

УДК 661.25.66.094

Капустенко П.А., Илюнин О.О., Болдырев С.А., Гарев А.О., Лещенко Е.В., Перевертайленко А.Ю.,  
Селяков А.М., Шамраев А.А.**КРИТЕРИЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ  
С УЧЕТОМ ГРУППОВОГО ВЛИЯНИЯ АРГУМЕНТОВ**

**Введение.** Украинские системы центрального отопления потребляют большое количество минерального топлива. Это приводит к высокому уровню выбросов углекислого газа, приводит к отрицательному воздействию на окружающую среду и негативно влияет на экономические показатели. Но районы концентрации промышленных предприятий имеют альтернативу – использование низкопотенциальных источников тепла (НИТ), а именно сбросных вод. И при интеграции теплового насоса (ТН) в отопительные системы предприятий уровни выбросов и экономические показатели могут существенно улучшиться. Методы утилизации низкопотенциального тепла известны и хорошо описаны в литературе [1]. Как правило, топологию схемы интеграции ТН в существующие отопительные системы предприятий определяют на предварительном этапе проекта по критерию минимума капитальных затрат. Синтез технических систем сложной структуры, к которым относится ТН, приводит к необходимости решения оптимизационных задач, которые также называют многокритериальными. Задача из общей задачи схемно-параметрической оптимизации сложной технической системы (СТС) сводится к задаче оптимизации параметров – из имеющихся в серийном выпуске агрегатов, компонентов, элементов, изделий скомпоновать ТН, эффективный, в определенном смысле, при заданных ограничениях.

ТН, как технический объект характеризуется принципом действия, заданной структурой, и множеством связанных нелинейно параметров, характеризующих процесс его функционирования. Задача поиска оптимальных параметров ТН при проектировании относится к задачам параметрической оптимизации. При их решении используют формализованные показатели — количественные оценки, которые также называют критериями оптимизации, или эффективности объекта [2]. Особенность, характерная как для векторных, так и для скалярных нелинейных задач – многоэкстремальность. Практическая значимость этой особенности заключается в том, что в решении многих прикладных проблем недостаточно отыскания некоторого локального решения, ибо, с одной стороны, глобальное решение может быть существенно эффективнее локального (на 35 % и более) а, с другой стороны, в ряде приложений искомые величины определяются только глобальным решением (например, при использовании принципа наилучшего гарантированного результата). Данное обстоятельство определяет прикладной интерес к решению многоэкстремальных задач оптимизации. Вместе с тем ряд важнейших вопросов, в частности, вопрос локализации экстремумов, далеки от разрешения. Указанные факторы определяют необходимость и актуальность исследования многокритериальных нелинейных оптимизационных задач и разработки практически приемлемых методов их решения.

**Постановка задачи.** Оценка эффективности требуется для самых разнообразных систем и процессов, показатель эффективности должен связывать между собой базовые показатели, которые являются общими для любой системы, процесса. Это означает, что в общем случае показатель эффективности является междисциплинарным. При замене оценок стоимостными показателями, показатель эффективности превращается в инструмент оценивания экономических операций. Учитывая огромное разнообразие номенклатуры комплектации, информационную доступность к техническим характеристикам, необходимо применение процедур ускоренного поиска удовлетворительных вариантов решения. Это приводит к требованию синтеза критериев, агрегирующих в себе все требования и цели технической системы.

Целью работы является разработка критерия оценки эффективности ТН, учитывающего нелинейность связей параметров системы. Это может выглядеть как двухэтапная процедура [3]:

- на первом этапе «При заданных исходных данных (ИД) подобрать множество  $N$  эффективных ТН»;
- на втором этапе «Из  $N$  эффективных ТН выбрать наилучшее решение».

Исходные данные для анализа и решения задачи являются характеристики НИТ, температурный график  $T_{11}/T_{21}(T_1)$  и нагрузка потребления:  $\langle V_{src}, T_{src}, Q_{ab}, T_{11}, T_{21}, T_1 \rangle$ .

В частности, ОАО «Запорожский железорудный комбинат» постоянно откачивает шахтные воды в объеме  $V_{src} = 2000$  куб.м/час с температурой  $T_{src} \approx 22$  °С при существующей потребности  $Q_{ab} = 4,167$  Гкал/час. Как оптимальная [4] была принята бивалентная параллельная схема интеграции компрессорного ТН типа «вода-вода» в существующую теплотель предприятия для выработки тепла на обогрев стволов шахт (рис. 1).

