УДК 519.8 https://doi.org/10.17721/1812-5409.2022/4.4

Д.І. Симонов[1], м.н.с.
В.М. Горбачук[2], д.ф.-м.н., с.н.с.

Метод пошуку рішень у динамічній моделі управління запасами за невизначеності

Інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України, 03187, Україна, м. Київ, пр-т Академіка Глушкова, 40
e-mail: (1) denys.symonov@gmail.com, orcid.org/0000-0002-6648-4736
(2) GorbachukVasyl@netscape.net , orcid.org/0000-0001-5619-6979

D.I. Symonov[1]
V.M. Gorbachuk[2], Dr.Sci.

A method of finding solutions in a dynamic model of inventory management under uncertainty

V.M. Glushkov Institute of Cybernetics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 03187, Ukraine, Kyiv, Academician Glushkov Avenue, 40
e-mail: (1) denys.symonov@gmail.com, orcid.org/0000-0002-6648-4736
(2) GorbachukVasyl@netscape.net , orcid.org/0000-0001-5619-6979

В статті розглядається метод пошуку рішень у динамічній моделі управління запасами за невизначеності. Запропоновано алгоритм формулювання оптимальної стратегії управління запасами за допомогою розробленого методу визначення розміру оптимальної партії замовлення та формування оптимального плану постачання в умовах стохастичності попиту.

Розроблене рішення спрямовано на забезпечення максимізації прибутку в операціях постачання товарів за рахунок оптимізації витрат на обслуговування запасів, підвищення коефіцієнту обіговості запасів, зменшенню витрат на обслуговування зворотного капіталу та інше. Моделювання виконано з урахуванням монопродуктової стратегії, рівномірного розподілу продаж в циклі та миттєвого постачання товару в момент початку циклу. В якості обмежень моделі були наведені найбільш поширені змінні, що дозволяє продемонструвати роботу алгоритму. В роботі виконано порівняння результатів моделювання альтернативних методів планування процесу управління запасами. Наведені результати свідчать про перевагу запропонованої моделі.

Ключові слова: система управління запасами, розмір оптимальної партії замовлення, лінійна регресія, функція Лагранжа.

The article considers the method of finding solutions in the dynamic model of inventory management under uncertainty. An algorithm for formulating an optimal inventory management strategy is proposed using the developed method of determining the size of the optimal order lot and forming an optimal supply plan under conditions of stochastic demand. The developed solution is aimed at ensuring profit maximization in goods supply operations due to the optimization of inventory maintenance costs, an increase in inventory turnover ratio, a reduction of working capital maintenance costs, etc. The modelling was performed considering the mono-product strategy, the even distribution of sales in the cycle, and the instant supply of goods at the beginning of the cycle. The most common variables were listed as limitations of the model, which allows for a demonstration of the operation of the algorithm. The paper compares the simulation results of alternative methods of planning the inventory management process. The given results indicate the superiority of the proposed model.

Key Words: inventory management system, size of the optimal order lot, linear regression, Lagrange function.

Вступ

Будь-яка організація, що здійснює господарську діяльність, стикається з необхідністю управління запасами. Формування якісної стратегії управління запасами є стратегічним завданням організацій [1]. Тимчасова відсутність можливості задовольнити попит може бути причиною втрати клієнтів [2]. Інтегровані ланцюги постачання передбачають планування та координацію потоків матеріалів і інформації між усіма ланками [3], а формування складських запасів дозволяє керувати ризиками виникнення дефіциту в наслідок коливань обсягів пропозиції та попиту. В [4] описано застосування оптимальних стратегій управління запасами з нелінійною функцією витрат, що є актуальним при плануванні процесів зі значними коливаннями показників. Однак, останнім часом досить багато проблем в ланцюгах постачання виникає в наслідок необхідності балансування між вимогами постачальника та можливостям покупця в баченні оптимального розміру партії товару та впливу факторів невизначеності [5]. Управлінські рішення щодо запасів повинні прийматися на рівні окремих продуктів, що ускладнює проблему загального використання наявних ресурсів та визначення пріоритетів [6]. Глобалізація та уніфікація товарів підвищує вимоги до забезпечення стабільності циклів постачання [7] по ланкам та вимоги до економічної ефективності операцій на усіх ланках процесу постачання.

Постановка цілі та задачі дослідження

Ціль дослідження є розробка моделі управління запасами з метою максимізації прибутку в процесі постачання товарів за допомогою оптимізації витрат на обслуговування запасів. Використання моделі дозволить мінімізувати витрати на зберігання товарів, підвищити рівень обслуговування клієнтів і тим самим знизити об'єм недоотриманого прибутку, зменшити вимоги до розміру складу та інше.

Для досягнення цілі вирішуються наступні задачі:

- визначення оптимального розміру партії замовлення;
- визначення оптимального плану постачання;
- формулювання оптимальної стратегії управління запасами;
- порівняльний аналіз результативності роботи запропонованої моделі.

