

Я. Б. Волянська, Т. С. Обнявко, С. М. Волянський,
О. А. Онищенко

**МЕТОДИКА ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ «КОМПРОМІСНИХ
РІШЕНЬ» ПРИ СИНТЕЗІ СКЛАДНИХ СИСТЕМ РІЗНОГО
ПРИЗНАЧЕННЯ**

Представлена методика спрямована на удосконалення відомих процедур синтезу складних технічних, організаційних, економічних систем. Використано метод пошуку значень параметрів складних систем на основі принципів Еджворта-Парето сумісно з методами експертних оцінок. Наведено приклад синтезу пропульсивного комплексу автономного плавального апарата і доведена ефективність методики. Табл. 10, дж. 23.

Ключові слова: синтез, особа, що приймає рішення, експертна оцінка, якість.

JEL C45

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими та практичними завданнями. У даний час синтез будь-якої нової складної системи чи нового складного продукту або пристрою не відбувається з «нуля». Проектувальники і конструктори прагнуть з максимальним ступенем використати відомі та апробовані рішення, вузли, деталі, комплектуючі, програмне забезпечення та інші складові кінцевого виробу, які вже добре себе зарекомендували у практиці. Це відомий, так званий, декомпозиційний [1] підхід до синтезу складних систем, що полягає у використанні широкої номенклатури сумісних окремих вузлів і застосовуваний у більшості випадків, наприклад, при синтезі складних технічних систем (СТС) [2, 3]. Саме декомпозиція СТС на складові елементи – розбиття на окремі й сумісні комплектуючі, вузли та блоки, дозволяє не тільки суттєво скоротити терміни проектування, але і помітно знизити витрати, як на проектування, так і на подальше створення всієї системи. Сучасне проектування будь-якої (технічної, організаційної, еколого-економічної чи іншої) складної системи неминуче стикається з необхідністю вирішення низки проблем і суперечностей, що приводить до необхідності знаходження компромісного рішення між безліччю необхідних та бажаних параметрів і вимог, що пред'являються до системи.

Наприклад, для більшості СТС, особливо – подвійного або спеціального призначення, зазвичай, суперечать такі вимоги, як мінімальна вартість і необхідність забезпечення максимальної енергоефективності системи, надійність системи і її масогабаритні показники, а також інші суперечливі, іноді взаємовиключні, вимоги. Економічність, керованість, швидкодія, маса, габарити, ціна, екологічність, надійність, простота експлуатації та технічного обслуговування і ремонту, ергономічність, функціональність і інші вимоги, що пред'являються до СТС, практично завжди вступають між собою у протиріччя.

Наприклад, при синтезі такої складної технічної конструкції, як електрична машина (ЕМ) необхідно урахувати, що [4]:

- а) при заданій номінальній потужності електромагнітні навантаження визначають ступінь використання активних матеріалів і розміри машини;
- б) при заданій частоті обертання валу, чим більше електромагнітні навантаження, тим менше розміри і вартість машини;
- в) геометричні розміри ЕМ визначають її електромагнітний момент.

Таким чином, при рівній потужності, електричні машини з більш високою частотою обертання валу мають менші габарити і масу. Уподобання при синтезі ЕМ у бік збільшення активних матеріалів (мідь обмоток, тип, вміст кремнію і товщина електротехнічної сталі), перетину провідників, класу ізоляції, визначають високу енергетичну ефективність ЕМ, але вступають у протиріччя з масогабаритними показниками і ціною. Проглядається очевидне протиріччя – чим менше активних матеріалів використано у конструкції, тим вона дешевше і легше, але техніко-експлуатаційні характеристики – гірше.

Аналогічних протиріч, суперечливих проблем, що виникають при синтезі СТС, можна виявити цілий ряд [2, 3, 5], при цьому задача «найкращої» побудови конструкції суттєво ускладнюється. Так, системний блок комп'ютера містить наступні основні вузли: «материнську» плату, процесор, оперативну пам'ять, жорсткий диск, блок живлення. Кожен з названих вузлів виробляється десятками, якщо не сотнями виробників, у десятках модифікацій і широкій номенклатурі, з різними параметрами і цінами. Композицій (об'єднань, комбінацій) таких вузлів, що дозволяють створити працездатний комп'ютер, величезна кількість і, що очевидно, кінцеві техніко-експлуатаційні характеристики, надійність і ціна системних блоків при різних з'єднаннях вузлів суттєво розрізняються. Саме тому ї стає питання, що таке «найкраща» система, конструкція? За одним-єдиним показником або критерієм це очевидне рішення, наприклад, знаходження мінімальної маси або вартості складових елементів. Але якщо змінити вимоги до максимального/мінімального значення того або іншого параметру, характеристики чи критерію системи (тобто послабити до неї вимоги, піти на компроміс), то можлива така комбінація елементів системи, конструкції, яка буде суттєво кращою за другими параметрами?

Таким чином, розробка методик розрахунку, що дозволяють не тільки аргументувати прийняття того чи іншого конструкторсько-технологічного рішення при синтезі складних систем різного призначення, а й забезпечувати у певному сенсі «найкращий» компромісний результат синтезу системи є важливою науково-технічною і практичною задачею.

Аналіз останніх досліджень, у яких започатковано розв'язання даної проблеми і виділення невирішених раніше частин. Традиційний синтез складних систем використовує два основних принципи: перший, заснований на оптимізації (пошуку мінімаксного значення) будь-якого критерію для окремих параметрів або параметра системи, другий, заснований на зортці прийнятих приватних критеріїв і оцінює можливі варіанти (альтернативи) за інтегральним критерієм якості [6].

