

УПРАВЛІННЯ У ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ

CONTROL IN TECHNICAL SYSTEMS

УДК 658.5

ФОРМАЛІЗАЦІЯ ЗАДАЧІ ФОРМУВАННЯ ГОЛОВНОГО КАЛЕНДАРНОГО ПЛАНУ В СИСТЕМІ ПЛАНУВАННЯ MRP II

Новінський В. П. – канд. техн. наук, доцент кафедри Інформатики і програмної інженерії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна.

Попенко В. Д. – канд. техн. наук, доцент кафедри Інформаційних систем і технологій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. Розглянуто задачу формування Головного календарного плану в процесі управління виробництвом на базі стандарту MRP II. Об'єктом дослідження є алгоритм формування цього плану для подальшого планування постачання матеріалів у виробництво і організації самого виробництва.

Мета роботи – вдосконалення алгоритму формування Головного календарного плану для уникнення зайвих стадій алгоритму.

Метод. Запропоновано вдосконалення алгоритму формування Головного календарного плану. Воно полягає в одночасному врахуванні вимог щодо своєчасної реалізації замовникам продукції, обмежень щодо потужностей робочих центрів підприємства і обмежень щодо тривалості закупівельних циклів у процесі постачання матеріалів. У стандарті MRP II передбачені спочатку планування термінів і кількості випуску продуктів, а лише на наступному кроці перевірка сформованого плану на припустимість щодо потрібного часу роботи обладнання і доступності потрібних кількостей матеріалів. У разі порушення обмежень розрахованим планом треба або планувати і здійснювати заходи для подолання вказаних обмежень, тобто організувати додаткові зміни для робочих центрів, задіяти додаткові потужності, пришвидшити доставку деяких матеріалів, або зменшувати план продажу. Всі ці заходи пов'язані з додатковими витратами. В запропонованому варіанті процесу планування це треба робити лише якщо алгоритм не знайде припустимого рішення. Задача формування Головного календарного плану, яка є центральною в стандарті MRP, сформульована авторами як задача лінійного програмування завдяки лінійному характеру вказаних обмежень по виробничих потужностях і матеріалах. Зокрема, в разі достатньо жорстких обмежень на потужності робочих центрів план поповнення залишків продуктів з виробництва зсувається на більш ранні інтервали планування і лише після цього упирається в обмеження. Запропоновано кілька стратегій планування поповнень з виробництва залишків продуктів.

Результати. Розроблені алгоритми реалізовані в формі шаблонів Microsoft Excel і доступні для використання з метою поглиблення розуміння стандарту MRP II. Також вони використовуються в навчальному процесі.

Висновки. Апробація рішення авторами підтвердила його працездатність, а також доцільність впровадження розробленої модифікації процесу планування MRP II у програмне забезпечення провідних постачальників систем класу ERP. Перспективи подальших досліджень можуть полягати в порівняльному аналізі запропонованих варіантів розміщення поповнень залишків продуктів з виробництва, шляхом економічного оцінювання цих варіантів, а також шляхом імітаційного моделювання.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: планування, виробництво, матеріали, продукти, напівпродукти, MRP II.

АБРЕВІАТУРИ

APICS – American Production and Inventory Control Society;

CPS – Cyber-physical system;

CRP – Capacity Requirements Plan, укр. ПЗП – План завантаження потужностей;

DDMRP – Demand Driven MRP;

IoT – Internet of Things;

JIT – Just in time;

MPS – Master Production Schedule, укр. ГКП – Головний календарний план;

MRP II – Manufacturing Resource Planning, стандарт де-факто;

S&OP – Sales & Operations Plan;

ToC – Theory of Constraints.

НОМЕНКЛАТУРА

p – номер продукту;

t – номер інтервалу зони планування;

p/p_{pt} – планова кількість для пари продукту-інтервал, це кількість продукту p , яку треба виробити не пізніше інтервалу t ;

pst_{pt} – прогнозний запас продукту p на початок інтервалу зони планування t ;
 sal_{pt} – потреба в продукті p і в інтервалі t за планом продажів;
 sop_{pt} – потреба в продукті p і в інтервалі t за планом продажів і операцій;
 w – номер робочого центру;
 rqw_{wt} – потреба в часі робочого центру;
 nw_{pw} – норма продуктивності робочого центру w при виробництві продукту p (у штуках на годину);
 fmt_{wt} – фонд часу робочого центру w в інтервалі t ;
 fnw_{wt} – сумарна, починаючи з інтервалу 1 до інтервалу t , потреба в робочому часі робочого центру w ;
 nm_{pm} – норма витрат матеріалу m при виробництві продукту p ;
 qtm_{mt} – планова потреба витрат матеріалу m у виробництві в інтервалі t ;
 stm_{mt} – прогнозний рівень запасу матеріалу $m = 1, \dots, M$ в інтервалі зони планування t ;
 dc_m – цикл постачання (delivery cycle) для матеріалу m ;
 plm_m – планова партія поставки для матеріалу m .
 plp_{pt}^{\max} – верхня межа плану поповнення запасу продукту p в інтервалі t .

ВСТУП

В наш час найбільш відомою методикою управління виробництвом є методика MRP II (Manufacturing Resource Planning), вона була розроблена в кінці 20-го сторіччя американською асоціацією APICS (American Production and Inventory Control Society), та у 21-му сторіччі набула додаткового розвитку та просування в практику управління у виробничій бізнес сфері. В наші дні вона є основною методикою, на яку орієнтуються інформаційні системи в цій області. Це визначається наступними факторами.

1. MRP II є найбільш комплексною теорією, яка не залежить від типу виробництва (дискретне чи неперервне; одиничне, серійне чи масове; виробництво на склад чи на замовлення).

2. MRP II визначає побудову системи управління, як сукупність та послідовність виконання фаз управління: планування, організацію діяльності, обліку та нормування. Для цих фаз представлено сукупність процедур та методів, які повинні бути реалізовані.

3. MRP II визначає архітектуру інформаційної системи та їх взаємозв'язків. Разом з обов'язковим переліком бізнес-процедур та методів їх реалізація в рамках інформаційної системи є обов'язковим для практичного застосування MRP II.

