

УДК 697.921.47

Структурная и параметрическая оптимизация канальной приточно-вытяжной вентиляции. Часть 2

Д-р техн. наук А. В. ЦЫГАНКОВ¹, канд. техн. наук О. В. ДОЛГОВСКАЯ², Д. В. ВИНОГРАДСКИЙ³

¹tsygaav@hotmail.com, ²ovdolgovskaia@itmo.ru, ³Dimon3550@mail.ru

Университет ИТМО

В статье рассматриваются методика подбора компонентов канальных приточно-вытяжных установок (ПВУ). Отличительной особенностью канальных приточно-вытяжных установок является многообразие конструкций однотипных блоков ПВУ. На основе каталогов нескольких производителей сформирована таблица составных блоков ПВУ. Анализ показал, что не все производители обладают программами по подбору оборудования и не у всех производителей имеется полный перечень блоков системы. Возникает необходимость оценить варианты, предлагаемые различными проектировщиками и выбрать лучший из них. Для решения задачи многокритериальной оптимизации в статье рассмотрены: метод весовых множителей, метод ограничений, метод приближения, метод отклонения (минимаксный). Для оценки ПВУ приняты следующие локальные критерии: стоимость ПВУ, расчетная мощность в условиях летней эксплуатации, расчетная мощность при зимней эксплуатации, общая масса, надежность. Для вычислительного эксперимента было сформировано восемь вариантов компоновки блоков нескольких производителей для установок с рекуперативным теплообменником. Сформирована таблица локальных критериев для рассматриваемых альтернативных вариантов и таблица весовых коэффициентов локальных критериев. Расчет коэффициентов проводился методом парного сравнения на основании оценок трех независимых экспертов. Приведены результаты вычисления аддитивной функции для вариантов ПВУ. Для метода приближения в качестве эталона принята виртуальная установка, локальные критерии которой являются лучшими из совокупности всех альтернативных вариантов. В заключении статьи приведен алгоритм решения оптимизационной задачи выбора компоновки блоков ПВУ.

Ключевые слова: приточно-вытяжная вентиляция, подбор оборудования, метод весовых множителей, метод ограничений, метод приближения, метод отклонения, оптимизация.

Информация о статье:

Поступила в редакцию 04.06.2024, одобрена после рецензирования 08.08.2024, принята к печати 03.09.2024

DOI: 10.17586/1606-4313-2025-24-1-19-28

Язык статьи — русский

Для цитирования:

Цыганков А. В., Долговская О. В., Виноградский Д. В. Структурная и параметрическая оптимизация канальной приточно-вытяжной вентиляции. Часть 2. // Вестник Международной академии холода. 2025. № 1. С. 19–28. DOI: 10.17586/1606-4313-2025-24-1-19-28

Structural and parametric optimization of ducted supply and exhaust ventilation. Part 2

D. Sc. A. V. TSYGANKOV¹, Ph. D. O. V. DOLGOVSKAIA², D. V. VINOGRADSKY³

¹tsygaav@hotmail.com, ²ovdolgovskaia@itmo.ru, ³vinogradskyd@yandex.ru

ITMO University

The article discusses the methodology for selecting components for ducted air handling units (AHU). A distinctive feature of ducted supply and exhaust units is the variety of designs of the same type of AHU blocks. Based on the catalogs of several manufacturers, a table of AHU component blocks was generated. The analysis shows that not all manufacturers have equipment selection programs and not all manufacturers have a complete list of system units. There is a need to evaluate the options offered by various designers and choose the best one. To solve the problem of multicriteria optimization, the article considers: the method of weighting factors, the method of restrictions, the method of approximation, and the method of deviation (minimax). To evaluate the AHU, the following local criteria have been adopted: cost of the AHU, design power in summer operation, design power in winter operation, total weight, and reliability. For the computational experiment, eight options for the layout of blocks from several manufacturers were generated for installations with a recuperative heat exchanger. A table of local criteria for the alternative options under consideration and a table of weighting coefficients of local criteria were generated. The coefficients were calculated using the paired comparison method based on the assessments of three independent experts. The results of calculating the additive function for AHU variants are presented. For

ловий и требований, формулируемых в ТЗ. Ниже приведены некоторые методы решения такой многофакторной оптимизационной задачи.

Постановка оптимизационной задачи

Выбор лучшего проектного решения сводится к решению многокритериальной оптимизационной задачи вида

$$\text{extr} F(\{X\}) = F(X^*); \quad (1)$$

$$\{X\} \in D_x; \quad (2)$$

$$F(X) = (f_1(X), f_2(X), \dots, f_n(X)), \quad (3)$$

где X^* — решение оптимизационной задачи; $\{X\}$ — множество проектных решений; D_x — множество допустимых Парето-оптимальных решений [11]; $F(X)$ — векторный критерий оптимальности; $f_i(X)$ — локальные (скалярные) критерии оптимальности; n — количество локальных критериев.

Любое решение в области Парето является компромиссом, поэтому задача (1) должна быть дополнена схемой компромисса, в качестве которой выступает скалярная целевая функция (функция полезности) вида [11]:

$$Y(X_j) = \Phi[a_i, \lambda_i, F_j(X)], \quad (4)$$

$$i \in [1, n]; \quad j \in [1, m],$$

где Φ — оператор определяющий структуру целевой функции; a_i — безразмерный критерий важности частного критерия; λ_i — функционал (коэффициент) приводящий частный критерий к нормализованному безразмерному виду; m — количество альтернативных решений.

