

УДК 681.511

М.Г. ІЄВЛЄВ*

ОДИН ІЗ СПОСОБІВ ДЕКОМПОЗИЦІЇ ЗАДАЧІ ОПТИМІЗАЦІЇ РЕЖИМІВ ПРОКАТКИ НА ТОВСТОЛИСТОВОМУ СТАНІ

*Інститут проблем математичних машин і систем НАН України, м. Київ, Україна

Анотація. В теорії управління під декомпозицією розуміється метод, яким досліджувана система ділиться на підсистеми, задача – на підзадачі тощо, кожна з яких вирішується самостійно. Процедура строгої декомпозиції спирається на чітко сформульований математичний апарат декомпозиції задач із блочною структурою, а також різні параметричні методи. Методи евристичної декомпозиції дозволяють аналізувати неформально поставлені задачі й дають можливість поділити її на основі інтуїтивних передбачень щодо взаємодії окремих задач. В основу такого поділу можуть бути покладені різні критерії, наприклад, мінімум розірваних зв'язків, технологічні або економічні міркування, поділ по стадіях процесу управління тощо. Задача оптимізації режимів прокатки на товстолистовому стані (ТЛС) багатовимірною, характеризується рядом вихідних показників, кожен із яких є функцією кількох управлінь. Для вирішення такої задачі необхідно згорнути векторний критерій у скалярний. При цьому виникає проблема визначення вагових коефіцієнтів різних показників, що у загальному випадку вирішується на рівні експертних оцінок, а ефективність оптимізації автоматичного управління за цим критерієм суттєво визначається досвідом експертів. У такій ситуації можна використати методи евристичної декомпозиції, які дозволяють аналізувати неформально поставлені задачі й дають можливість поділити її на основі інтуїтивних передбачень щодо взаємодії окремих задач. У статті розглянута постановка задачі оптимізації режимів прокатки на ТЛС шляхом декомпозиції загальної задачі автоматизації до ряду однокритеріальних задач із використанням евристичних методів, що дозволяє забезпечити максимальну ефективність автоматизації. Викладені вище науково-технічні рішення можуть бути використані при розробці автоматизованих систем управління режимами прокатки на ТЛС.

Ключові слова: декомпозиція, задача оптимізації, режими прокатки, товстолистовий стан.

Abstract. In control theory, decomposition is a method according to which the studied system is divided into subsystems, the problem – into subproblems, etc., each of which is solved independently. The procedure of strict decomposition is based on a clearly formulated mathematical apparatus of decomposition of problems with block structure, as well as on various parametric methods. Heuristic decomposition methods allow an informal analysis of the specified tasks and make it possible to divide them on the basis of intuitive predictions about the interaction of individual tasks. Such a division can be based on various criteria, for example, the minimum of broken ties, technological or economic considerations, the division by stages of the management process, etc. The problem of optimization of rolling mills on a heavy-plate mill is multidimensional and characterized by several output indicators, each of which is a function of several controls. To solve this task it is necessary to replace a vector criterion with a scalar one. After that, there arises the problem of determining the weight coefficients of various indicators, which in the general case is solved at the level of expert assessments, and the efficiency of optimization of automatic control by this criterion is significantly determined by the experience of experts. In this situation, you can use the methods of heuristic decomposition, which allows you to analyze informally set tasks and make it possible to divide them on the basis of intuitive predictions about the interaction of individual tasks. The paper considers the formulation of the problem of optimization of rolling modes on heavy-plate mills by decomposing the general automation problem into a number of single-criteria problems using heuristic methods, which allows ensuring maximum efficiency of automation. The above scientific and technical solutions can be used in the development of automated control systems for rolling modes on the heavy-plate mill.

1. Вступ

Декомпозиція – це науковий метод переходу від загального до часткового, від складного до простого. В теорії управління під декомпозицією розуміється метод, яким досліджувана система ділиться на підсистеми, задача – на підзадачі тощо, кожна з яких вирішується самостійно.

Процедура строгої декомпозиції спирається на чітко сформульований математичний апарат декомпозиції задач із блочною структурою. Найбільш універсальними є методи, що представляють собою узагальнення відомого алгоритму Данцига-Вульфа, а також різні параметричні методи, які ґрунтуються на введенні спеціальних перемінних [1].

Методи евристичної декомпозиції дозволяють аналізувати неформально поставлені задачі й дають можливість поділити її на основі інтуїтивних передбачень щодо взаємодії окремих задач. Стосовно управління виробництвом ці методи спираються на досвід і знання людей, які задіяні в управлінні. В основу такого поділу можуть бути покладені різні критерії, наприклад, мінімум розірваних зв'язків, технологічні або економічні міркування, поділ по стадіях процесу управління тощо.

Метою статті є опис декомпозиції задачі оптимізації режимів прокатки на товстолистовому стані з використанням евристичних методів.

2. Характеристика взаємозв'язків товстолистового стану як об'єкта автоматизації. Постановка та декомпозиція загальної задачі автоматизації

Товстолистовий стан (ТЛС) як об'єкт автоматизації є складним багатозв'язним об'єктом дискретно-безперервної дії. ТЛС властива певна номенклатура управлінь, координат стану та вихідних показників, зв'язки між якими носять суттєво нелінійний характер. При цьому деякі зв'язки встановлюються шляхом обробки статистичних даних, тобто носять статистичний характер.