Визначення оптимального розміру партії замовлення

Для комерційних організацій критерієм ефективності стратегії функціонування є забезпечення прибутку від своєї діяльності [8-11] на який, безпосередньо, впливає розмір операційних витрат. Одна з основних статей витрат пов'язана з обслуговуванням системи управління запасами: закупівлі, технологічні коефіцієнти переробки, обслуговування залишків та інше [12]. На рівень витрат значний вплив має обертання складських запасів, яке залежить від якості прогнозування попиту, розміру партій замовлень та циклічності поставок.

При розрахунку оптимального розміру партії замовлення x_i^{ord} необхідно враховувати, що замовлений товар повинен бути на складі на момент початку циклу t_i, но бажано не раніше, так як це негативно впливає на значення цільової функції в наслідок збільшення витрат на зберігання товару.

Розглянемо керовану систему управління запасами з дискретним часом t_i циклу постачання i та одним продуктом у портфелі постачання. Зробимо припущення, що функція попиту в циклі має рівномірний розподіл $f_i(D), D \in [a,b]$, а постачання партії товару здійснюється миттєво в момент початку циклу t_i. Цільова функція, що визначає якість функціонування системи управління запасами [13-14], можливо записати у вигляді:

$$\left\{ \sum_{i=1}^{n} \left(\sum_{j=1}^{m} F_{ij}^{pr} - \sum_{j=m+1}^{M} F_{ij}^{ov} \right) \right\} \to max, \tag{1}$$
$$i = \overline{1,n},\ j = \overline{1,M},$$

де F_{ij}^{pr} – дохід від реалізації товару в циклі t_i; F_{ij}^{ov} – витрати в циклі t_i.

Робота системи постачання повинна забезпечити максимальний рівень різниці між доходною частиною F_{ij}^{pr} та витратами F_{ij}^{ov}, за умови, що $F_{ij}^{pr} \geq F_{ij}^{ov}$. Проаналізуємо кожний компонент цільової функції.

Доходна частина може складатися з багатьох факторів, але в межах дослідження розглянемо чотири, найбільш впливові, компоненти: доход від реалізації замовлень, що виникнули і циклі t_i і товар для їх виконання в повному обсязі міститься на складі; замовлень, що виникли в циклі t_i і товар для їх реалізації є дефіцитними, але які були узгоджені з клієнтами, що їх відвантаження відбудеться в циклі t_{i+1} а оплата здійсниться в циклі t_i; замовлень, що виникли в циклі t_i, товар для їх реалізації є дефіцитними, але які були узгоджені з клієнтами, що їх відвантаження і оплата відбудуться в циклі t_{i+1}; залишки минулих циклів, що реалізовують в циклі t_i, тобто товар вже сплачено. Для визначення інтервалу обмежень $D \in [a,b]$ можливо використати декілька варіантів:

1. Проаналізувати накопичені данні та присвоїти значення для $a_i = \min_{\forall i}\{x_i^s\}, i=\overline{1,n}$, для $b_i = \max_{\forall i}\{x_i^s\}, i=\overline{1,n}$, де x_i^s – фактичний об'єм реалізації товару в циклі t_i.
2. Використати регресійну модель. Наприклад, визначити прогнозне значення продаж товару x_i^p за допомогою лінійної регресії: $x_i^p = b_0 + b_1 \cdot x_i^s, i=\overline{1,n},$ де b_0 – вільний член рівняння регресії; b_1 – коефіцієнт рівняння; x_i^s – незалежна змінна, та присвоїти значення для $a_i = x_i^p - t_\gamma \dfrac{\sigma_{x_i^s}}{\sqrt{n_i}}, i=\overline{1,n}$, для $b_i = x_i^p + t_\gamma \dfrac{\sigma_{x_i^s}}{\sqrt{n_i}}, i=\overline{1,n}$.

Модель «доходної» частини цільової функції, з урахуванням обмежень щодо факторів впливу на систему, буде мати вигляд [15-16]:

$$\begin{aligned} F_{ij}^{pr} &= \int_{a_i}^{x_i^{ord}} p_i^s \cdot D_i \cdot f(D)\,dD + \\ &+ \int_{x_i^{ord}}^{\infty} p_i^s \cdot (1+(1-r)) \cdot x_i^{ord} \cdot f(D)\,dD + \\ &+ \int_0^{\infty} r \cdot p_i^c \cdot (x_i^{ord} - D) \cdot f(D)\,dD + \\ &+ \int_{x_i^{ord}}^{\infty} r \cdot p_i^s \cdot (D - x_i^{ord}) \cdot f(D)\,dD, \end{aligned} \tag{2}$$

де x_i^{ord} – оптимальний об'єм замовлення товару на цикл t_i; p_i^s – ціна реалізації товару в циклі t_i; p_i^c – ціна закупівлі товару в циклі t_i; x_i^0 – залишок товару на початок циклу t_i; r – коефіцієнт дисконтування.