**Формализация описания.** Комплексную тепловую установку КТУ (рис.1) после декомпозиции на установки, агрегаты, узлы, компоненты (подклассы), можно формально описать как объект, или класс объ-

ектов в виде декартова произведения, формирующего множество реализуемых решений  $R^i(U)$ , где  $i = \text{card}(HG) \cdot \text{card}(NP) \cdot \text{card}(HP)$  – число всех технически возможных реализаций установки, где  $HG$  – теплогенератор,  $NP$  – сетевой насос,  $HP$  – тепловой насос. Мощности множеств всех технически возможных реализаций сетевых и тепловых насосов примем как  $\text{card}(NP) = p$  и  $\text{card}(HP) = h$  соответственно. В КТУ реализован пиковый теплогенератор, следовательно,  $\text{card}(HG) = g = 1$ .

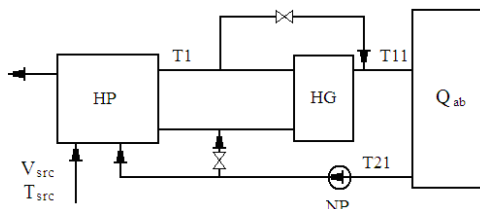


Рисунок 1 – Интеграция ТН в тепловую сеть по бивалентной параллельной схеме

С определенной глубиной формализации ТН, как объект или класс объектов, точно также можно представить в виде множества реализаций решений или записей полей базы данных, структура которых формируются на основе кортежей вида:

$HP: \langle \text{Compressor, Evaporator, Condenser, \dots, Refr; } V_{ref}, Q_{ab}, \dots, T_{11}, T_{21}, T_1, COP, CC, OC \rangle$ , где переменные  $V_{ref}, Q_{ab}, \dots, T_{11}, T_{21}, T_1$ , представляют собой конкретные числовые ограничения,  $COP, CC, OC$  – числовые значения, а переменные  $\text{Compressor, Evaporator, Condenser, \dots, Refr}$  являются лингвистическими, как например,  $\text{Evaporator} = \text{NB14-20 Alfa Laval, Refr} = \text{R136a}$ .

При более глубокой детализации модели каждый терм-элемент кортежа можно представить в виде записи следующей структуры:

- $\text{Compressor} = \langle T_1 = f_1(\text{Refr}, V_{ref}, T_{src}, \Delta P_{cp}, Q_{ab}), \dots, COP = f_{k-1}(N(\Delta P_{cp}), T_1), OC_{HP} = f_k(COP, N(P_{cp})), CC_{HP} \rangle$ ,
- $NP = \langle G = y_1(Q_{ab}, T_{11}, T_{21}), \dots, OC_{NP} = y_m(G, N(H_{pump}), \Delta P), CC_{NP} \rangle$ , где:
- Refr – тип хладагента,
- $V_{ref}$  – объем хладагента,
- $\Delta P_{cp}$  – необходимый перепад давления для компрессии хладагента,
- $N(P_{cp})$  – потребляемая электрическая мощность компрессора,
- COP коэффициент преобразования расхода электроэнергии на производство тепловой энергии (компрессию рабочего тела ТН),
- G – массовый расход в тепловой сети,
- $N(H_{pump})$  – потребляемая электрическая мощность сетевого насоса,
- $H_{pump}$  – необходимый напор,
- $\Delta P$  – перепад давления в тепловой сети,
- CC, OC – соответственно капитальные и эксплуатационные затраты.

Все элементы записей связаны между собой расчетными методами  $\{ f_k \}, \dots, \{ y_m \}$ , характеризующими физические зависимости между элементами ТН в виде формул, систем уравнений, и т.д. Эти методы реализованы в виде программных приложений, разработанных проектировщиками либо предоставленных производителями.

В силу того, что множество технически реализуемых агрегатов, узлов и т.д. (экземпляров подклассов) конечно, конечно и множество реализуемых решений  $\text{card}(R_L(U)) = g \cdot h \cdot p = L$ , создание скоростной процедуры сужения области поиска  $R_L(U)$  реализуемых решений до N-экземпляров, т.е. исключения неудовлетворительных альтернатив.

