

Д.В. Яновський, аспірант
Державний університет «Житомирська політехніка»

Оптимізація ланцюгів поставок: вирішення «ефекту батога» для замовлень постачальників

(Представлено: Граф М.С., PhD)

Дослідження приділяє особливу увагу аналізу ефекту «бичачого батога» в ланцюгах поставок та його впливу на збільшення варіабельності замовлень порівняно із попитом кінцевих споживачів. Зазначається, що під час глобальних криз, таких як пандемія чи війна, ланцюги поставок стикаються зі значним зростанням ненадійності виконання замовлень. Це призводить до порушень у русі інформаційних та матеріальних потоків, не дотримуючись основної мети логістичної системи – задоволення потреб як власних, так і клієнтських. У статті розглянуто можливі стратегії пом'якшення ефекту «бичачого батога», зокрема, важливість обміну інформацією та інтеграції для ефективної координації між ланками ланцюга поставок. Зазначено, що вдосконалення цих аспектів може призвести до зменшення варіабельності замовлень та оптимізації управління запасами.

Це дослідження приділяє увагу аналізу дволанкового ланцюга поставок з одним магазином та одним постачальником. Магазин робить замовлення постачальнику, враховуючи політику управління товарним запасом та недостатню надійність постачання. Досліджено вплив цих факторів на варіабельність замовлень порівняно з попитом. Запропоновано модель розрахунку замовлень постачальника наступній ланці, що враховує прогнози, зміну мінімального залишку магазину та недостатню надійність поставок у магазини. Наведено приклади, що ілюструють використання моделі. Показано, що такий підхід може сприяти точнішому задоволенню потреб кінцевих споживачів та зменшенню непередбачуваності управління запасами. Наголошено на важливості ефективної координації та інтеграції для забезпечення стабільності ланцюгів поставок. Запропонована модель може слугувати основою для розвитку більш ефективних практик управління ланцюгами поставок в умовах сучасного бізнес-середовища.

Ключові слова: ланцюг поставок; «ефект батога»; прогнозування; ненадійність виконання замовлень; мінімальний залишок.

Постановка проблеми. У сучасних умовах глобальних та непередбачуваних змін, таких як пандемія та війна, управління ланцюгами поставок стає викликом для багатьох компаній. Однією з ключових проблем, яка виникає в контексті цих змін, є так званий «ефект батога». Цей ефект виникає внаслідок непередбачуваних коливань попиту, стратегій управління запасами, ненадійності поставок та інших факторів на різних етапах ланцюга та призводить до зниження ефективності роботи ланцюга поставок. Дослідження має на меті знайти оптимальні рішення для управління ланцюгами поставок, забезпечуючи стабільність та оптимізацію в умовах невизначеності та змін.

Аналіз останніх досліджень та публікацій, на які спирається автор. Багато ланцюгів постачання стикаються з проблемою забезпечення відповідності запасів споживчому попиту, що призводить до більш високих коливань у процесі замовлення. Це називається «ефектом батога» (англ. Bullwhip Effect, BE), що визначається як посилення мінливості попиту у висхідному напрямі [1].

Для забезпечення відповідності запасів споживчому попиту застосовуються різноманітні методи прогнозування, аналіз яких проводиться в [11].

У [2] досліджується вплив цифрової трансформації в багаторівневому ланцюгу поставок на «ефект батога» шляхом зменшення відхилення зворотного зв'язку інформації та покращення загальної продуктивності ланцюга поставок. У [3] автори описують концепцію, яка дозволяє використовувати більш структурований підхід до управління для вивчення «ефекту батога» за допомогою штучного інтелекту.

У [4] досліджуються питання обміну даними між учасниками ланцюга поставок, наводяться випадки застосування та числові приклади. З числових результатів стає зрозуміло, що обмін інформацією між ланками забезпечує на 1,26 % більше прибутку порівняно з децентралізованою системою. Через асиметричну інформацію, що призводить до «ефекту батога», системі роздрібної торгівлі загрожують збитки. Аналіз чутливості для ключових параметрів забезпечує застосовність результатів у реальному світі.