На «витратну» частину рівняння (1) також впливає багато факторів, але розглянимо декілька з них: витрати на закупівлю товару в обсязі x_i^{ord}; вартість зберігання товару; втрати в наслідок відмови клієнтів очікувати поставки товару (штраф); вартість грошей, витрачених на закупівлю товару. Відповідно, витратна частина буде мати вигляд:

$$\begin{aligned} F_{ij}^{ov} &= p_i^c \cdot (x_i^{ord} - x_i^o) + \\ &+ \int_{a_i}^{x_i^{ord}} p_i^{stock} \cdot (x_i^{ord} - D_i) \cdot f(D)\,dD + \\ &+ \int_{x_i^{ord}}^{\infty} p_i^s \cdot (D_i - x_i^{ord}) \cdot f(D)\,dD, \end{aligned} \tag{3}$$

де p_i^{stock} – вартість зберігання одиниці товару в циклі t_i.

Враховуючи (2)-(3), узагальнена модель пошуку оптимального розміру партії замовлення буде матиме вигляд:

$$\left\{ \begin{aligned} &\int_{a_i}^{x_i^{ord}} p_i^s \cdot D_i \cdot f(D)\,dD + \\ &+ \int_{x_i^{ord}}^{\infty} p_i^s \cdot (2-r) \cdot x_i^{ord} \cdot f(D)\,dD + \\ &+ \int_0^{\infty} r \cdot p_i^c \cdot (x_i^{ord} - D) \cdot f(D)\,dD + \\ &+ \int_{x_i^{ord}}^{\infty} r \cdot p_i^s \cdot (D - x_i^{ord}) \cdot f(D)\,dD - \\ &- p_i^c \cdot (x_i^{ord} - x_i^o) - \\ &- \int_{a_i}^{x_i^{ord}} p_i^{stock} \cdot (x_i^{ord} - D_i) \cdot f(D)\,dD - \\ &- \int_{x_i^{ord}}^{\infty} p_i^s \cdot (D_i - x_i^{ord}) \cdot f(D)\,dD \end{aligned} \right\} \to \max, \tag{4}$$

$$i = \overline{1,n}.$$

Оскільки функція доходу є угнутою, то оптимальне значення можливо визначити як:

$$\frac{(\cdot)}{dx_i^{ord}} = p_i^s\cdot(2-r)\int_{x_i^{ord}}^{\infty} f\left(D\right)dD + r\cdot p_i^c\cdot\int_0^{\infty} f\left(D\right)dD -$$
$$-r\cdot p_i^s\cdot\int_{x_i^{ord}}^{\infty} f\left(D\right)dD - p_i^c - p_i^{stock}\cdot\int_{a_i}^{x_i^{ord}} f\left(D\right)dD +$$
$$+p_i^s\cdot\int_{x_i^{ord}}^{\infty} f\left(D\right)dD = 0.$$

Виконаємо ймовірнісне перетворення:

$$\frac{(\cdot)}{dx_i^{ord}} = p_i^s\cdot(2-r)\left(1-\int_a^{x_i^{ord}} f\left(D\right)dD\right)+$$
$$+r\cdot p_i^c\cdot\int_0^{\infty} f\left(D\right)dD -$$
$$-r\cdot p_i^s\cdot\left(1-\int_a^{x_i^{ord}} f\left(D\right)dD\right)-$$
$$-p_i^c - p_i^{stock}\cdot\int_{a_i}^{x_i^{ord}} f\left(D\right)dD +$$
$$+p_i^s\cdot\left(1-\int_a^{x_i^{ord}} f\left(D\right)dD\right).$$

отримаємо:

$$p_i^s\cdot(2-r) - r\cdot p_i^s - p_i^c + p_i^s + r\cdot p_i^c\int_0^{\infty} f\left(D\right)dD =$$
$$=(p_i^s\cdot(2-r) - r\cdot p_i^s + p_i^{stock} + p_i^s)\int_{a_i}^{x_i^{ord}} f\left(D\right)dD.$$

Оптимальний об'єм замовлення товару в циклі t_i можливо отримати з рівняння:

$$\int_{a_i}^{x_i^{ord}} f\left(D\right)dD = \frac{p_i^s\cdot(3-2\cdot r) - p_i^c\cdot(1-r)}{p_i^s\cdot(3-2\cdot r) + p_i^{stock}}, \quad (5)$$

проінтегрувавши, отримаємо,

$$\frac{x_i^{ord} - a_i}{b_i - a_i} = \frac{p_i^s\cdot(3-2\cdot r) - p_i^c\cdot(1-r)}{p_i^s\cdot(3-2\cdot r) + p_i^{stock}},$$

відповідно,

$$x_i^{ord} = a_i + \frac{(b_i - a_i)\cdot\left(p_i^s\cdot(3-2\cdot r) - p_i^c\cdot(1-r)\right)}{p_i^s\cdot(3-2\cdot r) + p_i^{stock}}. \quad (6)$$

На рисунку 1 зображена динаміка впливу змін вартості грошей і вартості зберігання на розмір оптимальної партії замовлення x_i^{ord}.