Выбор функции (4) и ее параметров всегда зависит от конкретной задачи и основан на субъективном мнении экспертов и в итоге от мнения лица, принимающего решение (ЛПР).

Существует несколько основных схем формирования компромиссного решения, все они базируются на переходе от исходной задачи многокритериальной оптимизации к задаче однокритериальной скалярной оптимизации. Ниже приведены некоторые методы решения задачи многокритериальной оптимизации. Для определенности в дальнейшем рассматривается задача минимизации целевой функции. Все критерии считаются положительными и однородными, т. е. уменьшение значения каждого из них ведет к росту эффективности ПВУ.

Методы решения оптимизационной задачи

Метод весовых множителей.

Метод основан на переходе от задачи многокритериальной оптимизации к задаче однокритериальной скалярной оптимизации через целевую функцию (2).

Выбор весовых коэффициентов a_i для оценки важности критериев — основная проблема многокритериальных задач оптимизации. Большинство подходов к определению весовых коэффициентов для частных критериев можно разделить на экспертные [12, 13] и статистические [14, 15]. Так как количество альтернативных решений $\{X\}$ в рассматриваемой задаче не превышает

10–12, то статистические методы не представляются значимыми и обоснованными. В свою очередь, для экспертных методов остается открытым вопрос объективности выбора весовых коэффициентов критериев, которые напрямую зависят от конкретных участников процесса, их количества и алгоритмов принятия решения.

Существует два основных типа экспертных оценок: числовая (согласованная) и интервальная. При строгой оценке каждому частному критерию ставится в соответствие единый коэффициент (число), согласованный всеми экспертами. В этом случае совокупность весовых коэффициентов отвечает условиям:

$$a_i \geq 0; \quad \sum_{i=1}^n a_i = 1, \quad i \in [1, n]. \quad (5)$$

При интервальной оценке каждому частному критерию ставится в соответствие замкнутый интервал $[a_i^L, a_i^R]$. Границы интервалов определяются по минимальной и максимальной оценке всех экспертов.

$$a_i^L = \min(a_{i,1}, a_{i,2}, \dots, a_{i,k}, \dots, a_{i,s}), \quad (6)$$

$$i \in [1, n]; \quad k \in [1, s];$$

$$a_i^R = \max(a_{i,1}, a_{i,2}, \dots, a_{i,k}, \dots, a_{i,s}), \quad (7)$$

$$i \in [1, n]; \quad k \in [1, s],$$

где s — количество экспертов; a_i^L — левая граница интервала; a_i^R — правая граница интервала.

Для всех интервальных оценок должно выполняться условие:

$$0 < a_i^L \leq a_i^R < 1. \quad (8)$$

Так как частные критерии имеют различные размерности, то для перехода к скалярной целевой функции все частные критерии необходимо нормировать, т. е. привести к единой безразмерной шкале.

В общем случае в качестве нормирующего коэффициента λ_i может быть принят любой функционал или число, имеющее размерность одинаковую с размерностью частного критерия. Удобно нормировать критерии в диапазоне $[0-1]$, используя относительные отклонения критериев от их минимальных значений.

$$\bar{f}_i(X) = \frac{f_i(X) - \min f_i(X)}{\max f_i(X) - \min f_i(X)}, \quad i \in [1, n], \quad (9)$$

где $\bar{f}_i(X)$ — безразмерный частный критерий.

В настоящее время при решении оптимизационных задач наиболее широко используются аддитивная и мультипликативная целевые функции [16].

Аддитивная функция с числовыми коэффициентами частных критериев имеет вид

$$\bar{Y}(X_j) = \sum_{i=1}^n a_i \bar{f}_i(X_j), \quad (10)$$

$$i \in [1, n]; \quad j \in [1, m].$$

Аддитивный критерий соответствует принципу справедливой компенсации значений нормированных частных критериев, т. е. общий уровень относительного снижения значений одного или нескольких критериев

не превышает суммарного уровня относительного увеличения других критериев.

Мультипликативная функция с одинаковыми коэффициентами частных критериев

$$\bar{Y}(X_j) = \prod_{i=1}^n \bar{f}_i(X_j), \quad (11)$$

$$i \in [1, n]; j \in [1, m].$$

Если необходимо учитывать значимость локальных критериев, то мультипликативная функция принимает вид

$$\bar{Y}(X_j) = \prod_{i=1}^n (\bar{f}_i(X_j))^{a_i}, \quad (12)$$

$$i \in [1, n]; j \in [1, m].$$

Достоинством мультипликативного критерия является то, что при его применении не обязательно нормирование частных критериев, что позволяет исключить влияние на целевую функцию произвола в выборе функционалов, приводящих частные критерии к нормальному безразмерному виду. Недостатком критерия является тенденция к сглаживанию уровней частных критериев и избыточная компенсация увеличения одного критерия уменьшением другого.

Необходимо отметить, что логарифмирование мультипликативной функции переводит ее в аддитивную. С учетом того, что решение ищется в области Парето, в дальнейшем в методе весовых множителей рассматривается только аддитивная целевая функция.

