

УДК 621.84

В.А. Краснобаєв, Ю.В. Пантелей, Р.Ю. Жермельова

*Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків*

## ПИТАННЯ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ЩОДО КЕРУВАННЯ У СКЛАДНИХ ІЄРАРХІЧНИХ СИСТЕМАХ

*Розглянута загальна задача оптимального керування ієрархічними системами, наведено аналіз найбільш широко розповсюджених процедур узгодження рішень у багаторівневих ієрархічних системах та методів декомпозиції задач управління, запропоновані принципи декомпозиції системної цільової функції.*

*оптимальне керування, складна ієрархічна система, процедура узгодження рішень*

### Вступ

У даний час питанням прийняття рішень у складних ієрархічних системах приділяється велика увага, як в Україні, так і за кордоном [1].

До достоїнств ієрархічної структури автоматизованого керування, у якій на нижньому рівні є велика кількість нескладних задач, а на вищестоячих рівнях – невелика кількість складних задач, варто віднести зниження загальної вартості обробки інформації в системі, підвищення пропускну здатності хост-машини в мережі ЕОМ і стійкість до відмов. Критичні для системи функції продовжують виконуватися локальними системами керування при виході з ладу хост-машини або ліній зв'язку.

Теоретичні питання побудови систем багатов'язної стабілізації параметрів у замкнутих локальних контурах регулювання, отриманих у результаті декомпозиції вихідної задачі оптимізації, розгляда-

ються в роботах [2 – 7]. Розглянуті системи мають змішану замкнено-розімкнуту структуру і сполучають керування за відхиленням і за збурюванням. При цьому динамічна стабілізація параметрів виробляється в основному замкнутим локальним контуром, а корекція за низькочастотними (НЧ) збурюваннями здійснюється системою верхнього рівня.

Поділ вирішення загальної оптимізаційної задачі між двома взаємозалежними рівнями може найчастіше вироблятися на основі гіпотези незначності впливу режимних величин на умови матеріального балансу, що дозволяє скористатися формальними схемами теорії збурювань.

### Викладення основного матеріалу

Загальна задача оптимального керування ієрархічними системами звичайно ставиться як статична оптимізаційна задача, тому що розглядається задача

функціонування виробництва на досить великих інтервалах часу (доба і більше), під час яких динамічною протікання процесів можна зневажити [4, 5].

Високочастотні збурювання матеріальних потоків, як передбачається в цьому випадку, відпрацьовуються системами автоматичної стабілізації роботи окремих установок і диспетчерськими службами нижнього рівня. Вирішення загальної задачі керування всім технологічним комплексом у цілому на ПЕОМ у реальному масштабі часу для перебування режимів роботи всіх установок, що входять у виробництво, неможливо через нелінійність моделей і величезної розмірності задачі (до десятків тисяч змінних). Вирішення окремих локальних задач оптимізації для ряду підсистем і елементів без вирішення загальної задачі виявляється найчастіше мало або зовсім неефективним, тому що не визначені змінні, що узгоджують режими робіт підсистем між собою, і не скоординовані критерії ефективності.

Існує два види алгоритмів координації: ітеративні і неітеративні [3 – 5]. В існуючих у даний час ітеративних процедурах (алгоритми Данцига-Вульфа, алгоритм Корнаї-Ліптака, методи, які ґрунтуються на уведенні функції Лагранжа або її різних модифікацій) оптимальне рішення визначається в ході ітеративного обміну інформацією між центром і елементами, а на кожному кроці ітеративного процесу вирішуються локально-оптимальні задачі елементів і координуюча задача центра.

При впровадженні ітеративних процедур узгодження рішень у багаторівневих ієрархічних системах виникають нездоланні перешкоди через великі міжрівневі інформаційні потоки і, відповідно, великі витрати часу на обмін інформацією.

