

УДК 697.921.47

Структурная и параметрическая оптимизация канальной приточно-вытяжной вентиляции. Часть 1

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 рассматривается метод оценки структуры канальных приточно-вытяжных установок (ПВУ). Особенностью таких установок является многообразие возможных схем компоновки блоков. Возникает необходимость выбрать из множества альтернативных вариантов Парето-оптимальное сочетание стоимостных, энергетических, массогабаритных и пр. параметров. В статье приведены базовые варианты схем компоновки установок. Исходные данные оптимизационной задачи приняты в виде массива (матрицы), состоящего из локальных критериев альтернативных вариантов компоновки ПВУ. Оптимизационная задача по выбору схемы ПВУ решается с помощью метода парного сравнения критериев на основе плавающего предпочтения. Предложен алгоритм проверки всех альтернатив на соответствие условиям Эджворта — Парето. На основе вербально-числовой шкалы относительной предпочтительности критериев сформирована матрица парных сравнений, которая представляет собой квадратную обратно-симметричную матрицу. Приведен метод вычисления собственного значения и собственного вектора такой матрицы. Собственный вектор обеспечивает упорядочение приоритетов, а собственное значение является мерой согласованности симметричной матрицы. В качестве примера рассмотрено решение задачи выбора одной из четырех базовых схемы ПВУ по локальным критериям (энергоэффективность, стоимость, надежность, массо-габариты, сервисное обслуживание). Приведены матрицы парных сравнений по локальным критериям и матрица собственных векторов альтернативных схем. В заключении статьи представлен алгоритм решения задачи оптимального выбора схемы ПВУ методом парного сравнения на основе экспертных оценок.

Ключевые слова: приточно-вытяжная вентиляция, подбор оборудования, метод парного сравнения, оптимизация, условия Эджворта — Парето.

Информация о статье:

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

DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-4-12-18

Язык статьи — русский

Для цитирования:

Цыганков А. В., Долговская О. В., Виноградский Д. В. Структурная и параметрическая оптимизация канальной приточно-вытяжной вентиляции. Часть 1. // Вестник Международной академии холода. 2024. № 4. С. 12–18. DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-4-12-18

Structural and parametric optimization of ducted supply and exhaust ventilation. Part 1

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 a method for assessing the structure of ducted air handling units (AHU). A special feature of such installations is the variety of possible block layouts. There is a need to choose from a variety of alternative options for a Pareto-optimal combination of cost, energy, weight, size, and other parameters. The article provides basic options for installation layout schemes. The initial data of the optimization problem is taken in the form of an array (matrix) consisting of local criteria for alternative options for the layout of the AHU. The optimization problem of choosing an AHU scheme is solved using the method of paired comparison of criteria based on floating preference. An algorithm is proposed for checking all alternatives for compliance with the Edgeworth — Pareto conditions. Based on the verbal-numerical scale of relative preference of criteria, a matrix of paired comparisons was formed, which is a square inversely symmetric matrix. A method for calculating the eigenvalue and eigenvector of such a matrix is given. The eigenvector provides priority ordering, and the eigenvalue is a measure of the consistency of the symmetric matrix. As an example, the solution to the problem of choosing one of four basic AHU schemes according to local criteria (energy efficiency, cost, reliability, weight and dimensions, maintenance) is considered. The matrices of pairwise comparisons based on local criteria and the matrix of eigenvectors for alternative schemes are presented. In conclusion, the article presents an algorithm for solving the problem of optimal selecting an AHU scheme using the paired comparison method based on expert assessments.

Keywords: supply and exhaust ventilation, equipment selection, paired comparison method, optimization, Edgeworth — Pareto conditions.

Article info:

Received 04/06/2024, approved after reviewing 08/08/2024, accepted 03/09/2024

DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-4-12-18

Article in Russian

For citation:

Tsygankov A. V., Dolgovskaia O. V., Vinogradsky D. V. Structural and parametric optimization of ducted supply and exhaust ventilation. Part 1. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2024. No 4. p. 12-18. DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-4-12-18

Введение

Системы вентиляции являются обязательным элементом инженерного обеспечения жилых и общественных зданий. Для современных производственных технологических процессов режимы вентиляции и параметры воздушной среды жестко нормируются и во многих случаях определяют энергопотребление и качество выпускаемой продукции. Следствием высокой востребованности вентиляционного оборудования стало наличие на рынке большого количества производителей, выпускающих близкие по конструкции и техническим характеристикам системы канальной вентиляции.