4. MRP II є основою системи класу ERP (Enterprise Resource Planning). На світовому ринку ERP систем кожний вендор – розробник системи цього класу має методику MRP II, реалізовану в системі.

APICS в APICS Dictionary [1] дає наступне визначення систем класу MRP II.

Планування ресурсів виробництва (Manufacturing Resource Planning – MRP II) – метод ефективного планування всіх ресурсів виробничої компанії. Він виконаний © Новінський В. П., Попенко В. Д., 2024
DOI 10.15588/1607-3274-2024-2-17

нує операційне планування в натуральних одиницях виміру, фінансове планування у вартісних одиницях виміру, і містить у собі можливості відповіді на питання «що буде, якщо...?» шляхом моделювання. Метод складається з безлічі процесів, кожен з яких пов'язаний з іншими: бізнес-планування, планування виробництва (планування продажів та операцій), розробка головного календарного плану виробництва, планування потреби в матеріалах, планування потреби в потужностях та системи підтримки контролю виконання за потужностями та матеріалами. Результат таких систем використовується фінансовими звітами, такими як бізнес-план, звіт про угоди щодо закупівель, бюджет відвантаження та прогноз запасів у вартісному вираженні.

Ресурсами виробництва, які підлягають управлінню в рамках MRP II, є:

- готова продукція та напівпродукти на стадіях виробництва та реалізації;
- виробничі потужності;
- закупні матеріали на стадіях постачання та використання.

Логіка роботи MRP II представлена на рис. 1.

MRP II охоплює три напрямку управління виробничою системою: бізнес-(тактичне) планування; операційне (оперативне) планування; організацію та облік виконання планів.

В рамках бізнес-планування передбачене формування плану продажів та операцій (Sales & Operations Plan – S&OP). План розробляється не менше ніж на рік з розбивкою по кварталах по номенклатурі продукції (якщо її кількість велика – тисяча позицій та більше – тоді по групах номенклатури) в кількісних та вартісних показниках. Для розробки S&OP потрібен загальний (укрупнений) план продажів. В фінансовій сфері на рівні бізнес-планування отримують фінансові бюджети витрат та обігу грошових коштів.

Операційне планування – це формування трьох основних планів: головного календарного плану (ГКП, Master Production Schedule – MPS), плану завантаження потужностей (ПЗП, Capacity Requirements Plan – CRP), плану потреб у матеріалах (ППМ, Material Requirements Plan – MRP).

MPS є об'ємним календарним планом. Його горизонт планування визначається технологічними циклами виробництва продуктів та закупівельними циклами постачання матеріалів. План формується як правило з розбивкою по тижнях по номенклатурі продукції в кількісних показниках.

Два інших плани CRP та MRP є виконавчими планами. Перший вказує порядок виконання операцій у виробництві. Розробляється з горизонтом в місяць з розбивкою по днях чи виробничих змінах. Регламентує послідовність виконання технологічних операцій та технологічних процесів з прив'язкою до конкретного технологічного обладнання (робочих центрів) та часу виконання. Другий план (Material Requirements Plan – MRP) вказує порядок виконання операцій в сфері постачання у виробництво необхідних закупівель.

них комплектуючих та матеріалів. Розробляється з горизонтом від місяця до декількох місяців (відповідно до максимальних циклів постачання окремих матеріалів) з розбивкою по днях. Постачання конкретних партій конкретних матеріалів вказується з призначенням постачальників для кожної поставки.

Для формування CRP та MRP потрібні відповідні виробничі та постачальні нормативи: робочі центри, графіки їх роботи і відповідно фонди робочого часу, нормативи продуктивності, реєстри постачальників, цикли постачання тощо.

Напрямок організації та обліку виконання представлений в MRP II відповідними процесами. Виконанню підлягають CRP та MRP.

На рисунку 1 позначені зворотні зв'язки, які є обов'язковими для системи управління, якою є систе-

ма MRP II. Якщо нема проблем з виконанням планів на рівні організації та обліку, управління передається на нижній рівень планування – формування CRP та MRP. Якщо проблеми є на рівнях організації та обліку або на нижніх рівнях, може бути необхідним пере-планувати MPS.

Формування MPS займає центральне місце в оперативному плануванні MRP II, це гарно видно на рис. 1. Тому змістом нашого дослідження є вдосконалення та розвиток MRP II в цій ланці оперативного планування, але для цього треба розглянути більш докладно саму процедуру та перелік дій формування MPS.

