

Сеник Юрій Ігорович,
кандидат біологічних наук, докторант,
старший викладач кафедри екології та
охорони здоров'я Західноукраїнського
національного університету.
Начальник фізико-хімічної лабораторії
ПРАТ "Тернопільський молокозавод"

Senyk Yurii,
PhD in Biological, Doctoral Student,
Senior Lecturer, the West Ukrainian National
University. Head of the Physical and Chemical
Laboratory PJSC "Ternopil Milk Factory",
<https://orcid.org/0000-0002-8164-7783>

ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМИ КАНБАН ЯК ЕФЕКТИВНОГО ІНСТРУМЕНТУ ОРГАНІЗАЦІЇ ТРАНСПОРТУВАННЯ МОЛОЧНОЇ СИРОВИНИ USING THE KANBAN SYSTEM AS AN EFFECTIVE TOOL FOR ORGANIZING THE TRANSPORTATION OF DAIRY RAW MATERIALS

Сеник Ю. І. Використання системи канбан як
ефективного інструменту організації
транспортування молочної сировини.
*Український журнал прикладної економіки та
техніки*. 2023. Том 8. № 4. С. 38 – 43.

Senyk Y. Using the kanban system as an
effective tool for organizing the transportation
of dairy raw materials. *Ukrainian Journal of
Applied Economics and Technology*.
2023. Volume 8. № 4, pp. 38 – 43.

В роботі розглянуто підходи до забезпечення необхідною кількістю сировини чи напівфабрикатів підприємства. Проаналізовано загальну схему циклу транспортування молочної сировини. Згідно з одним підходом систему постачання сировини можна представити через три константи, на основі яких можна встановити ряд їх співвідношень, які дозволять краще описати систему постачання. Наголошено, що загальна тривалість циклу для кожного постачальника є індивідуальною і залежить від показника попиту та об'єму партії продукту чи сировини. Тим не менш, різний час циклу для кожного продукту чи постачальника сировини не дозволяє їх консолідувати для побудови стабільного маршруту доставки, що важливо для досягнення необхідної частоти доставки з максимальним завантаженням транспортного засобу. Проаналізовано необхідність застосування «дошки хейдзунка» для організації ефективної роботи маршрутів транспортування молочної сировини працівниками підприємства. Такий інструмент дозволяє візуалізувати маршрут транспортування молочної сировини та забезпечити його чіткий контроль. Для цього використовується дошка хейдзунка та карти канбан постачальників, які формують графічне зображення транспортних маршрутів у відповідний часовий проміжок. Виокремлено напрями політики визначення частоти транспортування сировини чи напівфабрикатів. Доведено, що оптимальна політика замовлення повинна задовольняти властивість нульового замовлення, а час між замовленнями можна розрахувати, виходячи з кількості залишків на складі та швидкості їх використання, яка відповідатиме показнику попиту d і досягне нуля через f замовлень. Система канбан дозволяє отримати оптимальні результати у поєднанні з методом хейдзунка, який дозволяє максимально збалансувати час доставки сировини чи продукції. Розглянуто декілька моделей для аналізу системи хейдзунка, спільною особливістю цих методів є пошук оптимального розміру буферного складу для забезпечення максимальної ефективності виробничих потужностей з мінімізацією втрат. Загальна кількість канбанів для системи є вирішальною, бо саме цей показник визначає ефективність їхньої адаптації до зміни виробничих умов.
Ключові слова: канбан, система, метод хейдзунка, мінімізація втрат, замовлення.

The paper considers approaches to providing the enterprise with the required raw materials or semi-finished products. The general scheme of the milk raw material transportation cycle was analyzed. According to one approach, the supply system of raw materials can be represented by three constants, based on which several of their relations can be established, allowing us to describe the supply system much better. It is emphasized that the total duration of the cycle for each supplier is individual and depends on the demand indicator and the volume of the batch of the product or raw material. However, each product or raw material supplier's different cycle times do not allow them to be consolidated to build a stable delivery route. It is essential to achieve the required delivery frequency with maximum vehicle loading. The need to use the "heijunka board" to organize the efficient operation of routes for the transportation of dairy raw materials by the enterprise's employees was analyzed. Such a tool allows one to visualize dairy raw materials' transportation routes and ensure explicit control. For this, a heijunka board and supplier kanban cards are used, which form a graphic representation of transport routes in the corresponding time interval. Policy directions for determining the frequency of transportation of raw materials or semi-finished products are highlighted. It is proved that the optimal order policy must satisfy the zero-order property, and the time between orders can be calculated based on the amount of stock in the warehouse and the speed of their use, which will correspond to the demand indicator d and will reach zero after f orders. The kanban system allows optimal results in combination with the heijunka method, which balances the delivery time of raw materials or products as much as possible. Several models for the analysis of the heijunka system are considered. The common feature of these methods is the search for the optimal size of the buffer stock to ensure the maximum efficiency of production facilities while minimizing losses. The total number of kanbans for the system is decisive because this indicator determines the effectiveness of their adaptation to changes in production conditions.