Принципова складність задач вибору при багатьох критеріях якості [1, 6] полягає у апріорі неможливого знаходженні «найкращого» рішення. Невелика зміна умов і вимог, при яких синтезується система, що складається з безлічі різних елементів, призводить до зміни суті оптимізаційного синтезу. Останні розробки [6–8] у області автоматизації прийняття рішень і автоматизованого проектування (зокрема – САПР) підтверджують непродуктивність застосування у ході вирішення задач багатокритеріального оптимізаційного синтезу традиційних прийомів, аналогічних використовуваним у задачах однокритеріальної оптимізації, де функція мети приймає мінімаксне значення.

У даний час відомий альтернативний підхід до синтезу складних систем, що не вимагає однозначного встановлення критерію оптимальності чи функції мети [9, 10]. Цей підхід заснований на використанні принципу Еджворта–Парето і нерідко інтерпретується у термінах відносної важливості критеріїв якості [10–13].

Згідно [14] «будь-який вибір, що підпорядковується набору аксіом, які характеризують поведінку особи, приймаючої рішення (ОПР) у процесі прийняття

рішень, слід здійснювати у межах множини Парето, яку можна побудувати за допомогою «нового» векторного критерію, що визначається на основі «старого» векторного критерію та наявної кількісної інформації». Більш просто цей принцип можна охарактеризувати наданням можливостей звуження початкової множини Парето за допомогою встановлення відносної важливості (ваги) одного параметра або критерію перед іншим. Тут можна застосовувати теорію нечітких множин [8, 15] і методи експертних оцінок [6, 10, 16].

Використання інтегрального критерію якості (критерію оптимальності, функції мети) досить зручно з позицій автоматизованого проектування, однак від ОПР приховано процес пошуку варіантів, що не дозволяє змінювати важливість параметрів, переваг вибору альтернатив. Крім того, аналіз такого підходу до синтезу систем показує, що часто він недостатньо обґрунтований і складний, якщо враховує другорядні чинники технологічного процесу, часто дає слабо аргументований результат.

Таким чином, якщо встановлено взаємні зв'язки і залежності параметрів системи, то необхідний перехід до багатокритеріального аналізу системи і ітеративному процесу її синтезу – з урахуванням встановлення ОПР відносної важливості (пріоритетів) обраних інтегральних критеріїв якості.

Метою статті є розробка такої методики підтримки прийняття рішень при синтезі складних систем різного призначення, яка дає змогу ОПР визначити комбінацію складових елементів системи, котра суттєво поліпшує деякі параметри системи, за рахунок незначного погіршення параметру (параметрів, показників, критеріїв), відібраного ОПР.

Основний матеріал дослідження. Пропонується здійснювати синтез найбільш ефективної за декількома прийнятими ОПР параметрами і обмеженнями системи [1, 7, 10] на основі інтегральних критеріїв якості [6] і з використанням принципу Еджворта–Парето [11, 12, 14].

При синтезі складних систем різного призначення особливість застосування принципу Еджворта–Парето полягає у тому, що, послаблюючи (змінюючи) вимоги до значущості (ваги) окремих критеріїв, у процесі синтезу знаходяться квазіоптимальні рішення тоді, коли вони не визначаються традиційними методами оптимізації. Такий синтез – евристичний, ітераційний, тобто ОПР, аналізуючи альтернативні варіанти побудови системи, порівнює їх, змінює вимоги і обмеження, приймає компромісні рішення, знову аналізує нові отримані альтернативні варіанти і т.д. У ітеративному процесі синтезу складної системи, ОПР змінює значимість окремих критеріїв на основі прийняття компромісів, причому процедура синтезу системи протікає в умовах, коли використовуються звичні, фізично зрозумілі параметри і значення обраних критеріїв.

У процесі синтезу ОПР не використовує окремі виграшні ситуації, засновані на критеріях для ряду альтернативних варіантів, а оцінює компромісні варіанти, наприклад, у ході діалогу з програмним середовищем. Ідея практичного використання представленої методики прийняття «компромісних рішень» полягає у наступному.

Нехай експертами [6, 16, 17] відібрані параметри синтезованої системи $a_1, \dots, a_b, \dots, a_n$ і можливі складові елементи системи. Задача полягає у тому, щоб відібрати «найкращим» чином комбінацію елементів системи, наприклад, за вартістю. Згідно принципу Еджворта–Парето, очевидне значення – мінімум сумарної вартості складових елементів, розглядається тільки як відправна точка для поліпшення інших функціоналів або критеріїв системи за рахунок прийняття компромісів, тобто – ослаблення вимог деяких, обраних ОПР, критеріїв і обмежень.

Послідовність дій ОПР наступна.

1. ОПР визначає максимальне і мінімальне значення відібраних параметрів:

$$a_{i \min} < a_i < a_{i \max},$$

де $a_{i \min}$ і $a_{i \max}$ – мінімальне і максимальне значення i параметра (при $i = 1, \dots, n$) і встановлює функціональні обмеження.

2. ОПР уводяться функціонали (критерії) Φ_1, \dots, Φ_m , для яких необхідно знайти екстремум.