У [7] представлено новий метод прогнозування попиту на основі динамічних даних з використанням підходу машинного навчання, який оминає всі складнощі, пов'язані з зазвичай використовуваними прогнозами MMSE. Пропонований підхід до прогнозування на основі даних фокусується на визначенні

динамічного прогнозу «ефекту батога». Основна ідея, на відміну від існуючого простого прогнозування ковзного середнього, полягає в тому, що запропонований новий метод дозволяє оптимізувати ваги прогнозу шляхом мінімізації суми квадратів помилок прогнозу на один крок вперед за допомогою алгоритму навчання

Емпіричні дослідження виявили наявність «ефекту батога» у багатьох галузях промисловості (наприклад, [5–6]). Враховуючи широкий масштаб його наслідків, а також поширеність на практиці, ця тема викликала значний інтерес з боку дослідників у галузі управління ланцюгами поставок та має ключове значення для практиків, які прагнуть досягти поставлених цілей та покращити свою діяльність на місцевому та глобальному рівні ланцюжка поставок.

Метою статті є опис моделі формування замовлень від другої ланки ланцюга поставок, що мінімізує вплив «ефекту батога», враховує застосування мінімального товарного залишку магазину та ненадійність у виконанні замовлень постачальником.

Викладення основного матеріалу. Зі зростанням конкурентоспроможності ринку підтримання ефективною роботи ланцюга поставок відіграє важливу роль для компаній у доставці кінцевої продукції клієнтам. У процесі логістичної діяльності може виникнути відомий «ефект батога». Суть його полягає в тому, що навіть невеликі зміни в попиті від кінцевого споживача можуть викликати значні відхилення в планах та показниках інших учасників ланцюга поставок. Найбільше це відчутно на віддалених від кінцевого споживача етапах ланцюга, таких як виробник.

Споживчий попит може коливатися на різних етапах ланцюга поставок з багатьох причин, таких як стратегія управління запасами, методи прогнозування, час обробки замовлень та інші фактори. До того ж під час COVID-пандемії та у період війни ланцюги поставок зіткнулися зі значним зростанням ненадійності виконання замовлень. Це призводить до порушень у русі інформаційних та матеріальних потоків, не дотримуючись основної мети логістичної системи – задоволення потреб як власних, так і клієнтських.

«Ефект батога» є наслідком координаційних проблем у традиційних логістичних ланцюгах поставок, за яких невеликі зміни в попиті можуть призводити до значних коливань у виробництві та постачанні товарів.

Згідно з Чжаном [8] та Гілбертом [9], попит кінцевого споживача можна змодельовати за допомогою авторегресії. Це означає, що попит кінцевого споживача протягом періоду часу t можна визначити так:

$$D_t = \mu + \rho D_{t-1} + \varepsilon_t, \quad (1)$$

де D_t – попит на товар у кінцевого споживача на момент часу t , μ – середній попит на продукт у кінцевого споживача в авторегресійній моделі попиту, ρ – коефіцієнт автокореляції авторегресії, ε_t – помилка прогнозу на момент часу t .

Рівняння (1) є загальноприйнятим визначенням процесу SARMA(1, 0)X(0, 1). D_t оцінюється на основі минулих даних у момент часу t . Наприклад, якщо $t = 0$, D_{-1} , D_{-2} , ... є минулими даними на момент часу t і фізично реалізовані. Отже, D_0 рекурсивно оцінюється за формулою D_{-1} , D_{-2} , ... Ця процедура є типовим процесом оцінки значень у часових рядах.

У ланцюгу поставок магазини є сторонами, які безпосередньо одержують запити від клієнтів. Щоб задовольнити потреби клієнтів в обслуговуванні, споживчий попит зазвичай оцінюється з допомогою методів прогнозування перед розміщенням замовлення постачальнику. Магазин дотримується певної стратегії управління запасами. У базовій політиці управління запасами замовлення у кількості q_t розміщується на початку періоду t для того, щоб товарний запас досяг певного рівня S_t . Таким чином, кількість замовлення може бути представлена як

$$q_t = S_t - S_{t-1} + D_{t-1}, \quad (2)$$

де S_t – рівень базових запасів у період t , тобто стан запасів на початок періоду t .

