

Многомасштабное моделирование физических явлений и систем (часть II)

Лекции 7

Применение методов поддержки принятия решений для
многокритериальной задачи отбора многомасштабных композиций

Использование методов многомасштабного моделирования – как последовательных, так и параллельных – открывает широкие возможности для изучения процессов и явлений, при анализе которых необходимо учитывать широкий спектр пространственных и/или временных масштабов. К таким явлениям, в частности, относятся сложные гетерогенные процессы, протекающие в многокомпонентных системах, связанных с формированием новых композиционных материалов с заранее заданными свойствами.

В работе [1] представлены основные положения разработанной информационной технологии построения многомасштабных моделей с

1 Abgaryan K.K. *Informacionnaya tekhnologiya postroeniya mnogomasshtabnyh modelej v zadachah vychislitel'nogo materialovedeniya* [Information technology is the construction of multi-scale models in problems of computational materials science]. // «Izdatel'stvo «Radiotekhnika», “Sistemy vysokoj dostupnosti”. 2018. T. 15. № 2. P.9-15.

2. Brodskij YU.I. *Model'nyj sintez i model'no-orientirovannoe programmirovaniye* [Model synthesis and model-oriented programming] – М.: VC RAN, 2013, 142 P.

использованием таких новых понятий, как «базовая модель-композиция» и «многомасштабная композиция». Для создания на их основе программных систем применялся модельно-ориентированный подход, который был развит в работах Ю. И. Бродского [2]. Особенностью изложенной в работе [1] технологии является применение информационных структур, названных базовыми композициями (*БК*), объединяющих данные и методы их обработки. Эти математические объекты ставятся в соответствие базовым математическим моделям, которые используются для решения различных многомасштабных задач. Для описания *БК* задействован теоретико-множественный аппарат, который позволяет передать вычислительную сущность исходных математических моделей. Базовые композиции служат композиционными элементами (объектами), из которых согласно представленной в работе [1] технологии строятся многомасштабные композиции (*МК*) – информационные аналоги многомасштабных моделей, при помощи которых передается содержание многомасштабных вычислительных процессов и явлений.

Далее на базе *МК* строятся сложные иерархические программные системы, применяемые для решения различных прикладных задач, в том числе связанных с созданием новых композиционных материалов.

При решении конкретных задач могут быть построены разные многомасштабные модели, и, естественно, возникает вопрос о сравнении этих моделей, об оценке их эффективности. на этапе предсказательного моделирования предлагается методика сравнения многомасштабных моделей с помощью оценки и отбора соответствующих многомасштабных композиций. Оценка и отбор проводятся с использованием методов поддержки принятия решений при многих критериях качества.

Приведем описание метода построения многомасштабной композиции [1].

Базовую модель-композицию можно представить как объединение основных множеств разного структурного типа:

$$VX_{ij}, MA_{ij}, E_{ij}, \{MA_{ij}^k\}_{k=1}^p \{E_{ij}^k\}_{k=1}^p.$$

Здесь i – номер масштабного уровня, $i = \overline{0, L}$, где L – число рассматриваемых уровней; j – номер базовой модели-композиции на текущем масштабном уровне, $j = \overline{0, N_i}$, N_i – число моделей на i -м уровне; k – номер элементарного процесса BK . Опишем основные множества:

$VX_{ij} = \{V_{ij}, X_{ij}\}$ – множество данных, включающее:

V_{ij} – множество входных данных (внешние характеристики модели),

X_{ij} – множество выходных данных (фазовых переменных и данных – свойств модели);

MA_{ij} – множество методов обработки данных (модели и алгоритмы);

E_{ij} – множество событий, отнесенных к описанию выполняемых в рамках BK элементарных процессов;

$\{MA_{ij}^k\}_{k=1}^p$ – множество реализаций моделей и алгоритмов в зависимости от элементарного процесса p ;

$\{E_{ij}^k\}_{k=1}^p$ – множество реализаций событий по элементарным процессам.

