ФОРМУВАННЯ АГРЕГОВАНИХ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ УПРАВЛІННЯ ПРОКАТНИМ СТАНОМ НА БАЗІ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОЇ ОЦІНКИ

Мокрий Г.В., Борисов О.О.
Донецький національний технічний університет, м. Донецьк
кафедра автоматизованих систем управління,
кафедра автоматики і телекомунікацій
E-mail: alexbor@fcita.dn.ua

Abstract
Mokry G.V., Borisov A.A. The shaping complex quality factors of governing rolling mill on the base much-criterion evaluation. *Offerred principle of efficiency evaluation of control (rating of control strategy) with the account influences of factors on the base of separation of powerfully bound groups, information handling frequency division on groups with the separation of group argument (factor, aspect) and adaptive distribution "weights" group aspects in evaluations of real situations.*

У [1,2] вказувалось на необхідність багатокритеріальної оцінки ефективності управління складними процесами прокатного виробництва. Основні труднощі при оцінці управління прокаткою за множиною критеріїв зв'язані з численністю факторів, що впливають на цю оцінку, різнорідністю критеріїв оцінки, неможливістю приведення до єдиної шкали виміру, необхідністю урахування взаємного впливу факторів, ситуацій на «ваги» критеріїв, розпливчастості категорій існуючих оцінок [3,4].

Як показники, що характеризують управління виробництвом прокату, як правило, виступають геометричні параметри прокату, енергосилові витрати на виробничий процес, продуктивність безперервного стану, інтенсивність зносу механічних вузлів, надійність роботи устаткування і т.п. Для кожного з цих показників можуть бути визначені фактори, що на них впливають, і знайдені відповідні залежності. Природно, що поліпшення одних показників найчастіше можливо тільки за рахунок погіршення інших. Таким чином, виникає множина конкуруючих стратегій управління, що визначені великою кількістю факторів складного виробничого процесу. У зв'язку з цим, виникає загальна задача: на базі приватних різнобічних оцінок стратегії управління визначити її рейтинг стосовно конкуруючих стратегій, з огляду на зв'язність і взаємний вплив факторів, що впливають на процес прокатки.

Пропонується принцип оцінки ефективності управління (рейтингу стратегії управління) з урахуванням взаємовпливу факторів на базі виділення сильно зв'язаних груп, поділу частот обробки інформації з виділенням групового аргументу (аспекту) і адаптивного розподілу «ваг» групових факторів в оцінках реальних ситуацій. Відповідно до цього принципу, задача оцінки ефективності управління ставиться в такий спосіб:

1. На базі приватних прогнозних і статистичних оцінок якості управління складаються матриці даних, що відображають вплив визначених факторів на ефективність управління, що враховуються при реалізації стратегії. Знаходження зв’язків між факторами прокатки і формування відповідних матриць є окремою задачею, вирішення якої повинно базуватися на основних залежностях теорії і практики процесів прокатки.

2. За даними кореляційного аналізу оцінюється ступінь зв'язку між факторами і формується кореляційна матриця зв'язаності.

3. У матриці зв'язаності виділяються (аргументовано) групи сильно зв'язаних факторів, що обумовлюють механізм впливу цієї групи на реалізацію управління.

4. Для зв'язаних груп даних визначаються приватні аргументовані аспекти, як внутрішньої сутності явищ, що відображають інтегрований вплив групи виділених параметрів на ефективність управління. Агреговані аспекти, що характеризують управління з різних сторін у разі потреби (при великому їхньому числі) піддаються агрегації другого рівня, чим досягається зниження розмірності і спрощення рішення задачі оцінки управління.

5. На базі агрегованих факторів (оцінок) формується критерій оцінки стратегії управління (рейтинг) по сукупності факторів.

Структура алгоритму формування агрегованої оцінки управління процесом прокатки приведена на рис. 1.

