

УДК 628.8 + 697.9

Содержательная постановка задачи векторной оптимизации для систем кондиционирования воздуха

Канд. техн. наук Н. В. КОЧЕНКОВ

Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского

197082, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13

Канд. техн. наук В. В. НЕМИРОВСКАЯ

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет ИТМО

Институт холода и биотехнологий

191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

At the heart of a power estimation of technological process of processing of air in central airs of air and definition of efficiency of use of power resources consumed thus, the problem of optimization of modes of functioning of central airs of air, considered as a problem of vector optimization lies. As criterion the vector indicator in the form of a train of technological indicators is used. It is shown what to write down criterion function in an explicit form for the chosen indicator it is not obviously possible for a number of reasons.

Key words: air central air, power resources, a train, a thermodynamic condition, a power estimation, the vector optimization, operating variables.

Ключевые слова: система кондиционирования воздуха, энергетические ресурсы, кортеж, термодинамическое состояние, энергетическая оценка, векторная оптимизация, управляющие переменные.

Введение

В сложившейся практике проектирования при разработке технической документации на систему кондиционирования воздуха (СКВ) информация о реализуемых в ней процессах тепловлажностной обработки воздуха либо исключается вовсе, либо представлена неполно, что не позволяет судить об энергоэффективности этих процессов. В лучшем случае на $I-d$ -диаграмме могут быть показаны процессы обработки воздуха только для двух расчетных точек климата (зимней и летней точки). А как будет идти обработка воздуха в СКВ в течение года? Такая информация отсутствует, чтобы не демонстрировать, насколько неэкономичными, а порой даже до очевидности абсурдными, с точки зрения эффективности использования энергетических ресурсов, могут оказаться выбранные процессы тепловлажностной обработки воздуха.

Учитывая значительную энергоемкость процесса тепловлажностной обработки воздуха в СКВ, необходимость в проведении энергетической оценки с целью определения эффективности использования потребляемых при его реализации энергоресурсов становится очевидной. Актуальность этого вопроса возрастает еще больше после принятия Федерального Закона № 261-ФЗ, в соответствии с которым технологический процесс также может являться объектом энергетического обследования [1, п. 1 ст. 15].

В основе энергетической оценки технологического процесса в СКВ лежит задача оптимизации режимов ее функционирования, которая должна рассматриваться как задача векторной оптимизации. Эта задача характерна как для этапа проектирования, так и для этапа эксплуатации.

В этой статье используется терминология, принятая в работах профессора А. А. Рымкевича. Материал статьи хотя и базируется на уже известных положениях [2], однако под выбранным углом зрения дается впервые.

Количественные показатели для оценки качества технологического процесса в СКВ

Для оценки качества технологического процесса тепловлажностной обработки воздуха в СКВ должен использоваться комплекс технико-экономических показателей (рис. 1), в котором приоритетная роль принадлежит показателям группы А, характеризующим функциональные, расходные и термодинамические параметры СКВ (см. [2]). Эти параметры не зависят от рынка и отражают, во-первых, степень выполнения системой заданных функций, т. е. уровень и надежность обеспечения нормируемых параметров (чистоты, газового состава, температуры, влажности) воздушной среды в помещении объекта (подгруппа показателей А₁); во-вторых, те значения натуральных затрат энергоресурсов, которые необходимо использовать в СКВ для обеспечения выполняемых ею функций (подгруппа показателей А₂).

