

УДК 681.3

DOI: [10.26102/2310-6018/2024.45.2.022](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2024.45.2.022)

Оптимизация принятия структурно-компонентных проектных решений в САПР киберфизических систем

И.Я. Львович, Я.Е. Львович, А.П. Преображенский✉

Воронежский институт высоких технологий, Воронеж, Российская Федерация

Резюме. В статье приведены результаты исследования, включающего формирование оптимизационной модели и интерактивной процедуры принятия структурно-компонентных решений на основе принципов построения интегрированной САПР киберфизических систем (КФС). Приведено описание пяти основных уровней, в рамках которых реализуется процесс проектирования КФС. Рассмотрены некоторые подходы, которые использовались авторами в ходе проектирования элементов проектирования КФС. Дано описание формирования оптимизационной модели структурно-компонентного синтеза. Приведены основные компоненты такой оптимизационной модели. Структурные элементы КФС описываются на основе совокупности сформированных множеств. Выделены три группы показателей в модели. К первой группе отнесены надежность и стоимость, которые вычисляются для всей КФС в целом. Ко второй группе отнесем показатели, вычисляемые для некоторых цифровых нитей. Третья группа показателей связана с принципом охвата всего жизненного цикла КФС от проекта до эксплуатации. Приведена интерактивная процедура принятия структурно-компонентного проектного решения. Генерация вариантов решений осуществляется в автоматическом режиме рандомизированного поиска за счет замены булевых переменных на случайные.

Ключевые слова: киберфизическая система, САПР, структурно-компонентное проектирование, оптимизация, экспертное оценивание.

Для цитирования: Львович И.Я., Львович Я.Е., Преображенский А.П. Оптимизация принятия структурно-компонентных проектных решений в САПР киберфизических систем. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии.* 2024;12(2). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1538> DOI: 10.26102/2310-6018/2024.45.2.022

Optimization of making structural-component design decisions in CAD of cyberphysical systems

I.Ya. Lvovich, Ya.E. Lvovich, A.P. Preobrazhensky✉

Voronezh Institute of High Technologies, Voronezh, the Russian Federation

Abstract. The article presents the results of a study involving the formation of an optimization model and an interactive procedure for making structural and component decisions based on the principles of building an integrated CAD of cyberphysical systems (CFS). A description is given of the five main levels within which the CFS design process is implemented. Some approaches that were used by the authors during the design of the design elements of the CFS are considered. The description of how the optimization model of structural and component synthesis is formed is given. The main components of such an optimization model are given. The structural elements of the CFS are described on the basis of a set of formed sets. Three groups of indicators in the model are identified. The first group includes reliability and cost, which are calculated for the entire CFS as a whole. The second group includes the indicators calculated for some digital threads. The third group of indicators is related to the principle of covering the entire life cycle of the CFS from project to operation. An interactive procedure for making a structural and component design decision is presented. The generation of solution options is carried out in an automatic randomized search mode by replacing Boolean variables with random ones.

Keywords: cyberphysical system, CAD, structural and component design, optimization, expert assessment.

For citation: Lvovich I.Ya., Lvovich Ya.E., Preobrazhensky A.P. Optimization of structural and component design decisions in CAD of cyberphysical systems. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2024;12(2). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1538> DOI: 10.26102/2310-6018/2024.45.2.022 (In Russ.).

Введение

Киберфизические системы (КФС) занимают ведущее место в развитии нового технологического уклада «Индустрия 4.0» [1, 2] и цифровой экономики [3]. Рассмотрим класс КФС со встроенными в физическую среду вычислительными компонентами, которые на основе интерфейсов взаимодействия позволяют получить необходимые данные для интеллектуального анализа, направленного на принятие решений при управлении в физической среде с целью ее адаптации и самонастройки. Характерной реализацией этого класса КФС является система промышленного интернета вещей [4].