Проектирование ТН можно формально представить как процесс сужения множества альтернатив решений на основе информации, которой располагает лицо принимающее решение, проектировщик. Рациональный выбор альтернатив можно разбить на следующие этапы: 1) ситуационный анализ; 2) идентификация проблемы и постановка цели; 3) поиск необходимой информации; 4) формирование и формализация представления альтернатив; 5) формирование или коррекция критериев для оценки альтернатив; 6) проведение оценки; 7) выбор лучшей альтернативы; 8) оценка результата.

Этот процесс повторяется в цикле пока не будет достигнуто эффективное, удовлетворяющее проектировщика ТН решение.

*Методология.* Авторами предложен классический путь сведения векторной задачи к однокритериальной, на основе свертывания векторного критерия в модифицированную каноническую аддитивно-мультипликативную (АМ) функцию эффективности. При этом необходимо упорядочение критериев по важности, а также выбор веса каждого фактора. Подход в своей основе неформален: назначение количества и типов критериев осуществляется экспертами, что придает им эвристический характер.

Для перехода к скалярному представлению целевой функции экономической эффективности формально представим  $i$ -й экземпляр решения в виде:  $CHU_i = \langle \text{Compressor}_i, CC_{cp}^i, \text{Evaporator}_i, CC_{ev}^i, \dots, \text{NetPump}_i, CC_{NP}^i, \text{HG}_i, CC_{HG}^i, \text{COP}_i, OO_i^{SUM} \rangle$ , где  $CC_i$  – капитальные затраты (цены) соответствующих узлов, а  $OO_i^{SUM}$  – суммарные эксплуатационные расходы  $i$ -го экземпляра. Исключив нечисловые поля записи, получаем  $CHU_i^s = \langle CC_{cp}^i, CC_{ev}^i, \dots, CC_{NP}^i, CC_{HG}^i, \text{COP}_i, OO_i^{SUM} \rangle$  и переходим к скалярной форме представления функции эффективности:

$$C_i = \sum_{j=1}^m \lambda_j \cdot c_j, \tag{1}$$

где  $\lambda_j$  – весовой коэффициент влияния  $j$ -го фактора (агрегата, узла) на эффективность системы в целом,  $c_j$  – стоимостное его выражение ( $CC_j$ ) для экземпляра  $CHU_i$ .

КТУ содержит большое количество факторов, эксперту трудно определить, какой именно из них имеет наиболее весомое влияние на всю систему, а именно с этого начинается анализ системы для синтеза критерия оценки достижения желаемого решения. При решении задачи факторы ранжируют по значимости методом попарного сравнения, который дает максимум объективности при формировании ряда предпочтений [3]. Далее для перехода от бинарного представления предпочтений к скалярному, формируется матрица количественных оценок  $e_{ij}$ ; каждый эксперт  $E_i$  оценивает в баллах вес важности фактора  $c_j$ .

Нормируя оценки методом средних арифметических рангов получим весовые коэффициенты  $\lambda_j$  влияния факторов  $c_j$  (таблица 1):

Таблица 1 – Весовые коэффициенты влияния факторов

Эксперт №	Фактор ( $c_1$ )	Фактор ( $c_2$ )	Фактор ( $c_j$ )	Фактор ( $c_m$ )	$\Sigma$
$E_i$	$e_{i1}$	$e_{i2}$	$e_{ij}$	$e_{im}$	
$E_n$	$e_{n1}$	$e_{n2}$	$e_{nj}$	$e_{nm}$	
$\lambda_i, i=1, \dots, m$	$\lambda_1 = \sum_{i=1}^n e_{i1} / S$	$\lambda_2 = \sum_{i=1}^n e_{i2} / S$	$\lambda_j = \sum_{i=1}^n e_{ij} / S$	$\lambda_m = \sum_{i=1}^n e_{im} / S$	$S = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m e_{ij}$

где  $e_{ij}$  – оценка веса важности фактора  $c_j$  экспертом  $E_i$  по бальной шкале;  $\lambda_j$  – вес важности фактора  $c_j$  в критерии эффективности.