3. Серед змінних параметрів довільно вибирається розрахункова точка для якої перевіряється виконання визначених ОПР функціональних обмежень. Якщо функціональні обмеження не виконуються, точка з подальшого синтезу системи виключається. Якщо функціональні обмеження виконуються, точка зберігається як j -та пробна точка і для неї обчислюються значення всіх функціоналів Φ_1, \dots, Φ_m . Таким чином складається таблиця варіантів для кожного з функціоналів, значення яких розміщуються за зростанням ваги. На цьому етапі ОПР аналізує отримані таблиці та призначає (змінює) функціональні обмеження.

4. Перевіряється сумісність обмежень, і якщо виконані всі функціональні обмеження, то ОПР отримує всі необхідні точки для подальшого аналізу. Якщо такі точки не виявлені, то ОПР послаблює функціональні (критеріальні) обмеження або переходить до аналізу інших, якщо вони доступні, варіантів складових елементів системи.

При аналізі сформованих таблиць з'являється можливість змінювати критеріальні обмеження. Це дозволить ОПР з'ясувати, який виграш за іншими параметрами дають деякі послаблення критеріїв і до чого може привести підвищення жорсткості обмежень.

Приклад синтезу конструкції складної системи. Розглянемо послідовність прийняття «компромісних рішень» (яку можна використовувати при синтезі складних систем різного призначення), на простому прикладі синтезу СТС – аргументованому визначенні «найкращої» комбінації складових елементів конструкції пропульсивного комплексу (ПК) транспортного засобу спеціального призначення – автономного плавального апарата (АПА) [18, 19]. Ускладненість синтезу ПК такого АПА пов'язана також і з тим, що необхідний не тільки найбільш ефективний, за рядом параметрів, вибір складових його елементів, але узгодження і сумісність вибраних елементів комплексу. Неузгодженість при виборі співвідношень між технологічними та перетворюваними параметрами призводить до значного розкиду енергетичних, масогабаритних і експлуатаційних показників АПА.

У [18–22] показано, що ПК такого АПА спеціального призначення містить два елементи конструкції: електродвигун і редуктор (механічну передачу на гвинт). При заданій потужності механічної передачі, можлива безліч комбінацій пари «двигун – редуктор», які відповідають технологічним і тактико-технічним вимогам та забезпечуть виконання основних функцій АПА.

Нехай експертами [6, 16, 17] відібрані основні технічні параметри елементів ПК АПА: номінальні потужність і момент на валу двигуна, його номінальна і максимальна частоти обертання і максимальний момент; передавальне число редуктора; ККД, маса і моменти інерції двигуна і редуктора. Оскільки моменти інерції редукторів J_p , ККД двигунів і редукторів близької потужності практично мало відрізняються, тому вони, з метою спрощення, з подальшого аналізу виключені. Параметри сумісних, попередньо обраних проектувальниками, двигунів і редукторів, будь-які комбінації яких можуть бути встановлені у ПК АПА наведені у табл. 1 і табл. 2. Значення коефіцієнтів перевантаження (λ_d, λ_p) максимального і мінімального моментів на валу (M_{\max} і M_{\min}), моментів холостого ходу ($M_{хд}$, $M_{хр}$) двигуна і редуктора у таблицях також не наведені, оскільки за їх допомогою проектувальниками проводилась лише встановлення можливості

застосування обраних двигунів і редукторів задовольнити вимогам технологічного режиму роботи ПК АПА.

Таблиця 1

Параметри двигунів

Двигун	$P_{\text{ном}}$, кВт	$n_{\text{ном}}$, об/мин	$M_{\text{ном}}$, Нм	$J_{\text{дв}}$, кг·м ²	$m_{\text{дв}}$, кг	$C_{\text{дв}}$, у.о.
M1	1,20	1500	7,80	0,025	91	239
M2	1,40	1000	13,60	0,046	97	312
M3	1,15	2200	4,99	0,014	74	261
M4	1,25	1000	11,90	0,017	61	247
M5	1,50	1500	9,60	0,014	52	234
M6	1,50	2240	6,40	0,017	61	272
M7	1,20	2200	5,20	0,011	41	182
M8	1,10	1000	10,50	0,013	33	220

Таблиця 2

Параметри редукторів

Редуктор	i	M , Нм	m_p , кг	V_{p_3} , см ³	C_p , у.о.
P1	2–8,0	1000	75	$33,0 \cdot 10^{-3}$	58,0
P2	2–8,25	800	70	$32,0 \cdot 10^{-3}$	54,8
P3	2–8,24	900	80	$34,4 \cdot 10^{-3}$	57,0
P4	1,8–8,0	660	84	$32,9 \cdot 10^{-3}$	55,6
P5	2–8,0	500	75	$22,6 \cdot 10^{-3}$	60,7

З представлених у таблицях даних видно, що можна одержати 40 можливих варіантів рішень і при цьому будуть отримані різні техніко-експлуатаційні та техніко-економічні показники. Але у будь-якому випадку, у залежності від поставлених критеріїв, завжди буде існувати кращий варіант за рядом параметрів, і можливо, найкращий варіант з можливих комбінацій за одним, або за декількома, параметрами. Якщо елементів, що утворюють систему буде не два («двигун – редуктор»), а більше, з відповідною номенклатурою і параметрами, то очевидно, що «вручну» найкращу одночасно за кількома критеріями комбінацію таких елементів знайти практично неможливо. Розглянемо більш детально послідовність використання методу.

