

- Development. ICCBR 2019. Lecture Notes in Computer Science*, Vol 11680. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-29249-2_4
7. Turner, J.T., Floyd, M.W., Gupta, K. and Oates, T. (2019), “NOD-CC: A Hybrid CBR-CNN Architecture for Novel Object Discovery”. In: *Bach K., Marling C. (eds) Case-Based Reasoning Research and Development. ICCBR 2019. Lecture Notes in Computer Science*, Vol 11680. pp. 373-387. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-29249-2_25
 8. Su, Y., Yang, S., Liu, K., Hua, K. and Yao, Q. (2019), “Developing A Case-Based Reasoning Model for Safety Accident Pre-Control and Decision Making in the Construction Industry”. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, Vol. 16, p. 1511. <https://doi.org/10.3390/ijerph16091511>
 9. Cheetham, W. and Watson, I. (2006), “Fielded applications of case-based reasoning”. *The Knowledge Engineering Review*, Vol. 20, No 3, pp. 321–323. Cambridge University Press doi:10.1017/S0269888906000580.
 10. Amin, K., Kapetanakis, S., Althoff, K.-D., Dengel, A. and Petridis, M. (2018), “Answering with cases: a CBR approach to deep learning”. In: *Cox, M.T., Funk, P., Begum, S. (eds.) ICCBR 2018. LNCS (LNAI)*, Vol. 11156, pp. 15–27. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-01081-2_2
 11. Kolodner, J. (1993), *Case-Based Reasoning*. San Mateo: Morgan Kaufmann.
 12. Kolodner, J. (2005), Retrieving events from ase memory: A parallel implementation. In: *Proceedings from the Case-based Reasoning Workshop, DARPA, Clearwater Beach*, pp. 233-249.
 13. Aamodt, A. (1994) “Explanation-driven case-based reasoning”. In: *Wess, S., Althoff, K.-D., Richter, M.M. (eds.) EWCBR 1993. LNCS*, Vol. 837, pp. 274–288. Springer, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/3-540-58330-0_93
 14. Manning, Ch. D., Raghavan, P. and Schütze H. (2008), *Introduction to Information Retrieval*. Cambridge University Press.
 15. Bugaeva, L., Beznosik, Yu., Statjukha, G. and Kvitka A. (1996) “An application of Expert System to choice, simulation and development of gases purification processes”. *Computers chem. Engng.*, 1996. Vol. 20, Suppl. pp. S401-S406. DOI: 10.1016/0098-1354(96)00077-4.
 16. Statjukha, G.O., Beznosyk, Y.O. and Bugaeva, L.M. (2004) *Intelligent decision-making systems in the research and design of chemical technological processes*. Kiev: Polytechnic.
-

УДК 51.76

САНГІНОВА О. В., к.т.н., доцент; КОЗЛОВ П. В., аспірант
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ ПЛАНУВАННЯ РОЗКРОЮ ПОЛОТНА НА ВИРОБНИЦТВІ КАРТОНУ ТА ПАПЕРУ

Формалізовано задачу оптимізації процесів планування розкрою на виробництві картону та паперу: запропоновано критерії оптимізації, складено цільову функцію та визначено математичні обмеження на змінні з урахуванням обмежень реального виробництва. Для вирішення задачі оптимізації був використан Симплекс метод разом з новим підходом до створення карт розкрою що дозволив отримати кращий план відповідно до обраних критеріїв. Проведені дослідження показали, що використання такого підходу до планування дозволяє збільшити прибуток виробництва за рахунок більш точного представлення замовлення та збалансованого використання супутньої продукції у розрахунках задачі розкрою.

Ключові слова: Поздовжньо-різальний верстат, Симплекс метод, розкрой полотна, мінімізація витрат матеріалу.

DOI: 10.20535/2617-9741.2.2021.235864

© Сангінова О. В., Козлов П. В., 2021.

Постановка проблеми. Підвищення ефективності виробництва є однією з основних задач управління для целюлозно-паперової промисловості. Досягнення її можливо за допомогою використання оптимізаційних моделей і методів, реалізованих в програмно-апаратних комплексах. Такі автоматизовані системи дозволяють на основі замовлень, отриманих від споживачів, скласти об'ємний календарний план роботи виробництва,

який враховує потреби в сировині, продуктивність виробництва паперово чи картоноробної машин і оптимальний розкрой полотна на поздовжньо-різальних верстатах (ПРВ).