Множество методов обработки данных опишем подробнее.

$$MA_{ij} = \{M_{ij}, A_{ij}\} = \{s_{ij}, f_{ij}, a_{ij}, a_{i,\dots,i^*,j}\}.$$

Множество моделей M_{ij} , входящих в множество MA_{ij} , состоит из статических (s_{ij}) и динамических (f_{ij}) методов обработки. Алгоритмические модели (алгоритмы) a_{ij} , $i = \overline{0, L}$, $j = \overline{1, N_i}$, могут быть специализированными, то есть используемыми только в данной конкретной модели с определенного масштабного уровня, или универсальными, применяемыми в различных моделях с разных масштабных уровней $a_{i,\dots,i^*,j}$.

Определение 1. Под базовой моделью-композицией MC_i^j будем понимать однопараметрическое семейство основных множеств, задействованных в общем вычислительном процессе, разного структурного типа, включая данные (входные и выходные) и методы их обработки:

$$MC_i^j = \langle \{VX_{ij}, MA_{ij}, E_{ij}, \{MA_{ij}^k\}_{k=1}^p, \{E_{ij}^k\}_{k=1}^p\} \rangle.$$

Здесь

$$VX_{ij} = \{V_{ij}, X_{ij}\}, MA_{ij} = \{M_{ij}, A_{ij}\},$$

$$\{MA_{ij}^k\}_{k=1}^p = \{MA_{ij}^1, MA_{ij}^2, \dots, MA_{ij}^p\}, \{E_{ij}^k\}_{k=1}^p = \{E_{ij}^1, E_{ij}^2, \dots, E_{ij}^p\}.$$

Параметром семейства основных множеств служит число элементарных процессов в базовой модели-композиции p . Индексы i и j позволяют идентифицировать MC_i^j на пространственном уровне i по ее номеру j .

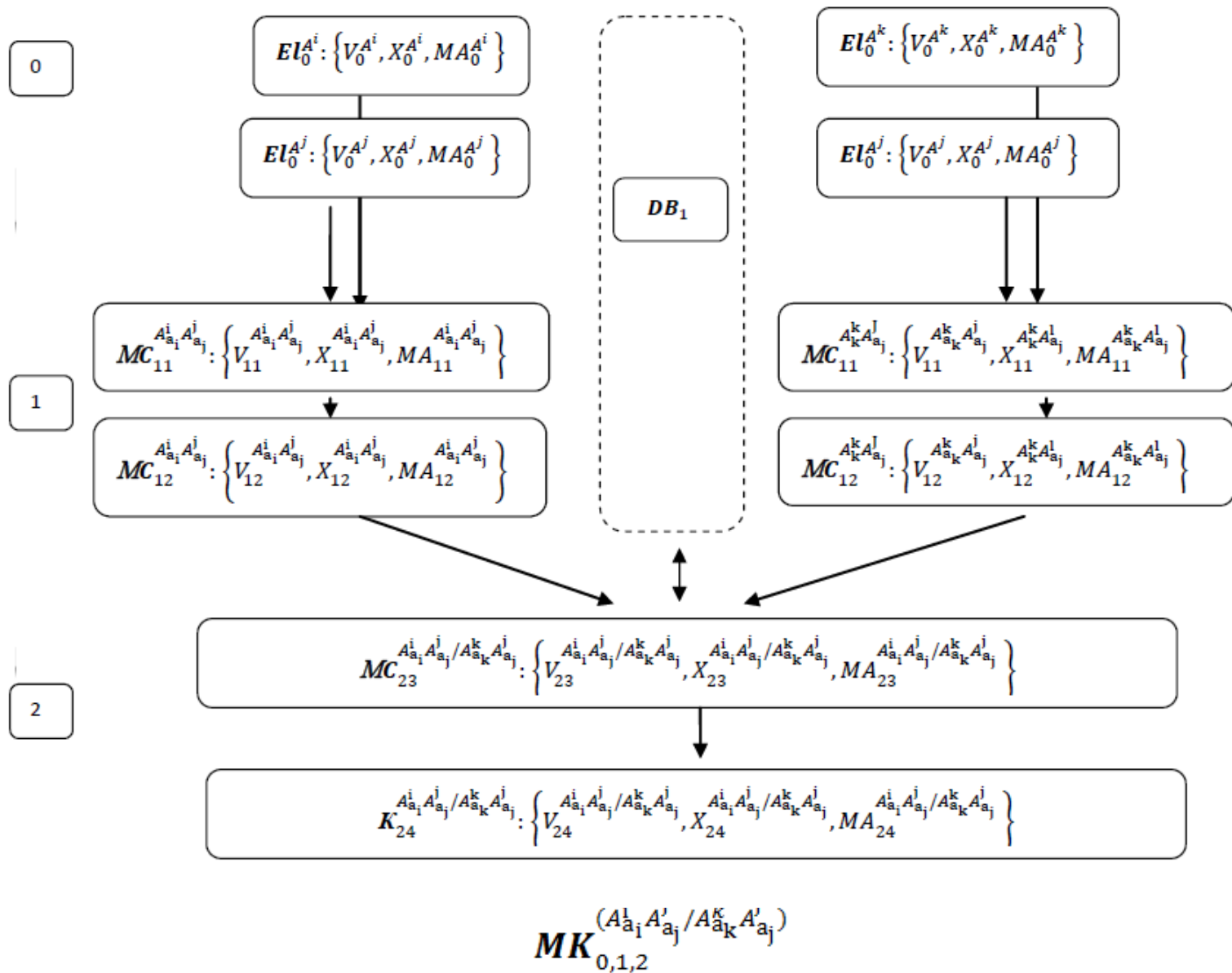
Структура модели-композиции представлена в [1].

