

ПОДСИСТЕМА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В. Б. ПОПОВ

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого»,
Республика Беларусь*

Т. В. КАДАЧ

Белорусский национальный технический университет, г. Минск

Введение

Современные методы проектирования технических систем (ТС) предполагают математическое моделирование проектируемого объекта с дальнейшим привлечением методов принятия решения, включая методы оптимизации.

При этом наиболее распространенной является задача оптимизационного синтеза, т. е. определения наилучших с точки зрения функционирования параметров объекта при известной его структуре.

Постановка задачи

Как правило, математические модели, применяемые при проектировании ТС, характеризуются наличием значительного количества оптимизируемых параметров и критериев оптимальности. При этом постановка задачи может меняться от простой линейной однокритериальной до явно выраженных нелинейных многокритериальных, что требует привлечения множества методов оптимизации и соответствующих знаний проектировщика. Исходя из вышеизложенного подсистема принятия проектных решений, предназначенная для решения задач оптимизационного синтеза технических объектов, должна включать:

- пакет прикладных программ для решения задач однокритериальной оптимизации, реализующих ряд методов нулевого порядка с локальными и глобальными свойствами;
- программные средства, включающие алгоритмы, работающие с проектировщиком в диалоговом режиме при постановке и решении задач с несколькими критериями;
- программные средства, реализующие формальные алгоритмы выбора окончательного решения из множества Парето;
- интерфейсные средства, позволяющие легко взаимодействовать с подсистемой проектировщику с минимальными знаниями в области исследования операций.

Структура подсистемы

Рассматриваемый здесь пример использования диалоговой системы поддержки принятия решений DMS (Decision Making Support System) ориентирован на поиск рациональных конструктивных и режимных параметров трубчатых воздухоподогревателей (ТВП) паровых котлов [4] на этапе эскизного проектирования.

Анализ ряда стратегий принятия решений показал, что все они включают большое количество методов, предназначенных для решения однокритериальных задач, а к поиску решений в условиях многокритериальности однозначного подхода пока не выработано. По последнему вопросу можно выделить два направления:

- определение множества Парето с последующим выбором окончательного решения;
- сведение задачи к однокритериальной с дальнейшим применением соответствующего метода оптимизации.

В обоих случаях от проектировщика часто требуется введение дополнительной информации, связанной с его системой предпочтений относительно критериев оптимальности.

Как следствие, в зависимости от момента, когда запрашивается дополнительная информация, все методы принятия решений в условиях многокритериальности можно разделить на три группы:

- 1) до начала процесса определения паретовского множества;
- 2) в процессе поиска решения (в режиме диалога с проектировщиком);
- 3) после определения точек, входящих в множество Парето.

Кроме того, возможна и комбинация вышеописанных вариантов.

С учетом рассмотренных подходов к поставленным задачам структура подсистемы принятия решений приобретает вид, приведенный на рис. 1.