Аналіз попередніх досліджень. Оптимізації процесів виробництва картону та паперу присвячено багато наукових робіт в Україні та закордоном. Початковим підходом до оптимізації виробництва була сформована ще у 1939 році Л. В. Контаровичем задача розкрою. Вона являє собою NP-повну задачу яка вирішується за допомогою лінійного програмування [1]. Розвиваючи цю тематику дослідники приділяли багато уваги оптимізації саме процесу розкрою полотна [2], [3] та [4]. Розробка математичних моделей планування розкрою та впровадження автоматизованих систем [5] доводять позитивний вплив на мінімізацію втрат обрізки що в свою чергу приводить до підвищення ефективності виробництва. Подальшим розвитком оптимізації процесів стає розглядання процесу розкрою у зв'язку з іншими процесами на виробництві [6]. Такими як зберігання готової продукції на складі та прогнозування попиту для виробництва більш затребуваної продукції. Також при розробці математичних моделей враховуються витрати не тільки обрізки матеріалу але й часу та роботи обладнання але не вартість зберігання готової продукції на складі. В подальшому [7] дослідники приділяють значну увагу розміру залишків готової продукції на складі виробництва та її використання у процесі планування розкрою нових замовлень [8]. Недоліком такого підходу є залежність до точного прогнозування майбутнього попиту на продукцію. Це притаманно більш сталим ринкам зубту де великі об'єми замовлень стандартного розміру дозволяють розрахувати рівень складських запасів наперед. Виробництва в Україні отримують замовлення різного формату та об'єму, що пов'язано з економічною ситуацією на ринку та великим різноманіттям подальшого використання готової продукції. Що в свою чергу приводить до необхідності оптимально планувати розкрой не тільки з урахуванням втрат обрізної кромки чи простою верстатів але й мінімізацією супутньої продукції поза заказом та її зберігання на складі.

Метою роботи є визначення критеріїв оптимізації процесу планування розкрою картону та паперу, формування цільової функції та обмежень з урахуванням технологічних властивостей виробництва, постановка та розв'язання задачі оптимізації. Для випробування вирішення задачі оптимізації вирішено спочатку використовувати пакет оптимізації SOLVER для MS OFFICE.

Виклад основного матеріалу. Об'єктом управління для автоматизованих систем є папероробне і картоноробне виробництво, що включають в себе робочі центри (паперово та картоноробні машини, поздовжньо-різальні верстати, верстати для різання листів і транспортно-пакувальні лінії). На даний момент найважливішою вимогою до оптимізації виробництва стає виконання замовлення в повному обсязі та в обумовленні контрактом строки. Попередні вимоги до масовості виробництва з мінімальними витратам часу на перенастроювання машин чи верстатів вже не можуть впливати на виконання замовлення.

Основними критеріями підвищення ефективності виробництва стають не лише мінімізація витрат при розкрої полотна але й час зберігання та тип готової продукції на складі.

Покращити мінімізацію обрізків, під час планування розкрою полотна для позаказного виробництва, дозволить методика рулонного планування, яка оперує кількістю замовленої продукції, а не вагою замовлення. Для цього потрібне перетворення тоннажу замовлення в одиниці готової продукції. Основною особливістю роботи за даною методикою є необхідність визначення середньої ваги рулону готової продукції опираючь на статистику попереднього виробництва, яка буде використовуватися як еталонна для перерахунку замовлення з тонн в кількість рулонів. Саме використання кількості рулонів як вхідних даних для алгоритмів оптимізації розкрою полотна дозволяють домогтися значній мінімізації обрізків та уникати перевиробництва готової продукції.

Мінімізація часу зберігання готової продукції на складі досягається за рахунок створення об'ємно-календарного плану що враховує ритмічність виробництва та дату відвантаження готової продукції. Найчастіше такий план є незбалансований та має велику кількість обрізків і не може бути взятий до виробництва. Звичайний підхід на виробництві пропонує штучне збільшення тонажу замовлення, а в більш складних випадка разом з додаванням рулонів (супутників) на які частіше є попит. У результаті таких дій план розкрою починає задовольняти мінімальним вимогам по обрізкам але вже містить більше рулонів ніж потребує контракт. Це в свою чергу приводить до переповнення складу готової продукції на яку не має покупця.