Такое представление полностью описывает структуру базовой модели-композиции и задает шаблон, который будет заполняться конкретными данными при создании реальных экземпляров *БК* для решения практических задач математического моделирования.

Далее приведем описание многомасштабной композиции, позволяющее представить информацию, из каких именно моделей-композиций, с каких масштабных уровней она состоит, сколько и каких процессов задействовано в ее работе, каким образом происходит обмен данными между моделями – композициями с разных уровней.

Определение 2. Под многомасштабной композицией (*МК*) будем понимать однопараметрическое семейство, полученное из экземпляров *БК* с разных масштабных уровней за счет объединения в общем вычислительном процессе их основных множеств разного структурного типа, включая данные (входные и выходные) и методы их обработки.

Многомасштабная композиция для расчета эффективного коэффициента теплопроводности наногетероструктуры



Многомасштабную композицию будем обозначать через $MK_{i,i^*,\dots,i^{***}}^{i,j;i^*,j^*,\dots,i^{**},j^{***}}$.
Здесь i, i^*, \dots, i^{***} – номера масштабных уровней, задействованных в данной MK , а j, j^*, \dots, j^{***} – номера BK на конкретном масштабном уровне. В определенном смысле $MK_{i,i^*,\dots,i^{***}}^{i,j;i^*,j^*,\dots,i^{**},j^{***}}$ схожа с BK , так как представляет собой объединение основных множеств разных структурных типов, связанных общим вычислительным процессом. Ее структуру можно представить набором таблиц, соответствующих экземплярам входящих в нее BK , расположенных в определенном порядке, соответствующем иерархии масштабов, задействованных в ней.

Пусть на i -м масштабном уровне имеется экземпляр MC_i^j и на i^* -м масштабном уровне – экземпляр $MC_{i^*}^{j^*}$. Здесь j, j^* – номера базовых моделей-композиций на масштабных уровнях i и i^* соответственно. Составим многомасштабную композицию $MK_{i,i^*}^{ij;i^*j^*}$ из двух экземпляров базовых композиций MC_i^j и $MC_{i^*}^{j^*}$. Основными множествами, как и в случае создания

композиции, будут

$$V_{ij} \cup V_{i^*j^*}, X_{ij} \cup X_{i^*j^*}, MA_{ij} \cup MA_{i^*j^*}, E_{ij} \cup E_{i^*j^*}, \{MA_{ij}^k\}_{k=1}^p \cup \\ \{MA_{i^*j^*}^k\}_{k=1}^{p^*}, \{E_{ij}^k\}_{k=1}^p \cup \{E_{i^*j^*}^k\}_{k=1}^{p^*}.$$

Здесь p и p^* обозначают число процессов в базовых композициях MC_i^j и $MC_{i^*}^{j^*}$ соответственно.