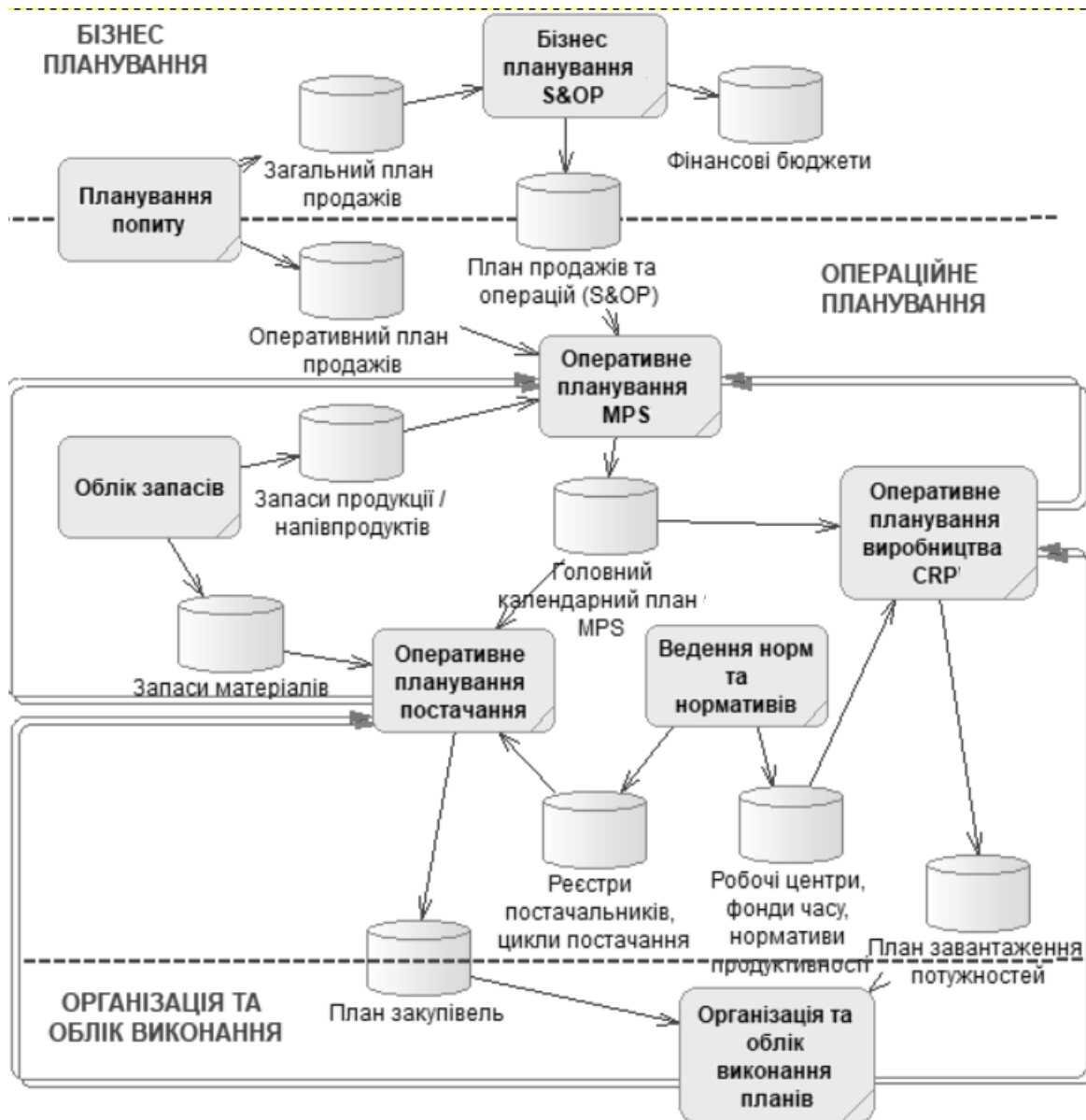


Рисунок 1 – Логіка роботи MRP II

У відповідності до [2, 3] схематично процедура формування MPS з переліком факторів та отриманих результатів представлена на рис. 2.

MPS складається з окремих позицій – планових замовлень (planned orders).

Генератор MPS – це процедура формування сукупності планових замовлень для різних продуктів (напівпродуктів) з урахуванням означених на рисунку факторів:

- бізнес плану MRP II – S&OP;
- інформації про замовлення покупців (клієнтів) та прогнози продажів продуктів;
- інформації про наявні запаси готової продукції та матеріалів;
- значення параметрів (модифікаторів) планування.

Формування MPS робиться в загальному випадку в два етапи.

На першому етапі формуються планові замовлення для продуктів. Вхідною інформацією для розрахунку є план продажів (закази покупців та прогнози продажів), план продажів та операцій, інформація про прогноз запасів продуктів на початок інтервалу планування. Робиться прогнозування падіння запасів готових продуктів та знаходяться для кожного продукту точки поповнення запасу – інтервали плану, які передують інтервалам з від’ємним значенням прогнозу запасу. Кількість у плановому замовленні приймається рівною дефіциту в наступному чи в декількох наступних інтервалах. Цей прийом розрахунку кількості має назву розрахунку по «переслідуванню дефіциту».

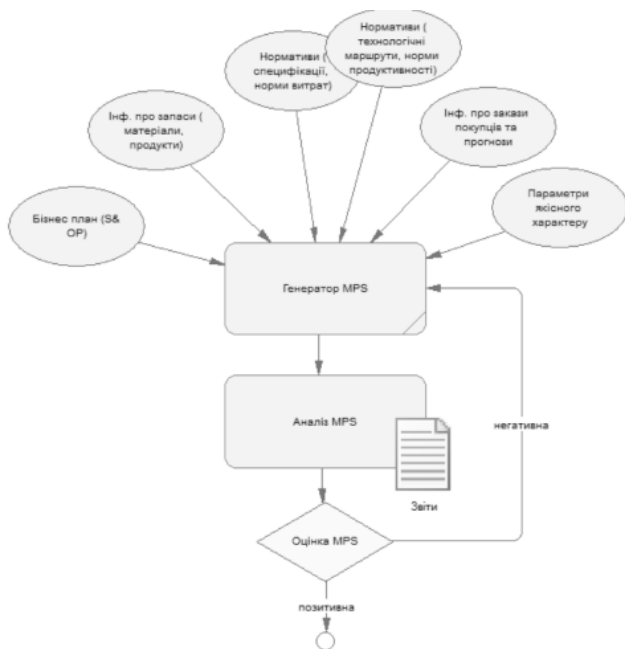


Рисунок 2 – Процедура формування MPS

На другому етапі процедури генерації MPS робиться «прогін» формування MRP. З урахуванням специфікацій продуктів розраховується кількості ви-

робництва напівпродуктів для виробництва вже спланованих позицій продуктів. Планові кількості напівпродуктів обраховуються на основі планових кількостей продуктів та нормативів витрат матеріалів або напівпродуктів з відповідної специфікації.

Об’єктом досліджень є процес розробки MPS на базі стандарту MRP II. Відповідно до стандарту, план розраховується, а потім перевіряється на припустимість, тобто на дотримання обмежень по виробничих потужностях і доступності матеріалів.

Суб’єктом досліджень є алгоритм розробки MPS. В результаті запропонованого вдосконалення він має відразу задовольняти вказані обмеження, якщо це можливо.

Метою дослідження є збільшення ефективності і спрощення процедури розробки MPS, що є важливим, зважаючи на високі вимоги стандарту MRP II до рівня організованості підприємства.

В цілому представлена вище процедура формування MPS є багатоетапною з необхідністю виконання цих етапів в рамках багатоітеративного процесу. На погляд авторів, цього можливо уникнути, якщо задачу формування MPS звести до задачі лінійного програмування з сукупністю лінійних обмежень та лінійною цільовою функцією.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Розглянемо формалізацію задачі формування MPS у вигляді задачі лінійного програмування. Прийmemo, що формування MPS виконується в зоні планування, яка розбита на окремі інтервали.