Розглянутий нижче варіант вирішення даної проблеми пропонує збалансований підхід до корегування планів розкрою між залученням вже наявної готової продукції на складі та додаванням супутників до плану розкрою на тривалому горизонті планування.

Формування цільової функції та постановка задачі оптимізації.

Враховуючи все вище наведене метою оптимізації є збільшення прибутку виробництва за рахунок мінімізації втрат при плануванні розкрою полотна та мінімізації виробництва та зберігання супутньої продукції.

Тоді цільова функція буде мати вид:

$$J = a_1 \cdot u_1 - a_2 \cdot u_2 + b_1 \cdot |u_1 - u_1^t| + c_2 \cdot y_2 + d_1 \cdot |y_1 - y_1^t| + d_2 \cdot |y_2 - y_2^t| \quad (1)$$

де:

a_1 - ціна одного рулона;

u_1 - кількість рулонів в замовленні;

a_2 - вартість часу простою верстата;

u_2 - кількість змін ножів;

u_1^t - кількість рулонів узятих у розкрой;

b_1 - вартість рулону вироблено поза замовленням;

d_1 - витрати від невиконання замовлення;

d_2 - вартість зберігання на складі;

c_2 -вартість рулонона супутника;

y_1 - виконання усього замовлення;

y_1^t - запланована кількість рулонів із замовлення;

y_2 - кількість супутників;

y_2^t - запланована кількість супутників

При розрахунку приймаються наступні допущення.

Вартість рулонів вироблених поза замовленням:

$$\begin{cases} b_1 = -a_1 \\ b_1 = -d_1 \end{cases} \quad (2)$$

Обмеження що накладаються на функцію:

$$\begin{aligned} u_1 - u^t &< 0 \\ u_1 - u^t &\geq 0 \end{aligned} \quad (3)$$

У разі якщо замовлення не виконане, то втрати буду складати вартість усього замовлення. В існуючому плануванні виробництва допускається що відхилення від замовлення не перевищує 10%. Таким чином можна сформулювати обмеження по частині виконання замовлення.

Відхилення в кількості виробленої позаказної продукції встановлюється менеджментом виробництва і знаходиться в діапазоні:

$$0,9 \leq u_i \leq 1,1 \quad (4)$$

У разі якщо замовлення виконано в повному обсязі, вироблені рулони не можуть бути використані як супутники.

Розв'язання задачі оптимізації. Вирішемо задачу оптимізації через мінімізування витрати розкрою та супутньої продукції за допомогою застосування Симплекс методу та обмежень які накладються у реальному виробництві.

З метою порівняння ефективності розглянемо результати розрахунків Симплекс методом та варіантів (карт розкрою) запропонованих планувальником виробництва та автоматизованою системою планування на одному з підприємств в Київській області. При моделюванні розкрою планувальником виробництва було обрано варіанти з першого по третій. Реальні замовлення виробництва представлені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Замовлення для розкрою, які використовувались у розрахунках

Замовлення №	Формат рулона (мм)	Вага замовлення (т)	Кількість рулонів у замовленні
1	1050	40	80
2	1250	60	101
3	1400	120	176
4	1510	30	42

Таблиця 2 – Варіант планування розкрою № 1

№ карти розкрою	Кількість зніманих рулонів з ПРВ	Шаблон розкрою				Обрізна кромка, мм
		1400	1400	1250	620	
1	5	1400	1400	1400		0
2	7	1400	1400	1250		150
3	6	1250	1250	1050	620	30
4	4	1510	1510	1050		130
5	1	1050	1050	1050	1050	0

Таблиця 3 – Порівняння плану на розкрою №1 та кількості замовленої продукції.

Формат рулона	Рулони у розкрою	Залишок рулонів у замолванні
1050	79	1
1250	101	0
1400	176	0
1510	42	0
Супутники		
620	50	

Висновок: розкрой вимагає 5 перестановок ножів і супутників, невиконання замовлення по ширині 1050.

Таблиця 4 – Варіант планування розкрою № 2

№ карти розкрою	Кількість зніманих рулонів з ПРВ	Шаблон розкрою				Обрізна кромка, мм
		1400	1400	1050	620	
1	5	1400	1400	1400		0
2	7	1400	1400	1250		150
3	6	1250	1250	1050	620	30
4	4	1510	1510	1050		130
5	1	1050	1050	1050	1050	0
6	10	1510	1510	620	530	30

Таблиця 5 – Порівняння плану на розкрою № 2 та кількості замовленої продукції.