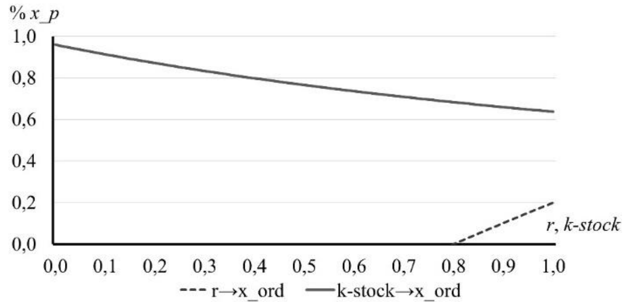

Рис. 1. Вплив вартості грошей і вартості зберігання на об'єм замовлення

Як можливо побачити на рисунку 1, існує суттєвий, майже лінійний, плив вартості грошей на економічно-обґрунтований розмір партії замовлення. Здійснювати закупку товару доцільно при умові, що $p_i^c / p_i^s \le r$. Вартість зберігання товару на складі має менш суттєвий вплив на економічно-обґрунтований розмір партії замовлення $\lim\limits_{k-stock\to\infty} x^{ord} = 0$, де $k-stock = p_i^{stock} / p_i^c$, але вже при $p_i^{stock} \approx p_i^c$ скорочується об'єм партії замовлення до $0.62x^p$. Таким чином, коефіцієнт дисконтування r та співвідношення вартість зберігання p_i^{stock} і вартості товару p_i^c стають додатковими обмеженнями цільової функції.

Визначення оптимального плану постачання

Зробимо декілька припущень: 1. об'єм доступного на ринку товару в будь-який момент часу не є обмеженим; 2. Розмір партії товару, що постачається, визначено точно та дорівнює x_i^{ord}, а попит – випадкова невід'ємна величина з визначеним певним законом розподілу [17]; 3. витрати на корегування плану продажів x_i^p являють собою опуклу функцію відхилень від x_i^p та x_i^s.

Сформулюємо математичну модель задачі управління запасами:

$$\left\{\sum_{i\in I} p_i^c \cdot x_i^p + \mathrm{M}\left[\sum_{i\in I} f_i\left(\xi_i - x_i^p\right)\right]\right\} \to \min, \quad (7)$$

за умов

$$\sum_{i\in I} k_{ij}\cdot x_i^p \le h_{ij}, i\in I, j\in J, h\in H, \quad (8)$$
$$x_i^p \ge 0, i\in I,$$

де k_{ij} – вектор операційних коефіцієнтів; h_{ij} – вектор обмежень (наприклад, $p_i^c \cdot x_i^p \le B_i$ – обмеження щодо бюджету на закупівлі товару B_i, або $v^x \cdot x_i^p \le V$ – обмеження на кількість товару, що зберігається на складі через обмеження розміру складу V та розмиру товару v^x, та інші); ξ_i – випадкова величина i-го циклу; $f_i(\cdot)$ – функція витрат, що пов'язані з впливом ξ_i.

Розглянемо функцію Лагранжа, ввівши вектор множників Лагранжа $\lambda = \{\lambda_h\}$, та виконаємо заміну $\mathrm{M}\left[f_i\left(\xi_i - x_i^p\right)\right] = \varphi_i(x_i^p)$. Отримаємо:

$$L(x,\lambda) = \sum_{i\in I} p_i^c \cdot x_i^p + \sum_{i\in I}\varphi_i(x_i^p) + \\ +\sum_{h\in H}\lambda_h \cdot \left(\sum_{i\in I}\sum_{j\in J} k_{ij}\cdot x_i^p - h_{ij}\right), \quad (9)$$

Визначимо вектор $x = \{x_i^p\}$, та $\tilde{p}_i^c(\lambda) = \min\left\{ p_i^c + \sum_{h\in H} k_{ij}\cdot\lambda_h \right\}$, то мінімальне значення можливо отримати при досягнені наступних умов:

$$\bar{x}_i(x) = \begin{cases} x_i^p, \textit{якщо}: \tilde{p}_i^c(\lambda) = p_i^c + \sum_{h\in H} k_{ij}\cdot\lambda_h \\ 0, \textit{інші} \end{cases}, \quad (10)$$