Keywords: kanban, system, heijunka method, loss minimization, order.

Вступ

Грунтуючись на загальному огляді системи ощадливого виробництва можна стверджувати, що найефективнішим інструментом для організації щоденного транспортування молочної

© Сеник Юрій Ігорович, 2023

ISSN 2415-8453. Український журнал прикладної економіки та техніки. 2023 рік. Том 8. № 3.

сировини є канбан [1, 2]. Зазвичай виділяють два підходи до забезпечення необхідною кількістю сировини чи напівфабрикатів підприємство:

- постачання стабільної кількості сировини чи напівфабрикатів за виробничої необхідності, тобто, у різний час;
- постачання стабільної кількості сировини чи напівфабрикатів у визначений час, тобто, згідно із заздалегідь затвердженим циклом.

Систему канбан можна представити як закриту децентралізовану систему з можливістю до саморегуляції, саме остання особливість забезпечує її ефективність, але потребує найбільших зусиль для реалізації. З огляду на це загальна кількість канбанів для системи є вирішальною, бо саме цей показник визначає ефективність їхньої адаптації до зміни виробничих умов [3].

Аналіз останніх досліджень та публікацій системи JIT та Канбан є об'єктами дослідження багатьох зарубіжних та вітчизняних учених. За останній час дослідження цієї галузі дуже еволюціонували. Системи JIT та Канбан стають інновацією на рівні підприємства та поєднують ніздрювате виробництво, гнучке виробництво, комп'ютеризоване виробництво та роботизацію. Області впровадження систем JIT та Канбан розширилися від виробничого процесу до всієї системи поставок і розглядалися з погляду аналітичного підходу та імітаційного моделювання. Однак пошук оптимального співвідношення параметрів утруднюється різними потребами в ресурсах, різною тривалістю виконання замовлень, наявністю великого найменування кінцевого продукту.

Формулювання цілей статті

Аналіз застосування системи канбан як найефективнішого інструменту для організації щоденного транспортування молочної сировини.

Виклад основного матеріалу дослідження

У своїй роботі Y. Monden [2] запропонував математичне вираження постійного циклу, який є еквівалентом системи канбан постачальника. Згідно з цим підходом систему постачання сировини можна представити через три константи:

a – кількість днів в циклі;

b – кількість поставок в циклі;

c – кількість циклів, які необхідно пропустити для наступної доставки.



Рис. 1 Загальна схема циклу транспортування молочної сировини

Джерело: розроблено автором

Для прикладу, молокопереробне підприємство має два постачальника А і Б, сировина від яких поступає, відповідно, двічі на день та один раз на три дні. Таким чином, для постачальника А цикл доставки можна виразити таким набором констант: $a = 1$, $b = 2$, $c = 1$, для постачальника Б - $a = 1$, $b = 1$, $c = 3$.

На основі введених констант можна встановити ряд їх співвідношень, які дозволять краще описати систему постачання. Першим важливим показником є «час циклу» (K), $K = a/b$, який виражає затрату часу на виконання всього циклу робіт (рис. 1). Другим таким співвідношенням є «час виконання» (L), який включає в себе такі етапи: отримання і виконання замовлення, завантаження і транспортування замовлення. Якщо постачальник працює згідно з системою канбан, то L може скоротитися до часу транспортування і не обов'язково є кратним співвідношенням a/b , у цьому випадку значення c визначається як результат L/K . Виходячи з цього, можна математично виразити час виконання канбану:

$$K + L = \frac{a}{b} + \frac{a \cdot c}{b} \quad (1)$$

Якщо ввести декілька додаткових параметрів:

d – середнє значення попиту на сировину чи деталь;

S – показник страхової безпеки, який розраховується через невизначеність попиту та процесу транспортування;

M – об'єм автотранспорту.