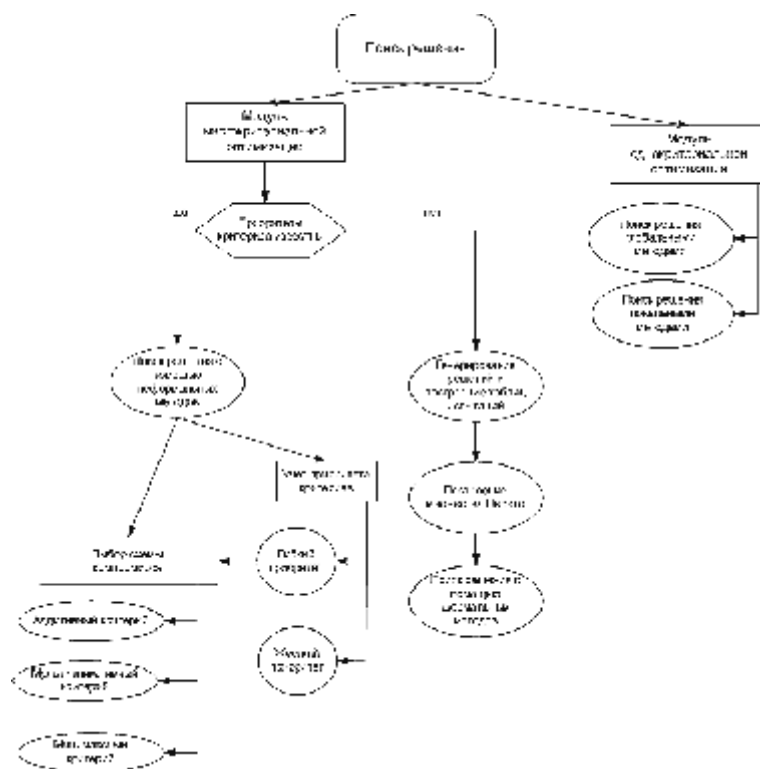


Рис. 1. Структура подсистемы принятия решений

Рассмотрим функциональные возможности модулей приведенной схемы детально.

Библиотека методов однокритериальной оптимизации. Учитывая, что целевые функции и функциональные ограничения, описывающие работоспособность ТС, как правило, не дифференцируемы и существенно нелинейны, были рассмотрены следующие методы оптимизации нулевого порядка:

1. С локальными свойствами:
 - градиентный метод;
 - метод Бокса;
 - метод Хука-Дживса;
 - метод случайного поиска с линейной тактикой;
 - метод случайного поиска с нелинейной тактикой;
 - симплекс-метод (метод деформируемого многогранника).
2. С глобальными свойствами:
 - метод сеток;
 - генетический алгоритм;
 - метод Монте-Карло;

- метод случайного поиска с изменением плотности испытаний;
- метод случайного поиска с предпочтением по расстоянию;
- бионический эволюционный алгоритм;
- набросовый алгоритм.

Сравнение методов оптимизации было выполнено во многих работах, и, в частности, большинство методов проанализировано в [1]. По рассмотренной в [1] технологии испытаний методов, указанные выше алгоритмы были запрограммированы и прошли сравнительное тестирование по следующим критериям:

- 1) робастность (способность алгоритма решать широкий круг задач);
- 2) удобство использования (подготовка исходной информации, требования к знанию методов оптимизации);
- 3) точность получаемого решения.

Вычислительные затраты алгоритма при решении конкретной тестовой задачи оценивались в специальных единицах – Горнерах, при этом в один Горнер (1Г) оценивается трудоемкость операции однократного вычисления значения целевой функции, так как эта процедура является наиболее трудоемкой при решении реальных задач анализа [2]. Эффективность алгоритма оптимизации, затратившего на получение результата с заданной точностью наименьшее число Горнеров, считалась наивысшей.

Сравнение методов проводилось на известных функциях (Розенброка, Зангвилла, Вуда, Изона, Пауэлла и Фентона), а также на реальных задачах параметрической оптимизации ТВП, где базой для сравнения служили результаты проведенного вычислительного эксперимента методом сеток с малым шагом на моделях ТВП с небольшим числом параметров ($n \leq 4$).

Наилучшую робастность и помехоустойчивость при удовлетворительной точности показали методы:

1. С локальными свойствами:
 - метод Хука-Дживса;
 - метод случайного поиска с линейной тактикой;
 - метод случайного поиска с нелинейной тактикой.
2. С глобальными свойствами:
 - метод Монте-Карло;
 - бионический эволюционный алгоритм;
 - генетический алгоритм;
 - набросовый алгоритм.

Эти методы послужили основой модуля однокритериальной оптимизации DMS.

Работоспособность модуля рассмотрена на примере решения задачи выбора параметров функционирования ТВП парового котла ТП-87 по критерию минимизации скорости низкотемпературной коррозии C_k трубок (рис. 2). Для этого был использован набросовый алгоритм, заключающийся в выполнении трех этапов:

- 1) определение стартовых точек методом Монте-Карло с помощью датчика случайных чисел с повышенной равномерностью, основанного на LP_τ -последовательности [3];
- 2) спуск из отобранных лучших точек с помощью локальных методов;
- 3) выбор из полученных локальных экстремумов наилучшего варианта.