Проектирование КФС осуществляется в рамках пятиуровневой архитектуры [5]:

– 1-й уровень – интеллектуального соединения, основанный на использовании механизмов организации встраиваемых систем, систем реального времени, распределенных систем и беспроводных сенсорных сетей;

– 2-й уровень – конверсии и интеллектуального анализа данных, обеспечивающий преобразование информации 1-го уровня, поступающей в соответствии с определенными протоколами передачи данных в базы данных, на основании взаимодействия с которыми осуществляется интеллектуальный анализ данных;

– 3-й уровень – киберфизических моделей, обеспечивающий машинно-цифровой интерфейс между компонентами КФС на основе формирования по цифровому следу 2-го уровня цифровых двойников компонентов 1-го уровня;

– 4-й уровень – цифрового познания реальности – направлен на экспертное оценивание сформированной на 2-м и 3-м уровнях информации с целью подтверждения правильности принятия решений при управлении и техническом обслуживании компонентов физической среды;

– 5-й уровень – интеллектуальной автоматической конфигурации, обеспечивающий обратную связь от киберпространства к физической среде путем выполнения корректирующих управляющих решений.

В настоящее время распространен подход к выработке проектных решений на каждом уровне в отдельности и их согласования с использованием типовых средств САПР, ориентированных на параметрический синтез [6, 7].

В [8] предлагается концептуальный подход к построению интегральной САПР КФС, базирующейся на следующих принципах:

1) учет разнообразия реализаций компонентов физической и вычислительной сред и технологий их взаимодействия при принятии управленческих решений;

2) системное объединение в единую структуру компонентов и технологий иерархических уровней архитектуры КФС;

3) учет синергетического эффекта при взаимодействии компонентов и технологий в процессе функционирования;

4) комплексное использование различных видов технологий;

5) характеристика состояния физической и вычислительной сред комплексом показателей эффективности, качества и надежности;

6) охват всего жизненного цикла КФС от проекта до эксплуатации.

Перечисленные принципы указывают на необратимость в первую очередь принятия структурно-компонентных решений. Эти решения связаны с генерацией множества вариантов комбинаций компонентов и технологий и выбора наилучшего на основе оценок проектировщиков.

Так, в [4] показана необходимость учета альтернативных вариантов реализации встраиваемых вычислительных средств на первом уровне архитектуры КФС и программных – на остальных уровнях при создании системы промышленного интернета вещей. Выбор структурно-компонентного решения базируется на экспертных оценках эффективности информационного обмена и управления с использованием граничных и туманных вычислений.

Для повышения эффективности процесса принятия проектных решений предлагается дополнить его процедурами решения формализованных задач оптимизации.

Целью статьи является разработка инвариантного математического обеспечения структурно-компонентного проектирования в САПР КФС с учетом системных связей в рамках многоуровневой архитектуры. Достижение этой цели основано на решении следующих задач:

- формирование оптимизационной модели структурно-компонентного проектирования;
- разработка интерактивной процедуры принятия структурно-компонентного проектного решения на основе оптимизационной модели.

Формирование оптимизационной модели структурно-компонентного синтеза

Оптимизационная модель структурно-компонентного синтеза проектного решения направлена на выбор наилучшего варианта S_l^* из множества S^* вариантов $S_l = \overline{1, S}$ по комплексу показателей $F_i, i = \overline{1, I}$. Для ее построения необходимо [4]:

- определить множество альтернатив, комбинация которых определяет структуру компонентной интеграции в рамках архитектуры КФС;
- определить характер влияния альтернативных решений на значения показателей $F_i, i = \overline{1, I}$;
- сформировать основные составляющие оптимизационных моделей: математические формализации экстремальных и граничных требований к принятию проектных решений. Если к показателю F_i предъявляется экстремальное требование, то он рассматривается в качестве критерия оптимизации, в случае граничного требования – включается в множество ограничений

Начнем с характеристики разнообразия реализаций структурных элементов КФС. Исходя из принципа 1, это множество компонентов (R): физические устройства (R_1), вычислительные устройства (R_2) программные средства (R_3); технологий: информационные (V_1), цифровые (V_2), интеллектуальные (V_3).

Разнообразию каждого из этих множеств в формализованном представлении [9] соответствуют нумерационные множества:

- $r = \overline{1, R}$ – нумерационное множество реализаций компонентов, включающее:
- $r_1 = \overline{1, R_1}$ – нумерационное множество реализаций физических устройств;
- $r_2 = \overline{1, R_2}$ – нумерационное множество реализаций вычислительных устройств;
- $r_3 = \overline{1, R_3}$ – нумерационное множество реализаций программных средств;
- $v = \overline{1, V}$ – нумерационное множество реализаций технологий, включающее:
- $v_1 = \overline{1, V_1}$ – нумерационное множество реализаций инфокоммуникационных технологий;

$v_2 = \overline{1, V_2}$ – нумерационное множество реализаций платформ цифровых технологий;

$v_3 = \overline{1, V_3}$ – нумерационное множество реализаций интеллектуальных технологий.