до формули (1), то можна вивести так звану, «формулу Тойоти», яка дозволяє визначити оптимальну кількість систем канбан (N):

$$N = \frac{d \cdot (K+L)}{M} + \frac{S}{M} = \left\lceil \frac{a \cdot (c+1)}{b \cdot M} + \frac{S}{M} \right\rceil \quad (2)$$

З формули (2) можна зробити висновок що, загальна тривалість циклу для кожного постачальника є індивідуальною і залежить від показника попиту та об'єму партії продукту чи сировини. Тим не менш, різний час циклу для кожного продукту чи постачальника сировини не дозволяє їх консолідувати для побудови стабільного маршруту доставки, що важливо для досягнення необхідної частоти доставки з максимальним завантаженням транспортного засобу. Для реалізації цього підходу в компанії «Toyota» частота доставок кратна 2 (2, 4, 6, 8, 10, 12) і чітко визначена для кожного товару [2]. Кооперація двох чи більше географічно близьких постачальників з однаковою частотою транспортування в один маршрут автоматизовані називається єдина частотна маршрутизація («Common Frequency Routing (CFR)») [4], якщо ж поєднується в один логістичний маршрут два постачальники з різною частотою транспортування, то такий підхід називається загальна частотна маршрутизація («General Frequency Routing (GFR)») [5]. Застосування принципу GFR дозволяє компанії будувати гнучкі логістичні маршрути, тим не менш, вона є складнішою в її організації та оперативному управлінні.

Для організації ефективної роботи маршрутів транспортування молочної сировини працівники підприємства повинні застосовувати так звану «дошку хейдзунка» («heijunka board»), яка забезпечує вимоги ощадливого виробництва до цього процесу [5]. Такий інструмент дозволяє візуалізувати маршрут транспортування молочної сировини та забезпечити його чіткий контроль. Для цього використовується дошка хейдзунка та карти канбан постачальників, які формують графічне зображення транспортних маршрутів у відповідний часовий проміжок [6].

Припустимо, підприємство має 20 постачальників і необхідно сформулювати маршрути доставки сировини, враховуючи періодичність продажу молока, ефективність побудови маршруту та необхідність молока-незбираного для виробничого процесу для виконання заявки та мінімізації втрат, для цього працівники підприємства будують дошку хейдзунка (рис. 2). На рисунку «heijunka board» зображена у вигляді графіка, де на вісі абсциса повинно бути вказано час виїзду автомолцистерни, а на вісі ордината – послідовність постачальників молочної сировини на маршруті водія. Тим не менш, такий підхід до організації постачання сировини не може гарантувати ідеальне виконання розробленого маршруту впродовж певного часу, що пов'язано з незапланованими змінами часу прибуття автомобіля до постачальника, часу перекачування молока у секцію автомолцистерни, трафік на дорозі тощо. Це суперечить

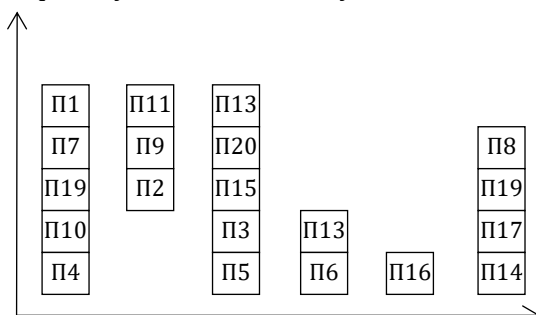


Рис. 2. Приклад дошки хейдзунка для побудови маршрутів

Джерело: розроблено автором

принципам Lean та може зумовити простий виробничого обладнання, надлишкові запаси сировини чи невиконання замовлення [4, 5]. Додатковою особливістю збоїв в логістичних маршрутах транспортування молочної сировини є пікові навантаження на лабораторію приймання сировини, що може зумовити отримання хибних результатів дослідження, а також додаткових простоїв транспортних засобів. Для мінімізації негативного впливу збоїв в графіку постачання молока необхідно рівномірно розподілити усі маршрути впродовж робочого дня молокопереробного підприємства.

На сьогоднішній день виділяють два напрями політики визначення частоти транспортування сировини чи напівфабрикатів [7]:

1. напрям, що ґрунтується на принципі «штовхай» («Push based policies»);
2. напрям, що ґрунтується на принципі «витягування» («Pull based order policies»).