У якості варійованих параметрів приймаємо наступні:

$a_1 = P_{\text{ном}}$ – номінальна потужність двигуна, кВт;

$a_2 = n_{\text{ном}}$ – номінальна частота обертання двигуна, об/хв;

$a_3 = M_{\text{ном}}$ – номінальний момент двигуна, Нм;

$a_4 = J_{\text{дв}}$ – момент інерції двигуна, кг·м²;

$a_5 = m_{\text{дв}}$ – маса двигуна, кг;

$a_6 = C_{\text{дв}}$ – вартість двигуна, у. о.;

$a_7 = m_p$ – маса редуктора, кг;

$a_8 = C_p$ – вартість редуктора, у. о.;

$a_9 = i$ – передавальне число редуктора.

Послідовність прийняття рішень ОПР наступна.

1. Наводяться (табл. 3) визначені максимальне і мінімальне значення відібраних параметрів ($a_{j \min} < a_j < a_{j \max}$, де $j = 1, \dots, n$).

Значення параметрів елементів

j	a_{jmin}	a_{jmax}	a_{tj}	a_{zj}	a_{zj}	a_{dj}	a_{sj}	a_{gj}	a_{7j}	a_{8j}	a_{9j}
1	1,10	1,50	1,25	1,20	1,40	1,15	1,50	1,50	1,20	1,10	1,40
2	1000	2240	1000	1500	1000	2200	1500	2240	2200	1000	1000
3	4,99	14,00	11,90	7,80	13,60	4,99	9,60	6,40	5,20	10,50	14,00
4	0,011	0,188	0,017	0,025	0,046	0,014	0,014	0,017	0,011	0,013	0,188
5	33	97	61	91	97	74	52	61	41	33	88
6	182	312	247	239	312	261	234	272	182	220	500
7	70	84	75	70	80	84	75	75	70	80	75
8	54,8	60,7	58,0	54,8	57,0	55,6	60,7	58,0	54,8	57,0	58,0
9	1,0	4,5	2,0	3,0	2,0	4,4	3,0	4,48	4,4	2,0	2,0

Далі накладаються і перевіряються функціональні обмеження (на статичний M_c і максимальний M_{max} моменти, прискорення і т.д.):

$$M_{ном} > M_c,$$

$$\lambda \cdot M_{ном} > M_{max},$$

$$M_{min} > M_{xx}.$$

Підкреслимо, що всі обмеження і нерівності були використані проектувальниками раніше – для попередньої перевірки [23] обраних двигунів і редукторів, тому всі параметри з табл. 1, табл. 2 і, відповідно, табл. 3, задовольняють функціональним обмеженням і придатні для подальшого аналізу.

2. Якість [6, 16, 17] кожного варіанту конструкції ПК оцінює ОПР за п'ятьма критеріями (функціоналами): сумарна маса двигуна і редуктора Φ_1 , сумарна вартість Φ_2 , прискорення ПК Φ_3 , час перехідного процесу ПК Φ_4 , кінетична енергія ПК Φ_5 .

Критерії обчислюються безпосередньо з параметрів:

$$\Phi_1 = a_5 + a_7 - \text{сумарна маса};$$

$$\Phi_2 = a_6 + a_8 - \text{сумарна вартість};$$

$$\Phi_3 = (M_{max} - M_{xx})/J_{пр} - \text{максимальне прискорення при розгоні ПК};$$

$\Phi_4 = (J_{пр} \cdot n_{ном}) / (M_{max} - M_{xx})$ – мінімальний час перехідних процесів, що визначає динаміку ПК АПА;

$\Phi_5 = 0,5 \cdot J_{пр} \cdot n_{ном}^2$ – запас кінетичної енергії, що визначає енергоефективність системи у динаміці;

$J_{пр} = (J_{дв} + J_p)$ – сума моментів інерції двигуна і редуктора, де значення J_p прийнято постійним ($0,01 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$) для всіх варіантів.

3. Складається таблиця, альтернативних варіантів для кожного з функціоналів (табл. 4, перші 25 варіантів системи з 40 можливих). Значення функціоналів розміщуємо за зростанням (крім функціоналу Φ_3 , який сортується за спаданням). У даному прикладі всі розрахунки проведені за допомогою *Microsoft Office Excel*. З розрахованих раніше (запропонованих як задовільні) варіантів, за рахунок порівняно невеликих відхилень від параметрів існуючого набору (моделі ПК), ОПР визначає найбільш вигідні комбінації.

3. ОПР з'ясовує існування комбінацій пари «двигун – редуктор», не гірших, ніж у прийнятому попередньо вихідному за всіма п'ятьма функціоналами варіанті. У найбільш загальному випадку, вихідний варіант можна прийняти довільно, наприклад, методом рівномірно-розподіленої послідовності, але краще, заздалегідь визначити реперну точку за критерієм мінімаксу. ОПР у якості критеріальних обмежень обрані значення у точці 1.