Многомасштабную композицию можно описать следующим образом:

$$MK_{i,i^*}^{ij;i^*j^*} = \langle \{ V_{ij} \cup V_{i^*j^*}, X_{ij} \cup X_{i^*j^*}, MA_{ij} \cup MA_{i^*j^*}, E_{ij} \cup E_{i^*j^*}, \{MA_{ij}^k\}_{k=1}^p \cup \\ MA_{i^*j^*}^k\}_{k=1}^{p^*}, \{E_{ij}^k\}_{k=1}^p \cup \{E_{i^*j^*}^k\}_{k=1}^{p^*} \rangle.$$

Число процессов в MK равно сумме $p + p^*$.

Связующими элементами между вычислительными моделями с разных масштабных уровней, входящими в $МК$, служат глобальные параметры, которые играют основную роль при передаче информации между масштабными уровнями.

При составлении многомасштабной композиции $МК_i^j = МК_{i^*,i^{**}}^{i^*,j^*;i^{**},j^{**}}$ из $МС_{i^*}^{j^*}$ и $МС_{i^{**}}^{j^{**}}$ под глобальными параметрами $\check{v} \in VX_{ij} = \{V_{i^*j^*} \cup V_{i^{**}j^{**}}, X_{i^*j^*} \cup X_{i^{**}j^{**}}\}$ будем понимать элементы (параметры), относящиеся к множеству $X_{i^*j^*} \cap V_{i^{**}j^{**}}$, образованному в результате пересечения двух множеств выходных данных $X_{i^*j^*}$ (с нижнего масштабного уровня) и входных данных $V_{i^{**}j^{**}}$ с верхнего масштабного уровня:

$$X_{i^*j^*} \cap V_{i^{**}j^{**}} = \{\check{v}: (\check{v} \in X_{i^*j^*}) \cap (\check{v} \in V_{i^{**}j^{**}}), \check{v} \in VX_{ij}\}.$$

Кроме того, при построении многомасштабной композиции используются базовые модели-композиции специального вида, обозначенные DB_i , i – номер масштабного уровня, $i = \overline{0, L}$, где L – число рассматриваемых уровней. Они требуются для хранения и передачи дополнительной информации, необходимой для работы BK соответствующего уровня.

Описанная технология многомасштабного моделирования может быть применена для решения различных задач структурной оптимизации, в частности для задач материаловедения при моделировании свойств полупроводниковых наносистем [3–5].

При компьютерной реализации разработанной концепции многомасштабного моделирования требуется построение различных информационных моделей – многомасштабных композиций. В данной работе на этапе предсказательного моделирования предлагается методика сравнения многомасштабных моделей с помощью оценки и отбора соответствующих MK , основанная на методах принятия решений в многокритериальных ситуациях.

В соответствии с принятой терминологией каждую MK , позволяющую решить поставленную задачу моделирования, назовем альтернативой. Можно проследить связь между требуемыми свойствами исследуемого объекта и оценкой задействованных в ходе моделирования многомасштабных композиций, используемых для анализа этих свойств.

Как показал анализ задачи моделирования, на первом этапе для оценки MK можно выбрать, например, следующие четыре критерия:

1. Вычислительная точность: критерий K_1 с числовой шкалой $E_1 \subseteq R$, R – множество действительных чисел.
2. Число арифметических операций: критерий K_2 с числовой шкалой $E_2 \subseteq R$.
3. Универсальность (возможность использования для скрининга): критерий K_3 со шкалой E_3 , состоящей из двух значений.
4. Соотношение собственного программного обеспечения и пакетов прикладных программ: критерий K_4 с числовой шкалой $E_4 \subseteq R$.

5. Число задействованных масштабных уровней: критерий K_5 с числовой шкалой $E_5 \subseteq R$.

