МАТЕМАТИЧНІ МЕТОДИ, МОДЕЛІ, ПРОБЛЕМИ І ТЕХНОЛОГІЇ ДОСЛІДЖЕННЯ СКЛАДНИХ СИСТЕМ

УДК 519.8: 519.9: 539.3: 681.3

РАЦИОНАЛЬНЫЙ КОМПРОМИСС В ЗАДАЧАХ СИСТЕМНОГО СОГЛАСОВАНИЯ ПРОТИВОРЕЧИВЫХ ЦЕЛЕЙ

Е.Л. ОПАРИНА

Предложен математический аппарат решения задачи многокритериального формирования и системного согласования противоречивых целей внешних и внутренних показателей изделия в условиях неопределенности при априорно известных ограничениях на показатели внешнего воздействия. Приведено решение практической задачи нахождения рационального компромисса разнотипных технологических процессов при создании единой системной технологии для выполнения определенного вида работ.

Высокие темпы глобализации и компьютеризации практической деятельности в конце 20 в. стимулировали быстрое развитие и широкое внедрение наукоемких технологий в различные отрасли производства. Эти процессы, с одной стороны, существенно расширили возможности создания и масштабы производства принципиально новых сложных технических систем различного назначения, но, с другой — привели к существенному расширению и усложнению проблематики формирования и принятия решений при разработке, производстве и эксплуатации новой техники. Проблемы начали приобретать качественно новый характер [1, 2]. В частности, резко повысились степень и уровень риска при формировании решений на различных стадиях жизненного цикла сложных и уникальных технических систем различного назначения; появилась практическая необходимость и существенно увеличилась сложность системно согласованного анализа взаимосвязи, взаимозависимости и взаимодействия множества разнородных условий и факторов, которые раньше не учитывались; обострились противоречия между необходимостью исследования большого количества ограничений и факторов риска и требованиями сокращения времени на формирование и реализацию решений.

Перечисленные проблемы определили практическую необходимость разработки новых подходов и методов формирования и выбора рациональных решений в условиях неопределенности и риска [3]. Цель данной работы — предложить математический аппарат решения задачи многокритериального формирования и системного согласования противоречивых целей в условиях неопределенности.

Характеристика свойств и особенностей задачи. Практическая необходимость разработки новых подходов и методов формирования рациональных решений при согласовании противоречивых целей определяется многими причинами. Среди них важнейшие — это современные тенденции развития рыночной экономики, действия которых проявляются в реальных задачах разрешения противоречий и поиска рациональных компромиссов. Типичными примерами можно считать различные задачи согласования потребностей и возможностей субъектов практической деятельности, в том числе согласования потребностей и возможностей человека, его запросов и имеющихся ресурсов. К ним относятся достаточно сложные многокритериальные задачи системного согласования требований к показателям качества разрабатываемого изделия с технологическими возможностями производства и с рыночными показателями спроса и сбыта конкурирующих видов продукции.

Следует особо отметить, что при решении задач системного согласования требований и показателей качества проектируемого изделия новой техники необходимо учитывать не только ограничения материальных, финансовых и других ресурсов, но и воздействия на условия эксплуатации изделия неустранимых факторов риска, например, природных или климатических. Решение таких задач сводится к поиску компромиссов противоречивых целей на основе формирования множества Парето. При этом в методах формирования оптимальных по Парето решений многокритериальных задач априорно полагается, что множество Парето существует [4,5]. Однако в реальных системных задачах формирования множества компромиссов противоречивых целей априорно нельзя исключить ситуацию, когда исходные условия эксплуатации и заданные требования к изделию являются принципиально несовместимыми. Реальность такой ситуации и результаты ее последствий подтверждает следующий пример.

В конструкциях английских пассажирских турбореактивных самолетов «Комета» оказались несовместимыми требования к весу и прочности материалов с условиями эксплуатации [2]. Были созданы и применены облегченные материалы с высокой статической прочностью, но не проведен должный анализ динамики нагрузки на элементы конструкции в условиях взлета, посадки, маневров в полете. Вместе с тем, в результате воздействий моторных и акустических вибраций, механических колебаний элементов конструкции (бафтинг и т.п.) корпус самолета подвергался широкому спектру циклических нагрузок. В таких условиях прочность облегченных материалов оказалась недостаточной для реальных условий эксплуатации самолетов, что привело к двум внезапным, не прогнозируемым катастрофам, причина которых — усталостные разрушения силовых элементов фюзеляжа [6]. Авиакомпания вынуждена была прекратить использование данного типа самолетов.