Альтернативою цьому підходові служить використання у вищестоящих підсистемах детальних моделей нижчестоящих підсистем, однак при цьому не використовуються переваги децентралізованого керування. У неітеративних алгоритмах прийняття рішення здійснюється в результаті однократного обміну інформацією між рівнями. У цьому випадку координуюча підсистема повинна мати для детермінованого варіанта детальні моделі підсистем і точно знати їх цільові функції, однак такий підхід приводить до втрати переваг децентралізованого керування і дуже складній задачі для вищестоящого рівня. В основному неітеративні алгоритми зводяться до побудови множини ефективних рішень. Для організаційних ієрархічних систем існують алгоритми координації, які ґрунтуються на нечіткій логіці і композиційному правилі Заде, а також неітеративна процедура прийняття рішень у багаторівневій ієрархічній системі на основі теорії нечітких множин і нечіткого динамічного програмування Белмана-Заде [1, 2, 6].

Недоліком усіх неітеративних алгоритмів є необхідність визначення і передачі на вищестоящий рівень керування всієї ефективної множини елементів (або досить точної апроксимації цієї множини).

Однак алгоритми, які ґрунтуються на теорії нечітких множин, дозволяють будувати ефективні множини тільки для координуючих параметрів в інтервалах заданого  $r$ -рівня з урахуванням фактичної невизначеності для об'єкта керування.

Для вирішення зазначених проблем доцільно використовувати метод, який ґрунтується на декомпозиції загальної задачі керування на підзадачі. Цей метод дозволяє явно сформулювати всі припущення, що приймаються при заміні загальної задачі на підзадачі. Однак при застосуванні цього методу можуть виникнути труднощі одержання структури підзадач і принципів координації, сумісних з реально існуючими методами керування технологічними процесами.

Для багаторівневої організаційно-технологічної системи міжрівнева і внутрішньорівнева координація повинна відрізнятися рівнем організації взаємодії:

1. **Координація за цілями.** Система керування вищестоящого рівня може встановлювати для нижчестоящої підсистеми цілі функціонування і показники, що їх характеризують, із завданням їх кількісних значень на планований період, тобто цільова функція підсистеми формується вищестоящим рівнем.

2. **Координація за обмеженнями.** У цьому випадку на ряд параметрів у точках сполучення підсистем встановлюються обмеження вищестоящою системою керування. Ці обмеження задаються із системних позицій і враховують цілі й обмеження підсистем.

3. **Координація в часі** (синхронізація роботи підсистем).

4. **Координація за вхідними або вихідними параметрами.**

Можна виділити також різні види координуючих впливів:

1. Інтегральна координація (слабка), коли для кожної підсистеми задається плановий показник  $K$  на визначений період часу  $T$  і різні обмеження:

$$\int_0^T [z(t) - z^*] dt \leq K. \quad (1)$$

2. Чітка координація (тверда), коли для координуючого параметра  $K$  у кожен момент часу виставляється вимога дотримання рівності

$$K(t) = K. \quad (2)$$

3. Інтервальна координація, що вимагає лише приналежності координуючого параметра  $K$  заданого інтервалу

$$K(t) \in [K_{\min}, K_{\max}]. \quad (3)$$

4. Лінгвістична координація, при якій здійснюється видача нечітких координуючих впливів природною мовою, наприклад: "Технічний засіб А повинен переміщатися до об'єкта С". У цьому випадку координуюча величина  $K$  є нечіткою і задається функцією приналежності  $\mu(K)$ . Важливим питанням є і вибір принципу координації: прогнозованої взаємодії, збалансованої взаємодії, оціненої взаємодії, що координує принцип навантажувального типу і координує принцип коаліційного типу.

Центральною проблемою розробки розподілених процедур вирішення складних задач є знаходження такої декомпозиції задачі на підзадачі і вибір таких методів їх вирішення, що приводили б до одержання прийнятної за якістю вирішення всієї задачі в цілому за прийнятний час. Формальні методи такої декомпозиції в даний час розроблені вкрай слабо й в основному для добре формалізованих задач визначеного класу (задача лінійного програмування великої розмірності).