Якщо значення дорівнює x_i^p, то індекс стану призначимо як $i^*(i,\lambda)$. Визначимо через $\psi(x,\lambda)$ (9):

$$\psi(x,\lambda) = \sum_{i\in I}\tilde{p}_i^c(\lambda)\cdot x_i^p - \\ -\sum_{h\in H}\lambda_h\cdot h_{ij} + \sum_{i\in I}\varphi_i(x_i^p) = \\ = \sum_{i\in I}\left(\tilde{p}_i^c(\lambda)\cdot x_i^p + \varphi_i(x_i^p)\right) - \sum_{h\in H}\lambda_h\cdot h_{ij}, \quad (11)$$

відповідно,

$$\psi(\lambda) = \min\{\psi(x,\lambda)\} = \\ = \sum_{i\in I}\left(\min\left(\tilde{p}_i^c(\lambda)\cdot x_i^p + \varphi_i(x_i^p)\right)\right) - \sum_{h\in H}\lambda_h\cdot h_{ij}, \quad (12)$$

Таким чином, задача пошуку оптимального закупівельного плану зводиться до задачі оптимізації:

$$\left\{\tilde{p}_i^c(\lambda)\cdot x_i^p + \varphi_i(x_i^p)\right\} \to \min, x_i^p \ge 0, i\in I. \quad (13)$$

Для розв'язання задачі оптимізації оптимальне значення множників Лагранжа можливо визначити за допомогою пошуку узагальненого градієнту:

$$g_\psi(\lambda) = \left\{g_\psi^h(\lambda)\right\} = \sum_{i\in I} k_{i^*(i,\lambda)j}\cdot x_i^p(\lambda). \quad (14)$$

Формулювання оптимальної стратегії управління запасами

На рисунку 2 наведено модель функціонування процесу забезпечення організації запасами. Модель функціонування передбачає циклічне замовлення економічно-обґрунтованих партій товару x_i^{ord} в циклі планування t_i. Забезпечення запланованого об'єму продаж x_i^p може відбуватися за допомогою декілька ітерацій постачання в циклі t_i. Кількість поставок в циклі t_i залежить від вартості грошей та витрат на зберігання товару, розраховується за формулою: $n = (x_i^p - x_i^0)/x_i^{ord}$.

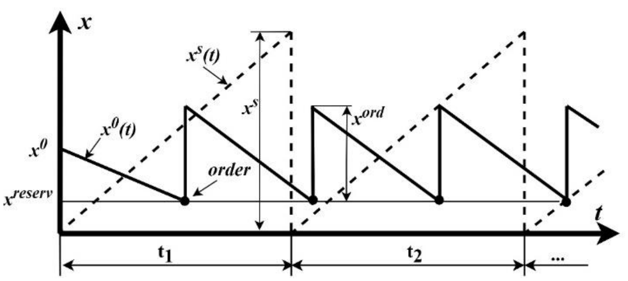

Рис. 2. Стан системи управління запасами

Оптимальна закупівельна стратегія для кожного циклу t_i полягає у наступному алгоритмі:

1. визначення рівня страхового запасу x^{reserv}, що дозволяє компенсувати

потребу в товарі на ймовірний час затримки в постачанні товару з урахуванням оптимального розміру партії замовлення x_i^{ord};
2. визначення рівня залишків x_i^0 на початок циклу t_i;
3. якщо поточні залишки $x_i^0 \le x^{reserv}$, то необхідно зробити замовлення на партію розміром x_i^{ord}, якщо залишки $x_i^0 > x^{reserv}$, то замовлення робити не потрібно.

Порівняльний аналіз роботи запропонованої моделі

Приклад 1. Умови взято в [15, с. 627], завдання 16.20. Обмеження задачі: для перевірки роботи алгоритму використаємо інформацію щодо попиту $0 \le D \le 5$, а щільність розподілу будемо використовувати для ситуації рівномірно розподіленого попиту. Задано наступні змінні: ціна продаж: 10 дол., ціна закупки – 8 дол., вартість зберігання – 1 дол., штраф за дефіцит – 10 дол., коефіцієнт дисконтування – 0,9. Потрібно визначити оптимальну партію замовлення за умови миттєвого здійснення поставки, а незадовільнений попит накопичується, тобто буде реалізовано в наступних періодах. Зробимо розрахунки за допомогою (6):

$$x_i^{ord} = \frac{5 \cdot \left(10 \cdot \left(3 - 2 \cdot 0,9\right) - 8 \cdot \left(1 - 0,9\right)\right)}{10 \cdot \left(3 - 2 \cdot 0,9\right) + 1} = 4,31.$$

Отже, оптимальна партія замовлення – 4,31 одиниця.