Рассмотренный пример свидетельствует о том, что при использовании принципа Парето в процедурах решения системных многокритериальных задач требуется прежде всего установить необходимость и доказать возможность формирования непустого множества компромиссов целей при заданных требованиях, ограничениях и условиях. Следует обратить внимание на то, что эти задачи принципиально отличаются от типовых задач системной оптимизации: целевые функции, области их определения и множества их значений априорно не задаются, а должны быть определены на основе неполной, разнородной исходной информации. Особенности и принципы решения таких задач исследуются в работе [3]. Поэтому будем полагать, что известны множества значений целевых функций, которые должны в содержательной трактовке характеризовать желательные значения противоречивых целей разработки изделия, в частности, желательные значения технических, экономических, эксплуатационных и других показателей качества изделия. Области определения в этом случае представляют множества значений конструктивных, технологических и других внутренних параметров изделия, а также множества значений показателей внешней среды и других условий эксплуатации изделия.

Рассматриваемый метод позволяет выявить условия и ограничения, при выполнении которых может быть обеспечено формирование множества Парето на основе принципа взаимного согласования области определения и множества значений для каждой функции, что теоретически обосновано в работе [7].

Сущность метода нахождения рационального компромисса и возможность его применения для решения задачи системного согласования противоречивых целей в условиях неопределенности рассмотрим на примере одной из практически важных задач концептуального проектирования сложных систем, а именно, задачи согласования требований к внешним и внутренним показателям изделия при априорно известных ограничениях на показатели внешнего воздействия.

Математическая постановка задачи. Заданы требования к внешним показателям y изделия в виде

$$y \in B^{\pm},\ \ B^{\pm} = \{B_i^{\pm},\ i = \overline{1, m}\},\ B_i^{\pm} = \left\{ y_i \,\middle|\, b_i^- \le y_i \le b_i^+,\ i \in [1, m] \right\}, \qquad (1)$$

требования к внутренним показателям x_1

$$x_1 \in D_1^{\pm},\ D_1^{\pm} = \left\{ x_1 \,\middle|\, x_1 = \left\langle x_{1j_1}, j_1 = \overline{1, n_1} \right\rangle,\ d_{1j_1}^- \le x_{1j_1} \le d_{1j_1}^+ \right\} \qquad (2)$$

и определены ограничения на показатели x_2, x_3 внешнего воздействия

$$x_2 \in D_2^*,\ D_2^* = \left\{ x_2 \,\middle|\, x_2 = \left\langle x_{2j_2},\ j_2 = \overline{1, n_2} \right\rangle,\ d_{2j_2}^- \le x_{2j_2} \le d_{2j_2}^+ \right\}, \qquad (3)$$

$$x_3 \in D_3^*,\ D_3^* = \left\{ x_3 \,\middle|\, x_3 = \left\langle x_{3j_3},\ j_3 = \overline{1, n_3} \right\rangle,\ d_{3j_3}^- \le x_{3j_3} \le d_{3j_3}^+ \right\}. \qquad (4)$$

Известны функциональные зависимости внешних показателей y от переменных $x = (x_1, x_2, x_3)$ в виде многоуровневой иерархической системы моделей в классе мультипликативных функций [8]. Система реализована в следующей форме последовательности моделей:

$$y_i = \Phi_i(x),\ \ i = \overline{1, m}, \qquad (5)$$

$$\left[1+\Phi_i(x)\right]=\prod_{k=1}^{K_0}\left[1+\Phi_{ik}(x_k)\right]^{c_{ik}}\ , \tag{6}$$

$$\left[1+\Phi_{ik}(x_k)\right]=\prod_{j_k=1}^{n_k}\left[1+\Psi_{kj_k}\left(x_{kj_k}\right)\right]^{a_{ikj_k}}\ , \tag{7}$$

$$\left[1+\Psi_{kj_k}\left(x_{kj_k}\right)\right]=\prod_{p_{j_k}=1}^{P_{kj_k}}\left[1+\varphi_{p_{j_k}}\left(x_{kj_k}\right)\right]^{\lambda_{kj_k}}\ . \tag{8}$$

