрами здійснювати вибір МВГ РТП за класифікаційними характеристиками виробів класифікатора ЄСКД. Після отримання РТП на МВГ, беручи до уваги дані, що містяться в ТУ, на МВГ формується параметрична модель (ПМ).

Щоб оцінити ступінь збігу параметрів МВГ з потрібними значеннями, пропонується використовувати інформаційний підхід, де як критерії порівняння взято інформативність, адекватність і точність параметричної моделі [6; 7].

Оцінювання інформативності ПМ ґрунтується на обчисленні ентропії, здобутої після порівняння параметрів структурного елемента РТП (див. табл. 1) зі значеннями ПМ МВГ. Припустимо, що структурний елемент РТП U_k характеризується безліччю параметрів $P_{kn} = \{p_{k1}, \dots, p_{ki}, \dots, p_{kn}\}$, а ПМ МВГ — безліччю $Q_m = \{q_1, \dots, q_i, \dots, q_m\}$, де $Q_m \in P_n$, $n \geq m$. Після покриття параметрів структурного елемента РТП дістаємо множину невизначених параметрів Q_r . Тоді $Q_n = Q_m \cup Q_r$; $Q_m \cap Q_r = \emptyset$.

Інформативність ПМ $I_{\text{ПМ}}$ у цьому разі визначатиметься так:

$$I_{\text{ПМ}} = H(Q_n) - H(Q_r), \tag{2}$$

де $H(Q_n)$ і $H(Q_r)$ — ентропія відповідно до і після покриття параметрів структурного елемента РТП.

Під час вибору МВГ порівняння ПМ зручніше здійснювати за ентропією, здобутою після покриття параметрів структурного елемента U_k параметрами моделі аналогічного МВГ. Із (2) дістаємо вираз для ентропії:

$$H(Q_r) = H(Q_n) - I_{\text{ПМ}}.$$

Параметри, якими характеризуються модулі, можна розглядати як події рівноймовірні й незалежні, тобто для розрахунку ентропії можна скористатися формулою Гартлі як окремим випадком формули Шеннона [7]. Тоді невизначеність $H(Q_r)$ ПМ оцінюватиметься за виразом

$$H(Q_r) = \log_2 n - \log_2 m = \log_2 n/m.$$

Так, наприклад, якщо $n = 20$, то ентропія буде максимальною при значенні $m = 1$ і дорівнюватиме 4,322 біт. Якщо ж $m = n$, невизначеність знімається повністю, і $H(Q_r) = 0$ біт, а $I_{\text{ПМ}} = 4,322$ біт, тобто дорівнює невизначеності, що існувала від самого початку. Якщо $m = n/2$, ентропія $H(Q_r) = 1$ біт.

Під адекватністю ПМ розуміють відповідність параметрів МВГ аналогічним параметрам структурного елемента.

Загалом уся множина параметрів Q_m , що належать до ПМ, розбивається на дві підмножини: Q_h і Q_g . Тоді $Q_m = Q_h \cup Q_g$; $Q_h \cap Q_g = \emptyset$. Тут $Q_h = \{q_1, \dots, q_i, \dots, q_h\}$ — підмножина параметрів, які відповідають аналогічним параметрам структурного елемента, тобто задовольняють прямі обмеження рівності

$$q_i = p_i \tag{3}$$

Таблиця 1

Опис структури РТП

Структурний елемент	Параметри структурного елемента				
	U_1	p_{11}	...	p_{12}	...
...
U_k	p_{k1}	...	p_{k2}	...	p_{kn}
...
U_l	p_{l1}	...	p_{l2}	...	p_{ln}

або нерівності

$$p_{i\min} \leq q_i \leq p_{i\max}, \quad (4)$$

де $p_{i\min}$, $p_{i\max}$ — відповідно мінімальне і максимальне допустимі значення аналогічного параметра структурного елемента p_i , $i = 1, h$; $Q_g = \{q_1, \dots, q_i, \dots, q_g\}$ — підмножина параметрів, які не відповідають аналогічним параметрам структурного елемента, тобто для них умови (3) і (4) не виконуються: $j = \overline{1g}$; $i \neq j$; $h + g = m$.