Якщо використати задану в завдані 16.20 щільність попиту $f(D) = 0.08D$, то отримаємо наступний результат:

$$x_i^{ord} = \sqrt{\frac{\left(\frac{10 \cdot \left(3 - 2 \cdot 0,9\right) - 8 \cdot \left(1 - 0,9\right)}{10 \cdot \left(3 - 2 \cdot 0,9\right) + 1}\right)}{0,04}} = 4,64.$$

Отриманий результат відповідає наведеному в [15], але модель більш чутлива к кореляції між ціною закупки та реалізації, чутлива к вартості грошей та витратам на зберігання товару на складі.

Приклад 2. Для аналізу якості роботи запропонованої моделі використаєм приклад, що наведено на сайті Kaggle Inc. – платформи для змагань з аналітики та передбачувального моделювання. Завдання передбачає моделювання продаж швидкопсувних товарів великого еквадорського роздрібного продавця продуктів харчування Corporación Favorita. Компанія заснована 1952 році та працює на ринках Еквадору, Коста-Ріки, Чилі, Панами, Парагваю та Перу [18].

В якості альтернативного методу прогнозування x_i^p використано лінійну регресію, як найбільш простий та поширений метод прогнозування. На рисунку 3 зображено моделювання за лінійною регресією даних з [18].

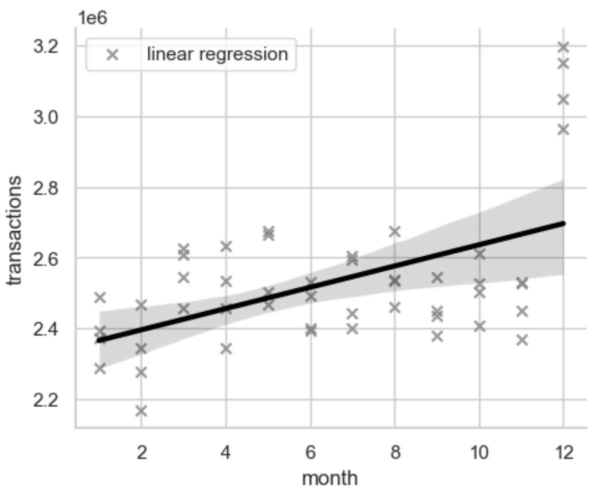

Рис. 3. Прогноз за лінійною регресією

Як можливо побачити на рисунку 3, модель регресії має низку прогнозну якість, це означає що рівняння регресії не дозволяє охопити значну частину можливих значень показників продаж.

Для моделювання використані наступні припущення:
- змінні: p_i^c = 0,8 у.о., p_i^s = 1,0 у.о., p_i^{stock} = 0,001 у.о., r = 0,95;

- моделювання відбувалося за умови накопичення дефіциту, тобто дефіцит, що виникає в поточному циклі, моє бути відвантажено в наступному.

На рисунку 4 наведено порівняння рівня складських запасів та їх реалізація для двох варіантів моделювання роботи декілька циклів постачання.

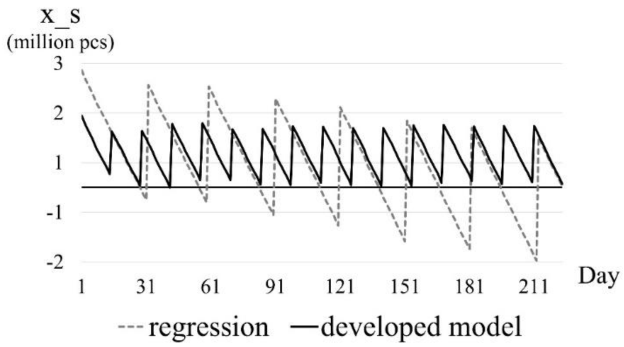

Рис. 4. Порівняння динаміки запасів

Як можливо побачити з рисунка 4, розроблена модель дозволяє зменшити рівень складських залишків, та за допомогою збільшення циклів постачання, що обумовлено використанням оптимального розміру партії поставки, мати бездефіцитний характер. Необхідно зазначити, що використання в якості альтернативного методу порівняння лінійної регресії має певні обмеження, які можливо уникнути, наприклад, використавши запропоновані методи [19].

Аналізуючи результати моделювання за допомогою регресійної моделі і запропонованої моделі, можливо зробити висновок, що за рахунок запропонованого алгоритму планування та управління, результативність процесу управління запасами може покращиться по наступним статтям: зберігання товару – до 40 відсотків, що обумовлено, окрім вищенаведеного, зниженням витрат на зберігання товару (зниження вимог до площі складу не враховано); зниження витрат на обслуговування оборотного капіталу – до 20 відсотків, за рахунок зниження потреб в оборотному капіталі, та зростанні коефіцієнту обіговості; зниження втрат внаслідок відсутності товару – в наслідок відсутності інформації про вимоги клієнтів щодо задовільних термінів очікувань, розрахувати зростання показника викликає труднощі, але необхідно зазначити, що скорочення циклу постачання сприяє скороченню термінів очікування покупцями дефіцитного товару.