Заданы условия взаимного согласования области D^* определения каждой функции $y_i=\Phi_i(x)$ множества $\Phi=\{\Phi_i(x)\,|\,x\in D^*,\ i=\overline{1,m}\}$ и множества B_i^* значений $y_i\in B_i^*$, $B_i^*\subset B^*$ каждой функции $\Phi_i\in\Phi$, $i=\overline{1,m}$ в виде

$$(\forall x_1\in D_1^*)\wedge(\forall x_2\in D_2^*)\wedge(\forall x_3\in D_3^*)\Rightarrow\exists\, y\in B^*, \tag{9}$$

$$\forall y\in B^*\Rightarrow(\exists x_1\in D_1^*)\wedge(\exists x_2\in D_2^*)\wedge(\exists x_3\in D_3^*), \tag{10}$$

$$y\in B^*\Leftrightarrow(y_1\in B_1^*)\wedge\ldots\wedge(y_i\in B_i^*)\wedge\ldots\wedge(y_m\in B_m^*). \tag{11}$$

Требуется:

- обосновать необходимость и доказать возможность формирования непустого множества компромиссов целей при заданных требованиях, ограничениях и условиях;
- сформировать такое множество Парето $P_{D,B}(\Phi)$, в котором обеспечивается выполнение условий взаимного согласования области D^* определения и множества B_i^* значений для каждой функции $\Phi_i\in\Phi$, $i=\overline{1,m}$;
- определить рациональные условия системного согласования противоречивых целей.

Знаки $\pm$ выделяют в формулах (1), (2) величины, которые можно корректировать, знак * выделяет величины, не подлежащие корректировке: они отображают априорно заданные ограничения в форме (3) и (4), искомый конечный результат решения задачи в форме (9)–(11).

Свойства и особенности задачи. Выбор методологического и математического аппарата решения задачи зависит от ее особенностей и свойств. Важнейшей особенностью данной задачи является формирование заданных функций в виде многоуровневой иерархической системы моделей (5)–(8) в классе мультипликативных функций. Для удобства вычислений после несложных преобразований представим модели (6)–(8) в следующей форме аддитивных функций:

$$\Phi_i(x)=\exp\left\{\sum_{k=1}^{K_0}c_{ik}\ \ln\left[1+\Phi_{ik}(x_k)\right]\right\}-1, \tag{12}$$

$$\Phi_{ik} = \exp\left\{ \sum_{j_k=1}^{n_k} a_{ikj_k} \ln\left[1 + \Psi_{kj_k}\left(x_{kj_k}\right)\right] \right\} - 1, \tag{13}$$

$$\Psi_{kj_k}\left(x_{kj_k}\right) = \exp\left\{ \sum_{p_{j_k}=1}^{P_{kj_k}} \lambda_{kj_k} \ln\left[1 + \varphi_{pj_k}\left(x_{kj_k}\right)\right] \right\} - 1. \tag{14}$$

Отметим некоторые особенности иерархической системы моделей. На высшем иерархическом уровне системы находятся модели (6) и (12), определяющие зависимость каждой функции $\Phi_i(x)$, $i = \overline{1,m}$ от переменных x_k, $k = \overline{1,K_0}$. На среднем — модели (7) и (13), определяющие раздельно зависимость каждой функции $\Phi_{ik}(x_k)$ соответственно от компонентов x_{kj_k}, $k = \overline{1,K_0}$, $j_k = \overline{1,n_k}$ переменных x_k, $k = \overline{1,K_0}$. На третьем уровне — модели (8) и (14), определяющие функции $\Psi_{kj_k}\left(x_{kj_k}\right)$, x_{kj_k}, $k = \overline{1, K_0}$, $j_k = \overline{1, n_k}$.

Данная иерархическая система позволяет раздельно на основе векторов $x = (x_k \,|\, k = \overline{1,K_0})$ и $x_k = (x_{kj_k} \,|\, k = \overline{1,K_0},\ j_k = \overline{1,n_k})$ формировать структуру моделей (5)–(8) и (12)–(14), в которых основными структурообразующими функциональными элементами являются функции $\varphi_{p_k}(x_{kj_k})$, и поэтому к ним предъявляются следующие требования.