Ефективність функціонування реверсивного листопрокатного стану визначається вихідними показниками об'єкта, які можна поділити на показники якості прокату та показники процесу прокатки [2, 3]. Перші повністю оцінюються з позиції споживача листа, другі – характеризують рівень ведення технологічного процесу щодо продуктивності, витрати металу слябу на тонну листа, витрати енергоресурсів і завантаження устаткування.

Показники якості прокату можна розбити на дві групи: перша характеризує механічні властивості, структуру, чистоту поверхні листа та ін., друга – геометричні розміри (середню товщину, поперечну та поздовжню різнотовщинність, площинність, середню ширину та різноширинність смуг із катаними кромками). Номенклатура вихідних показників представлена у табл. 1, номенклатура управлінь – у табл. 2. Крім управлінь, на формування вихідних показників об'єкта автоматизації впливає ряд збурень. Перелік основних збурень наведено у табл. 3.

З метою постановки та визначення задачі автоматизації необхідно визначити взаємозв'язки між наведеними управліннями, збуреннями та вихідними показниками об'єкта. Розглянемо ці взаємозв'язки на рівні причинно-наслідкових залежностей. Для їх встановлення здійснено аналіз даних теоретичних та експериментальних досліджень процесу прокатки, наведених у літературних джерелах, та даних, отриманих за участю автора при проведенні експериментальних досліджень на ряді товстолистових станів [2].

Таблиця 1 – Вихідні показники об'єкта

№ з/п	Найменування показників	Умовне позначення	Групи показників
1	Поперечна різновтовщинність	P_1	Якість прокату
2	Поздовжня різновтовщинність	P_2	
3	Середня товщина смуги (по осі)	P_3	
4	Різновширинність і форма смуги у площині	P_4	
5	Середня ширина смуги	P_5	
6	Якість поверхні бічних та торцевих кромок	P_6	
7	Механічні властивості, структура, щільність металу	P_7	
8	Площинність смуги	P_8	
9	Витратний коефіцієнт	P_9	Якість процесу
10	Продуктивність	P_{10}	
11	Витрата енергоресурсів на прокатку	P_{11}	
12	Еквівалентний момент прокатних двигунів (нагрів двигуна)	P_{12}	
13	Зношування та аварійність обладнання	P_{13}	

Таблиця 2 – Управління об'єктом автоматизації

№ з/п	Найменування управлінь		Умовне позначення
1	Управління противигином валків		Y_1
2	Управління гідравлічним натискним пристроєм (ГНП)	Начальна корекція товщини Стабілізація товщини	Y_2^1 Y_2^2
3	Управління електромеханічним натискним пристроєм (ЕМНП) горизонтальної кліті	Реалізація потрібного обтискання на етапі прокатки до кінцевої товщини Реалізація потрібного обтискання на етапі розбивки ширини Вибір співвідношення сумарних обтискань при продольній і поперечній прокатці Розподіл обтискань по пропусках на окремих етапах прокатки	Y_3^1 Y_3^2 Y_3^3 \bar{Y}_3^4
4	Управління ЕМНП вертикальної кліті	Сумарне обтискання бічних кромок Сумарне обтискання торцевих кромок Обтискання по пропусках бічних кромок	Y_4^1 Y_4^2 \bar{Y}_4^3
5	Охолодження валків		Y_5
6	Швидкісні управління головним приводом горизонтальної кліті		Y_6
7	Швидкісні управління головним приводом вертикальної кліті		Y_7

Продовж. табл. 2

8	Управління швидкістю робочих рольгангів	Y_8
9	Управління ритмом видачі заготовок на прокатку	Y_9
10	Управління пристроєм гідрозбивання	Y_{10}

Таблиця 3 – Збурення, що впливають на об'єкт автоматизації

№ з/п	Найменування збурень	Умовне позначення
1	Нерівномірність фізичних властивостей проката за його об'ємом (хімічний склад, пластичність, температура)	B_1
2	Відхилення інтегральної температури заготовки після нагрівальної печі від заданої	B_2
3	Відхилення початкових геометричних розмірів і механічних властивостей заготовок від номінальних	B_3
4	Змінювання характеристик електрогідроживлення	B_4
5	Температурна деформація деталей обладнання	B_5
6	Змінювання характеристик стана (зношування)	B_6
7	Змінювання параметрів охолоджуючої рідини (при охолодженні валків)	B_7
8	Ексцентриситет і овальність валків	B_8

У результаті розгляду причинно-наслідкових зв'язків між управліннями та вихідними показниками отримано опис (якісна модель) об'єкта управління, який представлений у табл. 4 та табл. 5 у вигляді двох прямокутних матриць зв'язку вихідних показників з управліннями (МЗУ) та матриці зв'язку вихідних показників із збуреннями (МЗЗ). Стовпці матриць відповідають вихідним показникам, рядки матриці МЗУ відповідають управлінням, а рядки матриці МЗЗ – збуренням, які діють на об'єкт автоматизації. Елементами матриць є 0 або 1, причому 1 відповідає наявності зв'язку, а 0 – його відсутності.