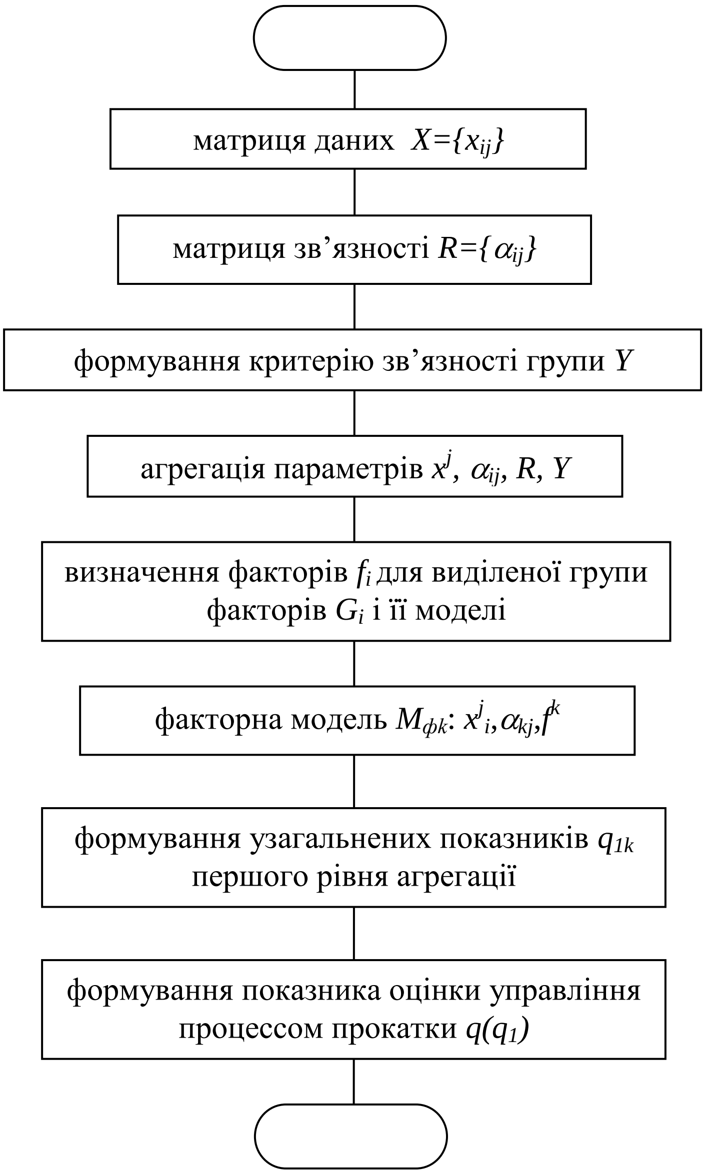

Рисунок 1 — Структура алгоритму формування агрегованої оцінки управління процесом прокатки

Приведена структура включає наступні модулі: модуль матриці даних $X=\{x_{ij}\}$, одержуваних по статистичним даним у результаті моніторингу і прогнозів факторів, що впливають на прокатку; модуль формування матриці зв'язності $R=\{\alpha_{ij}\}$, з використанням коефіцієнтів кореляції між факторами x^j і x^k (стовпці матриці даних, що характеризують вплив відповідного фактора на всі N факторів); модуль агрегації параметрів x^j, α_{ij}, R, Y, з використанням матриці зв'язку R, критерію зв'язності групи Y, і інтерпретації впливу факторів x^j; модуль факторних моделей $M_{фk}$: $x^j{}_i, \alpha_{kj}, f^k$, що зв'язує k-тий агрегований фактор із факторами підматриці зв'язків R_G виділених груп G_i, $\overline{\alpha}_i$; модуль визначення факторів f_i ($i=\overline{1,n}$, n — число факторів) для виділеної групи факторів G_i і її моделі $M_{фk}= x^j$, α_{kj}, f^k; модуль формування узагальнених показників q_{1k} першого рівня агрегації для оцінки різних сторін якості управління; модуль формування показника оцінки (рейтингу) стратегії управління $q(q_1)$ у цілому.

Матриця даних $X=\{x_{ij}\}$ представляє набір рядків і стовпців на перетинанні яких розміщуються елементи x_{ij}, що позначають оцінку j-го фактора в i-му процесі. Матриця X стандартизується таким чином, що середні значення $\bar{x}^j$ дорівнюють нулю, а дисперсії рівні 1:

$$\bar{x}^j = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} x_{ij} = 0; \quad \sigma_j^2 = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} x_{ij}^2 = 1; \tag{1}$$

Матриця зв'язку R формується з коефіцієнтів кореляції ρ_{ik} для x^j і x^k, обумовлених по статистичним і даним оператора стана. Для x^j і x^k

$$\bar{\rho}_{ik} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} x_{ij}x_{ik} = \frac{1}{N}(x^i, x^k), \tag{2}$$

де N — число факторів, що впливають на відповідні процеси (розмірність стовпців), (x^i , x^k) — скалярний добуток x^j і x^k, причому $\bar{\rho}_{jk} = \cos\alpha_{jk}$, α_{jk} — кут між векторами x^j і x^k, а величина $-1 \le \bar{\rho}_{jk} \le 1$ і $\left|\rho_{jk}\right| \le 1$.