Щоб оцінити адекватність ПМ, скористаємося ентропією, яку визначають після порівняння значень параметрів, що характеризують ПМ і належать до підмножини Q_m із параметрами, аналогічними тим, що входять до табл. 1:

$$H(Q_g) = H(Q_m) - H(Q_h) = \log_2 m/h.$$

Максимальна адекватність ($H(Q_g) = 0$) буде в тому разі, коли при $\forall q_i \in Q_m$ виконуються умови (3) і (4), тобто $Q_m = Q_h$. Так, наприклад, якщо $m = 10$, максимальна адекватність дорівнюватиме 3,322 біт. Якщо ж $Q_h = \emptyset$, то вже ентропія $H(Q_g)$ буде максимальною і в цьому разі дорівнюватиме 3,322 біт.

Отже, чим більша кількість параметрів ПМ відповідає аналогічним параметрам структурного елемента, тим менша ентропія ПМ і вища її адекватність.

Точність моделі оцінюється розміром відхилення значень ПМ МВГ від значень аналогічних параметрів відповідного структурного елемента. Зі свого боку, ця точність підтримується заданим значенням надійності структурного елемента РТП. Оскільки параметри, що входять до підмножини, задовольняють обмеження (3) і (4), оцінювання точності ПМ здійснюють тільки за тими параметрами, що належать до підмножини Q_g .

Загалом точність ПМ є функцією двох змінних $\Delta_{\text{ПМ}} = f(g, \delta_{qj})$, де g — кількість параметрів, що входять до підмножини Q_g ; δ_{qj} — різниця між значеннями j -го показника ПМ і аналогічного параметра структурного елемента, яка визначається як $\delta_{qj} = |p_i - q_j|$. При цьому дістаємо безліч $\delta Q_g = \{\delta_{q_1}, \dots, \delta_{q_i}, \dots, \delta_{q_g}\}$. Тоді точність ПМ можна подати як суму

$$\delta Q_{\text{ПМ}} = \sum_{j=1}^g \delta q_j.$$

У цій рівності відхилення параметрів є розмірною величиною, що створює труднощі під час розрахунку. Тому доцільно використовувати відносні відхилення параметрів: $\Delta(Q_g) = \sum_{j=1}^g \frac{\delta q_j}{p_i}$.

Під час вибору МВГ із бібліотеки моделей виконується мінімізація цільової функції:

$$F_{\text{ПМ}} = \left[\frac{H(Q_r)}{H(Q_n)}, \frac{H(Q_g)}{H(Q_m)}, \Delta(Q_g) \right] \rightarrow \min, \quad (5)$$

де $\frac{H(Q_r)}{H(Q_n)}$ і $\frac{H(Q_g)}{H(Q_m)}$ — нормовані значення ентропій відповідно $H(Q_r)$ і $H(Q_g)$.

Щоб вибрати оптимальний варіант, скористаємося адитивним критерієм для згортки цільової функції:

$$W_{kj} = \frac{H(Q_r)_{kj}}{H(Q_n)_{kj}} + \frac{H(Q_g)_{kj}}{H(Q_m)_{kj}} + \Delta(Q_n)_{kj}.$$

Визначивши значення W_{kj} для всіх m можливих варіантів структур k -го МВГ, проведемо ранжування: $W_{kl} < W_{kj} < W_{km}$ (табл. 2).