Введя дополнительные ограничения по ОС и СС применим к множеству реализуемых решений  $R^{pxh}(U)$  модификацию АМ [5] вида:

$$C_{AMm} = a \cdot \sum_{j=1}^m \lambda_j c_j + b \cdot \prod_{j=1}^m c_j^{\lambda_j} + c \cdot \prod_{j=1}^m c_j^{(1/\lambda_j)}; \tag{2}$$

$$a + b + c = 1, \lambda_j \neq 0, \forall j = 1, m,$$

где  $a, b, c$  – дополнительные коэффициенты, учитывающие значимость факторов:  $a$  – основных (значимых),  $b$  – дополнительных,  $c$  – информативных (незначимых). Представленный критерий  $C_{AMm}$  смягчает каноническую форму  $C_{AM}$  за счет добавления третьего члена, учитывающего веса незначимых  $\lambda_j$  факторов обратными степенями, и увеличивает множество решений  $\text{card}(R_K(U))$  по сравнению с  $C_{AM}$  ( $K < L$ ).

Предложен более четкий критерий с кластеризацией факторов по значимости учитывающий их групповое попарное взаимное влияние. Из множества  $\{q^m\}$  факторов, определяющих систему, выделим группу факторов  $q^{lm}$ , которые необходимы и достаточны для построения критерия и наглядного сравнения альтернатив решений с реальными процессами (объектами). Как правило, хватает небольшого количества учитываемых факторов  $|q^{lm}| = 5 \div 7$ . Остальные факторы  $q^{Ad}$  и  $q^{Ins}$ , будем считать дополнительными, повышающими адекватность модели реальному процессу и незначимыми, использование которых повышает чувствительность и полноту синтезируемого критерия для оценки альтернативы (экземпляра реальной системы):

$$C_{AMc} = \sum_{j=1}^{q^{lm}} \lambda_j^{lm} c_j + \prod_{j=q^{lm}-q^{lm+1}}^{q^{Ad}} c_j^{\lambda_j^{Ad}} + \prod_{j=q^{lm}-q^{lm+1}}^{q^{Ins}} c_j^{(1/\lambda_j^{Ins})}; \tag{3}$$

$$q^{lm} + q^{Ad} + q^{Ins} = q^m, \lambda_j \neq 0, \forall j = 1, m.$$

В результате применения критерия получим подмножество  $R_L(U)$  – усеченное множество альтернатив  $R_K(U)$ ,  $\text{card}(R_K(U)) = N$ .

В случае близких, «неразличимых» результатов и невозможности сделать единственное решение, переходят ко 2-му этапу поиска со сменой критерия на более емкий, например полином Колмогорова-Габора (ПКГ) второй степени [6], степень учитывает попарное влияние факторов друг на друга в технической системе:

$$C_{K-G} = \sum_{j=1}^m \lambda_j c_j + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \lambda_{ij} \cdot c_i \cdot c_j, \quad (4)$$

где канонически  $\lambda_{ij} = \lambda_i \cdot \lambda_j$ , что не учитывает природы оценки  $C_{K-G}$  весовыми коэффициентами, полученными ранжированием и попарными сравнениями.

Метод группового учета перекрестного влияния [6] позволяет выявить группы факторов, которые имеют одновременное влияние на техническую систему, и помогает уменьшить область возможных вариантов решения. Для определения  $\lambda_{ij}$  – веса влияния фактора  $c_i$  на  $c_j$  в системе, с помощью L-экспертов составим L матрицу  $E = \| e_{ij} \|$ , где на пересечении соответствующих строк и столбцов помещается –  $e_{ij}$  оценка влияния в критерии эффективности  $c_i$  на  $c_j$ ,  $e_{ij} = F(c_i, c_j) = [0, 1]$ .

После этого для всех  $e_{ij}$  применяем процедуру геометрического среднего на L-оценках экспертов:

$$\bar{e}_{ij} = \left( \prod_{l=1}^L e_{ijl} \right)^{1/L} \quad (5)$$

где  $\omega_l$  – это реальное число, которое определяет ранг l-го эксперта в работе группы экспертов. Используя полученные матрицы мы можем изменить ПКГ следующую форму:

$$C_{PKGm} = \sum_{j=1}^m \lambda_j c_j + \sum_{i=1}^m \sum_{j \neq i=1}^m \hat{e}_{ij} \cdot \lambda_i \cdot \lambda_j \cdot c_i \cdot c_j. \quad (6)$$