Во-первых, эти функции должны отражать с достаточной точностью экстремальные свойства [9], обусловленные ограничениями (1)–(4), характерными в целом для множества функций всех иерархических уровней системы моделей. Во-вторых, они должны в достаточной степени учитывать индивидуальные особенности экстремальных свойств каждой функции и обеспечивать возможность адаптации к ним на последующих уровнях. Специфика экстремальных свойств функций (5)–(8) и (12)–(14) обусловлена возмущающими действиями концов интервала [9]. Эта особенность является принципиальной и приводит к более сложной структуре класса рассматриваемых функций, чем в задачах интерполирования. Отсюда следует актуальность и практическая значимость выбора рационального класса функции $\varphi_{p_k}(x_{kj_k})$. Для реализации таких требований и особенностей функций $\varphi_{p_k}\left(x_{k\,j_k}\right)$ целесообразно применять полиномы Чебышева [7]. Используя смещенные полиномы Чебышева первого рода [10], полагаем

$$\varphi_{p_k}\left(x_{kj_k}\right) = T^*_{p_k}\left(x_{k\,j_k}\right), \quad p_k = \overline{0, P_{kj_k}}. \tag{15}$$

Тогда модель (14) преобразуется к виду

$$\Psi_{kj_k}\left(x_{kj_k}\right) = \exp\left\{ \varphi_{0\,j_k} + \sum_{p_{j_k}=1}^{P_{kj_k}} \lambda_{kj_k} \ln\left[1 + T^*_{p_k}\left(x_{kj_k}\right)\right] \right\} - 1, \tag{16}$$

где $\varphi_{0\,j_k} = \lambda_{0\,j_k} \ln(1 + T_0^*) = \lambda_{0\,j_k} \ln 1{,}5$; $j_k = \overline{1, n_k}$; $T_0^* = 0{,}5$.

Среди других свойств и особенностей следует отметить практическую необходимость и технологическую целесообразность одновременного выполнения условий (9) и (10) при формировании множества Парето. Эти условия представляют различные подходы к выбору рационального решения, определяющего искомое множество Парето. Условие (9) предполагает в качестве исходных данных принять внутренние показатели при некорректируемых ограничениях на показатели внешних воздействий, которые на практике задаются стандартами для различных видов изделий и выполнение их обязательно.

Данный подход позволяет получить ответ на следующий вопрос: какие показатели качества можно получить при выбранных внутренних показателях и при наличии заданных ограничений на показатели внешних воздействий. Условие (10) предполагает противоположный подход: исходные данные — это требования к внешним показателям качества, а определяемые величины — внутренние показатели изделия. Отсюда следует возможность получить ответ на вопрос: какие внутренние показатели необходимы для реализации заданных показателей качества при наличии заданных ограничений на показатели внешних воздействий. Следовательно, при наличии некорректируемых ограничений на показатели внешних воздействий первый подход обеспечивает формирование облика изделия в последовательности от задания внутренних параметров к определению качества изделия. Второй подход реализует противоположную последовательность: от задания качества изделия к выбору структуры и внутренних показателей.

Математически сущность первого подхода заключается в построении множества Парето как множества значений функций Φ, оптимальных по Парето на априорно заданной некорректируемой области D^*. Этот подход является типичным при поиске компромиссов Парето [4, 5]. Второй подход реализует формирование области D^* путем такой ее корректировки, в результате которой достигаются оптимальные значения функций Φ. Этот подход предложен В.М. Глушковым для задачи системной оптимизации [11]. Обобщение данного подхода для многокритериальных линейных задач оптимизации при интервальном задании предпочтений дано в работе [12], а для человеко-машинных процедур оптимизации — в [13].

Особо следует отметить, что в системной задаче концептуальной неопределенности указанные подходы не являются взаимозаменяемыми в том смысле, что можно выбрать любой из них и на его основе формировать требования, концепцию, облик и структуру сложной системы. В таких условиях использование раздельно любого подхода не обеспечивает получение рационального компромисса целей по следующим причинам.