Этот набор критериев не является полным, однако удовлетворяет основным требованиям, предъявляемым к перечню критериев, и основан на информации о смысле поставленной задачи [6]. Действительно, набор критериев $\{K_1, \dots, K_5\}$ соответствует существу поставленной задачи, минимален (в том смысле, что различные критерии характеризуют различные свойства исходов), критерии измеримы и операциональны (каждый критерий имеет однозначный и ясный смысл, характеризует определенное свойство исходов).

Таким образом, каждая многомасштабная композиция, позволяющая решить задачу моделирования, характеризуется пятимерным вектором $x = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)$, где x_i – значение, приписываемое данной альтернативе по критерию K_i , $i = 1, \dots, 5$. Используя известные процедуры [7], можно привести критерии к однородным шкалам.

Для выбора наилучших альтернатив можно сравнивать их по векторному отношению доминирования и рассмотреть парето-оптимальные варианты. Однако дополнительная информация о критериях и свойствах решений может сузить множество парето-оптимальных вариантов. Эта информация предоставляется экспертами, работающими в данной предметной области, в коалиции с аналитиком, специалистом в области принятия решений. Затем в зависимости от конкретного вида полученной информации применяется математически обоснованный метод выбора наилучших альтернатив в многокритериальной ситуации [6, 7].

Распространенный подход к решению задачи оценки и выбора наилучшей альтернативы, одновременно учитывающий дополнительную информацию о критериях и свойствах альтернатив, содержится в построении числовой функции ценности.

Пусть S – множество альтернатив и считается, что при заданных критериях K_1, \dots, K_n каждая альтернатива $s \in S$ имеет векторную оценку $x = (x_1, \dots, x_n)$, где $x_i = K_i(s)$ – значение альтернативы s по критерию K_i , $i = 1, \dots, n$.

Рассмотрим множество $X = \{x | x = (x_1, \dots, x_n), x_i = K_i(s), i = 1, \dots, n; s \in S\}$ – множество векторных оценок альтернатив из множества S . Пусть $a, b \in S$ и $x = (x_1, \dots, x_n)$ – векторная оценка альтернативы a ; $y = (y_1, \dots, y_n)$ – векторная оценка альтернативы b .

Числовая функция ценности $f: X \rightarrow R$ обладает следующим свойством: для любых двух альтернатив a и b : $f(x_1, \dots, x_n) \geq f(y_1, \dots, y_n) \Leftrightarrow$ альтернатива a не менее предпочтительна, чем b . Если известна функция ценности, то поиск оптимального варианта сводится к задаче нахождения аргумента максимума функции ценности на множестве X :

$$x^* = \operatorname{argmax} f(x), x \in X.$$

При использовании эвристических методов построения функции ценности используется метод обобщенного критерия, заключающийся в сведении многокритериальной задачи к однокритериальной, набор критериев «сворачивается» в числовую функцию, которая и будет служить функцией ценности.

Обычно функцию ценности строят в аддитивном виде как сумму функций ценности по каждому критерию с некоторыми весовыми коэффициентами $\alpha_1, \dots, \alpha_n$:

$$f(x_1, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot f_i(x_i),$$

где f_i – функция ценности критерия K_i .

Как известно, построение функции ценности в аддитивном виде правомерно только в случае взаимной независимости критериев [8]. Проверку взаимной независимости рассматриваемых критериев K_1, \dots, K_5 можно провести с учетом результатов Леонтьева–Гормана: если любая пара критериев $\{K_i, K_j\}$, где $i, j = 1, \dots, 5$, не зависит по предпочтению от остальных двух критериев, то все критерии K_1, \dots, K_5 взаимно независимы по предпочтению. Построение функции ценности проводится известными методами, описанными, в частности, в работе [6].

Для решения конкретной практической задачи с использованием многомасштабной модели рассматривается определенный набор многомасштабных композиций. Весовые коэффициенты α_i , $i = 1, \dots, 5$, и конкретный вид функции ценности определяются содержательным смыслом задачи. Для их нахождения проводится поэтапная процедура, опирающаяся в числе прочего на интерактивный процесс диалога между специалистом в данной прикладной области и аналитиком, формирующим процедуру опроса [6, 9].