Оптимальним вважатиметься такий варіант МВГ, для якого виконується умова $W_{kj} \text{ opt} \rightarrow \min$. Якщо параметри модуля в повному обсязі задовольняють обмеження (3) і (4) структурного елемента РТП U_k , то відношення

$$\frac{H(Q_r)_{kj}}{H(Q_n)_{kj}} = 0, \frac{H(Q_g)_{kj}}{H(Q_m)_{kj}} = 0, \Delta(Q_n)_{kj} = 0, \text{ а отже, } W_{Kj} = 0.$$

Вибір оптимальної структури РТП із додержанням вимог надійності структурних елементів у разі їх структурного резервування ґрунтується на мінімізації цільової функції (5) для всіх МВГ, що входять до цієї структури, і визначенні адитивного критерію якості для кожної S_i -ї структури:

$$W(S_i) = \sum_{k=1}^l \frac{H(Q_r)_{kopt}}{H(Q_n)_k} + \sum_{k=1}^l \frac{H(Q_g)_{kopt}}{H(Q_m)_{kopt}} + \sum_{k=1}^l \Delta(Q_n)_{kopt},$$

де $\frac{H(Q_r)_{kopt}}{H(Q_n)_k}$; $\frac{H(Q_g)_{kopt}}{H(Q_m)_{kopt}}$; $\Delta(Q_n)_{kopt}$ — відносні параметри, що характеризують відповідно інформатив-

ність, адекватність і точність для модуля M_k з оптимальною структурою, наведеною в табл. 2.

Обчисливши значення $W(S_i)$ для всіх n можливих варіантів структур РТП, що визначають безліч $\{S_i\}$, проведемо їх ранжування $W(S_1) < W(S_i) < W(S_n)$ (табл. 3). Ранжування може бути реалізовано за будь-яким атрибутом, що входить до табл. 3, зокрема за кількістю МВГ, що дає змогу вибрати структуру РТП, яка має максимальну кількість готових модулів. Крім того, табл. 3 містить варіанти побудови РТП, ранжовані за ступенем збігу з МВГ. Під час реалізації структурного резервування для підвищення надійності РТП передбачається використання надлишкової кількості елементів, що входять до фізичної структури об'єкта. Такий спосіб забезпечується підмікненням резервних структурних елементів до основних так, щоб у разі відмови основного резервний продовжував функціонувати [11]. Відповідно, наявність резервних елементів у структурі потребує брати їх до уваги в процесі ранжування.

Для отримання значень ефективності структурних варіантів необхідно оцінити витрати на доопрацювання МВГ, які не задовольняють вихідні вимоги. Для цього на ці модулі розробляють приватні ТЗ, які розсилають виконавцям, а ті, зі свого боку, оцінюють витрат V_{ij} на доопрацювання i -го модуля j -го варіанта реалізації РТП.

Висновки

Підсумувавши витрати за кожним варіантом побудови РТП і здійснивши сортування, можна ранжувати ці варіанти за критерієм витрат, що обернено пропорційно до ефективності. Здобуті варіанти вирізняються високою вірогідністю, оскільки оцінювання витрат виконують реальні розробники. Із нагромадженням інформації щодо реальних витрат на можливі доопрацювання МВГ процедуру попереднього оцінювання витрат можна буде автоматизувати. Таким чином, запропонований метод параметризації дає змогу розв'язати завдання параметричного синтезу ефективної структури РТП.

Список використаної літератури

1. Воробієнко П. П., Нікітюк Л. А., Резніченко П. І. Телекомунікаційні та інформаційні мережі: підручник для вищих навчальних закладів. Київ: САММІТ-Книга, 2010. 708 с.
2. Стеклов В. К., Беркман Л. Н. Проектування телекомунікаційних мереж. Київ: Техніка, 2002. 792 с.
3. Павликевич М. Й., Гуськов П. О. Планування і проектування телекомунікаційних мереж: навч. посіб. Том 1. Львів, 2015. 408 с.
4. Царьов Р. Ю., Нікітюк Л. А., Резніченко П. І. Структуровані кабельні системи: навч. посіб. для студентів вищих навчальних закладів. Одеса: ОНАЗ ім. О. С. Попова, 2013. 260 с.
5. Шинкаренко В. Ф., Шиманська А. А., Котлярова В. В. Моделювання електромеханічних систем. Київ: КІП ім. Ігоря Сікорського, 2019. 253 с.
6. Design methodology for reconfigurable multi-radio platform for future generation wireless systems / Mahmoud Al Ahmad, Lillian J. A. Olule, Saif A. Kabeer, Walid Shakhathreh // Alexandria Engineering Journal. 2023. Vol. 75. P. 325–340. URL: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.05.074>.
7. Математичні основи теорії телекомунікаційних систем / В. В. Поповський, С. О. Сабурова, В. Ф. Олійник [та ін.] // Харків: ТОВ «Компанія СМІТ», 2006. 564 с.
8. Матвійчук Я. М. Елементи теорії систем та макромоделювання: навч. посіб. Львів: Вид. Інституту підприємництва та перспективних технологій при НУ ЛІП, 2004. 356 с.
9. Ушкар М. М. Автоматизація системного проектування інформаційних радіо-систем // Труды МАІ. 2014. Вип. 78.