Існуючі методи декомпозиції в основному зводяться до послідовної заміни системи нелінійних диференціальних рівнянь у часткових похідних системою нелінійних алгебраїчних рівнянь, а потім після лінеаризації - до системи лінійних рівнянь.

Недоліком цього підходу є експонентний ріст машинного часу на розрахунок з ростом кількості елементів системи і використання єдиного для всіх елементів кроку квантування часу, хоча елементи можуть характеризуватися часовими квантами, що відрізняються один від одного на порядок і більше. Та ж сама проблема виникає і при вирішенні задачі квантування за просторовими координатами. Виходом з такого становища може стати розробка спеціальних декомпозиційних процедур, що допускають наявність у підсистемах різного рівня різних квантів за параметрами та часом.

У цьому випадку модель процесу керування автоматизованим технологічним комплексом стає адекватною існуючій на практиці політиці керування. Виникаюча внаслідок декомпозиції складної задачі керування паралельність вирішення ряду задач робить цей підхід придатним для реалізації загальної задачі керування на багатомашинному багаторівневому обчислювальному комплексі.

В основі запропонованого декомпозиційного підходу повинно лежати припущення про наявність загальної, глобальної моделі, що описує основні властивості системи адекватно поставленим цілям прийняття рішення. При наявності такої моделі застосування декомпозиційних методів дозволяє різко скоротити розмірність розв'язуваної задачі і звести її до послідовного вирішення ряду задач набагато меншої розмірності. Усі моделі, обмеження і критерії цих задач безпосередньо впливають тільки на основі спеціальним образом розчленованої глобальної цільової функції. При декомпозиційному підході алгоритм взаємодії між підсистемами (розв'язуваними задачами) і характер потоків інформації між вищестоящими і нижчестоящими рівнями є похідними і визначається методом декомпозиції глобальної задачі.

У даній статті запропоновані деякі принципи декомпозиції системної цільової функції і обмежень на цільові функції й обмеження, що відповідають окремим підсистемам.

Кожна підсистема оптимізує свою цільову функцію, а верхній рівень координує рішення нижчестоящих підсистем таким чином, щоб досягався оп-

тимум глобальної цільової функції. Процес координації здійснюється за допомогою деяких фіктивних змінних, котрі для нижчестоящих підсистем є параметрами.

Задачі, критерії і фіктивні змінні підсистем різних рівнів при декомпозиції можуть не відповідати реальним функціям керуючих органів і диспетчерських служб цих підсистем. Тому застосування процесу декомпозиції в чистому вигляді для реальної системи є проблематичним.

Аналіз і синтез ієрархічних систем безпосередньо не зводиться до класичної теорії оптимальних систем, що має справу тільки з однорівневими й одноцільовими системами. Ієрархічні системи відносяться до класу багаторівневих і багатоцільових систем. У цих системах змінюється саме поняття оптимальності, тому дуже важливо знайти адекватні математичні постановки задач і вкласти розумний зміст у поняття оптимальності.

Важливим фактором є врахування багатокритеріальності задачі керування складним багаторівневим технологічним комплексом. Правильне формалізоване представлення цілей системи значною мірою визначає практичну цінність одержуваних рішень. У найпростішому детермінованому випадку під критерієм розуміється функціонал  $F(\bar{x}, \bar{u})$ , визначений на множині можливих рішень, і при оптимізації необхідно знайти рішення  $(\bar{x}^*, \bar{u}^*)$ , що забезпечує максимум цього функціонала. При вирішенні багатокритеріальної задачі відшукується рішення, що забезпечує максимум кожного з часткових критеріїв. Однак такий максимум досягається лише в ідеальному випадку, а в реальних задачах потрібне компромісне рішення. Тому стає необхідним указівка послідовності застосування критеріїв і відносної важливості часткових критеріїв.