1. *Напряму, що ґрунтується на принципі «штовхай» («Push based policies»).* Відомо [8], що першу економічну модель розміру партії було запропоновано F.W. Harris ще у 1913 році. Вона передбачала, що рівень споживання товару знаходиться на константному рівні попиту d за одиницю часу; час виконання замовлення дорівнює 0; розмір партії для кожного замовлення є стабільним і становить q ; початковий запас товару дорівнює 0, а процес планування замовлень не має обмежень; вартість виготовлення кожної партії товару чи ціна сировини стабільна і становить c^0 , вона також включає транспортні витрати; зберігання товару чи сировини на складі передбачає лінійне нарахування вартості c^h за одиницю часу. Виходячи з цих припущень можна вивести формулу для розрахунку економічного розміру партії продукції («economic order quantity (EOQ)»), яка забезпечить мінімізацію витрат на її транспортування та зберігання на складі:

$$EOQ = \sqrt{\frac{2 \cdot c^0 \cdot d}{c^h}} \quad (3)$$

Таким чином, для ідеальної системи виробництва значення «EOQ» забезпечує «пилкоподібну» схему формування запасів, які вичерпуються саме в той момент, коли прибуває нова партія продукції. Для розрахунку часу формування замовлення, тобто розрахунку інтервалу замовлень, необхідно скористатися формулою: EOQ/d [9]. Описаний вище підхід до організації логістичних маршрутів з оцінкою розміру партії згідно з формулою (3) на практиці вперше було використано для компанії «General Motors» [10,11], щоб оптимізувати стратегію виробничого процесу та реалізації власної продукції.

Із аналізу чутливості до змін цієї системи [7] відомо, що фінансові витрати на створення, підбір оптимального значення EOQ або його зміни відповідно до перебудови технологічного процесу не залежать від загального об'єму партії або інтервалів EOQ/d . На основі отриманих даних розроблено концепцію «кратності двом» («power-of-two»), що обмежує інтервал t відносно базового періоду t^b згідно з формулою (4):

$$t = t^b \cdot 2^k, k \in \{1, 2, 3 \dots\} \quad (4)$$

У своїх дослідженнях W. Norr і M. Spearman [12], а пізніше D. Simchi-Levi зі співавторами [9] показали, що ефективність концепції «кратності двом» полягає у консолідації замовлень для кращого використання автотранспорту, а збільшення запасів і витрат на їх зберігання буде не вище 6% від вартості оптимального значення EOQ.

Після впровадження на підприємстві концепції «кратності двом» необхідно розглянути зміну ситуації щодо замовлення і постачання на підприємстві впродовж горизонту планування $[0, T]$. Якщо розглянути графік «рівень запасів як функція часу відповідно до політики P» (рис. 3), то можна зробити висновок, що оптимальна політика замовлення повинна задовольняти властивість нульового замовлення, а час між замовленнями можна розрахувати, виходячи з кількості залишків на складі та швидкості їх використання, яка відповідатиме показнику попиту d і досягне нуля через f замовлень.

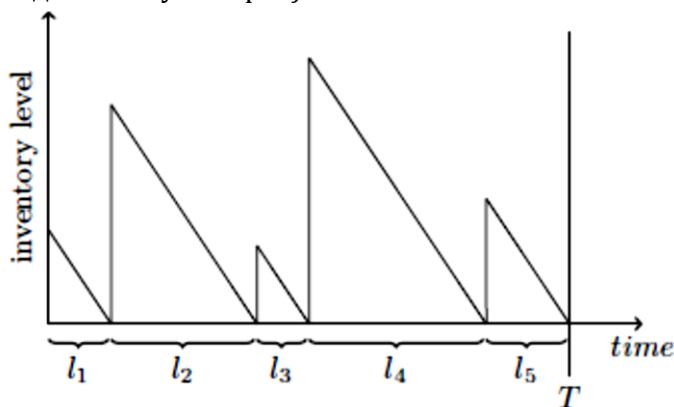


Рис. 3 Рівень запасів як функція часу відповідно до політики P. Джерело: [9]