Формат рулона	Рулони у розкрою	Залишок рулонів у замолванні
1050	80	0
1250	101	0
1400	176	0
1510	42	0
Супутники		
620	51	
530	1	

Висновок: розкрой вимагає шість змін ножів і супутників, замовлення виконані. Результат такого проведеного плану є перевиконання замовлень і переповнення складу.

Таблиця 6 – Варіант планування розкрою № 3

№ карти разкрою	Кількість знімань рулонів з ПРВ	Шаблон розкрою					Обрізна кромка, мм
1	5	1400	1400	1400			0
2	7	1400	1400	1250			150
3	6	1250	1250	530	530	620	20
4	4	1510	1510	620	530		30
5	1	1050	1050	1050	1050		0

Таблиця 7 – Порівняння плану на розкрою № 3 та кількості замовленої продукції

Формат рулона	Рулони у розкрою	Залишок рулонів у замовленні
1050	80	0
1250	101	0
1400	176	0
1510	42	0
Супутники		
620	71	
530	121	

Висновок: розкрой вимагає 5 перестановок ножів і супутників, замовлення виконані. Результат такого наведеного плану є перевиконання замовлень і заповнення складу

Таблиця 8 – Варіант планування розкрою № 4

№ карти разкрою	Кількість знімань рулонів з ПРВ	Шаблон розкрою				Обрізна кромка, мм
1	18	1050	1050	1050	1050	0
2	8	1050	1400	151		240
3	34	1400	1400	1400		0
4	33	1250	1400	1400		150
5	34	1250	1250	1510		190

Розкрой був отриманий з урахування обмежень виробництва та за допомогою програмного розширення SOLVER для пакета MS OFFICE. Дане розширення використовує симплекс метод для пошуку оптимального рішення.

Таблиця 9 – Порівняння плану на розк рою № 4 та кількості замовленої продукції

Формат рулона	Рулони у розкрою	Залишок рулонів у замовленні
1050	80	0
1250	101	0
1400	176	0
1510	42	0
Супутники		
620	0	
530	0	

Висновок: даний варіант розкрою вимагає 5 перстановок ножів, всі замовлення виконані.

Таблиця 10 – Варіант планування розкрою №5 – автоматична система розкрою полотна

№ карти розкрою	Кількість зніманих рулонів з ПРВ	Шаблон розкрою				Обрізна кромка, мм
1	35	1400	1400	1400		0
2	44	1510	1400	1250		40
3	27	1400	1250	1250		0
4	20	1050	1050	1050	1050	300

Таблиця 11 – Порівняння плану на розкрою №5 та кількості замовленої продукції

Формат рулона	Рулони у розкрою	Залишок рулонів у замовленні
1050	80	0
1250	98	3
1400	176	0
1510	44	-2

Висновок: даний варіант розкрою (рис. 1) вимагає 4 перстановок ножів, але замовлення на формат 1510 буде не виконаний повністю, а формат 1250 перевиконано і буде залишений на складі. У реальному житті такий варіант не буде прийнятий на виробництво, бо порушує відразу дві вимоги - виконання всього замовлення та часткове перевиробництво.

Отримані варіанти розкрою були піддані до цільової функції для порівняння їх ефективності, де J – очікуваний прибуток від виробленої готової продукції. Результати представлені в таблиці № 12.

Як видно, максимальне значення J приймає у варіанті обраним планувальником виробництва. Але при цьому порушується основна вимога щодо виконання замовлення тому не може бути використано для порівняння ефективності. Як бачимо з результуючої таблиці, оптимальним розкроєм для максимізації прибутку є варіант отриманий з використанням Симплекс методу.