Во-первых, противоречия целей имеют многоуровневую, иерархическую структуру. Высший уровень структуры — концептуальные противоречия замысла изделия в форме системных противоречий необходимых потребностей и потенциальных возможностей их реализации на различных стадиях жизненного цикла изделия. Второй уровень — межсистемные противоречия реализуемости изделия в форме противоречий между системой требований к внешним показателям, характеризующим свойства и качество изделия, и системой требований к внутренним показателям, характеризующим конструктивные, технологические и другие свойства реализуемости изделия. Следующий уровень — внутрисистемные противоречия между различными группами требований (техническими, эксплуатационными, экономическими и другими) в системе внешних показателей и между различными группами требований (конструктивными, технологическими и другими) в системе внутренних показателей. Сложность перечисленных противоречий вполне очевидна, но она усугубляется и другими факторами: 1) все противоречия взаимосвязаны и взаимозависимы; 2) требования к конструктивным, технологическим и другим группам показателей изделия формируются специалистами различных профессий.

Отсюда следует практическая необходимость системного согласования требований как между различными группами показателей в заданных комплексах внешних и внутренних параметров, так и в целом между комплексами внешних и внутренних показателей. Системная согласованность понимается как рациональный компромисс различных групп требований к изделию для достижения его рентабельности и конкурентоспособности при адаптации проекта к имеющимся технологическим, ресурсным и другим возможностям производства.

При этом необходимо учитывать как прямую, так и обратную взаимосвязь показателей. Так, например, неудачный выбор или замена материала может привести не только к изменению технологии обработки конструктивного элемента, но и к изменению определенных качественных показателей, в частности, технических, эксплуатационных, экономических и/или других показателей качества изделия. Такая возможность показана в рассмотренном выше примере. И наоборот, изменение требований к определенному показателю качества может привести к необходимости различных конструктивных и технологических изменений: только к изменению технологии обработки материала или к полному изменению структуры конструкции, или к одновременному изменению химического состава материала, технологии производства и формы конструктивных элементов разрабатываемого изделия.

Решение задачи. Указанные особенности и факторы показывают, что решение рассматриваемой задачи сводится к системному согласованию и совместному выполнению условий (9) и (10) как основы формирования непустого множества Парето. Метод и алгоритм системного согласования таких условий и формирования множества Парето при заданных требованиях, ограничениях и условиях предложены и достаточно подробно описаны в работе [7]. Поэтому, не акцентируя внимание на методе и алгоритме, отметим, что искомое множество Парето $P_{D,B}(\Phi)$ характеризуется триадой $\left\langle D^*, B^*, \Phi \right\rangle$, обеспечивает взаимное системное интервальное согласование области определения D^* и множества значений B^* для каждой функции множества Φ и описывается соотношением

$$P_{D,B}(\Phi) \overset{\Delta}{=} \{\left\langle D^*, B^*, \Phi \right\rangle \big| [\,\Phi : D^* \to B^*] \wedge [\Phi^{-1} : B^* \to D^*]\}\,.$$

Данное соотношение показывает, что при любом выборе значений внешних и внутренних показателей выполняется условие $\forall\, y \in B^* \Rightarrow$

$\Rightarrow \exists\, x_1 \in D_1^*$, т.е. для каждого $y \in B^*$ существуют соответствующие значения $x_1 \in D_1^*$ множества внутренних показателей. Справедливо и обратное утверждение: $\forall\, x_1 \in D_1^* \Rightarrow \exists\, y \in B^*$. Теоретическая реализуемость таких условий обоснована в работе [7], а практическое выполнение системного интервального согласования области определения D^* и множества значений B^* для каждой функции множества Φ и последующее формирование множества Парето реализуется в приведенном ниже примере решения реальной системной задачи. Эти результаты являются обоснованием возможности формирования не только множества Парето, но и непустого множества компромиссов целей, которое непосредственно формируется из множества Парето введением системы критериев на основе принципа дополнительности Гёделя [14].

Представим основные процедуры алгоритма формирования рационального компромисса искомого множества целей.

1. Основополагающей неформализуемой процедурой является выбор критериев и их ранжирование по степени важности. Полагаем, что ЛПР выбирает варианты:

- Вариант 1. Все критерии равнозначны по важности.
- Вариант 2. Все критерии ранжированы по степени уменьшения их важности.