У своїй праці Anne Meyer [13] припустила, що $l_i > 0$ при цьому $i \in \{1 \dots f\}$ і є вираженням часу між двома відправленнями, а їх сума $\sum_{i=1}^f l_i = T$ виражатиме загальний час горизонту. На основі отриманого графічного зображення на рис. 3 можна розрахувати рівень запасів (I), виходячи з площі отриманих трикутників:

$$I = \frac{l_i \cdot l_i \cdot d}{2} \quad (5)$$

Оптимальний час для формування замовлення можна розрахувати, виходячи з рівняння (6):

$$\min\{\sum_{i=1}^f l_i^2 \mid \sum_{i=1}^f l_i = T, i \in \{1 \dots f\}\} \quad (6)$$

Таким чином, оптимальним вирішенням цієї задачі є $l = \frac{T}{f}$, що

забезпечує впровадження політики мінімальних витрат на транспортування і зберігання, яка досягається здійсненням замовлень кожен $\frac{T}{f}$ період необхідного об'єму ($\frac{T}{f} \cdot d$), а загальна вартість цієї політики становитиме:

$$c^0 \cdot f + c^h \sum_{i=1}^f \frac{l_i \cdot l_i \cdot d}{2} = c^0 \cdot f + c^h \frac{d \cdot T^2}{2 \cdot f} \quad (7)$$

У моделі дискретності часу та обмеженості горизонту планування для знаходження періодів і кількості замовлення необхідно вирішити те ж квадратичне рівняння, як (7) з тією різницею - l_i повинно бути цілим числом в інтервалі від 1 до T . Оскільки властивість нульового інвентаризації також має бути виконана, достатньо визначити або час між надходженням, або розміри замовлення.

Можна здійснити розрахунок окремих параметрів для оптимізації процесу доставки відповідно до EOQ з дискретним часом та кінцевим горизонтом замовлень, враховуючи лише запаси на території складу підприємства. Так, мінімальний рівень запасів для частоти замовлень f дорівнюватиме, виходячи з кількості замовлень $r = f \cdot \left\lfloor \frac{T}{f} \right\rfloor$ розміру $d \cdot \left\lfloor \frac{T}{f} \right\rfloor$ і $f - r$ замовлень розміру $d \cdot \left\lceil \frac{T}{f} \right\rceil$. Виходячи з цього, розміри замовлення та час між прибуттям наступної партії сировини чи товару максимально матимуть два значення [14].

Таким чином, у системі з дискретністю часу фінансові затрати на транспортування пов'язані з оптимальним графіком замовлення P і можуть бути розраховані згідно з наступною формулою:

$$c^0 \cdot f + c^h \frac{d}{2} \left(r \cdot \left\lfloor \frac{T}{f} \right\rfloor + (f - r) \cdot \left\lceil \frac{T}{f} \right\rceil \right) \quad (8)$$

Формула (8) відповідає ідеальним умовам планування транспортування, якщо ж ввести обмежене значення процесу планування замовлень T та використання продукту, то можна розрахувати оптимальне значення кількості замовлень f стабільного об'єму впродовж визначеного часу. При цьому показник f залежатиме від економічного ефекту розрахунку значення цілої частини дійсного числа α , тобто $\lfloor \alpha \rfloor$ і $\lceil \alpha \rceil$:

$$\alpha = T \cdot \sqrt{\frac{c^h \cdot d}{2 \cdot c^0}} \quad (9)$$

Як зазначалося вище, значення EOQ є результатом припущення, що попит на продукти є стабільним впродовж всього проміжку часу. У своєму дослідженні А. Kovalev і С. Ng [15] показали математичний підхід до розрахунку цього показника з точки зору дискретності часу виробництва ($\log n$) та загальної кількості продукції, при цьому попит виникає зі стабільною швидкістю (λ). Для розв'язку поставленого завдання автори перейшли до дискретної мінімізації однієї змінної, яка представляє число порядків у рівнянні, при цьому, оптимальний розмір замовлення може набувати двох значень - $\lambda \lfloor \frac{n}{k} \rfloor$ і $\lambda \lceil \frac{n}{k} \rceil$.

2. *Напрямок, що ґрунтується на принципі «втягування» («Pull based order policies»).* Для розрахунку основних параметрів для побудови дієвого канбан, а саме - a , b , c і M , необхідно скористатися формулою 11, при цьому можна знехтувати показником S . Ці параметри дозволять через апроксимацію розрахунків (модель імітаційного моделювання, математична програмна модель та модель ланцюга Маркова [16]) оцінити час циклу або інтервал замовлення та розмір канбану, що забезпечить мінімізація запасів, максимізація пропускну здатності виробництва та мінімізація експлуатаційних витрат.