Таблиця 4 – Матриця зв'язку вихідних показників з управліннями (МЗУ)

Управління	Показники												
	Π_1	Π_2	Π_3	Π_4	Π_5	Π_6	Π_7	Π_8	Π_9	Π_{10}	Π_{11}	Π_{12}	Π_{13}
Y_1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
Y_2^1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Y_2^2	1	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
Y_3^1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Y_3^2	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0
Y_3^3	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
\bar{Y}_3^4	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
Y_4^1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0
Y_4^2	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0

Продовж. табл. 4

\bar{Y}_3^4	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1	1	1
Y_5	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1
Y_6	1	1	1	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1
Y_7	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1
Y_8	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1
Y_9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
Y_{10}	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0

Таблиця 5 – Матриця зв'язку вихідних показників із збуреннями (МЗЗ)

Збурення	Показники									
	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_7	P_{10}	P_{11}	P_{12}	
B_1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	
B_2	0	0	0	0	0	0	1	1	1	
B_3	1	1	1	1	1	0	0	0	0	
B_4	1	1	1	1	1	0	0	0	0	
B_5	1	1	1	1	1	0	0	0	0	
B_6	1	1	1	1	1	0	0	0	0	
B_7	1	0	0	0	0	1	0	0	0	
B_8	1	1	1	0	0	0	0	0	0	

З урахуванням отриманого опису об'єкта управління загальну задачу автоматизації можна сформулювати таким чином: забезпечити максимальну ефективність функціонування об'єкта управління за рахунок збільшення продуктивності процесу, зниження витрати електроенергії на прокатку та збільшення довговічності обладнання при забезпеченні на заданому рівні показників якості продукції, що характеризують точність геометричних параметрів листа, механічні властивості, якість поверхні, а також формоутворення листів у просторі та площині (у плані). Таким чином, ціль автоматизованого управління прокаткою полягає у досягненні оптимального співвідношення описаних показників для отримання максимального прибутку.

Сформульована таким чином задача автоматизації багатовимірною, характеризується рядом вихідних показників, кожен із яких є функцією кількох управлінь. Причому багато вихідних показників пов'язані між собою через спільні управління.

Вихідні показники задані, як правило, на обмежених інтервалах (замкнених, відкритих, напіввідкритих), де однією з меж може бути точка відліку. У n -вимірній системі координат, де n – кількість показників, інтервали, що задані на осях цієї системи, утворюють область можливого положення кінця вектора вихідного показника, що характеризує розв'язання задачі автоматизації. Величини управлінь також задані обмеженими інтервалами і в системі координат утворюють область допустимих управлінь. Задача має рішення, якщо існує область (непорожня множина) допустимих управлінь, що забезпечують попадання кінця вектора вихідного показника в задану область. У цих умовах може бути постановка задачі оптимізації за векторним критерієм.

Для вирішення такої задачі необхідно згорнути векторний критерій у скалярний. Проте, при згортанні векторного критерію у скалярний, необхідного для вирішення задачі, виникає проблема визначення вагових коефіцієнтів різних показників функціонування ав-

томатизованого об'єкта, що у загальному випадку вирішується зазвичай лише на рівні експертних оцінок. Внаслідок такого конструювання критерію ефективність оптимізації автоматичного управління за цим критерієм суттєво визначається досвідом експертів.

Вирішення загальної задачі автоматизації слід розпочати з аналізу можливостей її спрощення та зведення до задач меншої розмірності. Ряд можливостей спрощення задачі пов'язаний зі складом векторного критерію K . До них належать такі:

1. Виключення зі складу K показників, які з урахуванням конкретної ситуації на об'єкті автоматизації не є визначальними з точки зору ефективності його функціонування (виключення щодо ситуації).

2. Скорочення складу компонент вектора K із забезпеченням прийняттого рівня показників, що виключаються, шляхом відповідного поповнення складу обмежень на вибір управлінь (заміна обмеженням).

3. Виключення зі складу K показників на основі дослідження їх взаємозв'язку та взаємовпливу. Якщо, наприклад, зі збільшенням показника K_i показник K_j також завжди збільшується, а бажана мінімізація обох, один із них можна виключити зі складу K (використання взаємозв'язку компонент).

Більш строго підійти до постановки задачі автоматизації, вирішення якої забезпечувало б максимальну ефективність автоматизації, дозволяє декомпозиція об'єкта з загальної задачі автоматизації до ряду однокритеріальних задач [2, 4]. Практична можливість декомпозиції обумовлюється надмірністю управлінь на ТЛС та можливістю виділення управлінь, що істотно впливають на один показник та мало впливають на інші. При цьому вирішення зазначених однокритеріальних задач відповідно до їх часткових критеріїв має задовольняти постулату сумісності, тобто забезпечувати оптимальність рішення для загальної задачі автоматизації [5].

Розглянуті об'єкт і задача автоматизації характеризуються тим, що деякі взаємозв'язки між управліннями і вихідними показниками є статистичними, тобто вимагають уточнення на конкретному об'єкті, а деякі вихідні показники та їх зв'язки з управліннями мають імовірнісний характер, тобто теорією прокатки визначено заходи, що підвищують можливість отримання цих показників на заданому рівні (наприклад, показники, що характеризують механічні властивості прокату, якість його поверхні, аварійність обладнання та ін.). Це завідомо виключає для таких показників постановку задачі з пошуком екстремуму цього показника і допускає тільки можливість вирішення, що забезпечує попадання показника в заданий інтервал.