Наступні ланки ланцюга поставок формують замовлення, ґрунтуючись на попиті попередніх ланок. Відсутність інформації про попит кінцевих споживачів у наступних ланок призводить до коливань обсягів замовлень на всіх рівнях. Це призводить до збільшення коливань запасів у відповідь на зміни споживчого попиту в міру просування вгору ланцюгом поставок.

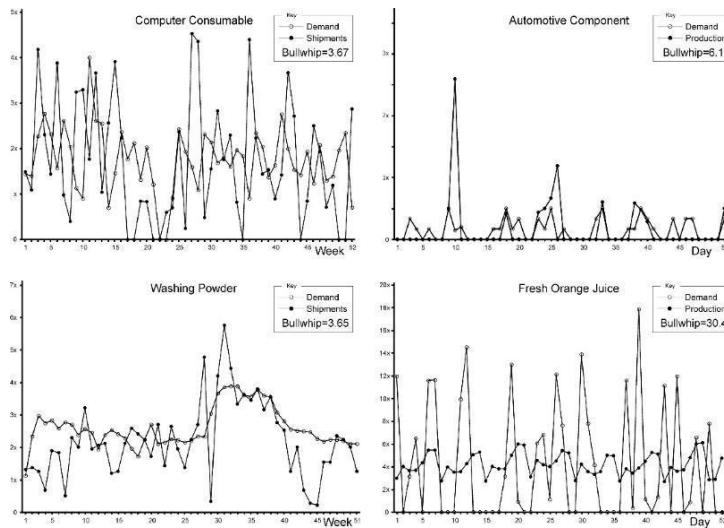


Рис. 1. Емпіричний доказ «ефекту батога» [10]

«Ефект батога» можна розрахувати як

$$B_t = \frac{VAR(q_t)}{VAR(D_t)} \quad (3)$$

У цьому дослідженні розглядається дволанковий ланцюг поставок з одним магазином та одним постачальником. Магазин стикається зі споживчим попитом та розміщує замовлення q_t постачальнику. У цьому дослідженні на замовлення q_t впливає:

- політика роботи магазину, яка полягає у підтримці певного товарного запасу R_t для представленості товару на полиці;
- ненадійність у виконанні замовлень постачальником – замовлення можуть бути виконані не в повному обсязі або не виконані взагалі.

Щоб визначити, скільки q_t замовити у постачальника, магазин має спрогнозувати споживчий попит D_t . Передбачається, що прогноз попиту відбувається з урахуванням впливу політики магазину та ненадійності постачання.

У такому разі кількість для замовлення може бути виражена як

$$q_t = D_t + R_t - S_t, \quad (4)$$

де D_t – прогноз споживчого попиту, R_t – мінімальна кількість товарного запасу для представленості товару на полиці, S_t – товарний запас магазину на момент замовлення.

Як очевидно з формули, на кількість замовлення впливає як прогноз попиту D_t , так і мінімальний товарний запас R_t та кількість, необхідна для його наповнення $R_t - S_t$. Тобто, в ситуації, коли замовлений товар не поставляється в повній кількості, поточний товарний запас починає вимиватися, і в подальше замовлення, крім попиту, необхідно враховувати додаткову кількість для того, щоб наповнити R_t . Як згадувалося раніше, значення R_t залежить від політики роботи магазину, тому воно може змінюватися залежно від різних факторів, таких як сезонність, свята, відкриття або закриття конкурентів, розширення або звуження асортиментної матриці і таке інше.

На рисунках 2–3 нижче наведено приклад впливу ненадійності у виконанні замовлень та зміни мінімального залишку на формування замовлень.