Аддитивная функция с интервальными коэффициентами:

$$[\bar{Y}^L(X_j), \bar{Y}^R(X_j)] = \sum_{i=1}^n [a_i^L, a_i^R] \bar{f}_i(X_j) =$$

$$= \left[\sum_{i=1}^n a_i^L \bar{f}_i(X_j), \sum_{i=1}^n a_i^R \bar{f}_i(X_j) \right]. \quad (13)$$

В работе [17] показано, что если интервальные числа положительные, т. е. $a_i^R > 0$ и $a_i^L > 0$, то их сравнение можно проводить, преобразовав их в нечеткие числа. Если принять, что $\bar{Y}(X_j)$ нечеткое треугольное число, то

$$\bar{Y}(X_j) = \frac{\bar{Y}^R(X_j) - \bar{Y}^L(X_j)}{2}. \quad (14)$$

В общем случае решением оптимизационной задачи является экстремальное значение целевых функций вычисленных для всех альтернативных вариантов входящих в множество D_x .

$$\text{extr} \bar{Y}(X_j) = X^*. \quad (15)$$

Для дальнейшего сопоставления результатов решения оптимизационной задачи, полученных различными методами удобно решение представить в виде ранжированной последовательности

$$\bar{Y}(X_1) < \bar{Y}(X_2) < \dots < \bar{Y}(X_j) < \dots < \bar{Y}(X_m). \quad (16)$$

Метод ограничений.

В методе ограничений в качестве скалярного критерия $Y(X)$ принимается частный критерий оптимальности $f_p(X)$ имеющий наибольшее значение, а остальные

частные критерии учитываются с помощью ограничений в виде неравенств

$$f_i(X) \leq \varepsilon_i, \quad i \in [1, n]; \quad i \neq p, \quad (17)$$

где ε_i — максимально допустимое значение частного критерия.

Таким образом, вместо задачи векторной оптимизации (1) с целевой функцией (4) решается задача условной оптимизации со скалярным критерием

$$\min F(X) = \min f_p(X) = X^*. \quad (18)$$

Метод во многом лишен недостатков присущих методу весовых множителей, так как не требует формирования целевой функции (4) и, следовательно, нет необходимости задавать весовые коэффициенты и приводить частные критерии к безразмерному виду, что уменьшает неопределенность полученного решения. Основными недостатками метода являются требование к наличию в совокупности частных критериев одного явно доминирующего и трудность выбора максимально допустимых значений критериев — ε_i , гарантирующих достижимость решения.

Метод приближения.

Метод основан на предположении, что существует решение, имеющее все частные критерии лучшие чем в рассматриваемом множестве D_x . Такое решение представляет собой вектор:

$$\bar{F}^* = (f_1^*, f_2^*, \dots, f_n^*), \quad \bar{F}^* \notin D_x, \quad i \in [1, n]. \quad (19)$$

В рассматриваемой задаче такой вектор может быть сформирован из частных критериев, имеющих в D_x минимальное значение.

$$\bar{f}_i^* = \min(f_{i,1}, f_{i,2}, f_{i,j}, \dots, f_{i,m}), \quad (20)$$

$$i \in [1, n]; \quad j \in [1, m].$$

Введем в рассмотрение скалярный критерий оптимальности, представляющий собой разницу модулей нормированных векторов

$$Y(X_j) = |\bar{F}(X_j)| - |\bar{F}^*|, \quad (21)$$

где

$$\bar{F}(X_j) = \left(\frac{f_1(X_j)}{f_1^*}, \frac{f_2(X_j)}{f_2^*}, \dots, \frac{f_n(X_j)}{f_n^*} \right) = (\bar{f}_{1,j}, \bar{f}_{2,j}, \bar{f}_{i,j}, \dots, \bar{f}_{n,j}); \quad (22)$$

здесь $\bar{F}^*$ — единичный вектор,

$$\bar{F}^* = \left(\frac{f_1^*}{f_1^*}, \frac{f_2^*}{f_2^*}, \dots, \frac{f_n^*}{f_n^*} \right) = (1, 1, \dots, 1). \quad (23)$$

В методе приближения решается задача оптимизации со скалярным критерием (21).

Если $\bar{F}^*$ единичный вектор в ортонормированном пространстве, то

$$|\bar{F}^*| = \sqrt{n}; \quad (24)$$

$$|\vec{F}(X_j)| = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\bar{f}_{i,j})^2}. \quad (25)$$

Модификацией метода приближения является метод проецирования. В качестве скалярного критерия рассматривается проекция вектора $\vec{F}(X_j)$ на единичный вектор $\vec{F}^*$. Задача оптимизации решается с критерием

$$Y(X_j) = \text{Pr}_1 \vec{F}(X_j) - |\vec{F}^*|. \quad (26)$$

Угол β между $\vec{F}^*$ и $\vec{X}$ вычисляется по формуле:

$$\cos \beta = \frac{\vec{F}^* \vec{X}}{|\vec{F}^*| |\vec{X}|}, \quad (27)$$

тогда

$$\text{Pr}_1 \vec{F}(X_j) = |X_j| \cos \beta = \sum_{i=1}^n \bar{f}_{i,j}, \quad (28)$$

так как

$$|\vec{F}^*| = \text{const}, \quad \bar{f}_{i,j} \geq 0, \quad (29)$$

$$i \in [1, n]; \quad j \in [1, m].$$

В таком случае общее решение для обоих методов можно представить в виде

$$X^* = \min Y(X_j) = \min \sum_{i=1}^n \bar{f}_{i,j}, \quad (30)$$

$$i \in [1, n]; \quad j \in [1, m].$$

Можно отметить, что так как в этих методах используются нормированные частные критерии, то они инвариантны к масштабу измерения частных критериев.

Метод отклонения (минимаксный).