Матриця зв'язку R використовується в модулі агрегації для виділення груп G_i сильно зв'язаних факторів. Метою розбивки матриці R є виділення таких непересічних підмножин $G_1 \ldots G_L$(агрегатів), величини зв'язку α_{ij} між факторами усередині яких, набагато більше зв'язків між факторами різних підмножин.

Розбивка матриці зв'язків R на підмножини G_i $(i=\overline{1,L})$ виробляється різними методами, що розрізняються компактністю одержуваних підмножин і обсягом обчислень. Групування факторів без одночасного виділення домінуючих факторів f^i проводиться методом діагоналізації матриці R (на головній діагоналі цієї матриці розташовуються компактні групи сильно зв'язаних факторів G_i). При цьому максимізується значення критерію компактності:

$$Y_k = \sum_{k=1}^{L}\frac{m_k}{M}\left[\frac{1}{m_k(m_k-1)}\sum_{\substack{i,j,\in G_k\\ i\neq j}}\alpha_{ij}\right] = \frac{1}{M}\sum_{k=1}^{L}\frac{1}{m_k-1}\sum_{\substack{i,j,\in G_k\\ i\neq j}}\alpha_{ij} = \max, \tag{3}$$

де m_k — число елементів у групі, L — число груп, $\sum\limits_{i,j,\in G_k}\alpha_{ij}$ — сума величин зв'язків між різними факторами в агрегаті $G_к$, $m_k(m_k-1)$ — загальна кількість таких величин, m_k/M — частка факторів, що попадають у підмножину $G_к$ (розмір агрегату), M — число елементів у вихідній матриці R. Оцінку компактності $G_к$ і виділення аспекту f^s з $G_к$, сильно зв'язаного з іншими факторами $G_к$ можна зробити різними методами, наприклад за допомогою критерію «варімакса», що максимізує дисперсію квадратів факторних навантажень на виділюваний фактор:

$$\sum_{k=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} a_{kj}^4 - \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{m}\left(\sum_{s=1}^{n}\alpha_{ks}^2\right)^2 = \max, \tag{4}$$

тут s — індекс факторів, що корелюють з виділюваним аспектом.

Якщо $G_к$ — включає фактори з малими єдностями, проекції факторних навантажень приводять до єдиної довжини розподілом їх на корінь квадратний зі спільності. Тоді критерій (4) приймає вигляд

$$\sum_{k=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}\left(\frac{\alpha_{kj}}{h_j}\right)^4-\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{m}\left(\sum_{s=1}^{n}\frac{\alpha_{ks}^2}{h_s^2}\right)^2=max, \qquad h_j=\sqrt{\sum_{k=1}^{m}\alpha_{kj}^2}, \tag{5}$$

де h_j — коефіцієнт множинної кореляції фактора x^j з m процесами $f^i,\ldots,f^m$.

Діагоналізація матриці R за критерієм (5) виробляється звичайно на першому етапі угруповання факторів x^j, унаслідок простоти алгоритму рішення. На другому етапі компактність G_i уточнюється з одночасним виділенням факторів f^i і використанням методу екстремального угруповання за критерієм

$$\begin{gathered}Y_э=\frac{1}{N^2}\sum_{i\in G_k}\left(x^i,f^1\right)^2+\frac{1}{N^2}\sum_{i\in G_k}\left(x^i,f^2\right)+\ldots+\frac{1}{N^2}\sum_{i\in G_k}\left(x^i,f^L\right)=\\ =\sum_{i\in G_k}\overline{\rho}^2_{x^i,f^1}+\sum_{i\in G_k}\overline{\rho}^2_{x^i,f^2}+\ldots+\sum_{i\in G_k}\overline{\rho}^2_{x^i,f^L}=\max\end{gathered} \tag{6}$$

де $\left(x^i,f^k\right)$ — скалярний добуток x^i,f^k, x^i — фактори найбільше тісно зв'язані з процесом f^k, а $(f^1,f^1)=(f^2,f^2)=\ldots=(f^L,f^L)=N$...