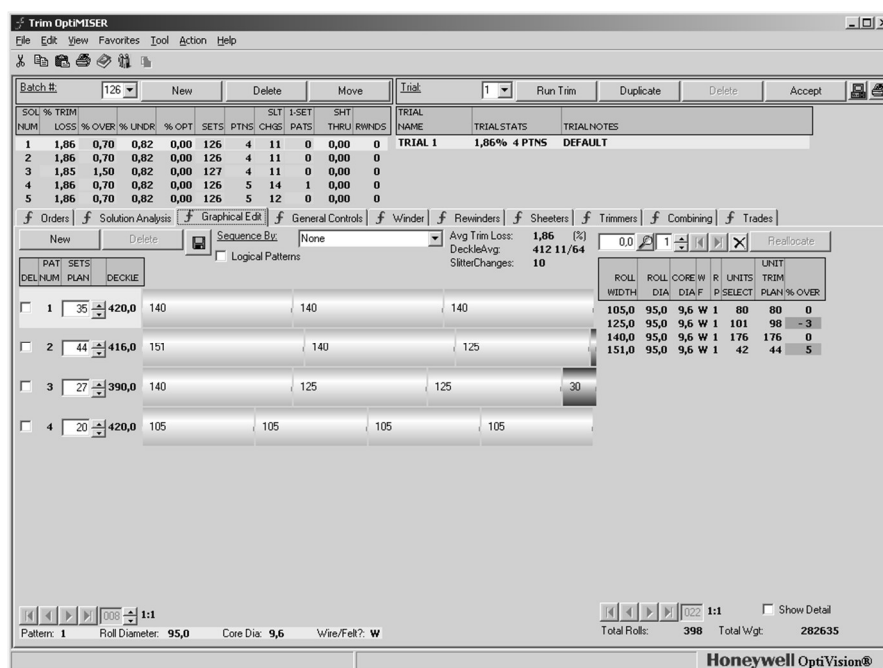


Рис. 1 – План розкрою виконаний автоматичною системою

Таблиця 12 – Порівняння карт розкрою за допомогою цільової функції.

Параметр цільової функції	Розкрой				
	№1	№2	№3	№4	№5
a_1	350	350	350	350	350
u_1	399	399	399	399	399
a_2	2400	2400	2400	2400	2400
u_2	5	6	5	5	5
b_1	-350	0	0	0	0
u_1^t	398	399	399	399	397
c_2	200	200	200	200	200
y_2	50	52	192	0	3
d_1	0	0	0	0	0
y_1	0	0	0	0	0
y_1^t	0	0	0	0	0
d_2	150	150	150	150	150
y_2^t	0	0	0	0	0

Вартість виробленої продукції	129800	127850	137250	127650	130200
-------------------------------	--------	--------	--------	--------	--------

Висновки. Проаналізовано розкрой полотна. Виявлено, що використання супутників зменшує прибутковість підприємства. Формалізовано задачу оптимального розкрою полотна. Розглянуто карти планування розкрою діючі на виробництві (ручні та автоматичні) та запропоновані автором на основі методики оптимального розкрою з використанням пакета SOLVER.

Перспективи подальших досліджень. Розробка програмного модуля на біза Симплекс метода для вирішення задачі оптимізації з урахуванням реальних обмежень виробництва.

Список використаної літератури

1. P. C. Gilmore and R. E. Gomory, A linear programming approach to the cutting-stock problem // Operations Research, vol. 9, no. 6, pp. 849–859, 1961.
2. Razauallah, S. Rehman, I. Hussain. Trim Loss Minimization and Reel Cutting at Paper Mill // International Journal of Engineering Research and Development. 2012. Vol 4, iss 3. P. 13-22.
3. S.C. Poltroniere, S.A. Araujo and K.C. Poldi. Optimization of an Integrated Lot Sizing and Cutting Stock Problem in the Paper Industry // Tendencias em Matematica Aplicada e Computacional. 2016. N. 3. P. 305-320.
4. Sônia Cristina Poltroniere, Kelly Cristina Poldi, Franklina Maria Bragion Toledo & Marcos Nereu Arenales. A coupling cutting stock-lot sizing problem in the paper industry // Annals of Operations Research. 2008. Vol. 157, pp 91-104.
5. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0305054803000765>
6. J. Erjavec, M. Gradišar, and P. Trkman, Renovation of the cutting stock process, International Journal of Production Research, vol. 47, no. 14, pp. 3979–3996, 2009.
7. Erjavec, M. Gradišar, and P. Trkman. Assessment of stock size to minimize cutting stock production costs // International Journal of Production Economics. 2012. vol. 135, no. 1, pp. 170–176.
8. Fu-Kwun Wang and Feng-Tai Liu. A new decision model for reducing trim loss and inventory in paper industry // Journal of Applied Mathematics. Vol. 2014, P. 215-226.

Надійшла до редакції 01.03.2021

Sanginova O. V., Kozlov P. V.

OPTIMIZATION OF THE CUTTING PLANNING PROCESS IN CARDBOARD AND PAPER PRODUCTION

Improving the production efficiency is one of the main management tasks for the pulp and paper industry.