Идея метода заключается в выборе решения, которое в наименьшей мере отличается от эталонного. В качестве меры отличия в многопараметрической задаче принимается максимальное из отклонений, вычисленных для всех локальных критериев. В практике проектирования технических объектов принято в качестве эталона выбирать прототип, параметры и характеристики, которого рассматриваются как исходные при проектировании нового объекта. Эталонное решение (прототип) представляет собой вектор $\vec{F}^*$ (19). Если такой вектор не задан, то по аналогии с методом приближения он может быть сформирован из частных критериев (20). Нормированные векторы альтернативных решений входящих во множество D_x вычисляется по формуле:

$$\bar{f}_i(X) = \frac{f_i(X) - f_i^*}{\max f_i(X) - \min f_i(X)}, \quad i \in [1, n]. \quad (31)$$

Сформируем вспомогательный вектор, элементы которого представляют собой максимальные отклонения от эталона.

$$X_j^{\max} = \max_{i \in [1, n]; j \in [1, m]} [\bar{f}_{1,j}, \bar{f}_{2,j}, \bar{f}_{i,j}, \dots, \bar{f}_{n,j}]; \quad (32)$$

Решением оптимизационной задачи является

$$\min X_j^{\max} = X^*; \quad j \in [1, m]. \quad (33)$$

Метод отклонения может рассматриваться как модификация метода приближения. Отличие заключается в выборе меры близости решения к эталону.

Локальные критерии ПВУ

К частным критериям оптимизации характеризующих всю установку можно отнести: стоимость ПВУ, расчетную мощность в условиях летней эксплуатации, расчетную мощность при зимней эксплуатации, общую массу, надежность.

Введем обозначения:

W_N — мощность в зимний период, Вт;

W_S — мощность в летний период, Вт;

M — масса ПВУ, кг;

S — стоимость, руб;

N — надежность.

Мощность потребляемая ПВУ определяется по климатическим параметрам А в летний период, и по параметрам Б в зимний период при номинальных расходах приточного и вытяжного воздуха с учетом потерь давления в системах воздухораспределения.

Мощность, потребляемая вентилятором W_v , нагревателем W_H и охладителем W_c вычисляется по формулам:

$$W_v = \frac{P \cdot G}{\eta}; \quad W_H = \frac{\Delta h \cdot G}{K_H}; \quad W_c = \frac{\Delta h \cdot G}{K_c}, \quad (34)$$

где P — полное давление, создаваемое вентилятором (определяется по напор-расходной характеристике); G — расход воздуха; Δh — разница энтальпий воздушного потока на выходе и входе из теплообменников; η — коэффициент полезного действия вентилятора, K_H — коэффициент полезного действия воздушонагревателя (отношение теплоты, переданной воздушному потоку к затраченной энергии); K_c — коэффициент полезного действия воздухоохладителя (отношение теплоты, отведенной от воздушного потока к затраченной работе).

Теплота вытяжного воздуха, передаваемая приточному воздуху в рекуператоре или регенераторе.

$$W_R = t_{N0} c_a G_{\text{out}} K_T, \quad (35)$$

где K_T — коэффициент рекуперации (регенерации) теплоты вытяжного воздуха; c_a — теплоемкость воздуха.

Для расчета перечисленных выше частных критериев должны быть известны основные технико-экономические характеристики ПВУ: стоимость и напор-расходные характеристики блоков, коэффициенты трансформации энергетических потоков (отопительный коэффициент, холодильный коэффициент, коэффициент рекуперации и пр.). Характеристики ПВУ приведены в технической документации производителей (см. табл. 1).

С учетом (34) и (35) частные критерии мощности вычисляются по формулам:

$$W_N = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta P_i + \Delta P_{\text{in}}}{\eta_{\text{in}}} G_{\text{in}} + \frac{\sum_{j=1}^m \Delta P_j + \Delta P_{\text{out}}}{\eta_{\text{out}}} G_{\text{out}} + \frac{h_{N,\text{in}} - h_{N,\text{out}}}{K_N} G_{\text{in}} - W_R; \quad (36)$$

$$W_S = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta P_i + \Delta P_{in}}{\eta_{in}} G_{in} + \frac{\sum_{j=1}^m \Delta P_j + \Delta P_{out}}{\eta_{out}} G_{out} + \frac{h_{N,in} - h_{N,out}}{K_c} G_{in}, \tag{37}$$

где n — количество блоков приточного канала $i \in [1, n]$; m — количество блоков вытяжного канала $j \in [1, m]$.

Необходимо учитывать, что структура ПВУ при зимней и летней эксплуатации в зависимости от условий эксплуатации может различаться вследствие замены рекуператора «летней вставкой» и включением байпасных линий для обхода теплообменников и фильтров.

Стоимость ПВУ в общем случае включает в себя: прямые и косвенные расходы. К прямым расходам относят: капитальные затраты на оборудование и комплектующие, к косвенным относят затраты на логистические услуги, монтажные и пуско-наладочные работы, страхование и пр.

При определении массы ПВУ необходимо различать массу самих блоков и общую массу с учетом воздухопроводов и воздухораспределительных устройств.

$$S = \sum_{k=1}^u s_k; \tag{38}$$

$$M = \sum_{k=1}^u m_k; \tag{39}$$

здесь s_k — стоимость блока ПВУ; m_k — масса блока ПВУ; u — общее количество блоков $k \in [1, u]$.