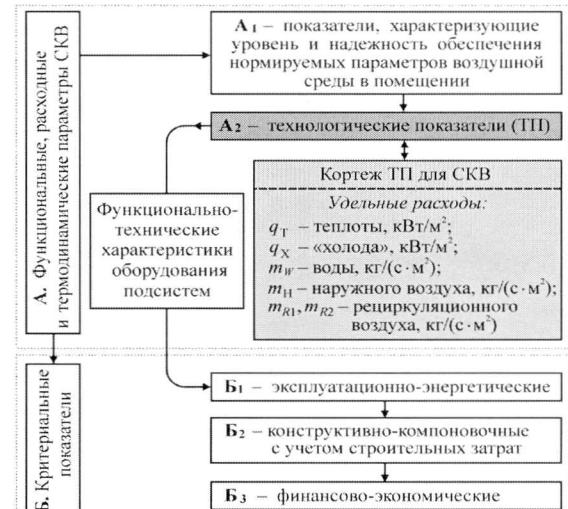


Рис. 1. Структура комплекса технико-экономических показателей

Определяющая роль в группе А принадлежит технологическим показателям, объединенным в подгруппу А₂. Технологические показатели (ТП) — совокупность показателей, отображающая прежде всего натуральные затраты в виде удельных (на 1 м² площади помещения) расходов теплоты q_T , холода q_x , воздуха (наружного m_h , рециркуляционного m_{R1}, m_{R2}) и воды m_W на его увлажнение за любой рассматриваемый период эксплуатации СКВ. К тому же эти показатели являются *ориентирующими*. Это означает, что для заданных исходных условий существует такое числовое значение каждого из них, которое может быть принято в качестве желаемого предела (эталона). Тогда любое рассматриваемое решение по СКВ может быть оценено по степени отклонения фактического значения показателя от его предельного значения, принятого в качестве эталонного.

Значения ТП вычисляются только для тех вариантов решений, для которых показатели подгруппы А₁ удовлетворяют требованиям, предъявляемым к ним.

Взаимосвязанная и взаимозависимая совокупность ТП, названа *кортежем*¹ ТП. Он представляет собой вектор показателей $\langle q_T, q_x, m_W, m_h, m_{R1}, m_{R2} \rangle$, количественно характеризующий термодинамическое состояние СКВ.

В группу Б включены критериальные показатели, которые обычно определяют целевые функции оптимизации. Их обобщение представлено тремя подгруппами показателей: Б₁ (эксплуатационно-энергетические), Б₂ (конструктивно-компоновочные), Б₃ (финансово-экономические). Подробно они рассмотрены в работе А. А. Рымкевича [2].

Несмотря на то, что ТП не тождественны потреблению тепловой и электрической энергии и непосредственно не отражают рыночный уровень материальных затрат, именно они составляют каркас комплекса технико-экономических показателей, поскольку являются исходными для вычисления всех других показателей.

При этом следует отметить, что непосредственной связи кортежа ТП с показателями группы Б не существует. Она проявляется только через функционально-технические характеристики оборудования подсистем (см. рис. 1), которые содержат сведения о типе и типоразмере оборудования подсистем, а также о рабочих параметрах их функционирования (расходных и термодинамических параметрах взаимодействующих сред).

При известных значениях кортежа ТП вычисление показателей группы Б в определенном смысле можно отнести к задачам технического характера. Поэтому для оценки качества технологического процесса обработки воздуха в СКВ используется кортеж ТП, являющийся векторным показателем, который будет выполнять в рассматриваемой ниже оптимизационной задаче функцию критериального показателя.

Критериальная (или целевая) функция для выделенного показателя записывается в неявном виде следующим образом:

$$\text{ТП}(t) = F \left\{ q_T(g(t)), q_x(g(t)), m_W(g(t)), m_h(g(t)), m_{R1}(g(t)), m_{R2}(g(t)) \right\}, \quad (1)$$

где $g(t)$ — функция, характеризующая зависимость управляющих переменных g от времени t .

Рассмотрение в уравнении (1) управляющих переменных как функции времени означает возможность изменения их значений в процессе функционирования системы с целью выбора в каждый определенный (расчетный) момент времени наилучших из них. Различают управляющие переменные верхнего и локального уровня. Диапазоны их изменения ограничены соответствующими интервалами, причем управляющие переменные могут принимать граничные значения этих интервалов. Состав управляющих переменных верхнего уровня зависит от выбранной конфигурации СКВ. Состав управляющих переменных локального уровня и диапазоны их изменения зависят, кроме того, от принятых способов регулирования в подсистемах [3].