Змінними задачі лінійного програмування є планові кількості поповнення запасу певного продукту в певному інтервалі зони планування p/p_{pt} , $p = 1, \dots, P$, $t = 1, \dots, T$.

Обмеження задачі:

1. Зміни задачі (планові кількості поповнень) не повинні бути менше нуля, це тривіальне обмеження.

$$p/p_{pt} \geq 0, p = 1, \dots, P, t = 1, \dots, T. \quad (1)$$

2. Календарні запаси продуктів (product stock – запас продукту) не повинні бути негативними.

$$pst_{pt} \geq 0, p = 1, \dots, P, t = 1, \dots, T. \quad (2)$$

3. Сумарні об’єми виробництва повинні дорівнювати підсумковому первісному дефіциту (позначимо його pst^*_{pT+1}) – дефіциту в останньому інтервалі зони планування для кожного продукту p .

$$\sum_{t=1}^T p/p_{pt} = -pst^*_{pT+1}, p = 1, \dots, P, \quad (3)$$

де pst^*_{pt} – прогнозний запас продукту p в першому інтервалі зони планування; $pst^*_{pt} = pst^*_{p,t-1} - (sal_{pt} + sop_{pt})$ – запас продукту p в довільному інтервалі $t = 2, \dots, T$.

4. Потреба в часі робочого центру не є більшою ніж його фонд часу – фонд робочого центру для всіх робочих центрів ($w = 1, \dots, W$) та для всіх інтервалів зони планування ($t = 1, \dots, T$).

$$rqw_{wt} \leq fnw_{wp}, w = 1, \dots, W, t = 1, \dots, T, \quad (4)$$

$$\text{де } rqw_{wt} = \sum_{s=1}^t \sum_{p=1}^P \frac{plp_{ps}}{nw_{pw}}, w = 1, \dots, W, p = 1, \dots, P,$$

$$fnw_{wt} = \sum_{s=1}^t fnt_{ws}, w = 1, \dots, W, p = 1, \dots, P.$$

Таким чином, fnw_{wt} – сумарна, починаючи з інтервалу 1 до інтервалу t , потреба в робочому часі робочого центру w .

stm_{m1} – прогнозний рівень запасу матеріалу $m = 1, \dots, M$ в першому інтервалі зони планування, визначається попереднім плановим періодом, для інтервалів 2, ..., T :

– якщо t менше чи дорівнює циклу постачання dc_m , $stm_{mt} = stm_{mt-1}$;

– якщо t більше dc_m , тоді $stm_{mt} = stm_{mt-1} + plm_m$.

5. Планові кількості витрат матеріалів (material requirement) на виробництво є не більшими ніж планові запаси матеріалів (material stock) для кожного інтервалу $t = 1, \dots, T$ зони планування та кожного матеріалу m :

$$rqm_{mt} \leq stm_{mt}, m = 1, \dots, M, t = 1, \dots, T, \quad (5)$$

$$\text{де } rqm_{mt} = \sum_{s=1}^t \sum_{p=1}^P plp_{ps} * nm_{pm}, m = 1, \dots, M, t = 1, \dots, T.$$

Запас матеріалу на протязі циклу постачання є незмінним, він дорівнює запасу першого інтервалу; для інтервалів, які лежать правіше циклу постачання, запас збільшується на величину планової партії поставки.

6. Цільова функція задачі – максимізація завантаження потужності всіх робочих центрів:

$$\sum_{w=1}^W \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T \frac{plp_{pt}}{nw_{pw}} \rightarrow \max. \quad (6)$$

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Після створення методики MRP е 70-х роках минулого сторіччя паралельно розвивались інші підходи до управління виробництвом. Відмітимо Теорію обмежень (Theory of Constraints, ToC) [4, 5], та JIT/Lean [6, 7] які подекуди сприймаються як альтернативи MRP II. На нашу думку, Теорія обмежень концентрується лише на одному, щоправда, важливому аспекті управління виробництвом: пошуку і оптимізації «вузьких місць» серед наявних робочих центрів, і не претендує на цілісну методику управління з розрахунком вичерпних планів, як MRP II. Що стосується JIT/Lean,

то в фокусі цього підходу – ритмічне постачання матеріалів на робочі місця; це працює, якщо на складі вже є потрібні матеріали; відповідно, хтось має подбати про матеріали з довгими циклами закупівлі. Таким чином, JIT/Lean працює в рамках, створених завдяки MRP.

У XXI сторіччі методика MRP II має кілька напрямків подальшого розвитку. Мають місце спроби вписати її в контекст Industry 4.0 [8], застосовуючи сучасні математичні, технічні і програмні засоби: кібер-фізичні системи (cyber-physical systems, CPSs), Інтернет речей (the Internet of Things, IoT), хмарні обчислення, великі дані, імітаційне моделювання, штучний інтелект. Якщо, наприклад, очевидна доцільність застосування імітаційного моделювання в досліджених алгоритмах MRP для порівняння варіантів плану, то доцільність застосування цього методу в поточному процесі планування викликає сумніви навіть у авторів [8], адже оперативність і зрозумілість процесу MRP теж є його суттєвими перевагами.

В роботі [9] автори показали шляхом експериментів, що в разі великої кількості різних замовлень попередня їх класифікація по трьох групах (ABC inventory analysis) дозволяє зменшити кількість переналадок на 16%.

Має місце спроба об'єднати в одному методі MRP, JIT/Lean і ToC, що призвело до появи методики управління виробництвом Demand Driven MRP (DDMRP) [10–13]. Вона полягає у тому, що на основі даних потоку виробничих замовлень для продуктів і робочих центрів створюються місця накопичення продуктів (буфери), не лише для «вузьких місць», як у ToC. Динамічно розраховуються три рівні запасів для кожного буфера (мінімальний, середній, максимальний). У процесі планування планові замовлення на виробництво або постачання матеріалів поповнюють планові залишки буфера, спрощено кажучи, з мінімального до максимального рівня, аналогічно тому, як у JIT порожній буфер ініціює поставку матеріалу з попереднього робочого центру.