Можна виділити три основні типи зв'язків між управліннями та показниками об'єкта. До них відносяться:

1. Показник (чисельне вираження параметра) однозначно пов'язаний з керуванням одним механізмом. Управління – координата, що змінюється у функції часу. Початок відліку часу – початок певного кроку дискретно-безперервного процесу, наприклад, пропуску металу через валки, порізки смуги на мірні довжини.

2. Показник однозначно пов'язаний з сукупністю управлінь одним механізмом чи різними механізмами на певному етапі прокатки і не залежить від інших управлінь, а також не залежить від управлінь на інших етапах. Управління, що визначають формування показника, який розглядається, не впливають на інші показники.

3. Група показників пов'язана з групою управлінь на всьому чи частині періоду циклу (етапу) прокатки.

Наявність зв'язків перших двох типів природно визначає постановку відповідних однокритеріальних автономних задач автоматизації, а питання декомпозиції стосуються перетворення третього типу зв'язків до перших двох.

З іншого боку, на формування показників автоматизованого об'єкта впливають збурення – впливи, незалежні від виданих на відпрацювання управлінь.

Як видно з матриці МСУ, більшість управлінь пов'язані одночасно з кількома вихідними показниками, що притаманно зв'язкам третього типу. Приведення цих зв'язків до першого або другого типу та вирішення однокритеріальних задач можливе після «поділу» між показниками згаданих управлінь. Такий поділ базується на умовному розриві слабких зв'язків між управліннями та показниками, а також на запровадженні додаткових збурень, що впливають на формування відповідного показника та імітують вплив розірваних зв'язків на це формування. Якщо рештою управлінь, пов'язаних з цими показниками, при новій сукупності збурень не вдається досягти значень показника в заданому інтервалі (або в раціональній області заданого інтервалу), то на управління, зв'язки з якими умовно розірвані, накладаються такі обмеження, щоб бажані значення показника, що розглядаються, були досяжні.

Оцінка слабких зв'язків здійснюється чисельним аналізом формалізованих зв'язків управлінь та показників, а визначення бажаних або раціональних областей у заданих інтервалах показників проводиться з урахуванням такої пріоритетності: 1 – показники якості продукції, 2 – показники витрати сировини на тонну продукції, 3 – показники продуктивності та витрати енергії в умовах припустимого завантаження обладнання стану.

Такий поділ управлінь проводиться з використанням отриманого опису об'єкта управління (якісної моделі управління процесом) та здійснюється на основі таких неформальних міркувань:

- безумовності досягнення певних показників у заданих межах;
- очевидної необхідності досягнення показників із вищим пріоритетом, що визначається економічною значимістю показника;
- доцільності передачі управлінь, спеціально призначених для формування певних показників, цим показникам (що істотно впливають на ці показники та мало впливають на інші);
- необхідності врахування характеру показника: показник оптимізується шляхом варіації відповідного управління або забезпечується в заданому діапазоні за рахунок введення обмежень на це управління в задачах формування інших показників.

Показники якості продукції безумовно повинні бути забезпечені у заданих межах, тобто невідповідність цих показників встановленим допускам (за товщиною, шириною та площинністю – для показників P_3, P_5, P_8) або заданим інтервалам (наприклад, за міцністю – для показника P_7 або за допустимими розмірами дефектів на поверхні та кромках прокату – для показника P_6) призводить до браку продукції.

Пріоритетність інших показників може бути визначена з урахуванням структури собівартості прокатної продукції [6, 7] та можливості підвищення рівня даних показників при автоматичному управлінні в порівнянні з ручним. При прокатці сталевих листів вартість сировини стосовно готової продукції становить 70–75%, частка заробітної плати персоналу у собівартості продукції, що характеризує продуктивність праці, становить 11–14%, а вартість електроенергії, що витрачається при прокатці, близько 3%. Аналогічну структуру має собівартість прокатної продукції з алюмінію та її сплавів.

Можливості економії металу та підвищення продуктивності при автоматичному управлінні враховувалися відповідно до результатів, отриманих при впровадженні ряду АСУ ТП ТЛС [2, 8, 9], можливе зменшення витрати енергії на прокатку оцінювалося за графіками питомої витрати енергії при прокатці товстих листів зі сталі, а також алюмінію та його сплавів [10, 11].

З урахуванням сказаного визначено таку пріоритетність показників: 1 – показники якості продукції, 2 – показники витрати сировини на тонну продукції, 3 – показник продуктивності та 4 – показник витрати енергії в умовах допустимого завантаження стану.

3. Декомпозиція загальної задачі автоматизації стосовно ТЛС 5000 для прокатки алюмінію та його сплавів

Розглянемо спрощення загальної задачі автоматизації та зведення її до ряду автономних однокритеріальних задач, проведені стосовно ТЛС 5000 для прокатки алюмінію та його сплавів із використанням положень, наведених вище. Подібні прийоми декомпозиції використані в [12].