Записать целевую функцию (1) в явном виде не представляется возможным. Это обусловлено как особенностями выбранного критериального показателя (кортежа ТП), так и особенностями взаимосвязей СКВ с окружающей средой. Рассмотрим эти особенности:

1. Все показатели, входящие в состав кортежа ТП, между собой взаимосвязаны (изменение значения одного из них приводит к изменению значений других) и являются функциями, в которых аргументом выступает другая функция — $g(t)$. Кроме того, управляющие переменные g зависят друг от друга, а аналитический вид уравнений связи между ними неизвестен.

2. Все показатели, входящие в состав кортежа ТП, между собой противоречивы. Это означает, что требование их одновременной минимизации не может быть реализовано.

3. Каждый из показателей, входящих в состав кортежа ТП, связан со своей подсистемой. Подсистемы имеют совершенно разные цели, так что термодинамическое состояние СКВ, являющееся оптимальным для одной подсистемы, может быть далеко не оптимальным для другой. Поэтому наряду с целью функционирования системы, фигурирующей в явном виде (т. е. в виде обеспечения нормируемых параметров воздушной среды в помещении), имеют место и целевые установки для подсистем, которые являются противоречивыми и непосредственно в формулировке цели функционирования системы не отражаются. Вместе с тем, игнорирование таких целевых установок может негативно отразиться на степени достижения желаемого результата.

4. Учет всех факторов, оказывающих влияние на значение ТП, связан с большими трудностями, поскольку, во-первых, в этом случае пришлось бы оперировать значительным количеством переменных, связанных с этими факторами, и во-вторых, соотношения, которые пришлось бы использовать выражения термодинамического состояния системы в виде функции от такого количества переменных, оказались бы довольно сложными и громоздкими.

5. Определение значений ТП связано с необходимостью учета факторов, которые являются существенными, но имеют случайный характер, а поэтому не поддаются строгой формализации и, следовательно, не могут непосредственно вводиться в математическую модель (в том числе, в уравнение для целевой функции). Необходимо правильно оценивать возможности математического

¹ Кортеж — упорядоченный набор элементов любой природы. Вектор, строго говоря, является частным случаем кортежа, когда все его компоненты — числа. Кортеж часто обозначается в угловых скобках <...>.

описания стохастически действующих факторов и помнить, что в этой сфере далеко не все поддается формализации и, следовательно, адекватному отражению в математической модели.

Таким образом, качество технологического процесса обработки воздуха в СКВ оценивается по шести показателям, входящим в состав кортежа ТП, между которыми требуется найти некоторый компромисс. При этом использовать вместо вектора показателей один общий в виде их свертки, представленной в денежном выражении, нецелесообразно. В этом случае уравнение (1) еще больше усложнится, поскольку к перечисленным выше причинам, не позволяющим записать целевую функцию в явном виде, добавится еще одна — необходимость учета такого фактора, как рыночный уровень материальных затрат.

Содержательная постановка задачи векторной оптимизации

Совокупность возмущающих воздействий на СКВ со стороны окружающей среды представлена в виде вектора возмущающих воздействий \bar{f} ; совокупность управляющих воздействий представлена в виде вектора \bar{g} , являющегося вектором управляющих переменных (рис. 2, а).

Под влиянием возмущающих \bar{f} и управляющих \bar{g} воздействий изменяется режим функционирования СКВ, в результате чего происходят переходы этой системы из одного термодинамического состояния в другое (рис. 2, б). Функционирование СКВ рассматривается как смена таких ее состояний в определенные (расчетные) моменты времени, которые являются дискретными, а на этапе эксплуатации, кроме того, и случайными. В интервалах между расчетными моментами времени термодинамическое состояние СКВ не изменяется, поскольку имеет место установившийся режим функционирования СКВ.

Требуемое термодинамическое состояние СКВ в каждый расчетный момент времени не зависит от его предыдущих и будущих состояний, а зависит только от возмущающих воздействий \bar{f} , имеющих место в данный

момент времени. Управляющее воздействие \bar{g} необходимо для того, чтобы фактическое термодинамическое состояние системы привести в соответствие требуемому для данного расчетного момента времени.

СКВ является динамической системой. Ее динамичность учитывается с помощью статической модели, в которой определяется термодинамическое состояние СКВ для каждого расчетного момента времени. В отличие от уравнения (1) в статической модели имеют место простые зависимости для расчета ТП, в которых связи между входными величинами, параметрами модели и выходными величинами носят линейный характер.