Такой подход позволяет с достаточной степенью уверенности утверждать, что найденный экстремум будет глобальным.

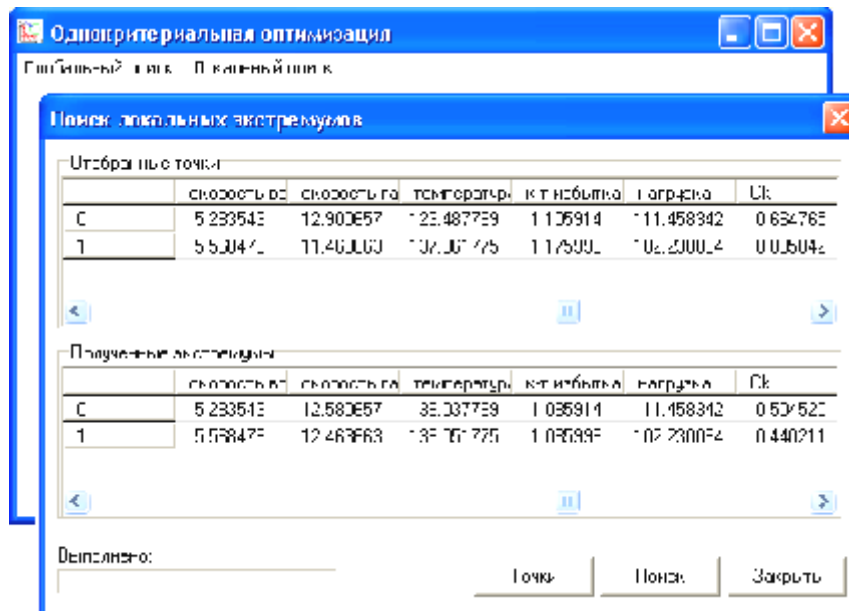


Рис. 2. Пример работы набросового алгоритма

Модуль *многокритериальной оптимизации. Неформальные методы принятия решений*. Существуют следующие подходы выбора окончательного решения без выделения множества Парето:

1. Свертка критериев.
2. Учет приоритета критериев (в виде жесткого или гибкого приоритета).
3. Выделение одного наиболее важного критерия и представление остальных критериев в виде ограничений.

Свертка критериев возможна в случае, если критерии нормализованы и не имеют приоритета. В данном подходе существуют следующие схемы компромисса:

- принцип минимакса – осуществляется равномерность понижения уровня всех критериев за счет «подтягивания» наихудшего из критериев с наибольшим уровнем;
- принцип абсолютной уступки – справедливым считается такой компромисс, при котором суммарный абсолютный уровень снижения одного или нескольких критериев не превосходит суммарного абсолютного уровня других критериев – минимизация суммы критериев (аддитивный критерий);
- принцип относительной уступки – справедливым считается такой компромисс, при котором суммарный относительный уровень снижения одного или нескольких критериев не превосходит суммарного относительного уровня других критериев – минимизация произведения критериев (мультипликативный критерий).

К данным схемам компромисса применим принцип гибкого приоритета, основанный на задании количественных характеристик приоритета критериев в виде вектора весовых коэффициентов $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)$, каждая компонента которого определяет значимость j -го критерия над остальными.

Например,

$$opt(Q, \alpha) = \max \prod_j Q_j^{\alpha_j} . \quad (1)$$

$$\alpha_j \in [0,1]; \sum_j \alpha_j = 1, j = 1, 2, \dots, m . \quad (2)$$

При применении к схемам компромисса принципа жесткого приоритета критерии располагаются в ряд в порядке их значимости $Q_1 > Q_2 > \dots > Q_m$, на основе которого

проводится последовательная оптимизация критериев. Принцип последовательной оптимизации заключается в следующем: вначале ищется локальный оптимум для наиболее важного критерия. Найденный оптимум с учетом уступки фиксируется в виде дополнительного ограничения. Затем ищется локальный оптимум второго по важности критерия, но уже для новой допустимой области решений и т. д. Таким образом, производится последовательное сужение допустимой области до единственного оптимального решения.