На наш погляд, в умовах непередбачуваності і невизначеності у виробничій сфері в Україні, які спричинені зовнішніми обставинами, складно пропагувати методи управління, в основі яких лежить Just In Time. Ймовірно, опора на очевидність і здоровий глузд, а також метод прямих послідовних розрахунків низки планів, характерні для стандарту MRP II, є вирішальними перевагами в умовах, коли необхідно довго підтримувати високий рівень організованості у виробництві. Починати треба саме зі стандарту MRP II. Проте бракує наукових робіт щодо вдосконалень самого стандарту MRP II, які би не висували додаткових організаційних вимог для підприємства. Саме на це спрямована наша стаття. У роботі [15] розглянута змістовна постановка задачі, а в даній роботі сформульована математична модель задачі і додані нові можливості.

3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Тут та далі всі позначення будемо намагатись робити мнемонічними та додатково вказувати це. Наприклад, plp (production planning – планування виробництва).

Запас продукту p на початок довільного інтервалу $t = 2, \dots, T$ зони планування дорівнює запасу в попередньому інтервалі (pst_{pt-1}) за відніманням потреби за планом продажів (sal_{pt}) та планом продажів та операцій (sop_{pt}) та додаванням плану виробництва (plp_{pt}):

$$pst_{pt} = pst_{p1} - \sum_{s=1}^t (sal_{ps} + sop_{ps} - plp_{ps}).$$

Обмеження (3) надає задачі властивості: виробляти стільки, скільки вимагають план продажів та план продажів і операцій.

Запас продукту pst^* без урахування поповнення поступово переходить у дефіцит зі знаком мінус.

Представлення цільової функції у вигляді (6) має мало сенсу, тому що з урахуванням (3)

$$\sum_{w=1}^W \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T \frac{plp_{pt}}{nw_{pw}} = \sum_{w=1}^W \sum_{p=1}^P \frac{-pst^*_{pt}}{nw_{pw}} = \text{const}.$$

Але можна ввести вагові коефіцієнти k_t (умовно назвемо їх «пріоритетами зсуву плану виробництва») та розглянути цільову функцію

$$\sum_{w=1}^W \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T k_t \frac{plp_{pt}}{nw_{pw}} \rightarrow \max. \quad (6a)$$

Якщо, наприклад, $k_t = 2^t$, план виробництва буде розподілятися в зоні планування в більш ранніх інтервалах. Якщо, наприклад, $k_t = 2^{(T-t+1)}$, план виробництва буде розподілятися в зоні планування в більш пізніх інтервалах. Таким чином, ми можемо враховувати, що для підприємства краще: виконувати план якомога пізніше (перший ряд коефіцієнтів, це відповідає принципам JIT/Lean), чи якомога раніше (другий ряд коефіцієнтів, це відповідає врахуванню часової вартості грошей).

Задача (1–5, 6a) є базовою задачею формування MPS у вигляді задачі лінійного програмування (назвемо її задачею варіанту 0).

Сформулюємо ще додаткові обмеження задачі, які дозволять отримати додаткові можливості обмеження розміщення поповнень продуктів в інтервалах зони планування. З метою надання дозволів або заборон на розміщення точок поповнення запасів продуктів введемо величини plp_{pt}^{\max} , $p = 1 \dots P$, $t = 1, \dots, T$ – верхню межу плану виробництва.

$$plp_{pt} \leq plp_{pt}^{\max}, p = 1, \dots, P, t = 1, \dots, T. \quad (7)$$

Нехай PLP – велика константа, а T_p^* – інтервал, що безпосередньо передуює виникненню дефіциту продукту p .

Варіант 1. І нехай для всіх продуктів

$$plp_{pt}^{\max} = \begin{cases} 0, & \text{якщо } t < T_p^*, \\ PLP & \text{у протилежному випадку.} \end{cases} \quad (8)$$

Тоді інтервали поповнення запасів продуктів можуть бути безпосередньо перед виникненням його дефіциту або пізніше.

Задача (1–5, 6a, 7a, 8) є розвитком базової задачі формування MPS у вигляді задачі лінійного програмування. Цю задачу назвемо задачею формування MPS з розміщенням плану відповідно до інтервалу дефіциту. Її також будемо називати задачею варіанту 1.

Варіант 2. Нехай для всіх продуктів

$$plp_{pt}^{\max} = \begin{cases} PLP, & \text{якщо } t = T_p^* \text{ та } \text{mod}(t - T_p^*, T_p^*) = 0, \\ 0 & \text{у протилежному випадку.} \end{cases} \quad (9)$$

Цю задачу назвемо задачею формування MPS з періодичним розміщенням поповнення запасів продуктів, або задачею варіанту 2.

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Апробацію задачі формування MPS проведемо в середовищі MS Excel за допомогою ad-on Solver (Розв'язувач задач). Прототипування різних задач за допомогою Excel є широко розповсюдженим засобом практичної перевірки працездатності теоретичних положень [14]. Ця модель розглянута також у [15] переважно під економічним кутом зору. Поточна модель на відміну від попередньої враховує можливу потребу зсунути план до початку або до кінця зони планування за допомогою коефіцієнтів зважування цільової функції по інтервалах. Апробацію проведемо у наступному порядку.

– Проведемо апробацію задачі варіанту 0 (базової задачі). Спочатку для цільової функції (6a) з $k_t = 2^t$, $t = 1, \dots, T$, потім з $k_t = 2^{(T-t+1)}$, $t = 1, \dots, T$.

– Проведемо апробацію задачі варіанту 1 (з розміщенням плану відповідно до інтервалу дефіциту), це буде виконано зі урахуванням обмеження (8).

– Проведемо апробацію задачі варіанту 2 (з розміщенням плану в сукупності фіксованих точок поповнення), це буде виконано зі урахуванням обмеження (9).

У прикладі розглядається модель, яка містить три продукти (П1, П2, П3), один робочий центр та один матеріал. Зона планування – десять інтервалів. Посилання на приклад є в розділі Обговорення.

У комірках B2:K4 (аркуш «Базова модель») розташовані кількості плану продажів. У комірках C7:K9 – кількості початкового зменшення запасів, з урахуванням початкових запасів продуктів (B7:B9) та плану продажів. У комірках L7:L9 – кінцевий дефіцит. У комірках B12:K14 розташовані значення плану виробництва, який підлягає розрахунку (це змінні моделі). В L12:L14 – сумарна планова кількість виробництва. У комірках B18:K20 – планові кількості запасів з урахуванням плану виробництва.