Класичні методи оптимізації (принцип максимуму Понтрягіна, метод динамічного програмування Белмана) дозволяють вирішувати задачі тільки зі скалярним критерієм. При наявності векторного критерію застосування цих методів оптимізації можливо тільки шляхом синтезу (найчастіше адитивного) одного узагальненого критерію з часткових критеріїв або введенням усіх (крім основного) критеріїв як додаткових обмежень або штрафних функцій.

Необхідність переведення векторного критерію в скалярний критерій оптимізації привела до введення спеціальних функцій переваги рішень, тобто акцент усе більше переноситься на проблему попереднього визначення переваги того або іншого рішення.

Найбільш часто при рішенні багатокритеріальних задач застосовуються синтетичні показники якості – адитивні, мультиплікативні і мінімаксні критерії. Адитивний глобальний критерій якості визначається таким чином:

$$F(\bar{x}, \bar{u}) = \sum_{j=1}^N L_j f_j(\bar{x}, \bar{u}), \quad (4)$$

де  $N$  – число часткових критеріїв ефективності, причому в окремому випадку можуть використовуватися і додаткові умови нормування:

$$0 < L_j < 1 \text{ та } \sum_{j=1}^N L_j = 1. \quad (5)$$

Вагові коефіцієнти для часткових критеріїв підбираються суб'єктивно на основі експертних оцінок, однак є і методи об'єктивного визначення ваг (наприклад, з рішення статистичної гри з критерієм мінімізації економічних втрат при прийнятті рішень). Основним недоліком адитивного критерію є можливість компенсації одного критерію за рахунок інших. Мультиплікативний глобальний критерій має вигляд

$$F(\bar{x}, \bar{u}) = \sqrt[N]{\prod_{j=1}^N L_j f_j(\bar{x}, \bar{u})}, \quad (6)$$

а мінімаксний –

$$F(\bar{x}, \bar{u}) = \min(f_1(\bar{x}, \bar{u}), \dots, f_N(\bar{x}, \bar{u})). \quad (7)$$

Мультиплікативний критерій не допускає компенсації, і якщо значення одного з часткових критеріїв дорівнює нулю, то глобальний критерій також дорівнює нулю. До достоїнств мінімаксного критерію можна віднести той факт, що для нього не відбувається зсуву оптимуму при додаванні нових несуттєвих критеріїв, але в той же час він погіршує чутливість глобального критерію.

При можливості ранжирування критеріїв за важливістю для знаходження чисельного рішення нерідко застосовується метод послідовних поступок.

Якщо в системі є невизначеність, то задача прийняття рішення значно ускладнюється. У випадку статистичної невизначеності (при відомих розподілах випадкових параметрів) при наявності векторної цільової функції рішення звичайно характеризується не одним, а декількома числами, і роль цільових функцій  $f_j$  відіграють визначені параметри розподілу, причому найбільш відомими прикладами є математичне сподівання  $M$  і дисперсія  $D$ , моменти вищих порядків застосовуються рідко.

Іноді застосовуються і звичайні функціонали, визначені на множині рішень, однак ці критерії вже носять імовірний характер: вони визначають імовірності появи деяких подій (наприклад, імовірність безвідмовної роботи устаткування і т.д.).

Наведемо узагальнення існуючих алгоритмів координатної на підставі таких уведених понять:

1. Множина ефективних точок  $P^*$  або множини Парето (які мають ту властивість, що неможливо поліпшити значення якого-небудь часткового критерію для підсистеми в порівнянні зі значенням, що досягається цим критерієм у точці  $x$ , без погіршення значення хоча б одного з інших часткових критеріїв).

2. Множина напівефективних точок  $R^*$  (якщо  $x \in R^*$ , то не існує припустимої альтернативи, що поліпшує значення відразу всіх часткових критеріїв).

3. Множина припустимих значень  $Y^F$  критеріїв.

Одним з істотних достоїнств вирішення багатокритеріальної задачі є той факт, що в результаті вирішення однокритеріальної задачі ми одержуємо рішення на границі якого-небудь обмеження, тобто вона, по суті, являє собою "генератор" вузьких місць, що "болісно" відбиваються на поведженні реального об'єкта і значно знижують інші показники режиму роботи системи - надійність, оптимальність і т.д. Багатокритеріальна постановка задачі відрізняється більшою близькістю до реальної задачі і меншою часткою абстракції.