На основе принципов 2–4 представим множество вариантов компонентной структуры КФС следующим образом [10]

$$SCR \times V, \quad (1)$$

где \times – знак декартова произведения.

Комбинация компонентов и технологий (1) приводит к выделению на каждом уровне $j = \overline{1, 5}$ архитектуры некоторого числа компонентно-технологических узлов w . На 1-м уровне – $n_1 = \overline{1, N_1}$; на 2-м – $n_2 = \overline{1, N_2}$; на 3-м – $n_3 = \overline{1, N_3}$; на 4-м – $n_4 = \overline{1, N_4}$; на 5-м – $n_5 = \overline{1, N_5}$. Разнообразие реализаций компонентов и технологий приводит к разнообразию реализации узлов: на 1-м уровне – $w_{n_1}(r_1, r_2, v_1, v_2) = \overline{1, W_{n_1}}$; на 2-м – $w_{n_2}(r_2, r_3, v_1, v_3) = \overline{1, W_{n_2}}$; на 3-м – $w_{n_3}(r_2, r_3, v_1, v_3) = \overline{1, W_{n_3}}$; на 4-м – $w_{n_4}(r_1, r_3, v_1, v_3) = \overline{1, W_{n_4}}$; на 5-м – $w_{n_5}(r_1, r_2, v_2, v_3) = \overline{1, W_{n_5}}$.

Определенная реализация узла характеризуется набором показателей [6]:

$$f_{iw_{n_1}}, f_{iw_{n_2}}, f_{iw_{n_3}}, f_{iw_{n_4}}, f_{iw_{n_5}}, i = \overline{1, I}. \quad (2)$$

Построение оптимизационной модели основывается на возможности вычисления по значениям (2) значений показателей $F_i, i = \overline{1, I}$. Для конкретизации вычислительной операции разделим показатели $F_i, i = \overline{1, I}$ на 3 группы.

К первой группе отнесем надежность и стоимость, которые вычисляются для всей КФС в целом:

– надежность (вероятность безотказного функционирования КФС)

$$P = \prod_{j=1}^5 \prod_{n_j=1}^{N_j} P_{wn_j}, \quad (3)$$

– стоимость реализации КФС

$$C = \sum_{j=1}^5 \sum_{n_j=1}^{N_j} C_{wn_j}, \quad (4)$$

где P_{wn_j} – вероятность безотказной работы функционирования n_j -го узла при реализации w_{n_j} ; C_{wn_j} – стоимость n_j -го узла при реализации w_{n_j} .

Ко второй группе отнесем показатели, вычисляемые для некоторых цифровых нитей $g = \overline{1, G}$, позволяющих интегрировать данные для передачи и преобразования информации от 1-го уровня до 5-го с обратной связью на 1-й уровень: при решении определенной задачи управления:

– трудоемкость вычислительного процесса

$$T_g = \sum_{j=1}^5 t_{wn_jg}, \quad (5)$$

где t_{wn_jg} – трудоемкость вычислений в n_j -м узле при реализации w_{n_j} в g -й цифровой нити;

– точность вычислений при случайных отклонениях в узлах цифровой нити от номинальных значений путем вычисления дисперсии отклонения [11]

$$D_g = \sum_{j=1}^5 A_j^2 D_{wnjg} + 2 \sum_{\substack{j_1=1 \\ j \neq j_1}}^5 A_j A_{j_1} r(w_{njg}, w_{nj_1g}) \sigma(w_{njg}) \sigma(w_{nj_1g}), \quad (6)$$

где A_j – коэффициент чувствительности, характеризующий влияние функционирования узла w_{nj} на качество функционирования g –й цифровой нити; $r(w_{njg}, w_{nj_1g})$ – коэффициент корреляции, характеризующий статистическую зависимость случайных отклонений в узлах w_{njg} и w_{nj_1g} ; $\sigma(w_{nj_1g})$ – среднеквадратичное отклонение случайных изменений в узле w_{njg} ; D_{wnjg} – дисперсия случайных отклонений в узле w_{njg} .