Кожна приватна сума в (6) залежить тільки від факторів x^i, що потрапили в одну групу $G_к$ і від аспекту f^k, поставленого у відповідність даній групі. При цьому, якщо визначені $G_i,\ldots,G_L$, фактор f^k може бути отриманий рішенням приватної задачі

$$\sum_{i\in Є_k}\left(x^i,f^k\right)^2=\max, \tag{7}$$

яка зважується за допомогою загальної факторної моделі для матриці R_k, що включає коефіцієнти кореляції між факторами тільки для групи $G_к$:

$$f^k=\frac{N}{\lambda_i^k}\sum_{i\in Є_k}\alpha_{1i}^k x^i, \tag{8}$$

де $\lambda_1^k,\left\{\alpha_{1i}^k;i\in G_k\right\}$ — перше найбільше власне значення і будь-який власний вектор матриці R_k.

З огляду на умови нормування f^k остаточно буде мати

$$f^k=\sqrt{N}\,\frac{\sum\limits_{i\in Є_k}\alpha_{1i}^k x^i}{\sqrt{\sum\limits_{i,j\in Є_k}\alpha_{1i}^k\alpha_{1j}^k(x^i,x^j)}}. \tag{9}$$

Визначення чисельних значень $\lambda_i^k,\alpha_{1i},\alpha_{1j}$ виробляється за допомогою факторних моделей (модулі $M_{фi}$: x^j, a_k, f^k). У факторному аналізі приймається лінійний зв'язок між оцінюваними оператором первинними факторами й процесами:

$$x^j=\sum_{k=1}^{m}\alpha_{kj}f^k+\eta^j, \quad j=\overline{1,n}, \tag{10}$$

де f^k — загальні процеси, η^j — вектор перешкод (характерних факторів), α_{kj} — «факторні навантаження», m — число загальних факторів, x^j — оцінювані (екзогенні) фактори.

Якщо позначити $\hat{x}^j$ — обчислене значення x^j, то

$$\hat{x}^j=\sum_{k=1}^{m}\alpha_{kj}f^k=x^j-\eta^j, \quad j=\overline{1,w}, \tag{11}$$

а задача ідентифікації моделі (10) полягає в мінімізації сумарної дисперсії

$$\sum_{j=1}^{n}\overline{\sigma}^{2}(\eta^{j})=\frac{1}{N}\sum_{j=1}^{n}(\eta^{j},\eta^{j})=\min . \qquad (12)$$

Виразивши η^{j} з (10) і підставивши його в (12), одержимо еквівалентну умову

$$\frac{1}{N}\sum_{j=1}^{n}(x^{j}-\sum_{k=1}^{m}\alpha_{kj}f^{k},\ x^{j}-\sum_{k=1}^{m}\alpha_{kj}f^{k})=\min , \qquad (13)$$

де під знаком суми в дужках скалярний добуток.

Якщо різні процеси, наприклад, f^{k} і f^{ℓ}, агреговані з R_G, якимось образом фіксовані, можна знайти навантаження, що задовольняють умові (12). Для цього продиференцюємо (12) по кожному навантаженню і дорівняємо похідні до нуля. Тоді для двох різних факторів f^{k}, f^{ℓ} будемо мати:

$$(x^{j}-\sum_{k=1}^{m}\alpha_{kj}f^{k},\ f^{\ell})=(\eta^{j},\ f^{\ell})=0,\quad \ell=\overline{1,m}. \qquad (14)$$

Приймаючи в увагу, що між процесами f^{k} і f^{ℓ} кореляція відсутня маємо:

$$(f^{k},f^{\ell})=\begin{cases}N & при \quad k=\ell\\ 0 & при \quad k\neq\ell\end{cases},\qquad \text{тоді}\qquad \alpha_{\ell j}=\frac{1}{N}(x^{j},\ f^{\ell})=\overline{\rho}_{x^{j},f^{\ell}}. \qquad (15)$$

Далі використовуючи (14) і (11), з огляду на те, що дисперсія оцінюваного фактора дорівнює сумі дисперсій обчисленого фактора $\widehat{x}^{j}$ і характерного параметра η^{j} будемо мати

$$\sum_{j=1}^{n}\overline{\sigma}^{2}(\widehat{x}^{j})=\max , \qquad (16)$$

а, підставляючи в (16) значення $\widehat{x}^{j}$ з (11) одержимо з урахуванням (15)

$$\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{m}\overline{\rho}^{2}{}_{x^{j},f^{k}}=\frac{1}{N}\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{m}(x^{j},\ f^{k})^{2}=\max . \qquad (17)$$

Тут максимум береться по всіх загальних процесах.