В таблице 2 для нашего примера ОАО «ЗЖРК» представлены весовые коэффициенты значимости факторов  $\lambda_j$  и весовые коэффициенты  $\hat{e}_{ij}$  перекрестного влияния факторов, полученные с помощью экспертных процедур методом анализа иерархий. [7]

Таблица 2 – Весовые коэффициенты значимости факторов перекрестного влияния

J	Факторы	$\lambda_j$	Индекс	T1	COP	$\alpha_{refr}$	$N_{cp}$	$\rho^{-1}_{refr}$	$\Delta P_{cp}$	$T_{src}$	CC	OC
1	T1, °C	0,710	Im	1	0,6	0,2	0,81	0,87	0,91	0,3	1	0,7
2	COP	0,426	Im	0,6	1	0,2	0,87	0,7	0,95	0,4	0,9	0,85
3	$\alpha_{refr}$ , BT/(M <sup>2</sup> ·°C)	0,142	Im	0,3	0,2	1	0,5	0,2	0,1	0,3	0,9	0,9
4	$N_{cp}$ , кВт	0,575	Im	0,9	1	0,5	1	0,4	0,4	0,7	0,9	0,9
5	$\rho^{-1}_{refr}$ , M <sup>3</sup> /кг	0,618	Im	0,9	0,5	0,2	0,4	1	0,45	0,8	0,5	0,7
6	$\Delta P_{cp}$ , Па	0,646	Im	0,9	0,2	0,1	0,85	0,6	1	0,8	0,6	0,7
7	$T_{src}$ , °C	0,213	Add	0,3	0,1	0,4	0,7	0,8	0,8	1	0,5	0,6
8	CC, евро	0,400	Ins	1	0,92	0,2	0,9	0,2	0,9	0,9	1	0,9
9	OC, евро/год	0,710	Add	0,3	0,2	0,8	0,2	0,2	0,6	0,8	1	1

Таблица 3 – Факторы и их стоимостные проекции

C(Факторы)	C(T1), евро	C(COP) евро	C( $\alpha_{refr}$ ), евро	C( $N_{cp}$ ), евро	C( $\rho^{-1}_{refr}$ ), евро	C( $\Delta P_{cp}$ ), евро	C( $T_{src}$ ) евро	CC, евро	OC, евро
A	77,220	154,440	51,480	208,400	223,400	233,640	428,800	991,800	254,206
B	75,210	125,430	58,480	185,560	195,490	189,430	64,560	894,150	401,140

Два решения, (A) Viessmann AG Vitocal 300G pro-3 и (B) Hotjet cz s.r.o. RZ1-50, как отвечающие ограничениям и ИСД, после 1-го этапа процедуры поиска были предложены на рассмотрение Технического Совета ОАО «Запорожский ЗРК». Был проведен анализ структуры цены, и оценена стоимость оборудования функциональных групп. Методом анализа иерархий было построено отношение «стоимость узла ТН = C (Фактор)».

**Выводы.** Результаты тестирования показали, что критерии  $C_{ADD}$  практически не делает различий между альтернативами, критерий  $C_{AMc}$  более чувствителен и обладает более высокой скоростью по сравне-

нию с основным САМм. Критерии  $C_{PKGm}$  и  $C_{PKG}$  из-за громоздкости попадают в один и тот же класс точности и скорости поиска. Подход кластеризации факторов, предложенный для синтеза критерия  $C_{AMc}$ , при определенном уровне абстрагирования может быть использован для оценки эффективности больших систем, а также для оценки адекватности математической модели реальной системе.

Таблица 4 – Результаты тестирования критериев

№	Критерий	Значение	
		А	В
1	$C_{ADD}$	1123,340	1121,239
2	$C_{AMm}$	5,943965592E+46	6,047025545E+47
3	$C_{AMc}$	7,833768742E+47	5,404751161E+48
4	$C_{PKG}$	1,263016141E+06	1,258297506E+06
5	$C_{PKGm}$	6,415098850E+05	6,157804141E+05