В статической модели отображаются условия функционирования системы, характерные для данного расчетного момента времени, которые сохраняются таковыми до следующего расчетного момента времени (см. рис. 2, б). В течение же годового цикла эксплуатации условия функционирования СКВ изменяются в зависимости от причин, вызывающих изменение возмущающих воздействий \bar{f} .

Переходы СКВ из одного термодинамического состояния в другое осуществляются непосредственно за счет корректировки значений управляющих переменных g . Математически эти переходы выражаются через изменение значений ТП:

$$\text{ТП}(t) = \langle q_t(t), q_x(t), m_W(t), m_h(t), m_{R1}(t), m_{R2}(t) \rangle .$$

Во времени этот процесс характеризуется некоторой траекторией в пространстве термодинамических состояний², которую описывает точка, характеризующая термодинамическое состояние СКВ в последовательные расчетные моменты времени. Показатели q_t , q_x , m_W , m_h , m_{R1} , m_{R2} рассматриваются также в качестве термодинамических координат, являющихся функциями времени t . По их максимальным значениям определяется установочная производительность оборудования подсистем, а по текущим значениям — фактическая производительность оборудования в расчетный момент времени.

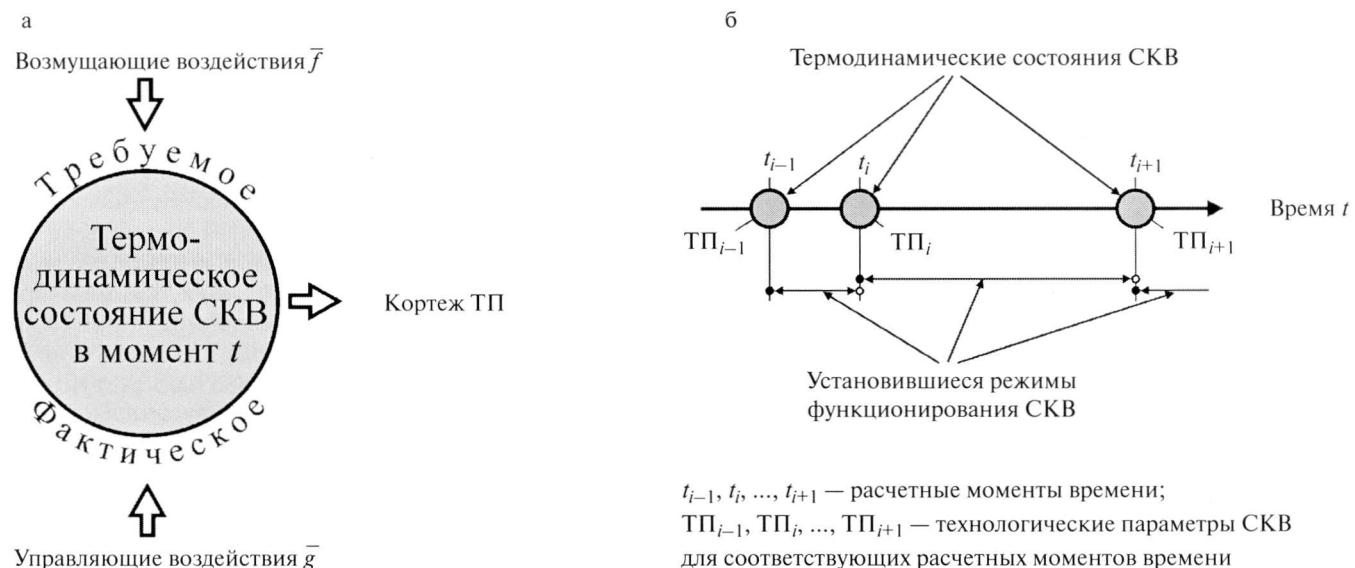


Рис. 2. Схема постановки оптимационной задачи

²Пространство термодинамических состояний — условное математическое пространство, размерность которого определяется числом параметров, входящих в состав кортежа ТП.