Проведемо спрощення задачі шляхом скорочення складу векторного критерію K . Відповідно до програм прокатки для стану 5000 завантаження двигунів головного приводу по нагріванню нижче допустимого для будь-яких типорозмірів, що прокатуються на стані [4]. На сучасних ТЛС прокатується різноманітний сортамент, причому тривалість прокатки партії заготовок одного типорозміру, як правило, менша 3τ (τ – постійна часу нагрівання двигуна). У цих умовах, чергуючи партії з перевантаженням по нагріванню і без перевантаження, можна прокатувати метал без зниження продуктивності, не перевищуючи допустиме нагрівання двигуна. З урахуванням сказаного, еквівалентний момент M_9 прокатних двигунів – показник Π_{12} зі складу векторного критерію K виключається та як обмеження при виборі режиму прокатки не розглядається (обмеження щодо ситуації). Вирішення задачі оптимізації режимів прокатки, де M_9 розглядається як цільова функція або обмеження, наведені в [13].

Показники, що характеризують механічні властивості і структуру металу (показник Π_7), а також зношування та аварійність обладнання (Π_{13}), можуть забезпечуватися в необхідних діапазонах тільки за рахунок регламентації управлінь при вирішенні інших задач. У зв'язку з цим названі показники виключаються зі складу критерію K (заміна обмеженням).

Виключимо зі складу критерію K також показник Π_9 (витратний коефіцієнт), оскільки вирішення задач отримання необхідних значень показників $\Pi_1 - \Pi_8$ забезпечує одночасно мінімальну або необхідну величину Π_9 (використання взаємозв'язку компонентів). Основні управління показників Π_{10} (продуктивність) та Π_{11} (витрата енергоресурсів на прокатку) є спільними, а самі показники не є суперечливими [10, 13]. Дійсно, одночасно зі зменшенням тривалості циклу прокатки підвищується температура, при якій проводиться деформація металу, отже, зменшуються робота прокатки та кількість енергії, що витрачається на цю роботу. Враховуючи більш високий пріоритет показника Π_{10} порівняно з Π_{11} , виключимо з векторного критерію K показник Π_{11} (використання взаємозв'язку компонентів).

Враховуючи проведене скорочення складу векторного критерію K , а також з огляду на відомі результати декомпозиції загальної задачі автоматизації ТЛС, отримані напівевристичним шляхом та апробовані на практиці [8, 9], згадану задачу автоматизації можна представити сукупністю однокритеріальних задач трьох типів (рис. 1): управління режимами прокатки, що полягають в оптимізації (мінімізації) цільової функції, що характеризує тривалість процесу (задачі № 7 та № 9); регулювання геометричних розмірів прокату, що полягає у мінімізації відхилень регульованих параметрів від заданих значень або у забезпеченні цих відхилень у межах допусків (задача № 2); прогнозування технологічних параметрів, на підставі яких обчислюються управління з точністю, що забезпечує значення показників якості продукції, які визначаються цими управліннями, у межах заданих допусків (задачі № 1, 3, 4, 5, 6, 8 – зводяться до побудови математичних моделей, що забезпечують задану точність розрахунків, які адаптуються, якщо це потрібно).