Висновки

В роботі запропонована модель системи управління запасами з використанням оптимального розміру партії замовлення та прогнозування попиту на цикл продажів з урахуванням невизначеності попиту. Розроблений алгоритм дозволяє підвищити якість планування закупівельних операцій, особливо в порівнянні з традиційними методами прогнозування – моделями лінійної регресії. Наведена модель має резерв для покращення, наприклад, зазвичай організації використовують мультипродуктовий підхід до управління продажами, це додає значне обмеження на використання складських приміщень з урахуванням пріоритетів в товарних групах. Необхідно зазначити, що ускладнення математичної моделі може негативно вплинути на можливість її інтерпретації серед менеджерів, що відповідають за процес забезпечення організації товарами, а це сприяє зростанню спротиву до впровадження моделі в технологічні процеси. Введення додаткових змінних в модель може сприяти необхідності визначення пріоритетів, що, в свою чергу, також ускладнить модель.

Список використаних джерел

1. *Hao, Z., Li, J., Cai, J.* Allocation of inventory responsibilities in overconfident supply chains. Eur. J. Oper. Res. Volume 305, 2022, pp. 207-221. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2022.05.042

2. *Shaia X., Xioigb S., Zhaigc C.* Mitigating supply disruption risks by diversifying competing suppliers and using sales effort. International Journal of Production Economics. Volume 255, 2022. N. pages.

https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2022.108637
3. *Ambroszkiewicz S.*, *Bylka S.* Relatively optimal policies for stock management in a supply chain with option for inventory space limitation. Applied Mathematical Modelling. Volume 114, 2022. N. pages.
https://doi.org/10.1016/j.apm.2022.09.033
4. *Демченко С.С.*, *Кнопов А.П.*, *Пепеляев В.А.* Оптимальные стратегии для систем управления запасами с выпуклой функцией издержек. Кибернетика и системный анализ - 2000. № 6. С. 113-120.
5. *Симонов Д.І.* Оптимізація динамічних процесів при адмініструванні ланцюгів постачання. Mechanism for economic development in the context of global changes: international experience. Рига, Латвія. 2021. С. 65-70. https://doi.org/10.30525/978-9934-26-081-0-15
6. *Silver A. Edward*, *David F. Pyke*, *Douglas J. Thomas*. Inventory and production management in supply chains. Fourth edition. Boca Raton, Calif.: CRC Press, 2017. 812 pages.
7. *Raa B.*, *Aouam T.* A shortfall modelling-based solution approach for stochastic cyclic inventory routing. Eur. J. Oper. Res., Volume 305, 2022. Pp. 674-684.
https://doi.org/10.1016/j.ejor.2022.06.001
8. *Кнопов П.С.*, *Пепеляева Т.В.*, *Демченко И.Ю*. Об одной полумарковской модели управления запасами. Кибернетика и системный анализ, том 52, № 5, 2016. С. 81-88.
9. *Nita H. Shah*, *Mandeep Mittal*. Optimization and inventory management. Singapore: Springer, 2020. 470 pages.
10. *Steven M. Bragg*. Inventory accounting: a comprehensive guide. Hoboken, NJ: J. Wiley, 2005. 243 pages.
11. *Waters D.* Inventory control and management. 2nd ed. Chichester, England: John Wiley & Sons Inc (Verlag), 2003. 391 pages.
12. *Леонтьев В.*, *Холлис В. Ченери*, *Пауль Г. Кларк* [и др.]. Исследования структуры американской экономики: теоретич. и эмпирич. анализ по схеме затраты-выпуск. Пер. с англ. А. С. Игнатьева; Под ред. А. А. Конюса. - Москва: Госстатиздат, 1958. - 640 с.
13. *Гуляницький Л.Ф.* Агрегована задача управління виробництвом та зберіганням продукції. Компьютерная математика, № 1, 2017. С. 36-44.
14. *Норкин В.И., Гайворонский А.А., Заславский В.А., Кнопов П.С.s* Модели оптимального распределения ресурсов для защиты объектов критической инфраструктуры. Кибернетика и системный анализ, Т. 54, № 5. – 2018. – С. 13-26.
15. *Hamdy A. Taha*. Operations Research: An Introduction, Global Edition (10th Edition). England, Harlow: Pearson Education Limited, 2017. 849 pages.
16. *Hadley, G. and Whitin, T.* Analysis of Inventory Systems. NJ, Upper Saddle River: Prentice-Hall, 1963. 452 pages
17. *Михалевич В.С., Трубин В.А., Шор Н.З.* Оптимизационные задачи производственно-транспортного планирования: Модели, методы, алгоритмы. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. – 264 с.
18. Сайт "Kaggle Inc.". Store Sales - Time Series Forecasting. Use machine learning to predict grocery sales. Режим доступу: https://www.kaggle.com/competitions/store-sales-time-series-forecasting/data. [Доступ: 24 червня 2022].
19. *Єршов С.В., Лико Т.І.* Методи побудови регресійних моделей на основі нечітких даних. Компьютерная математика, № 1, 2015. С. 43-49.