Поскольку каждому расчетному моменту времени соответствует своя точка траектории, то функционирование СКВ рассматривается как движение точки по этой траектории. Изменение термодинамического состояния системы описывается перемещением точки в ее новое положение на этой траектории.

Управляющие переменные g хоть и являются функциями времени, но в каждый расчетный момент времени фиксируются на определенных оптимальных значениях и сохраняют их вплоть до следующего расчетного момента времени. Поэтому процесс управления технологическим процессом в СКВ во времени строится как последовательная цепь решений по выбору значений управляющих переменных, принимающихся в расчетные моменты времени. Изменяя значения управляющих переменных в пределах соответствующих интервалов (в пределах имеющихся ресурсов управления), управляют системой. Возможности управлять системой лимитируются не только ресурсами управления, но и тем, что в процессе функционирования система не должна попадать в состояния, недопустимые с точки зрения конкретных условий ее эксплуатации. Так, например, должен быть исключен выход параметров воздушной среды в помещении за допустимые пределы.

Управление СКВ включает в себя, во-первых, определение значений координат q_t , q_x , m_W , m_h , m_{R1} , m_{R2} точки на траектории термодинамического состояния системы (т. е. определение цели и указание путей ее достижения в виде формирования целенаправленных управляющих воздействий — управляющих переменных верхнего уровня) и, во-вторых, удержание термодинамического состояния системы в этой точке траектории путем организации регулирования на локальном уровне (т. е. формирование управляющих воздействий в подсистемах в виде управляющих переменных локального уровня).

При выбранной конфигурации СКВ и одних и тех же возмущающих воздействиях \bar{f} , как известно, термодинамических состояний системы может быть множество, но интерес представляет только то состояние, которое является оптимальным, т. е. при котором показатели, входящие в состав кортежа ТП, имеют эталонные значения. Поэтому в каждый расчетный момент времени необходимо выбирать такие значения управляющих переменных g , чтобы достигать наилучшего термодинамического состояния системы, соответствующего максимальной эффективности использования энергетических ресурсов.

Задача оптимизации решается для каждого расчетного момента времени: при выбранной конфигурации СКВ

и известных возмущающих воздействиях \bar{f} необходимо найти такие значения управляющих переменных g (значения составляющих вектора \bar{g}), при которых в помещении объекта будут поддерживаться требуемые параметры воздушной среды, а термодинамическое состояние СКВ будет оптимальным. Используемый здесь термин «оптимальность» означает, что для каждого расчетного момента времени все показатели, входящие в состав кортежа ТП и характеризующие, как известно, расходы потребляемых энергоресурсов, будут иметь эталонные значения.

В этой задаче \bar{g} — множество альтернатив, а частными критериями оптимальности служат расходы потребляемых энергоресурсов q_t , q_x , m_W , m_h , m_{R1} , m_{R2} , которые являются функциями. По каждому частному критерию имеются ограничения.

Указанные частные критерии оптимизации образуют векторный критерий

$$\text{ТП} = (q_t, q_x, m_W, m_h, m_{R1}, m_{R2}) \rightarrow \text{опт.}$$

Задача выбора, содержащая множество возможных решений (множество альтернатив) и векторный критерий, является задачей векторной оптимизации.

Эта задача рассматривается только применительно к верхнему уровню управления и результатом ее решения являются значения составляющих вектора \bar{g} — управляющие переменные верхнего уровня, которые далее в зависимости от принятых способов регулирования в подсистемах трансформируются в управляющие переменные локального уровня [3].

Список литературы

1. Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации. Федеральный Закон от 23.11.2009. № 261-ФЗ // Собрание законодательства Российской Федерации. 2009. № 48. Ст. 5711.
2. Рымкевич А. А. Системный анализ оптимизации общеобменной вентиляции и кондиционирования воздуха. — СПб.: АБОК С-3, 2003.
3. Коченков Н. В. Энергосберегающие режимы систем кондиционирования воздуха: Моногр. Ч. 1. СКВ, обслуживающие помещения с однохарактерными нагрузками. — СПб.: ВКА им. А. Ф. Можайского, 2009.