Пример поиска решения с привлечением схем компромисса для определения режимов работы ТВП котла ТП-87 рассмотрен ниже. На рис. 3 иллюстрируется форма ввода параметрических ограничений с выбором схемы компромиссов и критериев отбора.

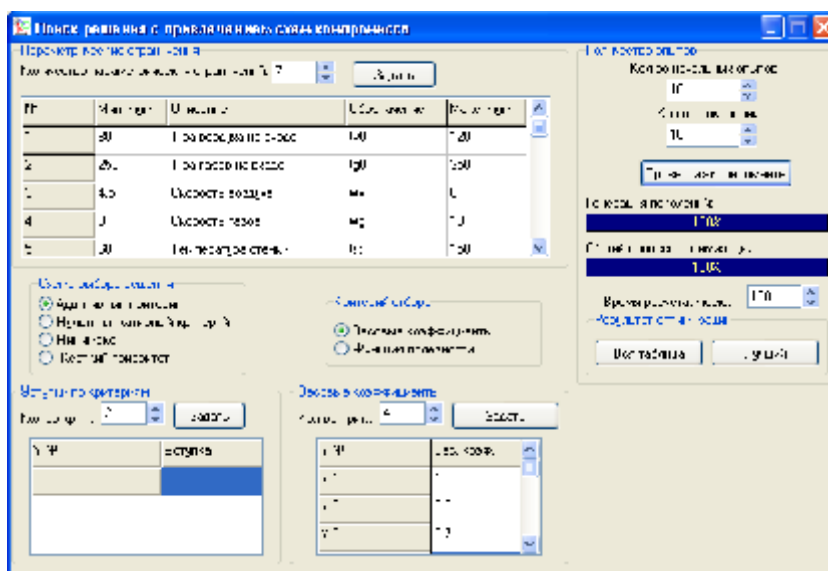


Рис. 3. Форма поиска решения с привлечением схем компромисса

Наиболее важным из критериев был выбран коэффициент теплопередачи k . Ему был назначен вес, равный 1, и выбран линейный вид функции полезности, означающий допущение постепенного ухудшения характеристик критерия (рис. 4).

Критерию скорость низкотемпературной коррозии C_k был назначен вес, равный 0,9, и выбран вид функции полезности, при котором незначительное отклонение от лучшего значения является критичным.

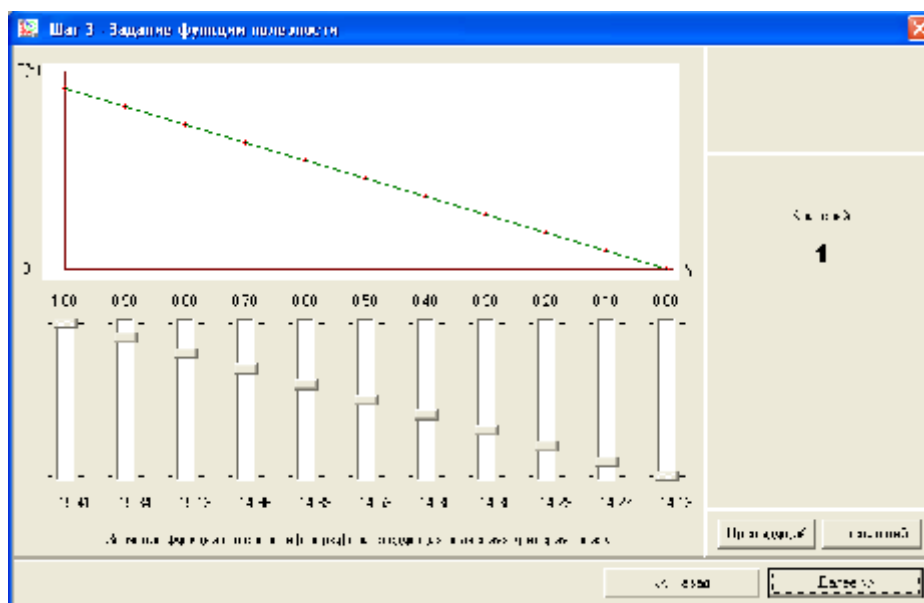


Рис. 4. Форма задания вида функции полезности

Критерию температура уходящих газов Θ_{yx} был назначен вес, равный 0,7, и выбран график, описывающий линейное постепенное ухудшение функции.