Надежность оборудования представляет собой комплекс таких показателей как безотказность, долговечность, ремонтпригодность, сохраняемость, а также срок и объем гарантий производителя. Различные подходы к оценке надежности вентиляционных систем приведены в работах [19, 20]. С учетом того, что оценка надежности нужна для задачи ранжирования может быть использована экспертная оценка, полученная на основе рейтинга производителей оборудования. Для определенности в дальнейшем будем полагать, что надежность уменьшается с увеличением положения в рейтинге, т. е. наиболее надежным является оборудование с индексом единица.

Рассмотренный выше список частных критериев не является исчерпывающим и может быть изменен или дополнен другими критериями, учитывающими назна-

чение вентилируемого помещения и особенности эксплуатации ПВУ (акустические характеристики, емкость фильтров, надежность, подвижность воздуха в помещении и пр.). К частным критериям могут быть отнесены любые технические характеристики блоков ПВУ регламентированные ТЗ.

Задача поиска оптимального решения при проектировании технического объекта заключается в нахождении вектора варьируемых параметров (альтернативных схем), обеспечивающих максимум (минимум) целевой функции.

Вычислительный эксперимент

Цель вычислительного эксперимента — сопоставить результаты подбора блоков ПВУ, полученные различными методами оптимизации.

Рассматривались восемь вариантов компоновки блоков нескольких производителей для установок с рекуперативным теплообменником. Все установки были спроектированы по единому ТЗ:

- 1. назначение помещения — офис;
- 2. географическое положение — Санкт-Петербург;
- 3. номинальный расход приточного воздуха — 1500 м³/ч;
- 4. номинальный расход вытяжного воздуха — 1500 м³/ч;
- 5. потери давления в приточном канале воздуховода — 400 Па;
- 6. потери давления в вытяжном канале воздуховода — 400 Па;
- 7. температура в помещении (приточная) — 20 °С;
- 8. относительная влажность воздуха в помещении — 60%.

Температуры и влажности уличного воздуха в зимний и летний периоды приведены по СП13113320.2020 [10].

Локальные и нормированные критерии альтернативных ПВУ приведены в табл. 2 и табл. 3, соответственно.

Весовые коэффициенты локальных критериев приведены в табл. 4, интервальные коэффициенты, полученные по приведенным выше оценкам экспертов, представлены в табл. 5. Расчет коэффициентов проводился методом парного сравнения [18] на основании оценок трех независимых экспертов.

Таблица 2
Локальные критерии

Local criteria					
Вариант	W_N , кВт	W_S , кВт	M , кг	S , тыс. руб.	N
1	14,7	6,0	314,6	1026	1
2	12,3	2,9	377,6	775	5
3	16,5	8,4	306,4	969	2
4	16,5	2,9	369,4	732	4
5	23,8	8,4	268	901	2
6	23,8	2,9	331	664	6
7	16,5	8,4	259,8	866	4
8	16,5	2,9	322,8	629	6

Таблица 3
Нормированные локальные критерии

Standardized local criteria					
Вариант	$\bar{W}_N$	$\bar{W}_S$	$\bar{M}$	$\bar{S}$	N
1	0,21	0,56	0,47	1,00	1,00
2	0,00	0,00	1,00	0,37	0,20
3	0,37	1,00	0,40	0,86	0,80
4	0,37	0,00	0,93	0,26	0,40
5	1,00	1,00	0,07	0,69	0,80
6	1,00	0,00	0,60	0,09	0,00
7	0,37	1,00	0,00	0,60	0,40
8	0,37	0,00	0,53	0,00	0,00

Таблица 4
Весовые коэффициенты локальных критериев
Table 4
Weight coefficients of local criteria

Эксперт	a_{WN}	a_{WS}	a_M	a_S	a_N
1	0,23	0,14	0,09	0,42	0,12
2	0,32	0,3	0	0,3	0,08
3	0,27	0,22	0,012	0,25	0,24
Средняя оценка	0,27	0,22	0,038	0,32	0,15

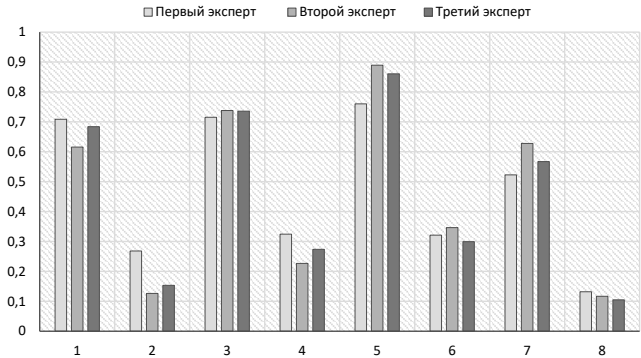


Рис. 1. Аддитивная функция
Fig. 1. Additive function

Результаты вычисления аддитивной функции для восьми вариантов ПВУ (см. табл. 2 и 3) с весовыми коэффициентами из табл. 4 показаны на рис. 1.

Аддитивная целевая функция, вычисленная по интервальным весовым коэффициентам показана на рис. 2.

Результаты решения оптимизационной задачи для аддитивной свертки локальных критериев, весовые коэффициенты которых являются экспертными оценками приведены в табл. 6.

Анализ полученных результатов показывает, что предпочтительными являются варианты № 2 и № 8, худшие результаты показали варианты № 5 и № 3.

При отсутствии экспертных оценок значимости критериев следует полагать, что все локальные критерии имеют одинаковые весовые коэффициенты.