#### Литература

1. Klemeš J, Perry S.J. Process optimisation to minimise energy use in food processing. In: Waldron K, editor. Handbook of waste management and co-product recovery in food processing, vol. 1. Cambridge, England: Woodhead Publishing Limited Wiefried.
2. Хорошев А.Н. Введение в автоматизированное проектирование механических систем. Белгород, 1999.372 с., ISBN5-217-00016-3.
3. Saaty T.L., Vargas L.G., and R.E. Wendell. Assessing attribute weights by ratio. OMEGA, 11(1):p. 9–13, 1983.
4. Товажнянский Л.Л., Бухкало С.И., Капустенко П.А., Хавин Г.Л. Основные технологии пищевых производств и энергосбережение– Харьков: НТУ «ХПИ», 2005– 460 с. ISBN 966-593-364-7.
5. Соболева Е.В. Исследование критериев обобщенной полезности для задач многокритериального оценивания. SAIT 2012, ISBN 978-966-2748-07-9, revision 1.1 (2012.04.24), available at <www.sait.kpi.ua/books>, accessed (2012.12.05).
6. Ivakhnenko A.G., Madala H.R. Inductive learning algorithms for complex systems modeling.– London, Tokyo: CRC Press, p. 352, 1994.
7. Недашковская Н.И. Многокритериальное принятие решений с использованием максиминного синтеза в методе анализа иерархий // Системні дослідження та інформаційні технології. – 2010. – №3. – с. 7–16.

#### Bibliography (transliterated)

1. Klemeš J, Perry S.J. Process optimisation to minimise energy use in food processing. In: Waldron K, editor. Handbook of waste management and co-product recovery in food processing, vol. 1. Cambridge, England: Woodhead Publishing Limited Wiefried.
2. Horoshev A.N. Vvedenie v avtomatizirovannoe proektirovanie mehanicheskikh sistem. Belgorod, 1999.372 p., ISBN5-217-00016-3.
3. Saaty T.L., Vargas L.G., and R.E. Wendell. Assessing attribute weights by ratio. OMEGA, 11(1):p. 9–13, 1983.
4. Tovazhnjanskij L.L., Buhkalo S.I., Kapustenko P.A., Havin G.L. Osnovnye tehnologii pishhevyyh proizvodstv i jenergosberezhenie– Har'kov: NTU «HPI», 2005– 460 p. ISBN 966-593-364-7.
5. Soboleva E.V. Issledovanie kriteriev obobshhennoj poleznosti dlja zadach mnogokriterial'nogo ocenivaniya. SAIT 2012, ISBN 978-966-2748-07-9, revision 1.1 (2012.04.24), available at <www.sait.kpi.ua/books>, accessed (2012.12.05).
6. Ivakhnenko A.G., Madala H.R. Inductive learning algorithms for complex systems modeling.– London, Tokyo: CRC Press, p. 352, 1994.
7. Nedashkovskaja N.I. Mnogokriterial'noe prinjatie reshenij s ispol'zovaniem maksimal'nogo sinteza v metode analiza ierarhij Sistemni doslidzhennja ta informacijni tehnologii. – 2010. – #3. – p. 7–16.

УДК 661.25.66.094

Капустенко П.О., Ілюнін О.О., Болдырев С.О., Гарев А.О., Лешенко О.В., Перевертайленко О.Ю.,  
Селяков О.М., Шамраєв А.А.

**КРИТЕРІЙ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ З УРАХУВАННЯМ ГРУПОВОГО ВПЛИВУ  
АРГУМЕНТІВ**

Наведено методику оцінки повноти обліку факторів при синтезі критерію економічної ефективності теплових насосів. Запропоновано підхід перехресного аналізу і кластеризації факторів, що різним чином впливають на ефективність технічних систем. Зазначено, що запропонований підхід підвищує чутливість критеріїв і придатний для оцінки адекватності математичних моделей об'єктів.

Kapustenko P.O., Ilunin O.O., Boldyryev S.O., Garev A.O., Leshchenko O.V., Perevertaylenko O.Yu.,  
Selyakov O.M., Shamraev A.A.

**THE CRITERION OF EFFICIENCY OF HEAT PUMPS WITH A VIEW OF GROUP INFLUENCE OF  
THE ARGUMENTS**

The method of accounting factors in completeness evaluation for the synthesis of the economic efficiency criterion of heat pumps is considered. An approach of a cross-analysis and the factors influencing to the effectiveness of the technical systems clustering is proposed. It was noted that the proposed method increases the sensitivity criteria and is suitable for the assessment of the mathematical objects models' adequacy.