Особенностью канальных приточно-вытяжных установок является многообразие возможных схем компоновки блоков, многообразие однотипных блоков, выпускаемых разными производителями, возможность изготовления (модернизации) блоков с особыми конструктивными и режимными характеристиками. Возникает необходимость выбрать из множества альтернатив оптимальный вариант.

Анализ методов проектирования климатического оборудования показывает, что в настоящее время при выборе схемы ПВУ учитываются только затраты энергии на обработку воздушных потоков [1]. Такой подход не позволяет учитывать многообразные технико-экономические, экологические и организационные факторы, оказывающие влияние на общую эффективность инженер-

ных систем здания. Также необходимо учитывать, что системы вентиляции должны обеспечивать безусловное выполнение санитарных требований к качеству внутренней воздушной среды. Целью предлагаемой методики оптимизации проектного решения является учет комплекса частных (локальных) критериев с учетом ограничений, накладываемых санитарными и строительными нормами. Решение общей многофакторной оптимизационной задачи может быть сведено к последовательному решению трех задач с различными локальными критериями:

- выбор схему ПВУ;
- подбор блоков для выбранной схемы;
- определение оптимальных конструктивных и режимных параметров для выбранных блоков ПВУ.

Структура и состав приточно-вытяжных установок

Современные канальные вентиляционные приточно-вытяжные установки представляют собой блочные конструкции. Состав и компоновка блоков, входящих в установку, определяется техническим заданием (ТЗ), климатическими условиями, архитектурно-планировочными особенностями всего здания и отдельных помещений.

Можно выделить некоторые базовые варианты схем компоновки установок [1, 2]:

- прямоточная (разделенная) система вентиляции (рис. 1);

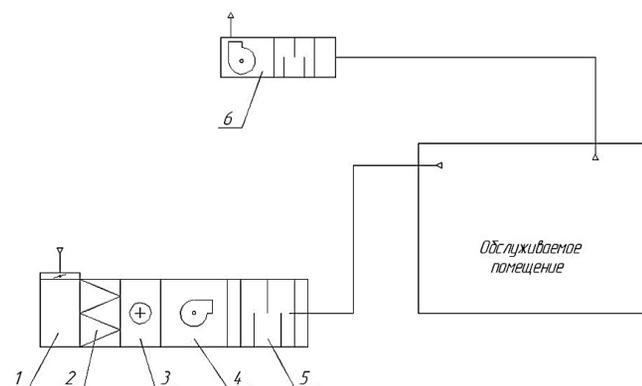


Рис. 1. Прямоточная система вентиляции:

- 1 — приемная секция; 2 — воздушный фильтр грубой очистки; 3 — воздухонагреватель; 4 — приточный вентилятор; 5 — шумоглушитель; 6 — вытяжной вентилятор

Fig. 1. Direct-flow ventilation system:

- 1 — feed section; 2 — coarse air filter; 3 — air heater; 4 — supply fan; 5 — sound absorber; 6 — exhaust fan

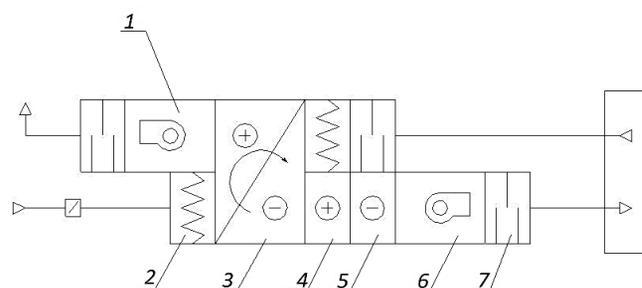


Рис. 2. Принципиальная схема вентиляции

- с роторным регенератором: 1 — вытяжной вентилятор; 2 — воздушный фильтр грубой очистки; 3 — роторный регенератор; 4 — воздухонагреватель; 5 — воздухоохладитель; 6 — приточный вентилятор; 7 — шумоглушитель