Таблиця 2

Ранжування модулів M_{kj} за критерієм W_{kj}

ПМ k -го МВГ	$H(Q_r)$	$H(Q_g)$	$\Delta(Q_g)$	W
M_{k1}	$H(Q_r)_{k1}$	$H(Q_g)_{k1}$	$\Delta(Q_g)_{k1}$	W_{k1}
...
M_{ki}	$H(Q_r)_{kj}$	$H(Q_g)_{kj}$	$\Delta(Q_g)_{kj}$	W_{kj}
...
M_{km}	$H(Q_r)_{km}$	$H(Q_g)_{km}$	$\Delta(Q_g)_{km}$	W_{km}

Таблиця 3

Результати ранжування можливих структур РТП

Структури РТП	Загальна кількість модулів у структурі РТП	Кількість МВГ у структурі РТП	$W(S)$
S_1	N_1	M_1	$W(S_1)$
...
S_i	N_i	M_i	$W(S_i)$
...
S_n	N_n	M_n	$W(S_n)$

10. Кузнєцов А. С., Кузнєцов С. М., Ушкар М. М. Автоматизована інформаційна система вибору виробів високої виробничої готовності під час проектування РЕЗ // Інформаційно-вимірвальні та управляючі системи. 2016. Т. 14, №5. С. 43–49.

11. Залевський Б. М. Модель комплексної оцінювання структурної надійності при резервуванні базового елемента каналу передавання даних безпроводової телекомунікаційної мережі // Вимірвальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах, 2023. №2. С. 159–166. URL: <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-74-20>.

О. Zhukova, В. Zalevskiy

PARAMETRIC MODELING OF RADIO ENGINEERING DEVICES AT THE STAGE OF SYSTEM DESIGN

System design provides for solving the task of comparative analysis and choosing the best option for constructing a radio engineering device. Its main result should be a structural diagram of the product and an assessment of the effectiveness of its implementation. The number of possible structural options for their implementation is limited when designing radio engineering devices of a certain class, so the search for the best option is mainly determined by the costs of its implementation, provided that the requirements of the technical specifications are fully satisfied.

The main way to reduce the costs of developing devices is to use high-availability modules as much as possible in the designed product, which means electronic modules that have passed certain stages of development or have at least working design documentation. Then, the task of system design is reduced to solving the task of covering the given structures of high-availability modules, and the efficiency of its solution depends to a large extent on the number of possible alternatives.

The methodology of using parametric modeling to determine the best option of construction of a radio engineering device (system) is considered. It is proposed to use an information approach to assess the degree of coincidence of the parametric models of high-availability modules with the values of parameters specified in the technical specifications while maintaining a given level of reliability. The degree of coincidence is evaluated by three criteria: informativeness, adequacy, and accuracy. It is shown that the considered methodology makes it possible to solve the parametric synthesis task of the effective structure of a radio engineering device while maintaining its specified reliability.

The resulting options are highly reliable because the cost estimation is performed by real developers. As information on the actual costs for possible modifications of high-availability modules is accumulated, the preliminary cost estimation procedure can be automated.

Keywords: radio engineering devices; parametric modeling; module with a high degree of production readiness; information entropy; reliability of a radio engineering device.