Таким чином, з (17) можуть бути визначені загальні процеси f^{k}, а факторні навантаження визначаються з задачі (15).

Перетворимо (17) до виду, зручного для рішення задачі екстремального угруповання факторів (8), (9), помінявши в (17) порядок підсумовування і відкинувши множник *1/N*:

$$\sum_{k=1}^{m}\left[\sum_{j=1}^{n}\left(x^{j},\ f^{k}\right)^{2}\right]=\max . \qquad (18)$$

Тут функціонал (18) представляє суму функціоналів, що складають критерій (6), у кожний з який входить лише один загальний фактор f^{k}.

Рішення (18) виробляється поетапно (по кроках), причому на кожнім етапі визначається тільки один фактор, що дозволяє використовувати цей метод при екстремальному угрупованні факторів (6), оскільки функціонал (6) представляє суму квадратів скалярних добутків векторів x^{j} і f^{k} по всіх компонентах виділеної множини $G_к$ з процесом f^{k} (причому тут

$$k=1,2,3,\ \ldots,\ \alpha_{kj}=i\in G_к). \qquad (19)$$

Запишемо (18) для першого кроку, що буде відповідати першому доданку в критерії (6) екстремального угруповання і можливості відшукання умовного екстремуму.

$$\sum_{i\in G_1}\left(x^{i},\ f^{1}\right)^{2}=\max,\quad (f^{1},f^{1})=N . \qquad (20)$$

Тут, (f^1,f^1) — скалярний добуток, що виступає в ролі обмежень.

Для відшукання локального екстремуму (20) використовуємо метод Лагранжа:

$$F\left(x^i, f^1, \lambda_1\right) = \sum_{i\in G_1}\left(x_i, f^1\right)^2 - \lambda_1\left(f^1, f^1\right) = 0. \quad (21)$$

Перший фактор f^1, що шукається, повинний задовольняти системі рівнянь, що одержувана диференціюванням (21)

$$\frac{1}{2}\frac{\partial F}{\partial f_i^1} = \sum_{i\in G_1}\left(x^i, f^1\right)x_j^i - \lambda_1 f_j^1, \qquad j = \overline{1, N}, \quad (22)$$

де $f^1=\{f^1{}_1, f^1{}_2, \ldots, f^1{}_n\}$ — векторна величина, λ_1 — множник Лагранжа.

Запишемо (22) у векторній формі

$$\sum_{i\in G_1}(x^i, f^1)x^i = \lambda_1 f^1, \quad (23)$$

тоді з обліком (15) рівняння (23) буде мати вигляд

$$\sum_{i\in G_l}\alpha_i X^i = \frac{1}{N}\lambda_l f^l. \quad (24)$$

З (24) видно, що для визначення f^1 досить знайти вектор $\alpha_1 = (\alpha_{11},\alpha_{12},\ldots\alpha_{1\,m_k})$ факторних навантажень на вектор f^1.

Вираження (24) приводиться до вигляду:

$$\sum_{i\in G_l}\alpha_{1i}\bar{\rho}x^i x^s = \frac{1}{N}\lambda_1\alpha_{1s}, \quad s = \overline{1, m_k}. \quad (25)$$

де m_k число зв'язаних параметрів у G_1.

Множачи (25) на вектор f^1 і з огляду на, що $(f^1,f^1)=N$, а $\alpha_{1i} = \frac{1}{N}(x^i, f^1)$, одержимо

$$N\sum_{i\in G_1}\alpha_{1i}^2 = \frac{1}{N}\sum_{i\in G_1}(x^i, f^1)^2 = \lambda_1. \quad (26)$$

Переписуючи співвідношення (25) як одне векторне рівняння будемо мати

$$R_k\alpha_1 = \frac{1}{N}\lambda_1\alpha_1, \quad (27)$$

тоді шуканий вектор α_1, є власний вектор кореляційної матриці R_k, а ${}^1\!/_N\,\lambda_1$ її власне значення.

Власний вектор α_1 вибирається так, щоб він відповідав максимальному власному значенню.