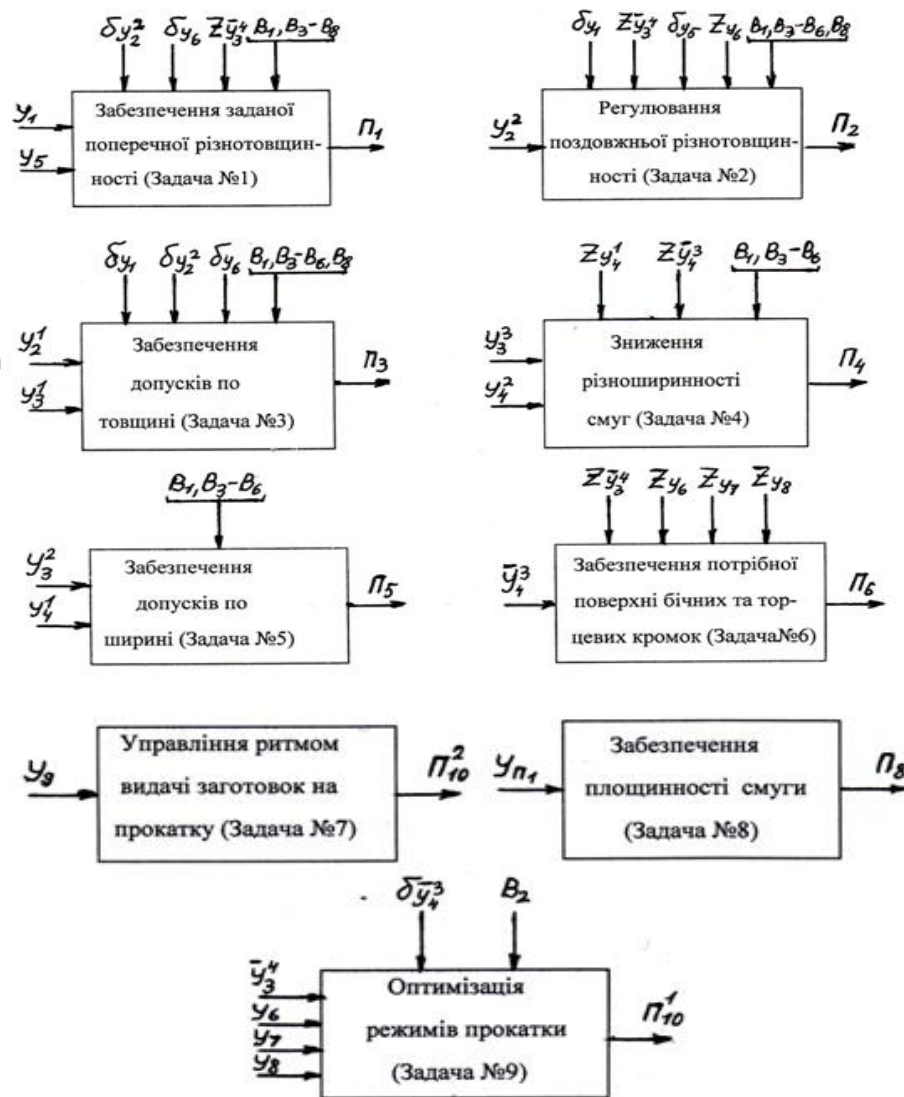


Рисунок 1 – Декомпозиція об'єкта автоматизації

Площинність забезпечується за рахунок підтримання поперечних різнотовщинностей (C) у ряді останніх пропусків відповідно до певного закону [14]. Надалі вважаємо, що забезпечення площинності (задача № 8) полягає у визначенні закону розподілу поперечних різнотовщинностей за пропусками, які є в ній задачами управління, а отримання необхідних значень C у різних пропусках відносимо до отримання показника Π_1 (задача № 1). Показник Π_{10} (продуктивність ділянки клітей) визначається двома складовими: тривалістю циклу прокатки (показник Π_{10}^1) та своєчасністю видачі заготовок на прокатку (показник Π_{10}^2). Друга складова визначається управлінням Y_9 . При цьому вважатимемо, що до циклу прокатки входить технологічно необхідна пауза після останнього пропуску, а додаткову паузу, що визначається ритмом видачі заготовок із печі, віднесемо до показника Π_{10}^2 . Отже, виділено дві автономні задачі № 7 та № 9 (рис. 1).

Задача № 9 може бути спрощена й приведена до сукупності задач оптимізації для окремих етапів, що складають цикл прокатки. Для цього покажемо, що мінімальний час циклу прокатки дорівнює сумі мінімальних часів окремих етапів. Надалі розглядається задача оптимізації для етапів розбивки ширини та прокатки до заданої товщини. Оп-

тимізація етапу попередньої витяжки не є доцільною через малу кількість пропусків (звичай 2). Для кожного етапу прокатки задані початкова і кінцева товщини (початкова товщина визначається кінцевою на попередньому етапі, а кінцева товщина – заданим розміром листа: шириною чи товщиною), тобто задано сумарне обтискання. Мінімізація тривалості етапу призводить до підвищення кінцевої температури на цьому етапі, а відповідно і початкової температури для наступного етапу. Це, у свою чергу, розширює діапазон можливих варіацій обтискань у пропусках, тобто на вибір обтискань не накладається додаткових обмежень. Таким чином, задане сумарне обтискання на кожному етапі, відсутність при виборі управлінь додаткових обмежень, що визначаються іншими етапами прокатки, дозволяє розглядати задачу оптимізації окремо для кожного етапу і забезпечити при цьому оптимальні показники всього циклу прокатки.

Розглянемо питання поділу управлінь між задачами. Власними управліннями, що не впливають на інші показники, є U_2^1 , U_3^1 , U_3^2 , U_3^3 і U_4^2 (показник P_9 не розглядається, а управління U_{10} на стані 5000 відсутнє). Рядки в матриці МСУ, відповідні цим управлінням, містять лише один елемент, рівний 1 (елементи стовпця, відповідного показнику P_9 , до уваги не беруться). Поділ управлінь, пов'язаних з декількома показниками, виконано в такий спосіб. Управління, спеціально призначені для формування певних показників, передані цим показникам: U_2^2 (стабілізація товщини за допомогою гідравлічного натискного пристрою ГНП) – показнику P_2 (поздовжня різнотовщинність), а U_1 (управління противигином – для стану 5000 управління противигином робочих валків U_1^1 та опорних валків U_1^2) і U_5 (секційне охолодження валків) – показнику P_1 (поперечна різнотовщинність).

Обтискання по пропусках у горизонтальній кліті (управління \bar{V}_3^4), а також швидкісні управління (V_6 , V_7 , V_8) впливають на ряд показників якості прокату (P_6 , P_7), продуктивність (показник P_{10}^1), а також показник зносу та аварійності обладнання (P_{13}). Як відзначалося раніше, опис формування показників P_6 , P_7 , P_{13} носить імовірнісний характер і визначені певні заходи, що підвищують імовірність отримання цих показників на заданому рівні. Зазначені показники дискретно впливають на економічну ефективність процесу (їхня невідповідність встановленим допускам призводить до браку продукції, поломки обладнання), тому їхнє отримання в заданому діапазоні обов'язкове. Отже, ці заходи обов'язково проводяться і можуть бути обмеженнями на вибір управлінь в інших задачах. Отриманий висновок стосується насамперед показника P_6 (задача № 6). Рішення про виключення показників P_7 і P_{13} зі складу векторного критерія K і забезпечення їх у необхідних діапазонах за допомогою регламентації управлінь під час вирішення інших задач прийнято вище. Таким чином, доцільно управління \bar{V}_3^4 , V_6 , V_7 , V_8 передати показнику P_{10}^1 , але при цьому в задачі формування даного показника враховувати відповідні обмеження.