Показатели третьей группы связаны с принципом 6. Ориентация построения интегрированной САПР КФС для всего жизненного цикла системы, в том числе этапа эксплуатации требует учета влияния случайных изменений в узлах каждого уровня, связанных с влиянием дестабилизирующих воздействий окружающей среды: обратимых и необратимых (старение).

В [11] показано, что показателем, характеризующим стабильность функционирования, является величина дисперсии случайных обратимых отклонений и случайный процесс необратимых изменений, которые вычисляются аналогично (6):

$$D_j^{ob} = \sum_{n_j=1}^{N_j} A_{n_j}^2 D_{wnj}^{ob} + 2 \sum_{\substack{n_{1j}=1 \\ n_j \neq n_{1j}}}^{N_j} A_{n_j} A_{n_{1j}} r(w_{n_j}, w_{n_{1j}}) \sigma^{ob}(w_{n_j}) \sigma^{ob}(w_{n_{1j}}), \quad (7)$$

где A_{n_j} – коэффициент чувствительности, характеризующий влияние узла w_{n_j} на стабильное функционирование в рамках жизненного цикла j -го уровня; D_j^{ob} – дисперсия отклонений при обратимых изменениях в узлах j -го уровня; D_{wnj}^{ob} – соответственно дисперсия и среднеквадратичное отклонение при обратимых изменениях в узле w_{nj} .

$$D_j^c = \sum_{n_j=1}^{N_j} A_{n_j}^2 D_{wnj}^c + 2 \sum_{\substack{n_{1j}=1 \\ n_j \neq n_{1j}}}^{N_j} A_{n_j} A_{n_{1j}} r(w_{n_j}, w_{n_{1j}}) \sigma^c(w_{n_j}) \sigma^c(w_{n_{1j}}), \quad (8)$$

где D_j^c – дисперсное отклонение при необратимых изменениях (старение) в узлах j -го уровня; D_{wnj}^c , $\sigma^c(w_{n_j})$ – соответственно дисперсия и среднеквадратичное при необратимых изменениях (старении) в узле w_{nj} .

Перейдем к формированию оптимизационной модели структурно-компонентного проектирования.

Представим альтернативы в выборе реализаций узлов w_{nj} с помощью следующих оптимизируемых переменных:

$$x_{wnj} = \begin{cases} 1, & \text{если выбирается } w_{nj} \text{ реализация узла} \\ 0, & \text{в противном случае, } w_{nj} = \overline{1}, \overline{W_{nj}}, n_j = \overline{1}, \overline{N_j}, j = \overline{1, 5}. \end{cases} \quad (9)$$

Главным показателем структурно-компонентного проектирования КФС является надежность ее функционирования (3) [6]. Максимизацию значения P будем рассматривать в качестве критерия оптимизации. На остальные показатели (4)–(8) экспертным путем [12] устанавливаются граничные требования: $C, T_g, D_g, D_j^{ob}, D_j^c$.

Кроме того, должны выполняться требования к оптимизируемым переменным (9). В совокупности они образуют множество ограничений, которое в оптимизационной модели объединяется с критерием оптимизации.