Критерию температурный напор Δt был назначен вес, равный 0,4, и был выбран вид функции полезности, при котором даже значительное отклонение от лучшего значения является некритичным.

Далее поиск окончательного решения осуществлялся бионическим алгоритмом, параметры которого задавались на форме поиска (рис. 3), по сформированному аддитивному критерию. Три лучших варианта приведены на рис. 5.

| Результаты. | | | | | |
|-------------|-------|------|--------|------|--------|
| № | γ1 | γ2 | γ3 | γ4 | ФП(γМ) |
| 8 | 14.30 | 0.16 | 167.19 | Е5Е1 | 4.31 |
| 7 | 14.50 | 0.00 | 167.90 | С110 | 3.49 |
| 11 | 15.04 | 0.22 | 150.09 | Е022 | 3.45 |

Количество решений: 3

<< Назад Готово

Рис. 5. Результаты поиска решения по аддитивному критерию

Диалоговый метод многокритериальной оптимизации. При решении многокритериальных задач в подсистеме используется диалоговый подход, детально рассмотренный в [4], [7], который заключается в выполнении следующих этапов:

- Генерация проектных решений и составление таблиц испытаний.
- Построение упорядоченных таблиц испытаний по каждому критерию.
- Определение допустимого множества, на основе которого система строит паретовское множество.
- Выбор окончательного решения многокритериальной задачи.

Принцип выделения точек Парето позволяет значительно сузить множество допустимых решений, однако на практике проектировщику необходимо выбрать только одно решение, для чего можно задействовать описанные ниже формальные методы.

Метод бинарных сравнений. Паретовские решения сравниваются попарно друг с другом по совокупности критериев (количество точек, где этот критерий лучше, и количество точек, где этот критерий хуже). На основе полученных данных строится «шахматка». Далее суммируются выигрышные ситуации. Лучшей признается точка с наибольшей суммой выигрышных ситуаций.

| | 1 | 2 | 3 | 4 | Σ |
|---|-----|-----|-----|-----|---|
| 1 | | 2:3 | 1:4 | 3:2 | 6 |
| 2 | 3:2 | | 2:3 | 4:1 | 9 |
| 3 | 4:1 | 3:2 | | 1:4 | 8 |
| 4 | 2:3 | 1:4 | 4:1 | | 7 |

Сравнение точек производится по 6 критериям.

По результатам сравнения 2 точка – лучшая.

Рис. 6. Иллюстрация метода бинарных отношений

Метод поиска точки, ближайшей к идеальной. Под идеальным понимается решение, задаваемое проектировщиком или соответствующее решению с наилучшими значениями по каждому из критериев (рис. 7).

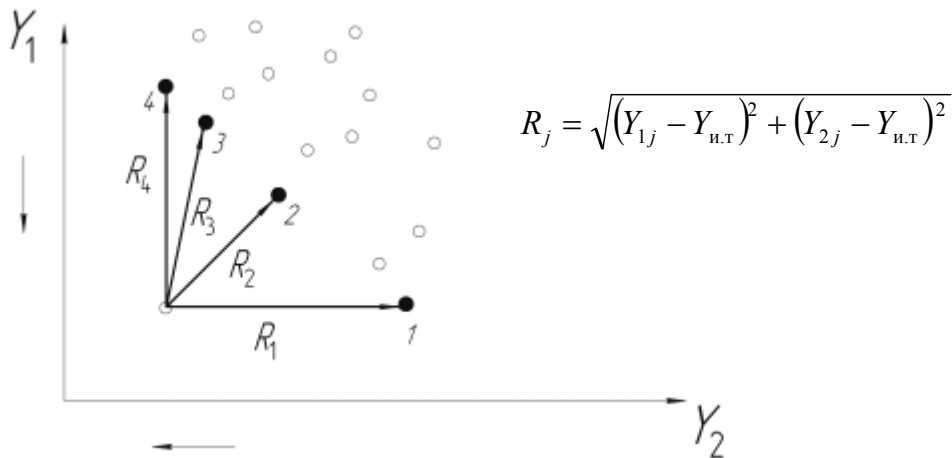


Рис. 7. Иллюстрация метода поиска точки, ближайшей к идеальной

Пример работы диалогового метода многокритериальной оптимизации рассмотрен для выбора параметров функционирования ТВП котла ТП-87. Полученное в результате выполнения начальных этапов метода множество Парето приведено на рис. 8.