Управління \bar{V}_3^4 впливає на поперечну різнотовщинність (показник P_1), причому як на кінцеву в останньому пропуску циклу, так і в попередніх пропусках. Залежно від режимів прокатки та стратегій управління противигином на стані 5000 задача отримання показника P_1 може вирішуватися або автономно лише за допомогою управління U_1 , або запровадженням додаткових обмежень на управління \bar{V}_3^4 . Приймаємо до уваги другий, більш загальний випадок.

Як вже зазначалося, точність геометричних розмірів, одержувана при регулюванні поздовжньої різновтовщинності (показник Π_2), пов'язана з вибором обтискань і швидкостей у регульованих і попередніх їм пропусках (управління \bar{V}_3^4 і Y_6), тобто зі стратегією управління режимами прокатки. Необхідність регламентації управлінь \bar{V}_3^4 та Y_6 в задачі оптимізації показника Π_{10}^1 через наявність зазначеного зв'язку визначається як застосовуваною стратегією управління, так і технологією прокатки певного сортаменту. Причому всьому діапазону зміни технологічних параметрів імовірно відповідають дві області параметрів: для першої – вирішення задач регулювання геометричних розмірів досягається без введення регламентації на вибір управлінь \bar{V}_3^4 та Y_6 , обумовленої цими задачами, для другої області – з регламентацією цих управлінь. Після визначення стратегій автоматичного управління для першої області параметрів необхідно уточнення питання існування другої області і характер регламентації управлінь \bar{V}_3^4 і Y_6 .

Управління \bar{V}_4^3 пов'язане з показниками Π_4 та Π_6 , які не є суперечливими. Оскільки показник Π_6 , як зазначалося вище, дискретно впливає на економічну ефективність процесу і отримання його у заданому інтервалі обов'язково, то управління передається цьому показнику. Зв'язком управління \bar{V}_4^3 з показником Π_{10} (продуктивність) можна знехтувати, тому що витяжка металу у вертикальній клітці мала і відповідно зміна довжини розкату при прокатуванні у вертикальній клітці незначна [10].

Описаний розподіл управлінь між показниками відображає отримана з матриці МЗУ перетворена матриця зв'язку ПМЗУ, яка представлена на табл. 6.

Таблиця 6 – Перетворена матриця зв'язку вихідних показників з управліннями (ПМЗУ)

Управління	Показники									
	Π_1	Π_2	Π_3	Π_4	Π_5	Π_6	Π_7	Π_8	Π_{10}	Π_{13}
Y_1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Y_2^1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Y_2^2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Y_3^1	0	0	1	0	0	0	0	0	0(1)	0
Y_3^2	0	0	0	0	1	0	0	0	0(1)	0
Y_3^3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
\bar{V}_3^4	0(1)	0(1)	0	0	0	0(1)	0(1)	0(1)	1	0(1)
Y_4^1	0	0	0	0(1)	0	0	0	0	0	0
Y_4^2	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
\bar{V}_4^3	0	0	0	0(1)	0	1	0	0	1	0(1)
Y_5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0(1)
Y_6	0	0(1)	0	0	0	0(1)	0	0	1	0(1)

Продовж. табл. 6

Y_7	0	0	0	0	0	0(1)	0	0	1	0(1)
Y_8	0	0	0	0	0	0(1)	0	0	1	0(1)
Y_9	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0(1)

У матриці ПМЗУ відсутні показники Π_9 , Π_{11} , Π_{12} та управління Y_{10} . Показники Π_7 та Π_{13} , виключені зі складу векторного критерію K , наведені в ПМЗУ з метою обліку обмежень на управління, запроваджених при цьому спрощенні. У перетвореній матриці ПМЗУ елементи, відповідні розірваним зв'язкам, позначені 0 (1), якщо необхідні значення показників, зв'язок із якими умовно розірвано, досягаються за умови обмеження відповідних управлінь. Якщо необхідності в обмеженні управлінь немає, то відповідний елемент матриці позначається 0. Відповідно, на рис. 3 літерами δ та z позначені управління, значення яких обумовлені розв'язанням інших задач, причому буквою z – управління, діапазон зміни яких обмежений із метою досягнення необхідних значень показників.

Таким чином виділено автономні однокритеріальні задачі трьох типів та проведено «поділ» управлінь між цими задачами й облік розірваних зв'язків.

До першого типу відноситься задача оптимізації режимів прокатки (обтискань та швидкостей) з метою мінімізації тривалості циклу (етапу) прокатки (показник Π_{10}^1 на рис. 1). Відповідно до матриці ПМЗУ управліннями у цій задачі є величини обтискань у пропусках і число пропусків у горизонтальній кліті (\bar{V}_3^4), швидкісні управління головним приводом горизонтальної та вертикальної клітей (Y_6 , Y_7), а також швидкістю робочих ролгангів (Y_8). На ці управління накладаються обмеження, що зумовлюють отримання заданих значень низки якісних показників продукції (Π_1 , Π_2 , Π_6 , Π_7 , Π_8) та збільшення терміну служби обладнання (показник Π_{13}).