2. Следующая неформализуемая процедура — ранжирование по степени важности заданных противоречивых целей. Полагаем, что ЛПР выбирает варианты:

- Вариант 1. Приоритетными являются цели, для которых оптимальный показатель — наибольшее значение, например, производительность, грузоподъемность и аналогичные показатели.

$$i_{01} = 2i_1 - 1,\ \ i_1 = \overline{1, m_1},\ \ y^*_{i_{01}} = \max_{i_{01}} \Phi(x)\,.$$

- Вариант 2. Приоритетными являются цели, для которых оптимальный показатель — наименьшее значение, например, стоимость, расходы топлива и аналогичные показатели.

$$i_{02} = 2i_2,\ \ i_2 = \overline{1, m_2},\ \ y^*_{i_{02}} = \min_{i_{02}} \Phi(x)\,.$$

3. Предыдущие процедуры создают основу для разработки процедуры формирования функциональных зависимостей целей. Учитывая функциональные зависимости y от переменных $x = (x_1, x_2, x_3)$,

$$y_i = \Phi_i(x),\ \ i = \overline{1, m},$$

на основе результатов B_i^*, D_2^*, D_3^* формируется система уравнений

$$y_i[q_0] - \Phi_i(x_1, x_2[q_2], x_3[q_3]) = 0,\ \ i = \overline{1, m},\ \ q_0 = \overline{1, Q_0}\,. \qquad (17)$$

Здесь дискретные аналоги $y_i[q_0]$; $x_2[q_2]$; $x_2[q_3]$ для B_i^*, D_2^*, D_3^* определяются соотношениями

$$\hat{B}^* = \left\{ y_i \,\middle|\, y_i = y_i[q_0],\ y_i[q_0] \in B_i^*,\ q_0 = \overline{1, k_0},\ y_i[1] = b_i^-,\ y_i[k_0] = b_i^+ \right\},$$

$$\hat{D}_2^* = \left\{ x_2 \,\middle|\, x_2 = x_2[q_2],\ x_2[q_2] \in D_2^*,\ q_2 = \overline{1, k_2},\ x_2[1] = d_2^-,\ x_2[k_2] = d_2^+ \right\},$$

$$\hat{D}_3^* = \left\{ x_3 \,\middle|\, x_3 = x_3[q_3],\ x_3[q_3] \in D_3^*,\ q_3 = \overline{1, k_3},\ x_3[1] = d_3^-,\ x_3[k_3] = d_3^+ \right\}.$$

4. Система уравнений (17) формируется раздельно для вариантов 1 и 2 и содержит соответственно $N_1 = m_1 \times Q_0$ и $N_2 = m_2 \times Q_0$ уравнений, где неизвестными являются компоненты $x_{1 j_1},\ j_1 = \overline{1, n_1}$ вектора x_1. Каждый вариант системы (17) — несовместная система нелинейных уравнений. Уравнения нелинейные, поскольку y_i определяются иерархической системой нелинейных моделей (5), (12)–(16). Система уравнений является несовместной, поскольку количество N_1 и N_2 уравнений превышает количество n_1 компонент вектора x_1. Учитывая указанные особенности, целесообразно каждую систему (17) свести к классу чебышевских задач приближения для несовместных систем нелинейных уравнений, метод решения которых предложен в работе [15]. Результаты решения систем уравнений для формирования целей вариантов 1 и 2 составляют искомое множество рациональных компромиссов целей.

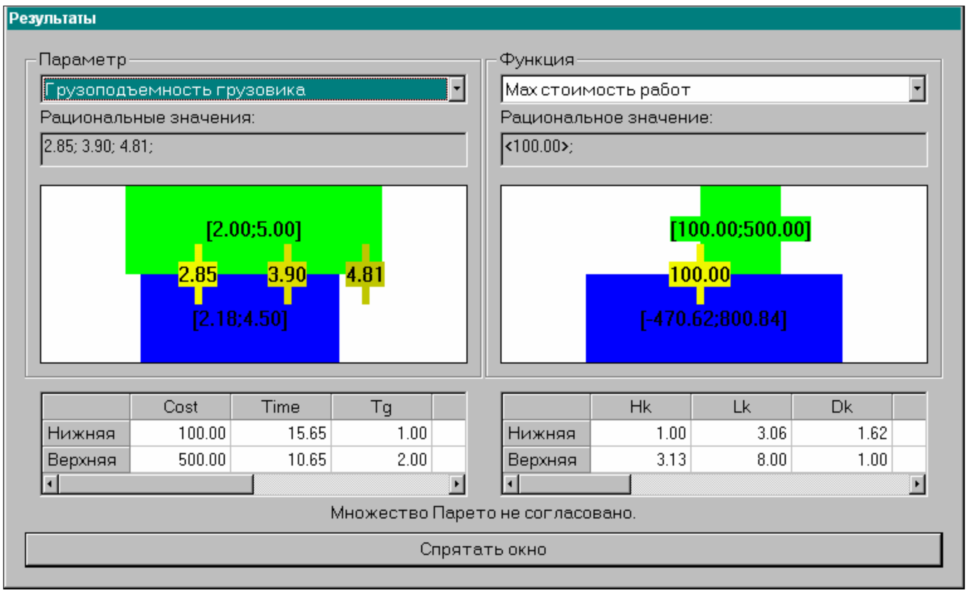
Рассмотрим пример решения практической задачи на основе формирования множества Парето $P_{D,B}(\Phi)$.