Тогда имеем следующую оптимизационную модель булевого программирования

$$\begin{aligned}
 & \prod_{j=1}^5 \prod_{n_j=1}^N \prod_{W_{n_j g=1}}^{W_{n_j}} P_{wn_j} x_{W_{n_j}} \rightarrow \max, \\
 & \sum_{j=1}^5 \sum_{n_j=1}^N \sum_{W_{n_j g=1}}^{W_{n_j}} c_{wn_j} x_{wn_j} \leq C, \\
 & \sum_{j=1}^5 \sum_{n_j=1}^{N_j} \sum_{W_{n_j g=1}}^{W_{n_j g}} t_{wn_j g} x_{wn_j} \leq T_g, g = \overline{1, G}, \\
 & \sum_{j=1}^5 \sum_{n_j=1}^{N_j} \sum_{W_{n_j g=1}}^{W_{n_j g}} A_j^2 D_{wn_j g} x_{wn_j} + \sum_{\substack{j_1=1 \\ j \neq j_1}}^5 \sum_{W_{n_j g=1}}^{W_{n_j g}} \sum_{W_{n_1 j g=1}}^{W_{n_1 j g}} \times \\
 & \quad \times A_j A_{j_1} r(w_{n_j g}, w_{n_1 j g}) \sigma(w_{n_j g})(w_{n_1 j g}) x_{w_j} \leq D_g, g = \overline{1, G}, \quad (10) \\
 & \sum_{n_j=1}^{N_j} \sum_{W_{n_j g=1}}^{W_{n_j g}} A_{n_j}^2 D_{wn_j}^{o6} x_{wn_j} + 2 \sum_{\substack{n_{1j}=1 \\ n_j \neq 1}}^{N_j} \sum_{W_{n_j g=1}}^{W_{n_j g}} \times \\
 & \quad \times A_{n_j} A_{n_{1j}} r(w_{n_j}, w_{n_{1j}}) \sigma^{o6}(w_{n_j}) \sigma^{o6}(w_{n_{1j}}) x_{wn_j} \leq D_j^{o6}, j = 1, 5, \\
 & \sum_{n_j=1}^{N_j} \sum_{W_{n_j g=1}}^{W_{n_j g}} A_{n_j}^2 D_{wn_j}^c x_{wn_j} + 2 \sum_{\substack{n_{1j}=1 \\ n_j \neq 1}}^{N_j} \sum_{W_{n_j g=1}}^{W_{n_j g}} \times \\
 & \quad \times A_{n_j} A_{n_{1j}} r(w_{n_j}, w_{n_{1j}}) \sigma^{o6}(w_{n_j}) \sigma^c(w_{n_{1j}}) x_{wn_j} \leq D_j^{o62}, j = 1, 5, \\
 & x_{wn_j} = \begin{cases} 1, & w_{n_j} = \overline{1, W_{n_j}}, n_j = \overline{1, N_j}, j = \overline{1, 5}. \\ 0, & \end{cases}
 \end{aligned}$$

Далее рассмотрим, каким образом на основе оптимизационной модели (10) построить интерактивную процедуру принятия структурно-компонентного проектного решения в САПР КФС.

Интерактивная процедура принятия структурно-компонентного проектного решения

Интерактивную процедуру структурно-компонентного проектирования в САПР КФС предлагается построить в экспертно-виртуальной среде принятия решений [12] на основе реализации следующих этапов:

- переход от оптимизационной задачи (10) к эквивалентной задаче, объединяющей экстремальное требование и $m = \overline{1, M}$ граничных требований в аддитивную функцию;
- инициализация процесса итерационного рандомизированного поиска оптимального решения путем автоматической генерации вариантов решения эквивалентной оптимизационной задачи;
- экспертное оценивание параметров аддитивной функции эквивалентной оптимизационной задачи в процессе итерационного поиска и окончательного варианта решения после его останова в интерактивном режиме с проектировщиком.

Эквивалентную задачу оптимизации представим как максимизацию по альтернативным переменным аддитивной функции [11]:

$$\Phi(x_{wn_j}) = \varphi(x_{wn_j}) + \sum_{m=1}^M y_m (b_m - \varphi_m(x_{wn_j})) \rightarrow \max_{x_{wn_j}}, \quad (11)$$

где $\varphi(x_{wn_j}), \varphi_m(x_{wn_j}), m = \overline{1, M}$ – соответственно функции (3)–(8); y_m, b_m – параметры функции (11);

$$0 \leq y_m \leq 1, m = \overline{1, M}, \sum_{m=1}^M y_m = 1,$$

$$b_1 = C, \overline{b_2, b_{2+G}} = T_g, g = \overline{1, G}, \overline{b_{3+G}, b_{3+2G}} = D_g, g = \overline{1, G},$$

$$\overline{b_{4+2G}, b_{4+2G+5}} = D_g^{oo}, j = \overline{1, 5}, \overline{b_{5+2G+5}, b_{5+2G+10}} = D_j^c, j = \overline{1, 5}.$$

Для поиска максимума функции (11) организуется итерационный процесс с номерами итераций $k = 1, 2, \dots$. Значения параметров $y_m, m = \overline{1, M}$ определяются на каждой k -й итерации синхронно с определением значений оптимизируемых переменных в интерактивном режиме с участием эксперта. При необходимости эксперт имеет возможность корректировать значения параметров $b_m, m = \overline{1, M}$ по отношению к тем значениям, которые он задает на первой итерации $b_m^1, m = \overline{1, M}$.