Таблиця 4

Значення функціоналів за варіантами комбінацій елементів ПК

i	Φ_1	i	Φ_2	i	Φ_3	i	Φ_4	i	Φ_5
17	103	7	236,8	5	2946	8	28,0	8	82,7
21	108	24	237,6	14	2946	17	28,0	17	82,7
7	111	16	239,0	20	2946	24	28,0	21	82,7
8	113	22	240,0	25	2946	21	28,0	24	82,7
22	116	17	274,8	1	2831	19	33,5	1	104,7
16	121	8	277	13	2831	23	33,5	9	104,7
20	122	21	278	19	2831	13	33,5	13	104,7
24	125	20	288,8	23	2831	1	33,5	19	104,7
5	127	14	289,6	8	2738	5	49	23	104,7
19	131	25	291	17	2738	14	49	18	104,7
25	132	2	293,6	21	2738	20	49	5	184,9
14	136	5	294	24	2738	25	49	14	184,9
6	136	10	294,7	6	2127	7	97,5	20	184,9
1	136	19	301,8	15	2127	16	97,5	25	184,9
23	141	13	302,6	7	1732	22	97,5	3	264,6
15	141	23	304	16	1732	11	123,5	11	264,6
13	145	1	305	22	1732	3	123,5	7	291,9
12	152	4	316,6	4	883	6	124,6	22	291,9
18	154	12	318	12	883	15	124,6	16	291,9
4	158	15	329	2	753	2	174,4	2	320,0
2	161	6	330	10	753	10	174,4	10	320,0
9	163	11	366,8	3	731	12	215,5	4	371,5
10	166	3	368	11	731	4	215,5	12	371,5
11	167	18	554,8	9	412	9	237,0	6	467,7
3	177	9	558	18	412	18	237,0	15	467,7

З аналізу табл. 4, видно, що існує тільки одна така не найгірша точка – 19: значення Φ_1 і Φ_2 у точці 19 кращі ($\Phi_{1-19} = 131 < \Phi_{1-1} = 136$ і $\Phi_{2-19} = 301,8 < \Phi_{2-1} = 305$), а за іншими критеріями однакові (див. табл. 4). Це «оптимальний» варіант відносно точки 1, проте він за всіма критеріями водночас не покращений. ОПР приймає компроміс – послабити вимоги за функціоналами Φ_4 і Φ_5 , тобто обрати обмеження $\Phi_4 = 49$ і $\Phi_5 = 184,9$ при незмінних вимогах до Φ_1 , Φ_2 і Φ_3 .

У допустимий діапазон для аналізу (відносно точки 1) потрапило вже 4 точки: 5, 14, 20 і 25. Видно, що можливе покращення конструкції відносно точки 1 відразу за трьома функціоналами: Φ_1 – на 10,3 %, Φ_2 – на 5,3 %, Φ_3 – на 4 %. У третій ітерації ОПР вирішено знайти точки, які по одному з функціоналів дещо гірше, ніж точка 1, але за іншими - краще.

Для цього обрано обмеження $\Phi_3 = 2738$, значення інших функціоналів не змінюється ($\Phi_4 = 49$, $\Phi_5 = 184,9$). Тут у допустимий діапазон для аналізу потрапляє 10 точок, серед яких (що очевидно), віддається перевага точкам 8, 17, 24. У точці 17 значення Φ_1 мінімальне і краще (на 24,2 %), ніж для точки 1. Значення функціоналів Φ_4 і Φ_5 для точки 17 краще, ніж для точки 1, відповідно на 16,4 і 21,0 %.

Таблиця 5

Координати «компромісних» точок

j	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9
1	1,25	1000	11,9	0,017	61	247	75	58,0	2
17	1,1	1000	10,5	0,013	33	220	70	54,8	2
20	1,5	1500	9,6	0,014	52	234	70	54,8	3
19	1,25	1000	11,9	0,017	61	247	70	54,8	2

Таблиця 6

Значення функціоналів

<i>i</i>	Φ_1	Φ_2	Φ_3	Φ_4	Φ_5
1	136	305,0	2831	33,5	104,7
17	103	274,8	2738	28,0	82,7
19	131	301,8	2831	33,5	104,7
20	122	288,8	2946	49,0	184,9

Наступний ітераційний аналіз суттєво кращих результатів не дає без значного погіршення критеріїв.

Очевидно, що наведена методика потребує від ОПР ретельного аналізу. Подальшим її розвитком є встановлення вагових коефіцієнтів для кожного з функціоналів з їх підсумовуванням. Вага функціоналу визначається за його положенням у таблиці – при умові сортуванні від найкращого варіанту до найгіршого. Мінімальна сума вагових коефіцієнтів функціоналів покаже «непокрасуваний» варіант, навіть якщо він не матиме найкращі показники за іншими функціоналами. У такому випадку у дію вступає ОПР і з кількох вищих за списком варіантів обирає найбільш прийнятний. Алгоритм визначення варіанту у такому випадку наступний.

1. Перепишемо таблицю 4, у якій додатково, біля кожного з розрахованих вище функціоналів, запишемо його порядковий номер по мірі заповнення таблиці варіантами (наприклад, як у частково заповненій табл. 7).

Таблиця 7

Вихідна таблиця функціоналів по варіантах

<i>i</i>	Φ_1	<i>i</i>	Φ_2	<i>i</i>	Φ_3	<i>i</i>	Φ_4	<i>i</i>	Φ_5
1	136	1	305	1	2831	1	33,5	1	104,7
2	161	2	293,6	2	753	2	174,4	2	320
3	177	3	368	3	731	3	123,5	3	264,6
4	158	4	316,6	4	883	4	215,5	4	371,5
5	127	5	294,7	5	2946	5	49	5	184,9

2. Проводиться сортування кожної *пари* стовпців (номера за списком і самого функціонала) за зростанням (або зменшенням) відповідно до уподобань до функціоналу. При цьому додається ще один стовпець у який записується вага функціоналу (P_{Φ}), що відповідає номеру сортування самого функціоналу (див. табл. 8).