В рядках 22:24 – нормативи витрат, постачання матеріалів, потрібна потужність робочого центру та його фонду часу. Комірки C23:C25 – норми витрат матеріалу на одиниці продуктів. Комірка F22 – кількість матеріалу в партії постачання. Комірка F23 – кількість інтервалів у циклі постачання. Комірки I23:I25 – норми продуктивності робочого центру по продуктах. Комірка K22 містить фонд часу робочого центру в кожному інтервалі.

В комірках B28:K30 розраховані кількості витрат матеріалу на план виробництва, а в комірках B31:K31 – підсумок потреби цих витрат. У комірках B32:K32 накопичувальний підсумок цих витрат. В комірках B33:K33 – плановий запас матеріалу. В комірку B33 – значення початкового запасу матеріалу, яке визначає незмінний рівень запасу впродовж циклу постачання, після чого плановий рівень запасу зростає у кожному інтервалі на кількість матеріалу в партії постачання.

Розглянемо апробацію варіанту 0. Вхідні дані моделі наведені на рис. 3.

В комірках B36:K38 розташовані розраховані значення завантаження (в годинах) робочого центру по продуктах відповідно до плану виробництва. В комірках B39:K39 розрахований підсумок завантаження. В комірках B40:K40 розрахований накопичувальний підсумок завантаження. В комірках B41:K41 розрахований плановий накопичувальний фонд часу, який у кожному інтервалі зростає на величину його фонду часу.

У комірках B44:K44 розташовані ваги цільової функції, а в B45:K45 – зважене завантаження робочого центру по інтервалах (добуток комірки з рядку 44 на час завантаження з рядку 39).

У комірку L44 цільова функція – зважена сума завантаження робочого центру по інтервалах.

У правій частині аркуша Excel розташовані графік планового падіння запасів, графік порівняння планової кількості витрат матеріалу з його плановим запасом, графік порівняння фонду часу з плановим часом завантаження робочого центру.

За допомогою Розв’язувача задач (Дані > Розв’язувач) можна визначити модель задачі лінійного програмування (рис. 4).

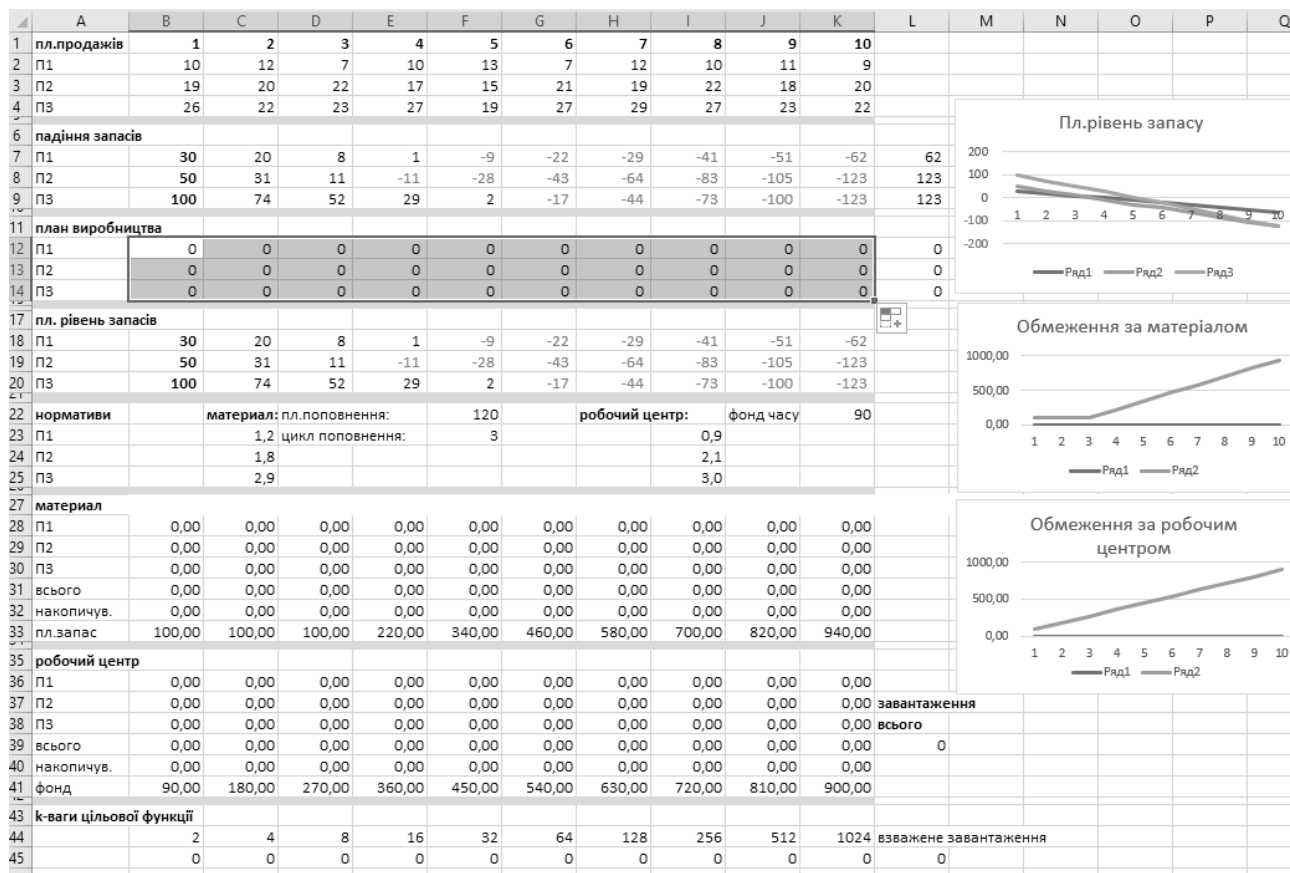


Рисунок 3 – Вхідні дані моделі варіанту 0 ([15])