Полученные оценки позволяют сравнить по предпочтительности многомасштабные композиции и отобрать для дальнейших исследований оптимальный набор MK .

Другие возможные подходы к решению задачи многокритериального выбора MK , в том числе не требующие нахождения весовых коэффициентов, рассмотрены в [7, 9, 10].

В качестве иллюстрации возможности выбора наилучшей альтернативы при наличии дополнительной информации о критериях оценки многомасштабных композиций рассмотрим модельный пример.

Для исследования электронных и структурных свойств тонких пленок InN (GaN) на кремниевых подложках [1] можно построить условно 5 вариантов многомасштабных композиций, которые реализуются с применением вычислительных средств ЦКП ФИЦ ИУ РАН. Обозначим их как

$$MK_{0,1,3}^{(A_{a_i}^i A_{a_j}^j / A_{a_k}^k)}, \widetilde{MK}_{0,1,3}^{(A_{a_i}^i A_{a_j}^j / A_{a_k}^k)}, \widetilde{MK}_{0,1,3,4}^{(A_{a_i}^i A_{a_j}^j / A_{a_k}^k)}, \widetilde{\widetilde{MK}}_{0,1,3}^{(A_{a_i}^i A_{a_j}^j / A_{a_k}^k)}, \widetilde{\widetilde{MK}}_{0,1,3,4}^{(A_{a_i}^i A_{a_j}^j / A_{a_k}^k)}.$$

В работе [1] представлена структура многомасштабной композиции $МК_{0,1,3}^{(A_{a_i}^i A_{a_j}^j / A_{a_k}^k)}$. Указаны экземпляры базовых композиций и последовательность их использования в вычислительном процессе [1].

Рассматриваемые многомасштабные композиции характеризуются следующими особенностями:

- $МК_{0,1,3}^{(A_{a_i}^i A_{a_j}^j / A_{a_k}^k)}$ – задействованы 3 масштабных уровня, один пакет (VASP),

$МК$ может применяться для скрининга (универсальна), число арифметических операций (условно) 10 млн, точность расчетов 0,1;

- $\widetilde{МК}_{0,1,3}^{(A_{a_i}^i A_{a_j}^j / A_{a_k}^k)}$ – задействованы 3 масштабных уровня, два пакета (VASP и

Material Studio), $МК$ может применяться для скрининга (универсальна), число арифметических операций (условно) 15 млн, точность расчетов 0,15;

- $\widetilde{МК}_{0,1,3,4}^{(A_{a_i}^i A_{a_j}^j / A_{a_k}^k)}$ – задействованы 4 масштабных уровня, три пакета (VASP

Material Studio, SRIM), $МК$ может применяться для скрининга (универсальна), число арифметических операций (условно) 30 млн, точность расчетов 0,01;

- $\widetilde{MK}_{0,1,3}^{(A_{a_i}^i A_{a_j}^j / A_{a_k}^k)}$ – задействованы 3 масштабных уровня, три пакета (VASP, Material Studio, SRIM), не универсальна, число арифметических операций (условно) 30 млн, точность расчетов 0,015;
- $\widetilde{MK}_{0,1,3,4}^{(A_{a_i}^i A_{a_j}^j / A_{a_k}^k)}$ – задействованы 4 масштабных уровня, один пакет (VASP), не универсальна, число арифметических операций (условно) 20 млн, точность расчетов 0,01.

Пусть на этапе предсказательного моделирования следует сравнить эти пять возможных MK , оценки которых по критериям K_1, \dots, K_5 приведены в табл. 1, и выбрать лучшие с точки зрения лица, принимающего решение, альтернативы.