Содержательная формулировка задачи. Цель данного примера — продемонстрировать потенциальные возможности новой концепции множества Парето $P_{D,B}(\Phi)$ в рациональной организации технологических процессов, в которых одновременно участвуют разнородные машины и механизмы. Рассматривается задача рациональной организации технологических процессов при выполнении земельных работ в котловане. Заданы следующие требования и ограничения: работа должна выполняться только с помощью комплекса машин (выемка земли — экскаваторами, транспортировка — грузовиками или тракторами с прицепом, укладка вывезенной земли — планировочной машиной (бульдозером, катком и т. д.)), установлены сроки и стоимости работ для различных котлованов. Сущность рациональной организации работ состоит в следующем: подобрать такой состав и параметры машин и механизмов, которые способны выполнить весь комплекс работ для каждого котлована в априорно согласованные с Заказчиком сроки. Эффективность работы комплекса зависит от основных групп показателей: параметров котлована (глубина, длина, ширина, твердость грунта и т.п.); показателей качества дороги (ширина, длина, угол подъема, интенсивность движения и т.п.), параметров экскаваторов (емкость ковша, скорость перемещения и т.п.), параметров грузовиков (грузоподъемность, скорость и т.п.), параметров бульдозера (мощность, скорость перемещения и т.п.). Комплекс машин должен гарантировать выполнение работы в срок.

Результаты решения задачи. Задача решалась на основе разработанного выше алгоритма по исходным данным, которые для различных вариантов выборки приведены в табл. 1.

Таблица 1. Исходные данные

Номер выборки	Глубина котлована, м	Длина котлована, м	Ширина котлована, м	Твердость грунта, число твердости	Длина дороги, км	Качество дороги, усл.ед.	Емкость ковша экскаватора, $м^3$	Грузоподъемность грузовика, т	Мощность бульдозера, л.с.	Стоимость работ, тыс. грн	Длительность работ, ч
1	8	8	3	1	3	0	3	2	3	400	18
2	1	4	2	2	5	1	5	3	1	100	14
3	5	5	3	1	3	0	2	4	1	500	12
4	10	8	4	1	5	1	4	5	2	300	20
5	2	7	3	1	5	0	1	2	2	200	10
6	2	6	2	2	3	0	3	4	3	100	11
7	6	3	1	1	3	0	5	3	1	300	17
8	7	5	2	1	5	1	2	2	2	400	19
9	6	4	3	2	1	0	2	5	2	500	13
10	8	4	3	1	4	1	3	2	3	250	10
11	2	3	3	2	1	1	1	3	1	270	14
12	5	5	2	1	2	0	2	2	1	370	17
13	9	8	1	1	5	0	5	5	3	550	19
14	3	7	4	1	3	0	4	4	2	150	15
15	4	6	3	1	2	1	3	3	1	370	13
16	5	5	2	2	1	0	2	2	2	420	18
17	7	2	1	2	1	0	1	4	2	170	11
18	3	9	2	2	5	0	3	3	1	120	10
19	4	7	5	1	4	0	5	2	1	280	17



Итерационная процедура нахождения множества Парето

Процедуры решения задачи отображались в диалоговых окнах: Главное меню, Выбор параметров функций, Формирование условий работы, Формирование выборки уравнений, Итерационная процедура. На рисунке показано диалоговое окно «Итерационная процедура», в котором отображен вариант формирования рационального значения грузоподъемности грузовика и стоимости его работ.