Fig. 2. Ventilation with rotary regenerator: 1 — exhaust fan; 2 — coarse air filter; 3 — rotary regenerator; 4 — air heater; 5 — air cooler; 6 — supply fan; 7 — sound absorber

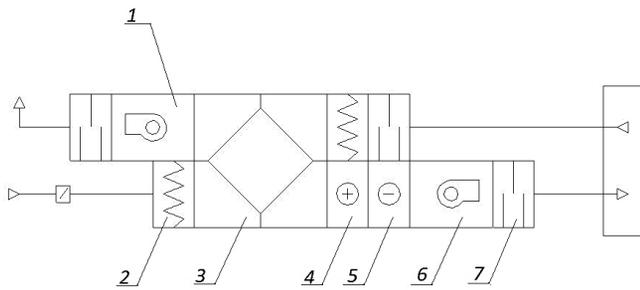


Рис. 3. Принципиальная схема вентиляции с рекуператором: 1 — вытяжной вентилятор; 2 — воздушный фильтр грубой очистки; 3 — рекуператор; 4 — воздушонагреватель; 5 — воздухоохладитель; 6 — приточный вентилятор; 7 — шумоглушитель

Fig. 3. Ventilation with recuperator: 1 — exhaust fan; 2 — coarse air filter; 3 — recuperator; 4 — air heater; 5 — air cooler; 6 — supply fan; 7 — sound absorber

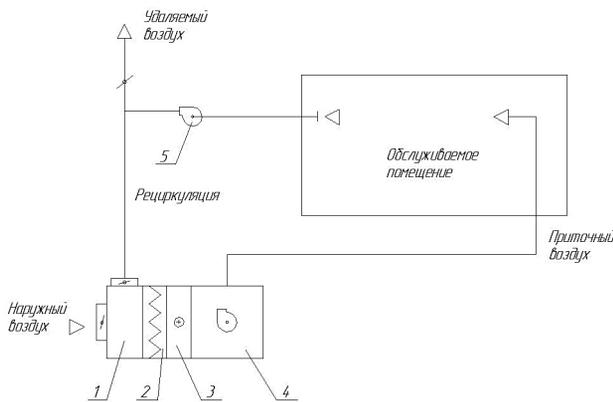


Рис. 4. Система вентиляции с рециркуляцией: 1 — приемная секция; 2 — воздушный фильтр грубой очистки; 3 — воздушонагреватель; 4 — приточный вентилятор; 5 — вытяжной вентилятор

Fig. 4. Ventilation system with recirculation: 1 — feed section; 2 — coarse air filter; 3 — air heater; 4 — supply fan; 5 — exhaust fan

- с передачей теплоты вытяжного воздуха приточному воздуху в регенеративном теплообменнике (рис. 2).
- с передачей теплоты вытяжного воздуха приточному воздуху в рекуперативном теплообменнике (рис. 3);
- с рециркуляцией вытяжного воздуха (рис. 4).

По функциональному назначению основные блоки канальных ПВУ делятся на:

- вентиляторы (радиальные, осевые, диаметрально-ые, с плавным регулированием, со ступенчатым регулированием и пр.);
- воздухоохладители (водяные, прямые);
- воздушонагреватели (электрические, водяные);
- воздушные теплообменники (рекуперативные, регенеративные);
- фильтры (грубой очистки, средней очистки);
- шумоглушители (низкочастотные, высокочастотные);
- клапаны (камеры, заслонки).

В крупных жилых, общественных и производственных зданиях, как правило, используется комбинация всех приведенных выше схем ПВУ.

Постановка оптимизационной задачи

Особенностью проектирования любого технического объекта и является наличие нескольких критериев оптимальности. В качестве локальных критериев могут выступать различные энергетические, технико-экономические, экологические и прочие параметры и характеристики, представляющие собой числовые (номинальные, порядковые, бинарные) или лингвистические переменные. Состав и значимость частных критериев для ПВУ зависит от требований к параметрам микроклимата в вентилируемых помещениях, ограничений накладываемых ТЗ, особенностей монтажа и эксплуатации системы вентиляции.