Генерация вариантов решений осуществляется в автоматическом режиме рандомизированного поиска за счет замены булевых переменных x_{wnj} на случайные булевые переменные \tilde{x}_{wnj} в соответствии со следующим распределением

$$p_{x_{wnj}} = P(\tilde{x}_{wnj} = 1), q_{x_{wnj}} = P(\tilde{x}_{wnj} = 0), p_{x_{wnj}} + q_{x_{wnj}} = 1. \quad (12)$$

На первом этапе принимается равномерное распределение (12) $p_{x_{wnj}}^1 = 0,5, q_{x_{wnj}}^1 = 0,5$, которое далее корректируется путем вычисления значения (11) Φ_1 при $x_{w_1nj} = 1$ и случайных значениях $\tilde{x}_{wnj}, w_{nj} \neq w_{1nj}$, а затем Φ_2 при $x_{w_1nj} = 0$ и случайных значений $\tilde{x}_{wnj}, w_{nj} \neq w_{1nj}$. Случайные значения булевых переменных определяются из условия

$$\tilde{x}_{wnj} = \begin{cases} 1, & \text{если } p_{x_{wnj}} \leq \xi \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases}, \quad (13)$$

где ξ – автоматически генерируемое псевдослучайное число, равномерно распределенное на интервале $[0, 1]$.

Номер реализации узла w_{1nj} определяется тоже автоматически на основе распределения случайной дискретной величины $\tilde{x}_{w_{nj}}, w_{nj} = \overline{1, W_{nj}}$ в соответствии с распределением

$$p_{w_{nj}} = \overline{1, W_{nj}}, \sum_{w_{nj}=1}^{W_{nj}} p_{w_{nj}} = 1, p_{w_{nj}}^1 = \frac{1}{\sum_{j=1}^5 \sum_{n_j=1}^{N_j} W_{nj}}. \quad (14)$$

Сравнение значений Φ_1^k и Φ_2^k позволяет определить вариацию $\Delta\Phi^k = \Phi_1^k - \Phi_2^k$, на основе которой корректируются распределения (12), (14) для поиска на $(k + 1)$ -й итерации [12].

Номер параметра $y_m, m = \overline{1, M}$ для коррекции на k -й итерации осуществляется путем выбора наименьшего значения $(b_m - \varphi_m(x_{wnj}^k)) < 0$ при вычислении функции Φ_1^k, Φ_2^k . Пусть этот номер m_1 . Тогда корректируются значения параметров для поиска на $(k + 1)$ -й итерации

$$y_m^{k+1} = \frac{y_m^k + \gamma^k \chi_m}{\gamma^k \chi_m}, m = \overline{1, M}, \quad (15)$$

где γ^k – корректирующий коэффициент, который определяется экспертом путем выбора градаций лингвистической переменной < необходимо уменьшить $(b_{m_1} -$

$\varphi_{m_1}(x_{wnjg}^k) >$: сильно, существенно, несколько, немного, мало и определения значения функции принадлежности [12];

$$\chi_m = \begin{cases} 1, & \text{если } m = m_1 \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases}$$

Для оценки необходимости изменения экспертом параметра b_m подсчитывается за k итерации число нарушений $u_m, m = \overline{1, M}$ граничных требований при определении функций φ_1, φ_2 , то есть $(b_{m_1} - \varphi_m(x_{wnj}^k)) < 0$, и выбирается номер m_2 с наибольшим значением u_m . Коррекция значения параметра b_{m_2} при сохранении неизменными других параметров $b_m, m = \overline{1, M}, m \neq m_2$ осуществляется следующим образом

$$b_{m_2}^{k+1} = b_{m_2}^k + \varepsilon^k (b_{m_2}^k - \varphi_{m_2}(x_{wnj}^k)), \quad (16)$$

где ε^k — определяется путем экспертного оценивания градаций лингвистической переменной аналогично определению γ^k .