Рис. 2. Надійність поставок та зміна мінімальної кількості залишку магазину



Рис. 3. Замовлення магазину та попит

Як видно з графіків, на збільшення варіабельності замовлень порівняно з попитом безпосередньо впливає зміна мінімального залишку і надійність виконання замовлень. При цьому, якщо замовлення виконуються в повному обсязі та зміна мінімального залишку відсутня, попит та замовлення стають ідентичними. Наприклад, це можна побачити в періоді з 34 по 44 день, де виконання замовлень становить 100 % та немає зміни мінімального залишку. Таким чином, можна констатувати, що:

- чим більше значення $\Delta R_t = |R_t - R_{t-1}|$ і чим частіше відбувається зміна мінімального залишку, або
- чим нижчий відсоток виконання замовлень і чим частіше відбувається недовпоставання, тим вище варіабельність замовлень і як наслідок «ефект батога» проявляється сильніше.

Постачальник (друга ланка нашого ланцюга поставок) виконує замовлення магазину. Побудова постачальником прогнозу на підставі замовлень магазину та формування замовлень наступній ланці поставок призведе до подальшого збільшення варіабельності замовлення порівняно з попитом кінцевого споживача. Тобто, при підйомі вгору по ланцюгу поставок «ефект батога» зростатиме. Його можна пом'якшити за рахунок обміну інформацією. Більш просунута інтеграція дозволяє учасникам ланцюга поставок співпрацювати чи передавати рішення щодо планування та поповнення запасів своїм колегам. Інтеграцію та обмін інформацією досить просто реалізувати для торгових мереж, у яких постачальником другої ланки є центральний або регіональний склад мережі, дані якого зазвичай знаходяться в одній інформаційній системі з даними магазинів. При цьому варто пам'ятати, що час поповнення постачальника (періодичність замовлень та час виконання замовлення) може відрізнятися від часу поповнення магазину.

В обмін інформацією між ланками ланцюга поставок пропонується врахувати такі параметри:

1. D_t – прогноз продажів на час поповнення магазину. Прогноз продажів базується на продажах кінцевому покупцю.
2. \check{D}_t – прогноз продажів на час поповнення постачальника. Прогноз продажів базується на продажах кінцевому покупцю.
3. R_t – поточне значення мінімального залишку магазину.
4. $\Delta \check{R}_t$ – планова зміна мінімального залишку магазину в періоді часу поповнення постачальника.
5. S_t – поточний залишок магазину.
6. \check{S}_t – поточний залишок постачальника.

Розрахунок замовлення Q_t від зовнішнього постачальника пропонується виконувати за формулою:

$$Q_t = D_t + R_t + \Delta \check{R}_t - S_t + \check{D}_t - \check{S}_t. \quad (5)$$

Пояснення формули (5): визначаємо цільовий рівень товарного запасу постачальника як потребу в товарі, яку зараз необхідно поставити на магазин з урахуванням планової зміни викладки як $D_t + R_t + \Delta \check{R}_t - S_t$ плюс прогнозний продаж за час поповнення постачальника \check{D}_t . Тоді замовлення постачальника – це цільовий рівень товарного запасу постачальника мінус поточний залишок.

Порівняння замовлень постачальника та магазину в цьому випадку виглядають так (рис. 4).



Рис. 4. Порівняння замовлень магазину та постачальника

Для наочності під час розрахунку час поповнення постачальника та магазину було взято однаковими. Як видно з графіка, замовлення постачальника в цьому випадку здебільшого збігається із замовленням магазину. Відмінність пояснюється двома чинниками: необхідністю замовити товар заздалегідь під зміну викладки та ненадійністю постачання.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Ефект «бичачого батога» становить суттєвий виклик для ефективного управління ланцюгами поставок, особливо в умовах непередбачуваних змін, таких як пандемія чи війна. Висвітлено, що обмін інформацією та інтеграція процесів планування можуть виявитися ефективними стратегіями для пом'якшення цього ефекту.

Досліджено модель розрахунку замовлень для постачальника в дволанковому ланцюгу поставок, яка враховує прогнози, зміну мінімального залишку магазину та ненадійність поставок. Цей підхід може сприяти кращому управлінню запасами та зменшенню варіабельності замовлень, забезпечуючи більш точне вирішення потреб кінцевих споживачів.

У результаті дослідження вказано, що важливість ефективної координації та інтеграції в ланцюгах поставок надзвичайно велика для досягнення стабільності та оптимізації управління запасами. Запропоновані стратегії та моделі можуть слугувати основою для розвитку більш раціональних та ефективних практик управління ланцюгами поставок у майбутньому. Перспективою наступних досліджень є врахування ціни та промоактивності під час розрахунку замовлення.