3. Далі проводиться пересортування кожних трьох стовпців за номером функціоналу, тобто функціонали шикуються за порядком первісного запису. Після цього проводиться розрахунок суми ваг функціоналів кожного варіанту і результат додається у додаткову колонку (див. табл. 9).

$$\Sigma P_i = P_{\Phi 1i} + P_{\Phi 2i} + P_{\Phi 3i} + P_{\Phi 4i} + P_{\Phi 5i}$$

Таблиця 8

Пересортована таблиця за значеннями функціоналів з визначенням їх ваги

<i>i</i>	$P_{\Phi 1}$	Φ_1	<i>i</i>	$P_{\Phi 2}$	Φ_2	<i>i</i>	$P_{\Phi 3}$	Φ_3	<i>i</i>	$P_{\Phi 4}$	Φ_4	<i>i</i>	$P_{\Phi 5}$	Φ_5
17	1	103	7	1	237	5	1	2946	8	1	28	8	1	82,7
21	2	108	24	2	238	14	2	2946	17	2	28	17	2	82,7
7	3	111	16	3	239	20	3	2946	21	3	28	21	3	82,7
8	4	113	22	4	240	25	4	2946	24	4	28	24	4	82,7
22	5	116	17	5	275	1	5	2831	1	5	33,5	1	5	105

Таблиця 9

Визначення сумарної ваги функціоналів по варіантах

<i>i</i>	P_{Φ_1}	Φ_1	<i>i</i>	P_{Φ_2}	Φ_2	<i>i</i>	P_{Φ_3}	Φ_3	<i>i</i>	P_{Φ_4}	Φ_4	<i>i</i>	P_{Φ_5}	Φ_5	ΣP
1	12	136	1	17	305	1	5	2831	1	5	33,5	1	5	105	44
2	21	161	2	11	294	2	20	753	2	20	174	2	20	320	92
3	25	177	3	23	368	3	22	731	3	16	124	3	15	265	101
8	4	113	8	6	277	8	9	2738	8	1	28	8	1	82,7	21
17	1	103	17	5	275	17	10	2738	17	2	28	17	2	82,7	20

4. У фінальну таблицю заносяться номер варіанта, його функціонали та сумарна вага функціоналів, за якою і сортується таблиця (див. табл. 10).

Таблиця 10

Фінальна таблиця з сумою ваг функціоналів

<i>i</i>	Φ_1	Φ_2	Φ_3	Φ_4	Φ_5	ΣP
17	103	274,8	2738	28	82,7	20
8	113	277	2738	28	82,7	21
21	108	278	2738	28	82,7	26
24	125	237,6	2738	28	82,7	30
20	122	288,8	2946	49	184,9	42
5	127	294,7	2946	49	184,9	43
1	136	305	2831	33,5	104,7	44
19	131	301,8	2831	33,5	104,7	46
14	136	289,6	2946	49	184,9	47
7	111	236,8	1732	97,5	291,9	49
13	145	302,6	2831	33,5	104,7	51
25	132	291	2946	49	184,9	51
23	141	304	2831	33,5	104,7	57
16	121	239	1732	97,5	291,9	58
22	116	240	1732	97,5	291,9	59
6	136	330	2127	124,6	467,7	89
2	161	293,6	753	174,4	320	92
15	141	329	2127	124,6	467,7	93
10	166	294	753	174,4	320	98
4	158	316,6	883	215,5	371,5	100
3	177	368	731	123,5	264,6	101
9	163	558	412	237	104,7	101
11	167	366,8	731	123,5	264,6	102
18	152	554,8	412	237	104,7	102
12	154	318	883	215,5	371,5	103

Верхні значення відповідають отриманим раніше «компромісним» результатами. Як видно з табл. 10 не існує варіанту з найкращими показниками за всіма функціоналами і не виключений навіть варіант, коли не буде жодного найкращого функціоналу. Але у той же час сумарна вага функціоналів показує, що сукупність параметрів у верхніх варіантах близька до «оптимальної». Таким чином, можна автоматизувати попередню обробку даних за сумою ваг функціоналів, і лише на фінальному етапі підключити експертів (ОПР) для прийняття остаточного «компромісного рішення».

Висновки.

1. Представлена методика підтримки прийняття рішень дозволяє вирішувати задачі синтезу складних систем різного призначення і знаходити варіант системи, непокрещуваний («оптимальний») за кількома критеріями одночасно, але з незначним погіршенням інших. Подібною методикою можна оптимізувати нові складні системи різного призначення, що синтезуються, де варійовані параметри можуть змінюватися у широких межах. Саме у цьому випадку можливості методики «компромісних рішень» мають переваги і розкриваються досить широко.

2. На прикладі синтезу конструкції СТС, знайдені можливі непокрещувані варіанти ПК АПА.

Параметри варіантів ПК АПА представлені у табл. 5, а у табл. 6 наведені значення критеріїв у цих точках:

- з редуктором типу РЗ, який перевершує вихідний за критеріями маси (4 %) і вартості (1 %), та незначно гірший за іншими критеріями;

- оптимальний за критерієм прискорення (т. 20). Прискорення у цьому варіанті системи на 115 рад/с² більше, ніж у початковому, а маса і вартість менші, відповідно, на 14 кг і 16,2 у. о.

- з двигуном типу М8 і редуктором Р2, маса і вартість якого на 33 кг і 30,2 у. о. менше, ніж у вихідного. У цьому варіанті тільки значення прискорення (на 3,4 %) гірше (т. 17).

3. Результати наведеного прикладу підтримки прийняття компромісних рішень показують, що у даному випадку для ПК АПА можна суттєво знизити масогабаритні показники його елементів «двигун – редуктор» за рахунок несуттєвого зменшення енергетичних і динамічних показників ПК.