Для останова итерационного процесса поиска на K -й итерации используем следующее условие

$$(\Phi^K - \Phi^{K-1}) \leq \varepsilon, \quad (17)$$

где $\varepsilon > 0$ — малое число, задаваемое экспертом. В случае выполнения (17) на основе вероятностей (12), вычисленных на K -й итерации, определяются значения случайных переменных \hat{x}_{wnj}^* . Поскольку условие (13) приводит к случайным реализациям при повторении генерации \hat{x}_{wnj}^* , целесообразно провести $h = 3 \div 5$ параллельных опытов \hat{x}_{wnjh}^* . Далее при $\hat{x}_{wnjh}^* = 1$ определяется $w_{nj}^* \in \overline{1, W_{nj}}$ и вычисляются значения показателей $\varphi_h, \varphi_{mh}, m = \overline{1, M}$. Проектировщик анализирует h вариантов решений и выбирает окончательное решение

$$w_{nj} \in \overline{1, W_{nj}}, n_j = \overline{1, N_j}, j = 1, 5. \quad (18)$$

Решение (18) является результатом структурно-компонентного проектирования в САПР КФС с использованием оптимизационной модели (10).

Заключение

С целью повышения эффективности, качества и надежности функционирования КФС при автоматизации проектирования перейти от принятия локальных проектных решений на каждом уровне архитектуры к принятию решений, ориентированных на решение с применением интегрированных САПР. В этом случае первоочередные разработки требуется поправить на создание инвариантного математического обеспечения автоматизированного структурно-компонентного проектирования. Распространенной в практике КФС, при автоматизации проектирования которой следует использовать такой подход, является система промышленного интернета вещей.

Инвариантное математическое обеспечение процесса структурно-компонентного проектирования для интегрированной САПР КФС базируется на формализации вычисления критерия оптимизации и функций ограничений в зависимости от значений булевых оптимизируемых переменных, характеризующих альтернативные варианты реализаций компонентов физической и виртуальной сред, и формировании оптимизационной модели булевого программирования.

Для построения интерактивной процедуры принятия структурно-компонентных проектных решений следует выполнить этапы, направленные на агрегацию

экстремального и граничных требований в единую эквивалентную оптимизационную модель, автоматическую генерацию за счет направленного случайного перебора значений альтернативных переменных с вычислением вариации эквивалентной оптимизируемой функции, организацию итерационного процесса, управляемого с использованием формализованных и экспертных оценок выбора проектировщиком окончательного проектного решения на ограниченном множестве альтернатив.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Park K.-J., Zheng R., Liu X. Cyber-physical Systems: Milestones and Research Challenges. *Computer Communications*. 2012;36(1):1–7. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2012.09.006>
2. Куприяновский В.П., Намиот Д.Е., Синягов С.А. Кибер-физические системы как основа цифровой экономики. *International Journal of Open Information Technologies*. 2016;4(2):18–25.
Kupriyanovsky V., Namiot D., Sinyagov S. Cyber-physical systems as a base for digital economy. *International Journal of Open Information Technologies*. 2016;4(2):18–25. (In Russ.).
3. Гумеров Э.А., Алексеева Т.В. Киберфизические системы промышленного интернета вещей. *Прикладная информатика*. 2021;16(2):72–81. <https://doi.org/10.37791/2687-0649-2021-16-2-72-81>
Gumerov E.A., Alekseeva T.V. Cyber-physical systems of the industrial Internet of things. *Prikladnaya informatika = Journal of Applied Informatics*. 2021;16(2):72–81. (In Russ.). <https://doi.org/10.37791/2687-0649-2021-16-2-72-81>
4. Lee J., Bagheri B., Kao H.-A. A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*. 2015;3:18–23. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001>
5. Ватаманюк И.В., Левоневский Д.К., Малов Д.А., Яковлев Р.Н., Савельев А.И. *Модели и способы взаимодействия пользователя с киберфизическим интеллектуальным пространством*. Санкт-Петербург: Издательство Лань; 2019. 176 с.
Vatamanyuk I.V., Levonevskii D.K., Malov D.A., Yakovlev R.N., Savel'ev A.I. *Modeli i sposoby vzaimodeistviya pol'zovatelya s kiberfizicheskim intellektual'nyim prostranstvom*. Saint Petersburg: Lan Publishing House; 2019. 176 p. (In Russ.).
6. Ронжин А.Л., Бизин М.М., Солёный С.В. Математические модели и средства многомодального взаимодействия с робототехническими и киберфизическими системами. *Математические методы в технике и технологиях*. 2016;(8):107–111.
Ronzhin A.L., Bizin M.M., Solenyi S.V. Matematicheskie modeli i sredstva mnogomodal'nogo vzaimodeistviya s robototekhnicheskimi i kiberfizicheskimi sistemami. *Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiyakh = Mathematical Methods in Technics and Technologies*. 2016;(8):107–111. (In Russ.).
7. Глущенко В.В. Концептуальный подход к проектированию САПР киберфизических систем. *Современные научные исследования и инновации*. 2022;(12). URL: <https://web.snauka.ru/issues/2022/12/99391>
Glushchenko V.V. Kontseptual'nyi podkhod k proektirovaniyu SAPR kiberfizicheskikh sistem. *Sovremennye nauchnye issledovaniya i innovatsii = Modern Scientific Researches and Innovations*. 2022;(12). (In Russ.). URL: <https://web.snauka.ru/issues/2022/12/99391>
8. Львович Я.Е. *Многоальтернативная оптимизация: теория и приложения*. Воронеж: Издательство «Кварта»; 2006. 415 с.