В данном окне последовательно формировались следующие результаты:

- начальные ограничения на значения параметров и функций;
- рациональные значения качественных показателей и соответствующие им значения конструктивных показателей и параметров внешних воздействий;
- окончательный результат в виде искомого множества Парето после выполнения необходимого количества итераций.

В результате выполнения всех процедур решения задачи в интерактивном диалоговом режиме получено согласованное множество Парето (табл. 2).

Таблица 2. Результаты формирования множества Парето

Глубина котлована, м	Длина котлована, м	Ширина котлована, м	Твердость грунта, число твердости	Длина дороги, км	Качество дороги, усл. ед.	Емкость ковша экскаватора, $м^3$	Грузоподъемность грузовика, т	Мощность бульдозера, л.с.	Стоимость работ, тыс. грн	Продолжительность работ, ч
[1,709; 4,884]	[4,192; 6,595]	[1,688; 3,3]	[1; 2]	[1,015; 5,11]	[0;1]	[1,778; 3,898]	[2,367; 4,046]	[1,589; 1,953]	[16,119; 559,599]	[8,078; 20,374]

Таким образом, приведенный пример иллюстрирует практическую возможность нахождения рационального компромисса между противоречивыми целями при организации ряда технологических процессов в единую системную технологию строительных, промышленных или иных видов работ при использовании разнотипных видов техники.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Механика* катастроф / Под. ред. акад. К.В. Фролова. — М.: Междунар. ин-т безопасности сложных технических систем. — 1995. — 389 с.
2. *Сопротивление* материалов деформированию и разрушению. Справочное пособие / Отв. ред. акад. НАНУ В.Т. Трощенко. Ч.1. — Киев: Наук. думка. — 1993. — 288 с. Ч.2. Киев: Наук. думка, 1994. — 702 с.
3. *Панкратова Н.Д.* Рациональный компромисс в системной задаче концептуальной неопределенности // Кибернетика и системный анализ. — 2002. — № 4. — С.162 – 180.

4. *Моисеев Н.Н.* Математические задачи системного анализа. — М.: Наука, 1981. — 488 с.
5. *Подиновский В.В., Ногин В.Д.* Парето–оптимальные решения многокритериальных задач. — М.: Наука, 1982. — 256 с.
6. *Шевелько П.С.* Усталость металлов в конструкциях самолетов. — М.: Воениздат, 1967. — 110 с.
7. *Панкратова Н.Д.* Формирование множества Парето в системной задаче концептуальной неопределенности // Доповіді НАН України. — 2001. — № 12. — С. 65–70.
8. *Панкратова Н.Д., Опарина Е.Л.* Восстановление многофакторных закономерностей в условиях концептуальной неопределенности // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2004. — № 3. — С.103 – 114.
9. *Корнейчук Н.П.* О методах исследования экстремальных задач теории наилучшего приближения // Успехи матем. наук. — 1974. — **29,** № 3. — С. 9–41.
10. *Ланцош К.* Практические методы прикладного анализа. — М.: Физматгиз, 1961. — 524 с.
11. *Глушков В.М.* О системной оптимизации // Кибернетика. — 1980. — № 5. — С. 89–90.
12. *Системная* оптимизация в многокритериальных задачах линейного программирования при интервальном задании предпочтения / В.М. Глушков, В.С. Михалевич, В.Л. Волкович, Г.А. Доленко // Кибернетика. — 1983. — № 3. — С. 1–8.
13. *Михалевич В.С., Волкович В.Л.* Развитие методов системной оптимизации в человеко-машинных процедурах решения многокритериальных задач // Кибернетические методы планирования, проектирования и управления. — Киев: ИК АН УССР. — 1982. — С. 7–15.
14. *Успенский В.А.* Теорема Гёделя в элементарном изложении // Успехи матем. наук. — 1974. — **29**. — Вып. 1 (82). — С. 3–47.
15. *Курилин Б.И.* К решению чебышевской задачи приближения для несовместной системы нелинейных уравнений // Журн. вычислительной математики и математической физики. — 1970. — **10**, № 1. — С. 3–14.

Поступила 03.03.2004