References:

1. Nagaraja, C.H., Thavaneswaran, A., & Appadoo, S.S. (2015), «Measuring the bullwhip effect for supply chains with seasonal demand components», *European Journal of Operational Research*, No 242, pp. 445–454.
2. Gao, J., Gao, Y., Guan, T., Liu, S., & Ma, T. (2023), «Inhibitory influence of supply chain digital transformation on bullwhip effect feedback difference», *Business Process Management Journal*.
3. Patil, C., & Prabhu, V. (2023), «Supply chain cash-flow bullwhip effect: An empirical investigation», *International Journal of Production Economics*, 109065.
4. Sarkar, M., Dey, B. K., Ganguly, B., Saxena, N., Yadav, D., & Sarkar, B. (2023), «The impact of information sharing and bullwhip effects on improving consumer services in dual-channel retailing», *Journal of Retailing and Consumer Services*, 73, 103307.
5. Akkermans, H., & Voss, C. (2013), «The service Bullwhip Effect», *International Journal of Operations & Production Management*, No 33 (6), pp. 765–788.
6. Jin, M., DeHoratius, N., & Schmidt, G. (2017), «In search of intra-industry bullwhips», *International Journal of Production Economics*, No 191, pp. 51–65.
7. Hoque, M.E., Thavaneswaran, A., Appadoo, S.S., Thulasiram, R.K., & Banitalebi, B. (2021), «A novel dynamic demand forecasting model for resilient supply chains using machine learning», In 2021 IEEE 45th Annual Computers, Software, and Applications Conference (COMPSAC), pp. 218–227, IEEE.
8. Gilbert, K. (2005), «An ARIMA supply chain model», *Management Science*, No 51 (2), pp. 305–310.
9. Zhang, X. (2004), «The impact of forecasting methods on the bullwhip effect», *International Journal of Production Economics*, No 88, pp. 15–27.
10. Wang, X., & Disney, S. (2016), «The bullwhip effect: Progress, trends and directions», *European Journal of Operational Research*, No 250(3), pp. 691–701.
11. Yanovsky D. & Graf M. (2023), «Analiz isnuichykh metodiv prohnouzuvannia popytu ta sposobiv otsinky yikh yakosti», *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, No 3.

Яновський Дмитро Валерійович – аспірант Державного університету «Житомирська політехніка».

Наукові інтереси:

- побудова математичних моделей;
- прогнозування;
- впровадження автоматизованих систем управління та прийняття рішень;
- BigData.

Yanovsky D.V.

Optimization of supply chain: solving the «BullWhip Effect» for supplier orders

This research pays special attention to the analysis of the Bullwhip Effect (BE) in supply chains and its impact on increasing the variability of orders compared to end-user demand. During global crises, such as a pandemic or war, supply chains face a significant increase in the unreliability of order fulfillment. This leads to disruptions in the movement of information and material flows, violating the main goal of the logistics system - meeting both own and client needs. The article discusses possible strategies to mitigate the BE, in particular, the importance of information exchange and integration for effective coordination between the links of the supply chain. It is noted that improving these aspects can lead to a reduction in order variability and optimization of inventory management.

This study focuses on the analysis of a two-link supply chain with one store and one supplier. The store places an order, taking into account the policy of inventory management and unreliability of supply. The influence of these factors on the variability of orders compared to demand was studied. A model for calculating orders from the second link of the supply chain is proposed, which takes into account forecasts, changes in the minimum balance of the store and the unreliability of deliveries to stores. Examples illustrating the use of the model are given. It is shown that such an approach can contribute to a more accurate satisfaction of the needs of end consumers and reduce the unpredictability of inventory management. The importance of effective coordination and integration to ensure the stability of supply chains is emphasized. The proposed model can serve as a basis for the development of more effective supply chain management practices in the modern business.

Keywords: supply chain; «bullwhip effect»; forecasting; order fulfillment; minimum stock.

Стаття надійшла до редакції 20.10.2023.