Исходные данные оптимизационной задачи представляют собой массив (матрицу):

$$\{A_{i,j}\}; \quad i \in (1, n), j \in (1, p), \quad (1)$$

где n — количество альтернативных вариантов (строки); p — количество частных (локальных) критериев (столбцы).

Общая формулировка задачи выбора оптимального варианта:

$$\text{extr} F(\{X\}) = X^*; \quad (2)$$

$$\{X\} \in \{D_X\}; \quad (3)$$

$$F(X) = (f_1(X), f_2(X), \dots, f_p(X)), \quad (4)$$

где X^* — оптимальное решение (результат решения оптимизационной задачи); $\{X\}$ — множество решений находящихся в области Парето; $\{D_X\}$ — исходное множество решений; $F(X)$ — векторный критерий оптимальности; $f_j(X), j \in (1, p)$ — частные (скалярные) критерии оптимальности.

Все альтернативы должны удовлетворять условиям Парето [3]. Множество альтернативных вариантов не может содержать элемент, все локальные критерии которого хуже, чем аналогичные критерии любого члена множества. Если исходное множество содержит элемент, все локальные критерии которого, лучше всех соответствующих локальных критериев любого из элементов этого множества, то этот элемент представляет собой решение оптимизационной задачи.

Для проверки условия (3) выделим из $\{D_{i,j}\}$ вектор \vec{F}_s , и матрицу $[X_s]$.

$$\vec{F}_s = (f_1(X_s), f_2(X_s), \dots, f_p(X_s))$$

— строка массива $\{D_{i,j}\}$ с номером s .

$$[X_s]_{i,j} = \{D_{i,j}\}, \quad i \in (1, n), i \neq s, j \in (1, p),$$

где $[X_s]_{i,j}$ — массив $\{D_{i,j}\}$ без строки с номером s .

Введем в рассмотрение матрицу

$$[E_s]_{i,j}, \quad i \in (1, n-1), j \in (1, p).$$

Почленно сопоставим все элементы вектора $[X_s]$ с соответствующими элементами $[X_s]_{i,j}$.

$$[E_s]_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{if } (\vec{F}_s)_j > [X_s]_{i,j}, \quad i \in (1, n-1); \quad j \in (1, p) \\ 0 & \end{cases}$$

Здесь символ \succ — условие превосходства частного критерия.

Если все элементы матрицы $[E_s]_{i,j}$ равны единице, то вектор \vec{F}_s доминирующий и он является решением оптимизационной задачи (2). Если все элементы матрицы $[E_s]_{i,j}$ равны нулю, то вектор \vec{F}_s не соответствует условию Парето, и он исключается из множества альтернативных решений. Процедура проверки условия (2) проводится последовательно для всех строк массива $\{D_{i,j}\}$. Необходимо отметить, что после исключения какой-либо строки из $\{D_{i,j}\}$ процедура проверки проводится повторно начиная с первой строки.

Выбор весовых коэффициентов

Для сравнения альтернативных вариантов схем, как правило, используются интегральные критерии в виде свертки локальных критериев [4]-[6]

В состав интегрального критерия локальные критерии входят с их весовыми коэффициентами, учитывающими важность этих локальных критериев.

Выбор весовых a_i коэффициентов для оценки важности критериев — основная проблема многокритериальных задачах оптимизации. Большинство подходов к определению весовых коэффициентов для частных критериев можно разделить на экспертные [7, 8] и статистические [9, 10]. 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.

В последнее время для расчета весовых коэффициентов критериев стали широко использовать метод парного сравнения критериев на основе плавающего предпочтения [11]-[13].

При использовании этого метода сначала формируются логические суждения о качественном уровне предпочтения критериев по отношению друг к другу. Затем используя вербально-числовую шкалу табл. 1 качественные значения предпочтения переводятся в количественные и формируется матрица парных сравнений [11].

По соглашению сравнение всегда производится для объекта, стоящего в левом столбце, по отношению к объекту, стоящему в верхней строке.