References

1. HAO, Z., LI, J., CAI, J. (2022). *Allocation of inventory responsibilities in overconfident supply chains*. Eur. J. Oper. Res., 305. p. 207-221. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2022.05.042
2. SHAIA, X., XIOIGB, S., ZHAIGC, C. (2022). *Mitigating supply disruption risks by diversifying competing suppliers and using sales effort*. International Journal of Production Economics. 255. n. pages.
https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2022.108637
3. AMBROSZKIEWICZ, S., BYLKA, S. (2022). *Relatively optimal policies for stock management in a supply chain with option for inventory space limitation*. Applied Mathematical Modelling. 114. n. pages.
https://doi.org/10.1016/j.apm.2022.09.033

4. DEMCHENKO, S., KNOPOV, A., PEPELYAEV, V. (2000) *Optimalnyie strategii dlya sistem upravleniya zapasami s vyipukloy funktsiey izderzhek*. Kibernetika i sistemnyiy analiz. 6. p. 113-120.
5. SYMONOV, D. (2021) Optimizatsiya dinamichnih protsesiv pri administruvanni lantsyugiv postachannya. Mechanism for economic development in the context of global changes: international experience. Riga, LatvIya. p. 65-70. https://doi.org/10.30525/978-9934-26-081-0-15
6. SILVER A. EDWARD, DAVID F. PYKE, DOUGLAS J. THOMAS. (2017) *Inventory and production management in supply chains*. Fourth edition. Boca Raton, Calif.: CRC Press. 812 pages.
7. RAA, B., AOUAM, T. (2022). *A shortfall modelling-based solution approach for stochastic cyclic inventory routing*. Eur. J. Oper. Res., 305, p. 674-684.
https://doi.org/10.1016/j.ejor.2022.06.001
8. KNOPOV, P., PEPELYAEVA, T., DEMCHENKO, I. (2016) *Ob odnoy polumarkovskoy modeli upravleniya zapasami*. Kibernetika i sistemnyiy analiz, 52(5). p. 81-88.
9. NITA H. SHAH, MANDEEP MITTAL. (2020) *Optimization and inventory management*. Singapore: Springer. 470 pages.
10. STEVEN M. BRAGG. (2005) *Inventory accounting: a comprehensive guide*. Hoboken, NJ: J. Wiley. 243 pages.
11. WATERS, D. (2003) *Inventory control and management*. 2nd ed. Chichester, England: John Wiley & Sons Inc (Verlag). 391 pages.
12. LEONTEV, V., HOLLIS V. CHENERI, PAUL G. KLARK [i dr.]. (1958) *Issledovaniya strukturyi amerikanskoy ekonomiki: teoretich. i empirich. analiz po sheme zatratyi-vyipusk*. Per. s angl. A. S. Ignateva; Pod red. A. A. Konyusa. - Moskva : Gosstatizdat. p. 640.
13. GULYANITSKIY, L. (2017) *Agregovana zadacha upravlInnya virobnitstvom ta zberIgannyam produktsiyi*. Kompyuternaya matematika, 1. p. 36-44.

14. NORKIN, V., GAYVORONSKIY, A., ZASLAVSKIY, V., KNOPOV, P. (2018) *Modeli optimalnogo raspredeleniya resursov dlya zaschityi ob'ektov kriticheskoy infrastrukturyi*. Kibernetika i sistemnyiy analiz, 54(5). p. 13-26.
15. HAMDY A. TAHA. (2017) *Operations Research: An Introduction, Global Edition* (10th Edition). England, Harlow: Pearson Education Limited. 849 pages.
16. HADLEY, G. AND WHITIN, T. (1963) *Analysis of Inventory Systems*. NJ, Upper Saddle River: Prentice-Hall. 452 pages.
17. MIHALEVICH, V., TRUBIN, V., SHOR, N. (1986) *Optimizatsionnyie zadachi proizvodstvenno-transportnogo planirovaniya: Modeli, metodyi, algoritmyi*. – M.: Nauka. Gl. red. fiz.-mat. lit. 264 pages.
18. Sait "Kaggle Inc.". Store Sales - Time Series Forecasting. Use machine learning to predict grocery sales. Retrieved from https://www.kaggle.com/competitions/store-sales-time-series-forecasting/data. [Accesses: 2022, June 24].
19. ERSHOV, S., LIKO, T. (2015) *Metodi pobudovi regresIynih modeley na osnovI nechItkih danih*. Kompyuternaya matematika, 1. p. 43-49.

Надійшла до редакції: 02.12.2022