Підхід «канбан» відрізняється від класичного підходу з розрахунком показника EOQ. У своїй роботі S. Miyazaki зі співавторами [17] показали на основі математичної моделі відмінність цих підходів, яка, окрім припущення щодо дискретності змінних, передбачала інше графічне вираження функції загальних затрат, яка для класичного підходу носитиме випуклу форму.

Система канбан дозволяє отримати оптимальні результати у поєднанні з методом хейдзунка, який дозволяє максимально збалансувати час доставки сировини чи продукції [3]. Аналіз даних показав, що існує декілька моделей для аналізу системи хейдзунка:

1. Математичний підхід розрахунку допустимого запасу продукції чи сировини на буферному складі [18];

2. Стохастична модель, запропонована K. Furmans і M. Veit [6], яка передбачала введення окремих змінних та забезпечувала точніший розрахунок порівняно із середніми значеннями параметрів системи, що дозволяло побудувати не лише ефективну, а й дієву систему хейдзунка;

3. Модель розрахунку оптимального розміру буферного складу, враховуючи зміну виробничих канбанів [16].

Спільною особливістю цих методів є пошук оптимального розміру буферного складу для забезпечення максимальної ефективності виробничих потужностей з мінімізацією втрат.

Висновки та перспективи подальших розвідок

Ґрунтуючись на загальному огляді системи ощадливого виробництва, можна стверджувати, що найефективнішим інструментом для організації щоденного транспортування молочної сировини є канбан. Це закрита децентралізована система з можливістю до саморегуляції, саме остання особливість забезпечує її ефективність, але потребує найбільших зусиль для реалізації. З огляду на це загальна кількість канбанів для системи є вирішальною, бо саме цей показник визначає ефективність їхньої адаптації до зміни виробничих умов.

Література

1. Bicheno J., Holweg M. The lean toolbox: The essential guide to lean transformation. Production and Inventory Control, Systems and Industrial Engineering (PICSIE). 2008. 308 p.
2. Monden Y. Toyota production system: An integrated approach to just-in-time, 4th edition. Cambridge, Mass: Masschuttes: Productivity Press. 2012. 521 p.
3. Kotani S. Optimal method for changing the number of kanbans in the e-kanban system and its applications. *International Journal of Production Research*. 2007. Vol. 45(24). P. 5789-5809.
4. Chuah K., Yingling J. Routing for a just-in-time supply pickup and delivery system. *Transportation Science*. 2005. Vol. 39(3). P. 328-339.

5. Ohlmann J., Frey M., Barrett T. Route design for lean production systems. *Transportation Science*. 2008. Vol. 42(3). P. 352-370.
6. Furmans K., Veit M. Models of leveling for lean manufacturing systems. In Handbook of Stochastic Models and Analysis of Manufacturing System Operations. *ISOR*. 2013. Vol. 192. P. 115-138.
7. Heckmann I. Towards Supply Chain Risk Analytics-Fundamentals, Simulation, Optimization. Karlsruhe Institut für Technologie: Springer Gabler. 436 p.
8. Harris F.W. How many parts to make at once. *Operations Research*. 1990. Vol. 38(6). P. 947-950.
9. Simchi-Levi D., Chen X., Bramel J. Economic lot size models with constant demands. *The Logic of Logistics. Springer Series in Operations Research and Financial Engineering*. 2014. P. 137-150.
10. Blumenfeld D.E., Burns L.D., Daganzo C.F., Frick M.C. Reducing logistics costs at general motors. *Interfaces*. 1987. Vol. 17(1). P. 26-47.
11. Blumenfeld D.E., Burns L.D., Diltz J.D., Daganzo C.F. Analyzing trade-offs between transportation, inventory and production costs on freight networks. *Transportation Research Part B: Methodological*. 1985. Vol. 19(5). P. 361-380.
12. Hopp W., Spearman M. Factory Physics: Foundations of Manufacturing Management. *Volume Second Edition, Chapter Inventory Control*. 2001. № 1(3). P. 48-108.
13. Meyer A. Milk run Design. Definitions, Concepts and Solution approaches. Dissertation, Karlsruhe institut für technologie (Kit). 2015. 257 p.
14. Fleischmann B. Transport and inventory planning with discrete shipment times. *In New Trends in Distribution Logistics*. 1999. Vol. 480. P. 159-178.
15. Kovalev A., Ng C. A discrete eq problem is solvable in $O(\log n)$ time. *European Journal of Operational Research*. 2008. Vol. 189(3). P. 914-919.
16. Matzka J., Di Mascolo M., Furmans K. Buffer sizing of a heijunka kanban system. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2012. Vol. 23(1). P. 49-60.
17. Miyazaki S., Ohta H., Nishiyama N. The optimal operation planning of kanban to minimize the total operation cost. *The International Journal Of Production Research*. 1988. Vol. 26(10). P. 1605-1611.
18. Lippolt C.R., Furmans K. Sizing of Heijunka-controlled production systems with unreliable production processes. *IFIP International Federation for Information Processing*. 2008. Vol. 257. P. 11-19. URL: https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-0-387-77249-3_2.pdf.