Таблица 1 Оценки многомасштабных композиций по критериям

№ критерия	$(A_{a_i}^i A_{a_j}^j / A_{a_k}^k)$ $МК_{0,1,3}$	$(A_{a_i}^i A_{a_j}^j / A_{a_k}^k)$ $\widetilde{МК}_{0,1,3}$	$(A_{a_i}^i A_{a_j}^j / A_{a_k}^k)$ $\widetilde{МК}_{0,1,3,4}$	$(A_{a_i}^i A_{a_j}^j / A_{a_k}^k)$ $\widetilde{\widetilde{МК}}_{0,1,3}$	$(A_{a_i}^i A_{a_j}^j / A_{a_k}^k)$ $\widetilde{\widetilde{МК}}_{0,1,3,4}$
1	до 0,1	до 0,15	до 0,01	до 0,015	до 0,01
2	10 млн	15 млн	30 млн	25 млн	30 млн
3	Да	Да	Да	Нет	Нет
4	75% собственного прогр. обеспеч.	50%	15%	15%	75%
5	3 уровня	3 уровня	4 уровня	3 уровня	4 уровня

Из содержательного смысла задачи следует, что значения по критериям K_1 , K_2 следует минимизировать, а по критериям K_3 , K_4 и K_5 – максимизировать.

В табл. 2 представлены оценки по критериям K_1, \dots, K_5 этих пяти альтернатив (т. е. пяти рассматриваемых MK), полученные после линейного преобразования шкал, сохраняющего упорядочение по предпочтению для каждого критерия. При этом лучшему значению соответствует более высокая оценка.

Таблица 2 Оценки многомасштабных композиций по десятибалльной шкале

№ критерия	$MK_{0,1,3}^{(A_{a_i}^i A_{a_j}^j / A_{a_k}^k)}$	$\widetilde{MK}_{0,1,3}^{(A_{a_i}^i A_{a_j}^j / A_{a_k}^k)}$	$\widetilde{MK}_{0,1,3,4}^{(A_{a_i}^i A_{a_j}^j / A_{a_k}^k)}$	$\widetilde{\widetilde{MK}}_{0,1,3}^{(A_{a_i}^i A_{a_j}^j / A_{a_k}^k)}$	$\widetilde{\widetilde{MK}}_{0,1,3,4}^{(A_{a_i}^i A_{a_j}^j / A_{a_k}^k)}$
1	2	1	10	9	10
2	10	8	2	4	2
3	10	10	10	1	1
4	7	4	1	1	7
5	6	6	8	6	8

По векторному отношению доминирования альтернатива $s_1 = (2, 10, 10, 7, 6)$ предпочтительней альтернативы $s_2 = (1, 8, 10, 4, 6)$.

Альтернативы $s_3 = (10, 2, 10, 1, 8)$, $s_4 = (9, 4, 1, 1, 6)$ и $s_5 = (10, 2, 1, 7, 8)$ не сравнимы между собой и не сравнимы с альтернативой s_1 .

Следовательно, без дополнительной информации о предпочтениях лица, принимающего решение, не может выбрать лучший вариант из четырех MK , именно из

$$MK_{0,1,3}^{(A_{a_i}^i A_{a_j}^j / A_{a_k}^k)}, \widetilde{MK}_{0,1,3,4}^{(A_{a_i}^i A_{a_j}^j / A_{a_k}^k)}, \widetilde{\widetilde{MK}}_{0,1,3}^{(A_{a_i}^i A_{a_j}^j / A_{a_k}^k)} \text{ и } \widetilde{\widetilde{MK}}_{0,1,3,4}^{(A_{a_i}^i A_{a_j}^j / A_{a_k}^k)}.$$

Считаем, что в этом модельном примере оценки в табл. 2 отражают также и результат приведения значений критериев к однородным шкалам и обосновано применение линейной свертки

$$f(x_1, \dots, x_5) = \sum_{i=1}^5 \alpha_i \cdot x_i.$$

Пусть в результате взаимодействия эксперта, аналитика и лица, принимающего решение, для конкретной задачи весовые коэффициенты критериев составят соответственно

$$\alpha_1 = 1, \alpha_2 = 0,5, \alpha_3 = 1, \alpha_4 = 2, \alpha_5 = 0,5,$$

то есть в этой задаче существенно, чтобы превалировало собственное программное обеспечение, была достаточная точность вычислений, и выполнялось условие универсальности. Тогда лучшей альтернативой будет s_1 , то есть $МК_{0,1,3}^{(A_{a_1}^i A_{a_j}^j / A_{a_k}^k)}$, затем в порядке убывания предпочтительности: s_5, s_3, s_2 и s_4 , несмотря на то что эта $МК$ не предпочтительней их в точности вычислений.