Так как, рассматриваемые альтернативные варианты соответствуют условиям Парето, то все локальные критерии находятся в области допустимых значений, поэтому выбор оптимальных вариантов методом ограничений проведен непосредственно на основании анализа табл. 2 и 3. Оптимальные варианты, полученные методом ограничений, приведены в табл. 7.

Решение оптимизационной задачи методами приближения и отклонения предполагает существование эталонного варианта ПВУ. Если в ТЗ не задан прототип, на основе которого проводится проектирование, то в качестве такого эталона может быть принята виртуальная установка, локальные критерии которой являются лучшими из совокупности всех альтернативных вариантов (см. табл. 2).

Таблица 5
Интервальные коэффициенты локальных критериев
Table 5
Interval coefficients of local criteria

W_N		W_S		M		S		N	
a_{WN}^L	a_{WN}^R	a_{WS}^L	a_{WS}^R	a_M^L	a_M^R	a_S^L	a_S^R	a_N^L	a_N^R
0,23	0,32	0,14	0,3	0	0,09	0,25	0,42	0,08	0,24

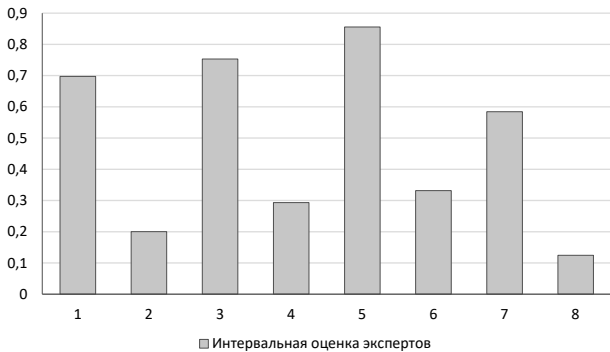


Рис. 2. Интервальная аддитивная функция
Fig. 2. Interval additive function

Таблица 6
Ранжированная последовательность альтернативных ПВУ
Table 6
Ranked duration of alternative AHU

Место	Эксп. 1	Эксп. 2	Эксп. 3	Интервальная
1	8	2	2	8
2	2	8	4	2
3	4	4	8	4
4	6	5	1	6
5	7	1	6	1
6	1	7	3	7
7	3	3	7	3
8	5	5	5	5

Таблица 7
Оптимальные варианты по методу ограничений
Table 7
Optimal options for using the constraint method

Критерий	$\bar{W}_N$	$\bar{W}_S$	$\bar{M}$	$\bar{S}$	N
Вариант	2	2; 4; 6; 8	5	8	1

Таблица 8
Локальные критерии эталонной установки
Table 8
Local criteria for reference installation

W_N , кВт	W_S , кВт	M , кг	S , тыс. руб	N
12,3	2,9	259,8	629	1

Таблица 9
Нормированные локальные критерии
альтернативных ПВУ

Table 9
Standardized local criteria for alternative AHU

Вариант	$\bar{W}_N$	$\bar{W}_S$	$\bar{M}$	$\bar{S}$	N
1	1,20	2,07	1,21	1,63	6,00
2	1,00	1,00	1,45	1,23	2,00
3	1,34	2,90	1,18	1,54	5,00
4	1,34	1,00	1,42	1,16	3,00
5	1,93	2,90	1,03	1,43	5,00
6	1,93	1,00	1,27	1,06	1,00
7	1,34	2,90	1,00	1,38	3,00
8	1,34	1,00	1,24	1,00	1,00

Таблица 10
Нормированные отклонения локальных критерием
от эталона

Table 10
Normalized deviations of local criteria from
the reference

Вариант	$\bar{W}_N$	$\bar{W}_S$	$\bar{M}$	$\bar{S}$	$\bar{N}$
1	0,21	0,56	0,47	1,00	0,00
2	0,00	0,00	1,00	0,37	0,80
3	0,37	1,00	0,40	0,86	0,20
4	0,37	0,00	0,93	0,26	0,60
5	1,00	1,00	0,07	0,69	0,20
6	1,00	0,00	0,60	0,09	1,00
7	0,37	1,00	0,00	0,60	0,60
8	0,37	0,00	0,53	0,00	1,00

Таблица 11
Вспомогательный вектор $X_j^{\max}$

Table 11
Auxiliary vector $X_j^{\max}$

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8
Вектор	1	1	1	0,93	1	1	1	1

Такие локальные критерии приведены в табл. 8. Нормированные локальные критерии (см. формулу (34)) приведены в табл. 9.

Результат решения методом приближения показан на рис. 3.

Нормированные локальные критерии по методу минимаксного отклонения (см. формулу (31)) и вектор $X_j^{\max}$ приведены в табл. 10 и 11, соответственно.

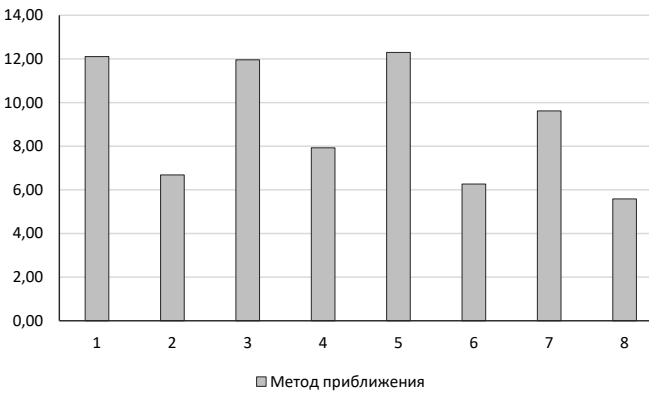


Рис. 3. Целевая функция по методу приближения

Fig. 3. Objective function by approximation method

Анализ результатов показывает, что все альтернативные варианты с точки зрения минимаксной оценки близки. Незначительное преимущество имеет четвертый вариант. Близость результатов объясняется тем, что эталонный вариант формировался из рассматриваемой совокупности установок, а все они соответствуют условию Парето.