Пусть C_1, C_2, \dots, C_n — совокупность объектов. Количественные суждения о парах объектов (C_i, C_j) представляются матрицей размера $n \times n$

$$A = (a_{i,j}), (i, j = 1, 2, \dots, n).$$

Правила формирования матрицы:

1. Если $a_{i,j} = \alpha$, то $a_{j,i} = 1/\alpha, \alpha \neq 0$.
2. Если количественные суждения таковы, что C_i, C_j имеют одинаковую значимость, то $a_{i,j} = 1$ и $a_{j,i} = 1$, в частности $a_{i,i} = 1$ для всех i .

Таким образом, матрица парных сравнений представляет собой квадратную обратно-симметричную матрицу:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{1,2} & \dots & a_{1,n} \\ 1/a_{1,2} & 1 & \dots & a_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/a_{1,n} & 1/a_{2,n} & \dots & 1 \end{bmatrix}.$$

Корректное формирование матрицы парных сравнений предполагает выполнение условия согласованности для всех ее элементов. Если объекты C_i, C_j, C_m связаны зависимостями $C_i = k_{i,j} C_j$ и $C_i = k_{i,m} C_m$, то условие

$$\text{согласованности } C_j = C_m \frac{k_{i,m}}{k_{i,j}}.$$

Так как матрица формируется на основании независимых экспертных оценок, то она почти всегда несогласованная, но рассматриваемый метод допускает незначительный уровень несогласованности. Необходимо отметить, что для большинства практических задач очень трудно сформировать оценки, связывающие все объекты, если некоторые из них являются истинными и не подлежат коррекции.

После формирования матрицы A , задача сводится к тому, чтобы поставить в соответствие C_1, C_2, \dots, C_n числовые коэффициенты $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$, которые соответствуют принятым вербальным критериям важности. В монографии [11] показано, что решение сводится к задаче о собственных значениях матрицы:

$$\omega_i = \frac{1}{\lambda_{\max}} \sum_{j=1}^n a_{i,j} \omega_j, \quad i, j = 1, 2, \dots, n,$$

где λ_{\max} — максимальное собственное число матрицы; $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$ — собственный вектор матрицы A .

Собственный вектор обеспечивает упорядочение приоритетов, а собственное значение является мерой согласованности суждений.

Таблица 1

Вербально-числовая шкала относительной предпочтительности критериев

Table 1

Verbal-numeric scale for relative preferences of the criteria

Количественное определение уровня предпочтительности	Вербальное определение важности критерия
1	Равная предпочтительность
3	Умеренное (слабое) превосходство
5	Сильное превосходство
7	Очень сильная предпочтительность
9	Абсолютная предпочтительность
2, 4, 6, 8	Промежуточный выбор между двумя соседними значениями

Элементы собственного вектора вычисляются последовательно по формуле [11]:

$$\omega_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{i,j}}, \quad (5)$$

а затем нормализуются

$$\alpha_i = \frac{\omega_i}{\sum_i \omega_i}. \quad (6)$$

Собственные значения определяются из матричного уравнения

$$[A]\bar{\omega} = \lambda_{\max}\bar{\omega}. \quad (7)$$

Для согласованной обратно-симметричной матрицы $\lambda_{\max} = n$, поэтому для оценки согласованности матрицы принят индекс

$$C_s = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}.$$

Если $C_s \leq 0,1$ то можно полагать, что матрица суждений согласована на приемлемом уровне.

Выбор схемы ПВУ

В качестве примера рассмотрен выбор схем ПВУ, показанных на рис. 1–4.

Схема 1 — прямоточная система вентиляции.

Схема 2 — система вентиляции с рециркуляцией.

Схема 3 — система вентиляции с роторным регенератором.

Схема 4 — система вентиляции с рекуперативным теплообменником.

Матрица парных сравнений, сформированная группой экспертов по локальным критериям приведена в табл. 2.

Собственный вектор $\alpha_\Sigma = \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5$ и оценка согласованности C_s вычислялись по формулам (5) и (6), соответственно.

$$\alpha_\Sigma = 0,50, 0,25, 0,11, 0,044, 0,093; C_s = 0,08.$$

В табл. 3–7 представлены матрицы парных сравнений рассматриваемых схем по всем локальным критериям.