| № | Y1 | Y2 | Y3 | Y4 |
|----|-------|------|--------|-------|
| 1 | 14.05 | 1.22 | 159.43 | 73.24 |
| 2 | 14.68 | 1.33 | 157.36 | 69.99 |
| 3 | 14.15 | 1.21 | 159.43 | 70.48 |
| 4 | 14.15 | 1.23 | 154.33 | 69.35 |
| 5 | 14.31 | 1.25 | 157.55 | 68.00 |
| 6 | 14.41 | 1.23 | 159.29 | 68.09 |
| 7 | 14.33 | 1.28 | 151.33 | 67.76 |
| 8 | 14.31 | 1.15 | 151.13 | 68.67 |
| 9 | 14.35 | 1.30 | 153.25 | 68.30 |
| 10 | 14.27 | 1.25 | 153.00 | 67.05 |
| 11 | 14.34 | 1.22 | 153.33 | 68.22 |
| 12 | 14.33 | 1.33 | 157.23 | 68.02 |

Рис. 8. Множество Парето

Для выбора окончательного варианта использовался метод поиска точки, ближайшей к идеальной. Координаты идеальной точки соответствуют наилучшим значениям частных критериев оптимальности (рис. 9).

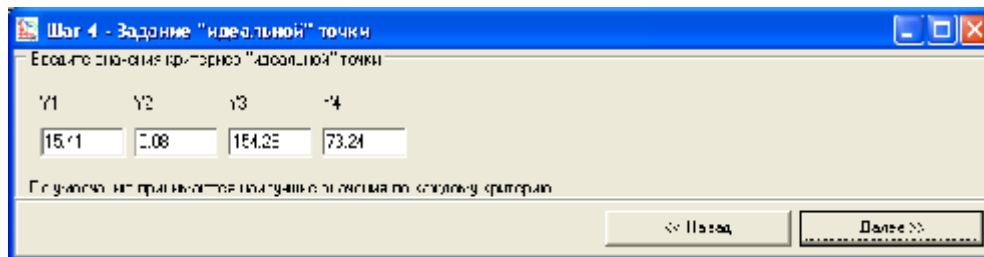


Рис. 9. Определение координат идеальной точки

Таблица результатов, полученная в процессе определения расстояний каждой точки до идеальной, приведена на рис. 10.

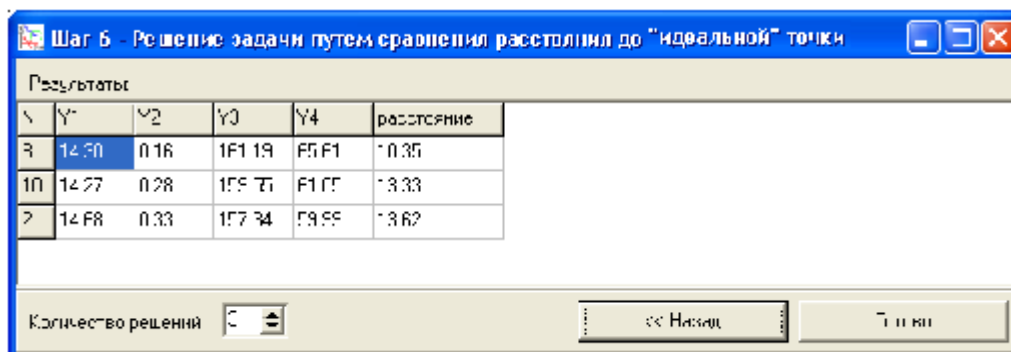


Рис. 10. Таблица результатов, полученных по методу «Поиск точки, ближайшей к идеальной»

В табл. 1 приведены полученные значения критериев оптимальности. Для базового варианта значения рассчитаны с использованием нормативных методов, а для проектного варианта приведены значения для двух случаев поиска окончательного решения, описанных выше.