References

1. Bicheno, J., Holweg, M. (2008). The lean toolbox: The essential guide to lean transformation. Production and Inventory Control, Systems and Industrial Engineering (PICSIE).
2. Monden, Y. (2012). Toyota production system: An integrated approach to just-in-time, 4th edition. Productivity Press. Cambridge. Massschuttes.
3. Kotani, S. (2007). «Optimal method for changing the number of kanbans in the e-kanban system and its applications». *International Journal of Production Research*. Vol. 45(24). pp. 5789-5809.
4. Chuah, K., Yingling, J. (2005). «Routing for a just-in-time supply pickup and delivery system». *Transportation Science*. Vol. 39(3). pp. 328-339.
5. Ohlmann, J., Frey, M., Barrett, T. (2008). «Route design for lean production systems». *Transportation Science*. Vol. 42(3). pp. 352-370.
6. Furmans, K., Veit, M. (2013). «Models of leveling for lean manufacturing systems. In Handbook of Stochastic Models and Analysis of Manufacturing System Operations». *ISOR*. Vol. 192. pp. 115-138.
7. Heckmann, I. Towards Supply Chain Risk Analytics-Fundamentals, Simulation, Optimization. Karlsruhe Institut für Technologie. Springer Gabler. Germany.
8. Harris, F.W. (1990). How many parts to make at once. *Operations Research*. Vol. 38(6). pp. 947-950.
9. Simchi-Levi, D., Chen, X., Bramel, J. (2014). «Economic lot size models with constant demands». *The Logic of Logistics. Springer Series in Operations Research and Financial Engineering*. pp. 137-150.
10. Blumenfeld, D.E., Burns, L.D., Daganzo, C.F., Frick, M.C. (1987). «Reducing logistics costs at general motors». *Interfaces*. Vol. 17(1). pp. 26-47.
11. Blumenfeld, D.E., Burns, L.D., Diltz, J.D., Daganzo, C.F. (1985). Analyzing trade-offs between transportation, inventory and production costs on freight networks. *Transportation Research Part B: Methodological*. Vol. 19(5). pp. 361-380.
12. Hopp, W., Spearman, M. (2001). «Factory Physics: Foundations of Manufacturing Management». *Volume Second Edition, Chapter Inventory Control*. № 1(3). pp. 48-108.
13. Meyer, A. (2015). Milk run Design. Definitions, Concepts and Solution approaches. Dissertation, Karlsruhe institut für technologie (Kit).
14. Fleischmann, B. (1999). Transport and inventory planning with discrete shipment times. *In New Trends in Distribution Logistics*. Vol. 480. pp. 159-178.
15. Kovalev, A., Ng, C. (2008). «A discrete eq problem is solvable in $O(\log n)$ time». *European Journal of Operational Research*. Vol. 189(3). pp. 914-919.
16. Matzka, J., Di Mascolo, M., Furmans, K. (2012). «Buffer sizing of a heijunka kanban system». *Journal of Intelligent Manufacturing*. Vol. 23(1). p. 49-60.
17. Miyazaki, S., Ohta, H., Nishiyama, N. (1988). The optimal operation planning of kanban to minimize the total operation cost». *The International Journal Of Production Research*. Vol. 26(10). pp. 1605-1611.
18. Lippolt, C.R., Furmans, K. (2008). «Sizing of Heijunka-controlled production systems with unreliable production processes». *IFIP International Federation for Information Processing*. Vol. 257. pp. 11-19. Available at: https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-0-387-77249-3_2.pdf.

Стаття надійшла до редакції 15.09.2023 р.