- L'vovich Ya.E. *Mnogoal'ternativnaya optimizatsiya: teoriya i prilozheniya*. Voronezh: Izdatel'stvo «Kvarta»; 2006. 415 p. (In Russ.).
9. Месарович М., Такахара Я. *Общая теория систем: математические основы*. Москва: Мир; 1978. 312 с.
Mesarovic M., Takahara Ya. *General Systems Theory: Mathematical Foundations*. Moscow: Mir; 1978. 312 p. (In Russ.).
10. Львович И.Я., Львович Я.Е., Фролов В.Н. *Информационные технологии моделирования и оптимизации. Краткая теория и приложения*. Воронеж: Воронежский институт высоких технологий, ИПЦ «Научная книга»; 2016. 444 с.
L'vovich I.Ya., L'vovich Ya.E., Frolov V.N. *Informatsionnye tekhnologii modelirovaniya i optimizatsii. Kratkaya teoriya i prilozheniya*. Voronezh: Institute of High Technologies, PPC «Nauchnaya Kniga»; 2016. 444 p. (In Russ.).
11. Львович Я.Е., Львович И.Я. *Принятие решений в экспертно-виртуальной среде*. Воронеж: ИПЦ «Научная книга»; 2010. 139 с.
L'vovich Ya.E., L'vovich I.Ya. *Prinyatie reshenii v ekspertno-virtual'noi srede*. Voronezh: PPC «Nauchnaya Kniga»; 2010. 139 p. (In Russ.).
12. Соболев И.М. *Численные методы Монте-Карло*. Москва: Наука; 1973. 312 с.
Sobol' I.M. *Chislennyye metody Monte-Karlo*. Moscow: Nauka; 1973. 312 p. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Львович Игорь Яковлевич, доктор технических наук, профессор, Воронежский институт высоких технологий, Воронеж, Российская Федерация.
e-mail: office@vvt.ru

Igor Ya. Lvovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Voronezh Institute of High Technologies, Voronezh, the Russian Federation.

Львович Яков Евсеевич, доктор технических наук, профессор, Воронежский институт высоких технологий, Воронеж, Российская Федерация.
e-mail: office@vvt.ru

Yakov E. Lvovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Voronezh Institute of High Technologies, Voronezh, the Russian Federation.

Преображенский Андрей Петрович, доктор технических наук, профессор, Воронежский институт высоких технологий, Воронеж, Российская Федерация.
e-mail: app@vvt.ru

Andrey P. Preobrazhenskiy, Doctor of Technical Sciences, Professor, Voronezh Institute of High Technologies, Voronezh, the Russian Federation.

Статья поступила в редакцию 27.03.2024; одобрена после рецензирования 16.05.2024; принята к публикации 23.05.2024.

The article was submitted 27.03.2024; approved after reviewing 16.05.2024; accepted for publication 23.05.2024.