4. Використовуючи надані принципом Еджворта–Парето можливості ослаблення критеріальних обмежень та використовую наведену методику, можна автоматизувати отримання найкращих, з можливої множини альтернативних варіантів, параметри для будь-якої складної системи.

ЛІТЕРАТУРА

1. Прокопов, С. В. Экономико-математическое моделирование в производственном менеджменте / С. В. Прокопов. – К.: ИМСО, 2017. – 438 с.
2. Цветков, В. Я. Сложные технические системы / В. Я. Цветков // Образовательные ресурсы и технологии. – 2017. – 3 (20). – С. 86–92.
3. Романов, В. Н. Техника анализа сложных систем / В. Н. Романов. – СПб.: СЗТУ, 2011. – 287 с.
4. Копылов, И. П. Проектирование электрических машин. Учебник / И. П. Копылов, Б. К. Клоков, В. П. Морозкин, Б. Ф. Токарев. – М.: Высшая школа, 2005. – 767 с.
5. Батоврин, В. К. Управление жизненным циклом технических систем: серия докладов / В. К. Батоврин, Д. А. Бахтурин, И. С. Мацкевич, М. С. Липецкая. – СПб.: Фонд «Центр стратегических разработок «Северо-Запад», 2012. – Вып. 1. – 59 с.
6. Обнявко, Т. С. Методика підтримки прийняття рішень при закупівлях і проектуванні спеціальних засобів та обладнання / Т. С. Обнявко // Науковий вісник Ужгородського національного університету. Серія: Міжнародні економічні відносини та світове господарство. – 2016. – № 8 (2). – С. 33–39.
7. Бідюк, П. І. Проектування комп'ютерних інформаційних систем підтримки прийняття рішень / П. І. Бідюк, Л. О. Коршевнюк. – Київ: ННК «ІПСА», 2010. – 340 с.
8. Волянська, Я. Б. Підвищення ефективності технічного обслуговування, експлуатації і ремонту складних технічних систем / Я. Б. Волянська, О. М. Мазур, Т. С. Обнявко, О. А. Онищенко // Управління проектами та розвиток виробництва: Зб. наук.пр. – Луганськ: вид-во СНУ ім. В. Даля (Сєверодонецьк), 2018. – №2(65). – С. 5-18.
9. Бродецкий, Г. Л. Возможности метода последовательных уступок при выборе решения по многим критериям / Г. Л. Бродецкий, Д. А. Гусев, О. А. Мазунина, А. В. Фель // Логистика и управление цепями поставок. – 2017. – № 3 (80). – С. 91–105.

10. Горелик, В. А. Теория принятия решений / В. А. Горелик. – М.: МПГУ, 2016. – 152 с.
11. Ногин, В. Д. Обобщенный принцип Эджворта-Парето и границы его применимости / В. Д. Ногин // Экономика и математические методы. – 2005. – № 3. – т. 41. – С. 128–134.
12. Ногин, В. Д. Обобщенный принцип Эджворта-Парето в терминах функций выбора / В. Д. Ногин // Методы поддержки принятия решений. – 2005. – С. 43–53.
13. Ногин, В. Д. Принятие решений в многокритериальной среде: количественный подход (2-е изд., испр. и доп.) / В. Д. Ногин. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005 – 273 с.
14. Ногин, В. Д. Проблема сужения множества парето: подходы к решению / В. Д. Ногин // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2008. – № 1. – С. 98–112.
15. Богданова, А. В. Сужение множества Парето на основе простейших наборов нечеткой информации об относительной важности критериев / А. В. Богданова, В. Д. Ногин // Вестник Санкт-Петербургского университета. – 2007. – Сер. 10. – Вып. 2. – С. 17–33.
16. Onishchenko, O. Decision support system in assessing technical design and tender purchases / O. Onishchenko, O. Mazur // Collection of scientific works of the Military Academy (Odessa). – 2016. – № 1 (5). – P. 91–100.
17. Обнявко, Т. С. Визначення ефективності тендерних проектів у військовій економіці методами економетрики / Т. С. Обнявко, О. А. Онищенко // Науковий вісник Херсонського державного університету. Серія «Економічні науки». – 2014. – № 9. – С. 212–218.
18. Иванов, В. Г. К вопросу выбора электродвигателей гребных электроприводов необитаемых подводных аппаратов / В. Г. Иванов, И. В. Степанов, А. А. Томов // Морские интеллектуальные технологии. – 2018. – № 2 (40). – т. 2. – С. 52–59.
19. Волянский, С. М. Повышение качества управления электроприводами движительно-рулевого комплекса подводных аппаратов / С. М., Волянский, Я. Б. Волянская // Электротехнические и компьютерные системы. – 2014. – Вып. 15 (91). – С. 224–227.
20. Caridis, Piero Inspection, Repair and Maintenance of Ship Structures (2nd Edition) / Piero Caridis. – eBook, Product Code: 4394, 2009 – 326 p.
21. Matthews, Ch. Ship and Boat Building and Repair, Chapter 92 / Ch. Matthews, J. R. Thornton, E. Mirsch, J. Baldwin, C. Kiehner, F. H. Thorn, P. Ayres, C. Logan // Encyclopaedia of Occupational Health and Safety, 4th Edition. – 2015. Режим доступа: <http://www.ilocis.org/documents/chpt92e.htm>.
22. Mobley, R. Maintenance Engineering Handbook. Seventh Edition / R. Mobley. – The McGraw-Hill Companies. – 2008. – 457 p.
23. Jufer, M. Electric Drive: Design Methodology / M. Jufer. – Wiley-ISTE, 2010. – 225 p.