Заключение

Начальным этапом структурно-параметрической оптимизации ПВУ является выбор схемы установки. Выбор схемы установки предлагается проводить методом парного сравнения на основе плавающего предпочтения. Этот метод и алгоритм его реализации рассмотрены в первой части статьи.

Следующим этапом оптимизация является подбор блоков для принятой схемы. Эту многокритериальную задачу предлагается решать методом свертки вектора локальных критериев к скалярной целевой функции.

В зависимости от требований ТЗ целевая функция формируется либо на основании экспертных оценок значимости локальных критериев, либо на сопоставлении с эталонной установкой (прототипом).

Алгоритм решения задачи.

1. Выбор альтернативных ПВУ.
2. Определение локальных критериев ПВУ.
3. Проверка альтернативных вариантов на соответствие условиям Парето.
4. Нормирование локальных критериев.
5. Выбор метода оптимизации.
6. Определение весовых коэффициентов локальных критериев.
7. Вычисление ранжированной последовательности альтернативных ПВУ.
8. Анализ решений полученными разными методами оптимизации.

Если полученные результаты не позволяют однозначно определить лучший вариант ПВУ, то расчет повторяется для тех конструкций, которые занимают наиболее высокие места в ранжированной последовательности.

Литература

References

1. КатюшаTM. Климат под контролем. [Электронный ресурс]: <https://katusha.pro/> (Дата обращения: 05.04.2024)
2. Breezart. [Электронный ресурс]: <https://breezart.ru/> (Дата обращения: 05.04.2024)
3. Dexvent. [Электронный ресурс]: <https://dexvent.ru/> (Дата обращения: 05.04.2024)
4. RVM. [Электронный ресурс]: <https://rvment.ru/> (Дата обращения: 05.04.2024)
5. Ровен. [Электронный ресурс]: <https://spb.rowen.ru/> (Дата обращения: 05.04.2024)
6. KORF. [Электронный ресурс]: <https://po-korf.ru/> (Дата обращения: 05.04.2024)
7. Развитие. [Электронный ресурс]: <https://progress-nw.ru/> (Дата обращения: 05.04.2024)
8. РЕМАК. [Электронный ресурс]: <https://www.remak.nl/> (Дата обращения: 05.04.2024)
9. Веа. [Электронный ресурс]: <https://veza.ru/> (Дата обращения: 05.04.2024)
10. СП 60.13330.2020. Свод правил. «Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха». Дата введения 1 июля 2021 года. 138 с.
11. Подиновский В. В., Ногин В. Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. Физматлит. 2007.
12. Ионов М. В., Болгова Е. В., Звартау Н. Э., Авдонина Н. Г., Балахонцева М. А., Ковальчук С. В., Конради А. О. Внедрение системы поддержки принятия решений для повышения качества медицинских данных пациентов с артериальной гипертензией // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22. № 1. С. 217–222.
13. Зубкова Т. М., Тагирова Л. Ф., Тагиров В. К. Прототипирование адаптивных пользовательских интерфейсов прикладных программ с использованием методов искусственного интеллекта // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19. № 4. С. 680–688.
14. Repetski E. J., Sarkani S., Mazzuchi T. Applying the analytic hierarchy process (AHP) to expert documents. // International Journal of the Analytic Hierarchy Process. 2022. V. 14. N 1. DOI: 10.13033/ijahp.v14i1.919
15. Машунин К. Ю., Машунин Ю. К. Векторная оптимизация с равнозначными и приоритетными критериями // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2017. № 6. С. 80–99.
16. Кини Р. Л., Райфа Х. Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения // Радио и связь. 1981.
17. Левин В. И. Сравнение интервалов и оптимизационные задачи с интервальными параметрами. // Радиоэлектроника, Информатика, Управление. 2001. № 2.
18. Саати Т. Л. Принятие решений. Метод анализа иерархий // Радио и связь. 1993. С. 316.
19. Галкина Н. И. Моделирование процесса прогноза и повышения надежности работы систем вентиляции // Инженерный вестник Дона. 2013. № 4. С. 202.
20. Пасечников К. В., Жировова С. В., Рамзаев А. В. Критерии оценки надежности функционирования систем вентиляции // Сборник статей X Международной научно-практической конференции. 2022. С. 188–191.
1. KatyushaTM. Climate control. [Electronic resource]: <https://katusha.pro/> (Date of request: 05.04.2024)
2. Breezart. [Electronic resource]: <https://breezart.ru/> (Date of request: 05.04.2024)
3. Dexvent. [Electronic resource]: <https://dexvent.ru/> (Date of request: 05.04.2024)
4. RVM. [Electronic resource]: <https://rvment.ru/> (Date of request: 05.4.2024)
5. Rowen. [Electronic resource]: <https://spb.rowen.ru/> (Date of request: 05.04.2024)
6. KORF. [Electronic resource]: <https://po-korf.ru/> (Date of request: 05.04.2024)
7. Progress. [Electronic resource]: <https://progress-nw.ru/> (Date of request: 05.04.2024)
8. REMAK. [Electronic resource]: <https://www.remak.nl/> (Date of request: 05.04.2024)
9. Vesa. [Electronic resource]: <https://veza.ru/> (Date of request: 05.04.2024)
10. CR 60.13330.2020. Code of rules. «Heating, ventilation and air conditioning». The date of introduction is July 1, 2021. 138 p. (in Russian)
11. Podinovsky V. V., Nogin V. D. Pareto-optimal solutions to multicriteria problems. Phismathlit. 2007. (in Russian)
12. Ionov M. V., Bolgova E. V., Zvartau N. E., Avdonina N. G., Balakhontseva M. A., Kovalchuk S. V., Conradi A. O. Implementation of a decision support system to improve the quality of medical data of patients with arterial hypertension. *Scientific and technical bulletin of information technologies, mechanics and optics*. 2022. vol. 22. No. 1. pp. 217–222. (in Russian)
13. Zubkova T. M., Tagirova L. F., Tagirov V. K. Prototyping adaptive user interfaces of application programs using artificial intelligence methods. *Scientific and Technical Bulletin of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2019. Vol. 19. No. 4. pp. 680–688. (in Russian)
14. Repetski E. J., Sarkani S., Mazzuchi T. Applying the analytic hierarchy process (AHP) to expert documents. *International Journal of the Analytic Hierarchy Process*. 2022. V. 14. N 1. DOI: 10.13033/ijahp.v14i1.919
15. Mashunin K. U., Mashunin U. K. Vector optimization with equivalent and priority criteria. *News of the Russian Academy of Sciences. Theory and control systems*. 2017. No. 6. pp. 80–99. (in Russian)
16. Keeney R. L. Raiffa H. Decisions with multiple objectives: preferences and value tradeoffs. *Radio and communications*. 1981. (in Russian)
17. Levin V. I. Comparison of intervals and optimization problems with interval parameters. *Radioelectronics, Computer Science, Management*. 2001. No 2. (in Russian)
18. Saati T. L. Making decisions. Method of analysis of hierarchies. *Radio and communication*. 1993. P. 316.
19. Galkina N. I. Modeling of the process of forecasting and improving the reliability of ventilation systems. *Engineering Bulletin of the Don*. 2013. No 4. P. 202. (in Russian)]
20. Pasechnikov K. V., Zhirovova S. V., Ramzaev A. V. Criteria for evaluating the reliability of ventilation systems. *Collection of articles of the X International Scientific and Practical Conference*. 2022. P 188–191. (in Russian)