Таблица 2

Матрица парных сравнений локальных критериев

Table 2

Matrix for paired comparisons of local criteria

	Энергоэффективность	Стоимость	Надежность	Массогабариты	Сервисное обслуживание
Энергоэффективность	1	3	5	7	5
Стоимость	1/3	1	2	5	5
Надежность	1/5	1/2	1	3	1
Массо-габариты	1/7	1/5	1/3	1	1/3
Сервисное обслуживание	1/5	1/5	1	3	1

Таблица 3

Матрица парных сравнений схем по энергоэффективности*

Table 3

Matrix of pairwise comparisons by energy efficiency schemes*

Энергоэффективность	Схема 1	Схема 2	Схема 3	Схема 4
Схема 1	1	0,5	0,14	0,25
Схема 2	2	1	0,33	0,5
Схема 3	7	3	1	2
Схема 4	4	2	0,5	1

$$*\alpha_E = 0,071, 0,149, 0,500, 0,278; C_s = 0,0014.$$

Таблица 5

Матрица парных сравнений схем по надежности*

Table 5

Matrix of pairwise comparisons for the circuits by reliability*

Надежность	Схема 1	Схема 2	Схема 3	Схема 4
Схема 1	1	2	7	6
Схема 2	0,5	1	5	3
Схема 3	0,14	0,2	1	0,5
Схема 4	0,17	0,33	2	1

$$*\alpha_N = 0,540, 0,295, 0,061, 0,103; C_s = 0,012.$$

Таблица 4

Матрица парных сравнений схем по стоимости*

Table 4

Matrix of pairwise comparisons for the schemes by cost*

Стоимость	Схема 1	Схема 2	Схема 3	Схема 4
Схема 1	1	2	5	4
Схема 2	0,5	1	4	3
Схема 3	0,2	0,25	1	2
Схема 4	0,25	0,33	0,5	1

$$*\alpha_S = 0,493, 0,307, 0,11, 0,088; C_s = 0,064.$$

Таблица 6

Матрица парных сравнений схем по массогабаритным параметрам*

Table 6

Matrix of paired comparisons for the schemes by weight and size parameters*

Массогабарит	Схема 1	Схема 2	Схема 3	Схема 4
Схема 1	1	2	5	4
Схема 2	0,5	1	3	2
Схема 3	0,2	0,33	1	0,5
Схема 4	0,25	0,5	2	1

$$*\alpha_M = 0,507, 0,265, 0,086, 0,142; C_s = 0,009.$$

Таблица 7
Матрица парных сравнений схем по сервисному обслуживанию*

Table 7
Matrix of paired comparisons for the schemes by maintenance*

Сервис	Схема 1	Схема 2	Схема 3	Схема 4
Схема 1	1	2	7	5
Схема 2	0,5	1	5	4
Схема 3	0,14	0,2	1	2
Схема 4	0,2	0,25	0,5	1

* $\alpha_C=0,521, 0,320, 0,088, 0,072; C_s=0,067.$

Анализ расчетов показывает, что для всех матриц парных сравнений условие согласованности выполняется.

Для вычисления весовых коэффициентов рассматриваемых схем формируется общая матрица, столбцы которой являются собственными векторами $\alpha_E, \alpha_S, \alpha_N, \alpha_M, \alpha_C$ (табл. 8).

Затем эта матрица умножается на вектор-столбец α_Σ , в результате получаем новый вектор α_{unit} , элементы которого являются весовыми коэффициентами схем ПВУ.

$$\alpha_{unit} = \begin{bmatrix} 0.291 \\ 0.226 \\ 0.296 \\ 0.186 \end{bmatrix}.$$

Полученный результат показывает, что для принятых парных сравнений локальных критериев (табл. 2) и альтернативных схем (табл. 3–7) предпочтительной является схема ПВУ с роторным регенеративным теплообменником.

Заключение

Начальным этапом структурной оптимизации ПВУ является выбор схемы установки. Выбор схемы установки предлагается решать методом парного сравнения на основе плавающего предпочтения.