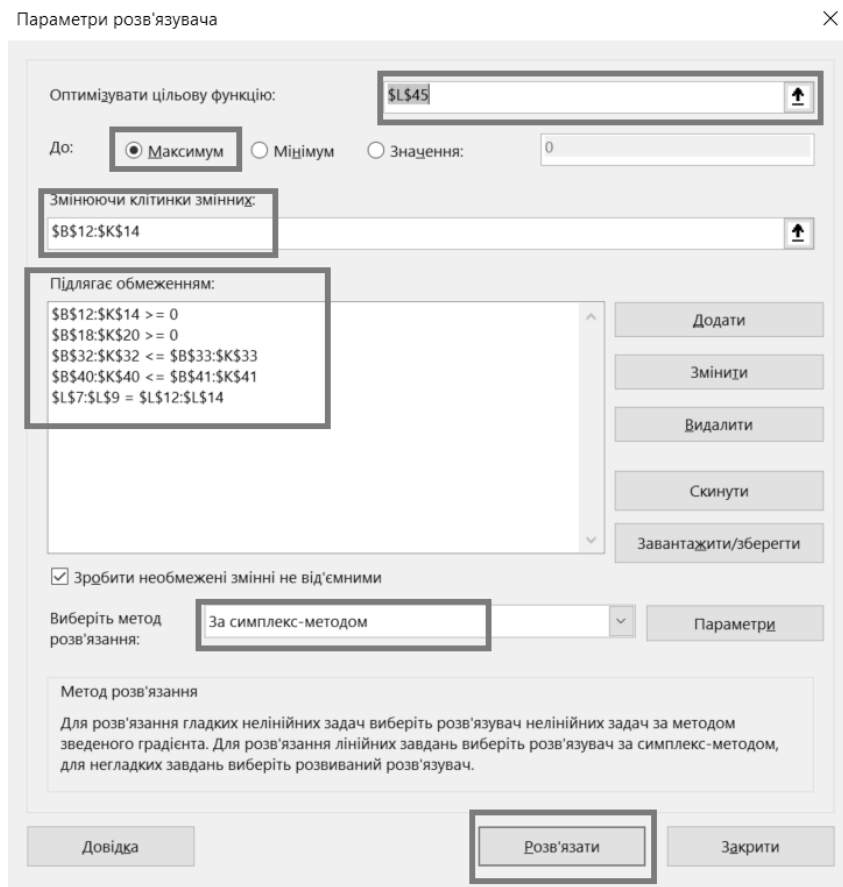


Рисунок 4 – Модель задачі варіанту 0

В такому вигляді задача сформульована в [15], лише критерій модифіковано, аби впливати на зсув плану раніше чи пізніше.

Результат розрахунку варіанту 0 MPS (зсув плану якнайпізніше) представлений на рис.8.

Після розв'язання задачі (кнопка «Розв'язати») отримуємо план поповнень запасів продуктів в комірках В12:К14.

Проведемо розрахунок плану виробництва для задачі варіанту 0 з вагами $k_t = 2^{(T-t)}$, $t = 1, \dots, T$ (зсув плану якнайраніше). Для цього змінимо значення в комірках В44:К44 на рис. 3. Результат розрахунку MPS варіанту 0 зі зсувом плану якнайраніше – на рис. 9.

Апробація варіанту 1. Щоб провести апробацію моделі, яка відповідає варіанту 1, треба додати до обмежень моделі обмеження (7), (8). Для цього до вхідних даних додано комірки В48:К50 зі значеннями обмежень плану виробництва зверху (рис. 5). Змінена модель показана на рис. 6.

Апробація варіанту 2. Для проведення апробації моделі, яка відповідає варіанту 2, треба змінити обмеження моделі (8) на обмеження (9). Для цього введено дані в комірках В48:Л50, які задають цикли поповнення запасу (рис. 7).

47	обмеження зверху										
48	п1	0	0	0	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000
49	п2	0	0	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000
50	п3	0	0	0	0	100000	100000	100000	100000	100000	100000

Рисунок 5 – Вхідні дані моделі, які задають обмеження (8)

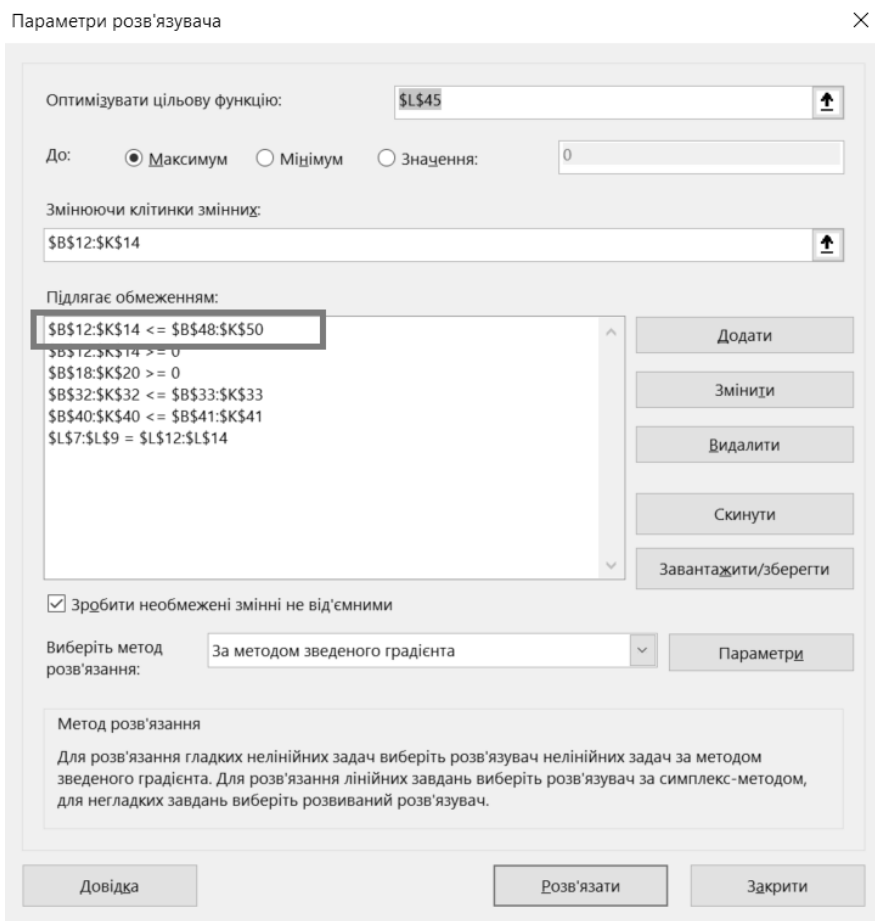


Рисунок 6 – Обмеження (7), яке додано в модель

47	обмеження зверху											цикли поповнення
48	П1	0	0	100000	0	0	100000	0	0	100000	0	2
49	П2	0	0	100000	0	0	100000	0	0	100000	0	3
50	П3	0	0	0	0	100000	0	0	100000	0	0	3
51												