Если же, например, весовые коэффициенты критериев составят соответственно

$$\alpha_1 = 1, \alpha_2 = 0,5, \alpha_3 = 2, \alpha_4 = 1, \alpha_5 = 1,5,$$

то есть в задаче наиболее существенно, чтобы выполнялось условие универсальности и было большее число масштабных уровней, то лучшей альтернативой будет s_3 , то есть $\widetilde{MK}_{0,1,3,4}^{(A_{a_1}^i A_{a_j}^j / A_{a_k}^k)}$, затем в порядке убывания предпочтительности: s_1, s_2, s_5 и s_4 .

На следующих этапах решения задачи моделирования для рассматриваемой практической задачи можно попытаться расширить набор критериев для оценки MK , сохраняя все естественные требования к набору критериев. При этом значения критерия оценки MK могут быть результатом оценки частных критериев BK . Такой подход приведет к более точным оценкам критериев MK и, следовательно, к более обоснованному результату выбора.

В связи с тем, что разработанная технология дает возможность формализовать процесс отбора наилучших в определенном смысле *МК* и позволяет решить поставленную задачу с учетом предпочтений экспертов и лиц, принимающих решение, можно говорить о том, что данный подход может быть применен при создании человеко-машинных систем автоматизированного проектирования. В дальнейшем при расширении набора критериев можно использовать и последовательно наращивать в автоматическом режиме структуры данных, получаемых при помощи отобранных *МК*.

Помимо всего прочего, предложенный выше подход может применяться в так называемых обратных задачах выбора, в которых заранее указаны желательные значения частных критериев, описывающих *МК*, или диапазоны их изменения.

Литература

1. *Абгарян К. К.* Информационная технология построения многомасштабных моделей в задачах вычислительного материаловедения // Системы высокой доступности, 2018. Т. 15. № 2. С. 9–15.
2. *Бродский Ю. И.* Модельный синтез и модельно-ориентированное программирование. – М.: ВЦ РАН, 2013. 142 с.
3. *Abgaryan K. K., Mutigullin I. V., Reviznikov D. L.* Theoretical investigation of 2DEG concentration and mobility in the AlGaIn/GaN heterostructures with various Al concentrations // Physica Status Solidi (C), 2015. Vol. 12. Iss. 12. P. 1376–1382.
4. *Абгарян К. К.* Задачи оптимизации наноразмерных полупроводниковых гетероструктур // Известия вузов. Материалы электронной техники, 2016. Т. 19. № 2. С. 112–118.
5. *Абгарян К. К., Ревизников Д. Л.* Численное моделирование распределения носителей заряда в наноразмерных полупроводниковых гетероструктурах с учетом поляризационных эффектов // ЖВМ и МФ, 2016. Т. 56. № 1. С. 155–166.
6. *Кини Р. Л., Райфа Х.* Принятие решений при многих критериях предпочтения и замещения / Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1981. 559 с. (*Keeney R., Raiffa H.* Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Tradeoffs. – N. Y.: Wiley, 1975).

7. *Подиновский В. В.* Введение в теорию важности критериев. – М.: Физматлит, 2007. 64 с.
8. *Фишберн П.* Теория полезности для принятия решений / Пер. с англ. – М.: Наука, 1978.
(*Fishburn P. C.* Utility Theory for Decision Making. – N. Y.:Wiley, 1970).
9. *Осипова В. А., Алексеев Н. С.* Математические методы поддержки принятия решений. – М.: ИНФРА-М, 2018. 151 с.
10. *Петровский А. Б.* Теория принятия решений. – М.: Академия, 2009. 391 с.