This can be achieved through the use of automated planning systems, designed to take into account the features and limitations of particular production. Such systems allow, on the basis of orders received from consumers, a voluminous production schedule to be made to take into account the needs for raw materials, the productivity of paper or cardboard machines, and the optimal cutting of the canvas on longitudinal cutting machines.

Linear programming method for solving optimization problems. Computer simulation using optimized packages to compare the results with the options used in production.

Cutting planning processes were optimized on the basis of standard orders for rolled products of an enterprise in the Kyiv region. The problem of optimizing the cutting planning process and criteria for increasing the production efficiency is formalized. The target function is to increase the profit of production by minimizing material losses in planning the cutting of the master rill and minimizing the storage of related products in production warehouses. To solve the optimization problem, it is proposed to use our own method of calculating the optimal cutting patterns for the manufacture of finished products on a longitudinal cutting machine.

The MS Office SOLVER package was used for the calculations.

Different cutting options were compared via the target function. Important criteria for this inspection are the fulfillment of the entire order, the availability and storage of related products outside the order, and the minimization of time for the reconfiguration of machines. Longitudinal cutting machines of this production can be adjusted only

manually, and it takes a long time. Also, technological restrictions on the allowable width of the edge are an important requirement for cutting patterns. All patterns that do not meet these restrictions cannot be compared.

There are three options for comparison. An option is made according to the proposed method and with an optimization package using the Simplex method and a number of technological limitations inherent in this production. An option is selected by the production planner manually taking into account previous experience. And the variant of cutting orders is made by the production management system, which accompanies the process of planning and transfer of tasks for longitudinal cutting machines. The function takes the maximum value in the option offered by the production scheduler. But this option is not optimal, because a person adds rolls to the satellite to improve the cutting map to fulfill all orders. This in turn leads to overfulfillment of orders and production of additional products in a warehouse where they can be stored for years until the expiration date. The option offered by the automotive system does not require the use of accompanying rolls but unfortunately does not meet the requirements for optimal cutting of the material. Automatic cutting leaves a large edge that is already within the maximum allowable limitations of the machines and, moreover, does not lead to the execution of the entire order. This violates the basic requirement for production such as full execution of the order. Therefore, this option cannot be used either. The optimal cut for profit maximization is the option obtained using the roll planning technique. This technique allows the average weight of the roll to be obtained through the use of production history. The estimated weight is used to convert the order from tons to the number of pieces. Cutting patterns for the production of the order in this way are presented and, taking into account the technological limitations of production, can be calculated on the basis of the Simplex method in optimization packages. Such cutting patterns have no satellites and allow the fulfilment of all orders.

The roll planning technique reduces the number of clippings and avoids overproduction. The analysed cutting plans show that the use of satellites reduces the profitability of the enterprise and does not always minimize material costs.

Keywords: Simplex method, cutting plan, minimization of material costs.

References

1. Gilmore P. C. and Gomory R. E. (1961), "A linear programming approach to the cutting-stock problem", *Operations Research*, vol. 9, no. 6, pp. 849–859, 1961.
2. Razaullah, S. Rehman, I.Hussain (2012), "Trim Loss Minimization and Reel Cutting at Paper Mill", *International Journal of Engineering Research and Development*, Vol 4, iss 3. P. 13-22.
3. Poltroniere S.C., Araujo S.A. and Poldi K.C. (2016), "Optimization of an Integrated Lot Sizing and Cutting Stock Problem in the Paper Industry", *Tendencias em Matematica Aplicada e Computacional*, N. 3. P. 305-320.
4. Poltroniere S.C., Poldi K. C., Toledo F. M. B and Arenales M. N. (2008), "A coupling cutting stock-lot sizing problem in the paper industry", *Annals of Operations Research*, Vol. 157, pp 91-104.
5. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0305054803000765>
6. Erjavec J., Gradišar M. and Trkman P. (2009), "Renovation of the cutting stock process", *International Journal of Production Research*, vol. 47, no. 14, pp. 3979–3996.
7. Erjavec J., Gradišar M. and Trkman P. (2012), "Assessment of stock size to minimize cutting stock production costs", *International Journal of Production Economics*, Vol. 135, no. 1, pp. 170–176.
8. Wang F. and Liu F. (2014), "A new decision model for reducing trim loss and inventory in paper industry", *Journal of Applied Mathematics*, Vol. 2014, P. 215-226.