## Висновки

Для реальних систем характерна залежність вибору критерію (або групи критеріїв) оптимізації від навколишнього середовища і ряду інших факторів; тобто в залежності від ситуації повинний проводитися вибір вектора критеріїв (або одного критерію) у процесі прийняття рішення оптимальним образом, а не вводиться в систему жорстко або вольовим шляхом. Особливо важливого значення набувають питання аналізу зони застосовності різних критеріїв і виявлення можливості вирішення однокритеріальних задач в окремому випадку. Тому стає можливим об'єктивно провести вибір критеріїв за ступенем їх застосовності. Одна із істотних переваг методу оптимізації – зміна критерію оптимізації і перехід до векторної оптимізації, зміна обмежень не призводять до переходу до зовсім нової задачі і навіть до зміни методу вирішення задачі, тобто метод оптимізації повинен мати достатню гнучкість.

У даний час прийнятий такий підхід до постановок задачі, що критерії прийняття рішень не входять у модель і задаються людиною до початку вирішення задачі на ПЕОМ. Однак у цьому випадку суб'єктивізм вибору критерію вкрай великий. Вибір того або іншого критерію цілком визначається станом системи і зовнішнього середовища, а також ступенем невизначеності за різними показниками, параметрами і характеристиками системи. Розглядаючи концептуальні рівні опису складної ієрархічної, погано визначеної системи, можна виділити три рівні опису з характерним ступенем абстрагування і деталізації:

1. **Методологічний рівень.** Використання на цьому рівні теорії стиснутих множин дозволяє адекватно відобразити задачу керування складним багаторівневим ієрархічним комплексом, провести декомпозицію цієї задачі на ряд більш простих ієрархічних взаємодіючих задач з використанням основних операцій стиснутих множин.

2. **Алгоритмічний рівень.** З урахуванням наявної в системі невизначеності можуть бути використані детерміновані методи теорії нечітких, інтервальних або випадкових множин. Застосування теорії нечітких множин дозволяє побудувати конструктивні алгоритми для розрахунку, ідентифікації й оптимізації для кожної з отриманих за допомогою стиснутих множин задач.

3. **Операційний рівень.** Для розрахунку й оптимізації на основі отриманих на другому рівні алгоритмів необхідно мати аналітичні і чисельні методи оперування з нечіткими та інтервальними величинами, методи вирішення задач нечіткого та інтервального лінійного і нелінійного програмування, одержання рішень систем звичайних і диференціальних рівнянь. Є також способи зведення задач нечіткого математичного програмування до сукупності задач інтервального програмування, а також до звичайних детермінованих задач, що дає можливість скористатися розробленими методами математичного програмування.

### Список літератури

1. Алтунин А.Е., Семухин М.В. *Модели и алгоритмы принятия решений в нечетких условиях: Монография.* – Тюмень: ТГУ, 2000. – 352 с.

2. Афанасьев В.Н. *Динамические системы управления с неполной информацией. Алгоритмическое конструирование.* – М.: КомКнига, 2007. – 216 с.

3. Бусленко Н.П. *Моделирование сложных систем.* – М.: Наука, 1988. – 386 с.

4. Губко М.В. *Математические модели оптимизации иерархических структур.* – М.: Наука, 2006. – 264 с.

5. Зарубин В.С. *Математическое моделирование в технике.* – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 195 с.

6. Кофман А. *Введение в теорию нечетких множеств: Пер. с франц.* – М.: Радио и связь, 1982. – 432 с.

7. Месарович Р., Мако Д., Такахара Н. *Теория иерархических многоуровневых систем.* – М.: Мир, 1973. – 344 с.

Надійшла до редколегії 14.03.2007

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Ю.В. Стасєв, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.