До цього типу задач відноситься задача управління ритмом видачі заготовок на прокатку, що полягає в мінімізації пауз між прокаткою наступних один за одною заготовок з урахуванням обмеження щодо допустимого охолодження заготовки перед прокаткою [2].

До другого типу задач належить задача автоматичного регулювання поздовжньої різнотовщинності за допомогою ГНП (показник Π_2).

До третього типу задач відносяться задачі № 1, 3, 4, 5, 6, 8. Задача № 1 полягає у прогнозуванні зусилля протигина та деформації валкової системи під дією цього зусилля для компенсації прогину валків від зусилля прокатки та отримання з заданою точністю необхідної поперечної різнотовщинності. Задачі № 3 і 5 полягають у прогнозуванні зусилля прокатки та деформації кліті (відповідно горизонтальної та вертикальної) з точністю, що забезпечує реалізацію необхідного обтиснення у пропуску, а, отже, і попадання показників Π_3 та Π_5 (середня за довжиною товщина та ширина розкату) у задані допуски. Можливість розв'язання задачі № 8 (забезпечення допусків за площинністю, показник Π_8) визначається достовірністю математичних моделей, які дозволяють прогнозувати умови виникнення короблення товстих листів та параметри короблення. За допомогою цих моделей визначається допустимий діапазон зміни поперечних різнотовщинностей у відповідних пропусках, що забезпечує прокатку листів без хвилі або з допустимою хвилею. Зазначений діапазон поперечних різнотовщинностей може обумовлювати у свою чергу певні обмеження на функцію розподілу обтискань та зусиль за пропусками.

Вирішення задач формування показників P_4 і P_6 носить, як згадувалося, ймовірнісний характер і полягає у визначенні заходів, що підвищують імовірність отримання цих показників на заданому рівні, та у виконанні цих заходів. Зазначені заходи (у тому числі величини обтискань у вертикальній кліті) визначені технологами на основі наявного досвіду теоретичних та експериментальних досліджень.

4. Висновки

Розроблено якісну модель управління процесом прокатки на ТЛС, що визначає зв'язки вихідних показників об'єкта автоматизації з керуючими впливами та збуреннями.

Виконано постановку та декомпозицію загальної задачі автоматизації ТЛС з використанням якісної моделі управління та відомих результатів декомпозиції, отриманих напівемпіричним шляхом для аналогічних задач. У результаті загальна задача автоматизації представлена сукупністю автономних однокритеріальних задач.

Описаний підхід до постановки та декомпозиції загальної задачі автоматизації ТЛС використаний при розробці АСУ ТП низки товстолистових станів.

СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Борисова Л.В. Автоматизовані системи управління технологічним процесом у хімічних виробництвах: курс лекцій. Х.: НУЦЗУ, 2015. 98 с.
2. Ієвлев М.Г., Грабовський Г.Г. Математичні моделі і алгоритми керування в АСК ТП товстолистових прокатних станів. К.: Техніка, 2001. 248 с.
3. Грабовский Г.Г., Иевлев Н.Г., Корбут В.Б., Бутко В.Г. Основные принципы построения и опыт внедрения АСУ толстолистовыми прокатными станами. Интернет-издание «Metaljournal». 2014. URL: <https://www.metaljournal.com.ua/main-principals-of-design-and-integration-experience-of-Automatic-Control-System-by-plate-mills/>.
4. Архангельский В.И., Твардовский В.П., Иевлев Н.Г. Принципы и результаты решения основных задач оптимизации режимов реверсивной горячей прокатки листов. *Автоматизация станов горячей прокатки*. К.: Институт автоматизи, 1980. С. 64–71.
5. Месарович М., Мако Д., Такахага И. Теория иерархических многоуровневых систем. М.: Мир, 1973. 344 с.
6. Нурсейтов Б.Н., Колябина Е.Г., Акбиев К.Р. Типовые технико-экономические расчеты в черной металлургии: учебн. пособ. Караганда: Изд-во КарГУ, 2009. 155 с.
7. Банний Н.П., Федотов А.А., Ширяев П.А., Щепилов Ф.И. Экономика черной металлургии. М.: Металлургия, 1975. 472 с.
8. Архангельский В.И. Опыт создания и применения АСУ ТП в прокатном производстве. К.: УкрНИИТИ, 1976. 56 с.
9. Архангельский В.И., Твардовский В.П. Автоматизация режима обжатий толстого листа. Системы и средства автоматизации производств и управления. М.: Металлургия, 1977. С. 38–46.
10. Вусатовский З. Основы прокатки. М.: Металлургия, 1967. 584 с.
11. Меерович И.М. Прокатка плит и листов из легких сплавов. М.: Металлургия, 1969. 252 с.
12. Веренев В.В. Декомпозиция задачи исследования динамики прокатной клетки. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*: сб. научн. тр. Днепропетровск: ИЧМ НАН Украины, 2008. Вып. 18. С. 293–297.
13. Ієвлев М.Г. Автоматизоване управління режимами прокатки на товстолистових станах. *Математичні машини і системи*. 2020. № 4. С. 95–112.
14. Ієвлев Н.Г. Математические модели плоскостности толстолистового проката применительно к АСУ ТП. *Математичні машини і системи*. 2018. № 1. С. 67–77.

Стаття надійшла до редакції 02.05.2022