Інтерпретація встановленим аспектам f_k (якщо вони не очевидні) дається на базі евристичних прийомів. Звичайно зміст виділеного процесу f_k в групі факторів $\bar{p}$ зв'язується з фактором (чи факторами) з області $\bar{p}$, що має найбільше факторне навантаження на фактор f_k, що інтерпретується.

При рішенні факторних моделей виходять не самі фактори f^k, а лише їхні оцінки $\bar{f}^k$, виражені через факторні навантаження, у вигляді лінійних комбінацій оцінок факторів:

$$\bar{f}^l = \sum_{j=1}^{n}\alpha_j^l x^j, \qquad l = \overline{1, m}, \quad (28)$$

де l — індекс процесу, m — число факторів, α_j^l — факторні навантаження j–го фактора на l-й вектор.

Прийнято, що фактори f^l також представляють лінійні комбінації (функції) векторів x^j:

$$f^l = \sum_{j=1}^{n} \alpha_j^l x^j + \eta^l, \quad l = \overline{1,m}, \tag{29}$$

де η^l — можлива перешкода.

Співвідношення (29) визначає оцінки загальних факторів через вимірювані фактори, їхні взаємні коефіцієнти кореляції і факторні навантаження.

Оскільки оцінка якості управління прокаткою виробляється по сукупності показників (факторів), жоден з який окремо не гарантує вірогідності оцінки в умовах нестабільності процесу прокатки, глобальну оцінку розчленуємо на ієрархічне дерево оцінок, з таким розрахунком, щоб для локальних оцінок можна було підібрати найкращу статистику у своїй області.

Уведемо функції цінності $q_1(\overline{f}), q(\overline{q_1})$, що виражають цінність (корисність) набору факторів і їхніх ваг при виборі оцінки альтернатив одержання достовірних даних на ієрархічних галузях агрегації оцінок.

Відповідно до принципу послідовної агрегації факторів і підвищення цінності оцінок процес оцінювання виробляється поетапно з використанням багаторядного алгоритму.

На першому етапі (нижній рівень) виділяються групи факторів $x^j = p^j$ і ставляться у відповідність цим групам приватні фактори f_k . На другому етапі (рівні) для агрегації факторів f_k в інтегральні показники, загальноприйняті для оцінки стратегії управління використовується функція цінності $q_1(\overline{f})$, що максимізує цінність сукупності отриманих факторів f_k на інтегральний показник $q_{1i}(\overline{f})$. На третьому етапі інтегральні показники $q_{1i}(\overline{f})$ агрегуються в узагальнений показник оцінки (рейтинг) управління процесом прокатки максимізацією функції корисності $q(\overline{q_1})$ (тут $q_1(\overline{f}) = q_{11}(\overline{f})$, $q_{12}(\overline{f})$, …, $q_{1m}(\overline{f})$, m — число прийнятих інтегральних показників).

У загальному число етапів агрегації ієрархічних рядів згортання й узагальнення факторів P_n і факторів f_k, визначається розмірністю вихідної матриці X факторів, що P враховуються , кількістю зв'язаних груп, а також числом загальноприйнятих кінцевих оцінок стратегій управління, у які агрегується X матриця.

Висновок: переваги запропонованого методу і моделі оцінки якості управління прокаткою очевидні, оскільки глобальна (загальна) оцінка розчленовується на ієрархічне дерево приватних оцінок, а оцінки цілого завжди складніше оцінок його частин (для оцінки приватного показника завжди легше одержати якісну статистичну інформацію, чим для оцінки управління прокатним станом в цілому).

Література

1. Жадан А.Г., Маневич Л.Б. Совершенствование технологии прокатки на основе комплексных критериев качества. — М.: Металлургия, 1989. — 93 с.
2. Кучеряев Б.П., Крахт В.Б. Оценка технологических параметров листовой прокатки. // Известия высших учебных заведений. Чёрная металлургия. №3. — 2005. — С .32–38.
3. Бессараб В.І., Борисов О.О. Проблеми автоматизації процесу холодної листопрокатки // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація, випуск 38. — Донецьк: ДонНТУ, 2002. — С. 7–12.
4. Юрьев А.Б., Бринза В.В., Кузнецов И.С. Компьютерный анализ и оптимизация технологии производства проката // Сталь, №5. — 2004. — С. 56–59.