Таблица 1

Значения критериев оптимальности

| Критерии | Базовый вариант | Проектный вариант | |
|---|-----------------|-------------------|--------|
| | | 1 | 2 |
| Коэффициент теплопередачи k | 14,4 | 14,3 | 14,54 |
| Скорость коррозии C_k | 0,35 | 0,16 | 0,08 |
| Температура уходящих газов $\vartheta_{ух}$ | 165 | 161,19 | 161,93 |
| Температурный напор ΔP | 60,5 | 65,61 | 61,16 |

Приведенные в табл. 1 значения критериев оптимальности были получены при следующих значениях оптимизируемых параметров (табл. 2).

Таблица 2

Значения оптимизируемых параметров

| Значения оптимизируемых параметров | Базовый вариант | Проектный вариант | |
|---|-----------------|-------------------|-----|
| | | 1 | 2 |
| Температура воздуха на входе $t'_{вп}$ | 80 | 70 | 76 |
| Температура газов на входе ϑ'_2 | 287 | 291 | 287 |

| | | | |
|---|------|------|------|
| Скорость воздуха w_B | 6,2 | 6,24 | 6,92 |
| Скорость газов w_r | 9,7 | 9,46 | 9,36 |
| Температура стенки трубки $t_{ст}$ | 105 | 148 | 146 |
| Коэффициент избытка воздуха за пароперегревателем $\alpha_{пп}''$ | 1,18 | 1,25 | 1,08 |
| Относительная нагрузка котла \bar{D} | 0,83 | 0,71 | 0,78 |

Подсистема DMS также тестировалась на задачах многокритериальной оптимизации параметров подъемно-навесного устройства (ПНУ) универсального энергосредства [5] и типовых зубчатых редукторов [6]. Анализ сформированных оптимизационных моделей ПНУ и типовых редукторов показал эффективность оценки модернизируемых технических объектов на соответствие техническим требованиям по разным критериям качества, подтвердив, таким образом, многокритериальность оценки синтезированных вариантов.

Заключение

Проведенные исследования продемонстрировали работоспособность подсистемы принятия проектных решений DMS для решения задач оптимизационного синтеза технических систем.

Литература

1. Реклейтис, Г. Оптимизация в технике : в 2 кн. / Г. Реклейтис, А. Рейвиндран, К. Рэкшел. – Москва : Мир, 1986. – Кн. 2. – 320 с.
2. Черноруцкий, И. Г. Методы принятия решений / И. Г. Черноруцкий. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2005. – 416 с.
3. Соболев, И. М. Выбор оптимальных параметров в задачах с многими критериями / И. М. Соболев, Р. Б. Статников. – Москва : Наука, 1981. – 130 с.
4. Операционная модель трубчатых воздухоподогревателей и методика принятия решений при выборе режимов их эксплуатации : сб. науч. тр. // Вестн. НТУ «ХПИ», темат. вып. «Системный анализ, управление и информационные технологии». – Харьков, 2007. – С. 21–28.
5. Попов, В. Б. Многокритериальная оптимизация подъемно-навесного устройства универсального энергосредства / В. Б. Попов, В. Т. Придухо // Современные методы проектирования машин : тр. I Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 11–13 дек. 2002 г. : в 3 т. – Минск, 2002. – Т. 3. – С. 163–167.
6. Кадач, Т. В. Принятие решений при автоматизированном проектировании типовых зубчатых редукторов / Т. В. Кадач, В. Б. Попов // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2007. – № 1. – С. 22–28.
7. Kadach, T. The dialogue system of multi-objective optimization with the decision-making support / T. Kadach, V. Pashanau // 22 Miedzynarodowe sympozjum naukowe mlodych pracownikow nauki. – Politechnika Zielonogorska, 2001. – S. 67–70.

Получено 18.10.2007 г.