Литература

1. Основные схемы систем вентиляции и кондиционирования воздуха. Р НОСТРОЙ 2.15.13–2015. М.: 2017.
2. Уляшева В. М., Иванова Ю. В., Федорова И. В. Вентиляция общественного здания: учебное пособие. СПбГАСУ. 2024. С. 106.
3. Подиновский В. В., Ногин В. Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. М.: Физматлит, 2007. 256 с.
4. Постников В. М., Черненко В. М. Методы принятия решений в системах организационного управления. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. С. 205.
5. Зак Ю. А. Прикладные задачи многокритериальной оптимизации. М.: Экономика, 2014. С. 455.
6. Ногин В. Д. Линейная свертка в многокритериальной оптимизации // Искусственный интеллект и принятие решений. 2014. № 4. С. 73–82.
7. Ионов М. В., Болгова Е. В., Звартау Н. Э., Авдонина Н. Г., Балахонтцева М. А., Ковальчук С. В., Конради А. О. Внедрение системы поддержки принятия решений для повышения

Таблица 8
Общая матрица собственных векторов

Table 8
General eigenvector matrix

	Энергоэффективность	Стоимость	Надежность	Масса	Сервис
Схема 1	0,072	0,494	0,540	0,507	0,521
Схема 2	0,149	0,307	0,295	0,265	0,320
Схема 3	0,501	0,110	0,061	0,086	0,088
Схема 4	0,278	0,088	0,103	0,142	0,072

Алгоритм решения задачи:

1. Выбор альтернативных схем ПВУ;
2. Определение локальных критериев выбора схемы;
3. Проверка схем на соответствие условиям Парето;
4. Формирование вербальных и количественных критериев важности локальных критериев (табл. 1);
5. Формирование матрицы парных сравнений A (табл. 2);
6. Формирование матриц парного сравнения альтернативных схем по всем локальным критериям (табл. 3–7);
7. Вычисление собственных значений и собственных векторов всех сформированных матриц;
8. Проверка всех матриц на выполнение условия согласованности;
9. Формирование общей матрицы собственных векторов (табл. 8);
10. Вычисление вектора весовых коэффициентов схем ПВУ α_{unit} ;
11. Выбор схемы с максимальным значением весового коэффициента.

Как отмечалось выше, оптимизация ПВУ состоит из нескольких этапов. После выбора схемы установки необходимо подобрать отдельные блоки ПВУ. Решение этой задачи будет рассмотрено во второй части данной статьи.

References

1. Basic schemes of ventilation and air conditioning systems. R NOSTROI 2.15.13–2015. Moscow: 2017. (in Russian)
2. Ulyasheva V. M., Ivanova U. V., Fedorova I. V. Ventilation of a public building: a textbook. SPBGASU. 2024. P. 106. (in Russian)
3. Podinovsky V. V., Nogin V. D. Pareto-optimal solutions to multicriteria problems. Moscow: Phismathlit. 2007. 256 p. (in Russian)
4. Postnikov V. M., Chernenky V. M. Methods of decision-making in organizational management systems. Moscow: MSTU im. N. E. Bauman, 2014. P. 205. (in Russian)
5. Zach Yu. A. Applied problems of multicriteria optimization. Moscow: Economy, 2014. P. 455. (in Russian)
6. Nogin V. D. Linear convolution in multicriteria optimization. *Artificial intelligence and decision making*. 2014. No. 4. P. 73–82. (in Russian)
7. 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

- качества медицинских данных пациентов с артериальной гипертензией // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22. № 1. С. 217–222.
8. *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.
 9. *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
 10. *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.
 11. *Saati T. L.* Принятие решений. Метод анализа иерархий. М.: Радио и связь, 1993. С. 316.
 12. *Madera A. G.* Моделирование и принятие решений в менеджменте. Руководство для будущих топ-менеджеров. М.: ЛКИ, 2010. С. 688.
 13. *Ногин В. Д.* Принятие решений при многих критериях. СПб.: ЮТАС, 2007. С. 104.
 8. *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*. 2022. vol. 22. No. 1. pp. 217–222. (in Russian)
 9. *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
 10. *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)
 11. *Saati T. L.* Making decisions. Method of analysis of hierarchies. Moscow: Radio and communication, 1993. P. 316. (in Russian)
 12. *Madera A. G.* Modeling and decision making in management. A guide for future top managers. Moscow: LKI, 2010. P. 688. (in Russian)
 13. *Nogin V. D.* Decision making under multiple criteria. SPb, UTAS, 2007. P. 104. (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»