REFERENCES

1. Prokopov, S. V. Economic-mathematical modeling in industrial management / S. V. Prokopov. – K.: IMSO, 2017. – 438 p.
2. Tsvetkov, V. Ya. Complex technical systems / V. Ya. Tsvetkov // Educational resources and technologies. – 2017. – 3 (20). – P. 86–92.
3. Romanov, V. N. The technique of analysis of complex systems / V. N. Romanov. – SPb.: SZTU, 2011. – 287 p.
4. Kopylov, I. P. Designing of electrical machines. Textbook / I. P. Kopylov, B. K. Klokov, V. P. Morozkin, B. F. Tokarev. – Moscow: Higher School, 2005. – 767 p.
5. Batovrin, V. K. Life cycle management of technical systems: a series of reports / V. K. Batovrin, D. A. Bakhturin, I. S. Matskevich, M. S. Lipetskaya. – St. Petersburg: Foundation «Center for Strategic Research «North-West», 2012. – Issue. – 59 p.
6. Obnyavko, T. S. Methodology of decision-making support for purchasing and designing of special tools and equipment / T. S. Obnyavko // Scientific Bulletin of Uzhgorod National University. Series: International Economic Relations and World Economy. – 2016 – No. 8 (2). – P. 33–39.
7. Bidyuk, P. I. Designing of computer information systems for decision support / P. I. Bidyuk, L. O. Korshevnyuk. – Kyiv: NSC IPSA, 2010. – 340 p.
8. Volyanskaya, Ya. B. Improving the efficiency of maintenance, operation and repair of complex technical systems / Ya. B. Volyanska, O. Mazur, T. S. Obnyavko, O. A. Onishchenko // Project management and production development: Zb . sci.pr – Lugansk: View of the SNU them. V. Dalya (Severodonetsk), 2018. – № 2 (65). – P. 5–18.

9. Brodetsky, G. L. Possibilities of the method of successive concessions in choosing a solution by many criteria / G. L. Brodetsky, D. A. Gusev, O. A. Mazunina, A. V. Fel // *Logistics and Supply Chain Management*. – 2017. – No. 3 (80). – P. 91–105.
10. Gorelik, V. A. Theory of decision making. / V. A. Gorelik. – Moscow: MPGU, 2016. – 152 p.
11. Nogin, V. D. Generalized Edgeworth-Pareto Principle and Boundaries of Its Applicability / V. D. Nogin // *Economics and Mathematical Methods*. – 2005. – No. 3. – Vol. 41. – P. 128–134.
12. Nogin, V. D. Generalized Edgeworth-Pareto Principle in Terms of Selection Functions / V. D. Nogin // *Methods of Decision Support*. – 2005. – P. 43–53.
13. Nogin, V. D. Decision-making in a multicriteria environment: a quantitative approach (2nd ed., Rev. and add.) / V. D. Nogin. – Moscow: FIZMATLIT, 2005 – 273 p.
14. Nogin, V. D. The problem of narrowing the set of Pareto: approaches to the solution / V. D. Nogin // *Artificial intelligence and decision-making*. – 2008. – № 1. – P. 98–112.
15. Bogdanova, A. V. The narrowing of the Pareto set on the basis of the simplest sets of fuzzy information about the relative importance of criteria / A. V. Bogdanova, V. D. Nogin // *Bulletin of St. Petersburg University*. – 2007. – Ser. 10. – Issue. 2. – P. 17–33.
16. Onishchenko, O. Decision support system in assessing technical design and tender purchases / O. Onishchenko, O. Mazur // *Collection of scientific works of the Military Academy (Odessa)*. – 2016. – № 1 (5). – P. 91–100.
17. Obnyavko, T. S. Determination of the effectiveness of tender projects in the military economy by methods of econometrics / T. S. Obnyavko, O. A. Onishchenko // *Scientific Bulletin of Kherson State University. Series «Economic Sciences»*. – 2014. – No. 9. – P. 212–218.
18. Ivanov, V. G. On the choice of electric motors for rowing electric drives of uninhabited underwater vehicles / V. G. Ivanov, I. V. Stepanov, A. A. Tomov // *Marine Intellectual Technologies*. – 2018. – No. 2 (40). – Volume 2. – P. 52–59.
19. Volyanskiy, S. M. Improvement of the quality of electric drives control of the propulsion-steering complex of underwater vehicles / S. M. Volyanskiy, Ya. B. Volyanskaya // *Electrotechnical and computer systems*. – 2014. – Issue. 15 (91). – P. 224–227.
20. Caridis, Piero *Inspection, Repair and Maintenance of Ship Structures (2nd Edition)* / Piero Caridis. – eBook, Product Code: 4394, 2009 – 326 p.
21. Matthews, Ch. *Ship and Boat Building and Repair, Chapter 92* / Ch. Matthews, J. R. Thornton, E. Mirsch, J. Baldwin, C. Kiehner, F. H. Thorn, P. Ayres, C. Logan // *Encyclopaedia of Occupational Health and Safety, 4th Edition*. – 2015. Режим доступа: <http://www.ilocis.org/documents/chpt92e.htm>.
22. Mobley, R. *Maintenance Engineering Handbook. Seventh Edition* / R. Moble. – The McGraw-Hill Companies. – 2008. – 457 p.
23. Jufer, M. *Electric Drive: Design Methodology* / M. Jufer. – Wiley-ISTE, 2010. – 225 p.