Сведения об авторах

Цыганков Александр Васильевич

Д. т. н., профессор, Образовательный центр
«Энергоэффективные инженерные системы», Университет
ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9,
tsygaav@hotmail.com

Долговская Ольга Владимировна

К. т. н., директор Центра научно-образовательных
изданий Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург,
ул. Ломоносова, 9, ovdolgovskaia@corp.ifmo.ru,
РИНЦ SPIN-код 9181-9946

Виноградский Дмитрий Викторович

Аспирант, Образовательный центр «Энергоэффективные
инженерные системы», Университет ИТМО, 191002,
Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, Dimon3550@mail.ru

Information about authors

Tsygankov Aleksandr V.

D. Sc., Professor, Educational Center «Energy Efficient
Engineering Systems», ITMO University, 191002, Russia,
St. Petersburg, Lomonosov str., 9,
tsygaav@hotmail.com

Dolgovskaia Olga V.

Ph. D., Director of the Center for Scientific and Educational
Publications of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg,
Lomonosov str., 9, ovdolgovskaia@corp.ifmo.ru,
РИНЦ SPIN-код 9181-9946

Vinogradsky Dmitry V.

Postgraduate student, Educational Center «Energy Efficient
Engineering Systems», ITMO University, 191002, Russia,
St. Petersburg, Lomonosov str., 9, Dimon3550@mail.ru



Статья доступна по лицензии

Creative Commons «Attribution-NonCommercial»



30-я юбилейная международная выставка
**«Оборудование, технологии, сырье и ингредиенты
для пищевой и перерабатывающей
промышленности»**
29 сентября-2 октября 2025 г.

«Агропродмаш» – международная выставка оборудования, машин и ингредиентов для пищевой и перерабатывающей промышленности – на протяжении двух десятилетий демонстрирует лучшие мировые достижения, способствуя внедрению новых современных технологий российскими предприятиями пищевой и перерабатывающей промышленности.

«Агропродмаш» – абсолютный лидер среди выставок России по тематике «Пищевая промышленность, оборудование и ингредиенты» во всех категориях:

✓ Пищевые технологии.	✓ Ингредиенты.
✓ Оболочки.	✓ Пищевая безопасность.
✓ МясоПром.	✓ Холод.
✓ ПтицеПром.	✓ УпаковМаш.
✓ РыбПром.	✓ Пищевая безопасность.
✓ КондитерПром.	✓ Весовое и измерительное оборудование.
✓ ХлебПром.	✓ Склад, логистика.
✓ ЗерноПром.	✓ Автоматизация.
✓ ФруктПром.	✓ Санитария и гигиена.
✓ МолТех.	✓ Промышленные полы.
✓ Розлив.	✓ Переработка отходов.
✓ Напитки.	✓ Комплект.
✓ Мороженое.	✓ Интернэшнл.

Организатор выставки:

ЦВК «Экспоцентр», 123100, Россия, Москва,
Краснопресненская набережная, 14

Место проведения: МВЦ «Крокус Экспо»



<https://www.agroprod mash-expo.ru/>