Рисунок 7 – Вхідні дані моделі, які відповідають обмеженню (9) з періодичним поповненням

5 РЕЗУЛЬТАТИ

На рис. 8 надані результати розрахунку плану варіанту 0 зі зсувом його наскільки можливо пізніше.

Можна переконатись у дотриманні обмежень 1–5 з переліку обмежень з розділу 1:

1. B12:K14 >= 0;
2. B18:K20 >= 0;
3. B32:K32 <= B33:K33;
4. B40:K40 <= B41:K41;
5. L7:L9 = L12:L14.

Останні три обмеження представлені на діаграмах. Сумарні обсяги виробництва дорівнюють кінцевому дефіциту.

На рис. 9 представлені результати розрахунку плану варіанту 0 зі зсувом його наскільки можливо раніше. Як бачимо, поповнення продуктів передбачені з

початку зони планування, якщо ресурси дозволяють (як для продукту П2), але з точки зору JIT/Lean це найбільший гріх. В той же час два останні інтервали взагалі не використовуються для виробництва, на відміну від плану на рис.8 (зсув плану якнайпізніше), де для виробництва не використовуються два перші інтервали.

В останньому інтервалі виробництво не планується, бо у нього нема споживачів – плану продажу наступного інтервалу. Це виправиться само собою в разі «ковзаючого» планування, коли по завершенню інтервалу зона планування зміщається на один інтервал.

На рис. 10 – результат розрахунку варіанту 1 плану (поповнення починаються до першого дефіциту).

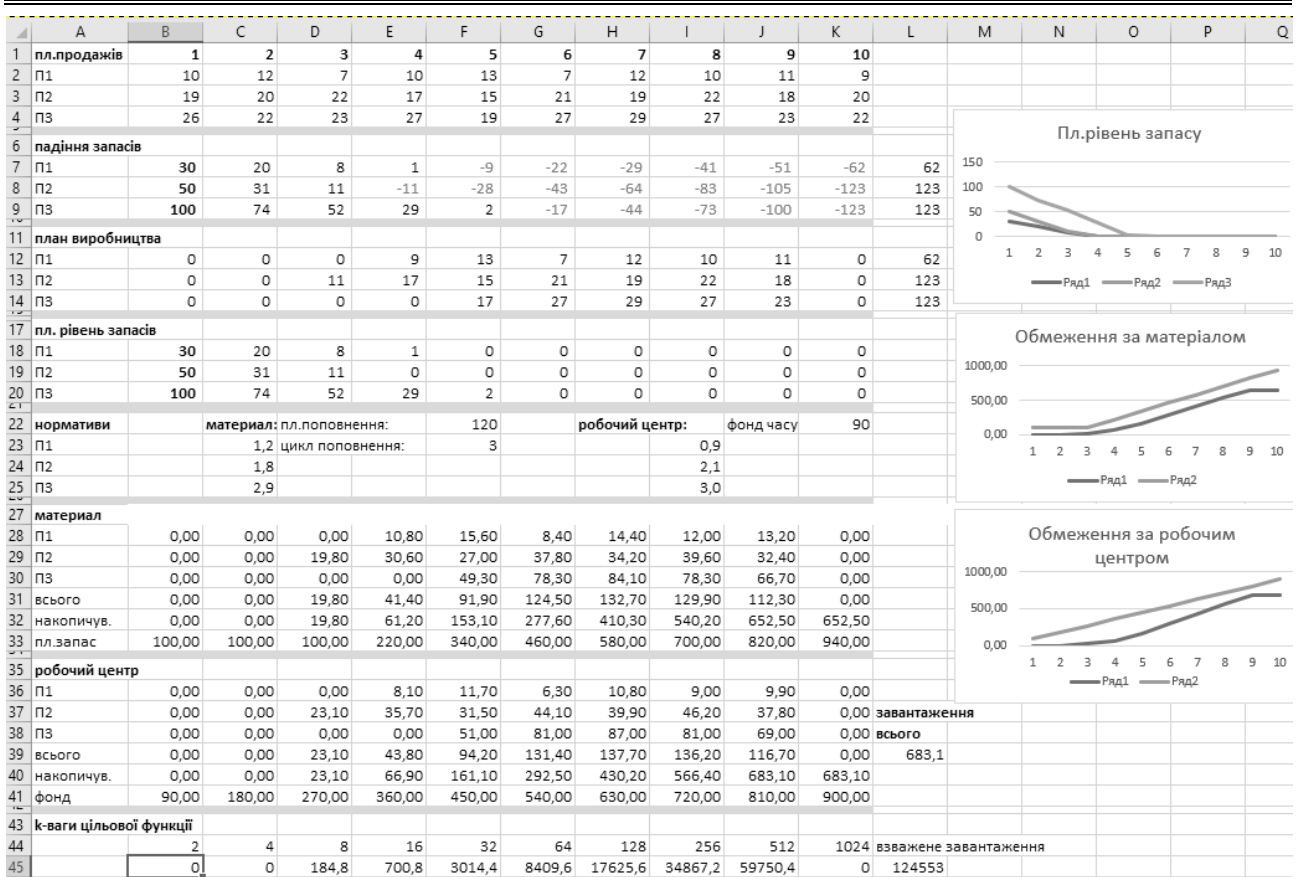


Рисунок 8 – Результати розв'язання задачі варіанту 0 з вагами $k_t = 2^t$, $t = 1, \dots, T$ (зсув плану якнайпізніше)

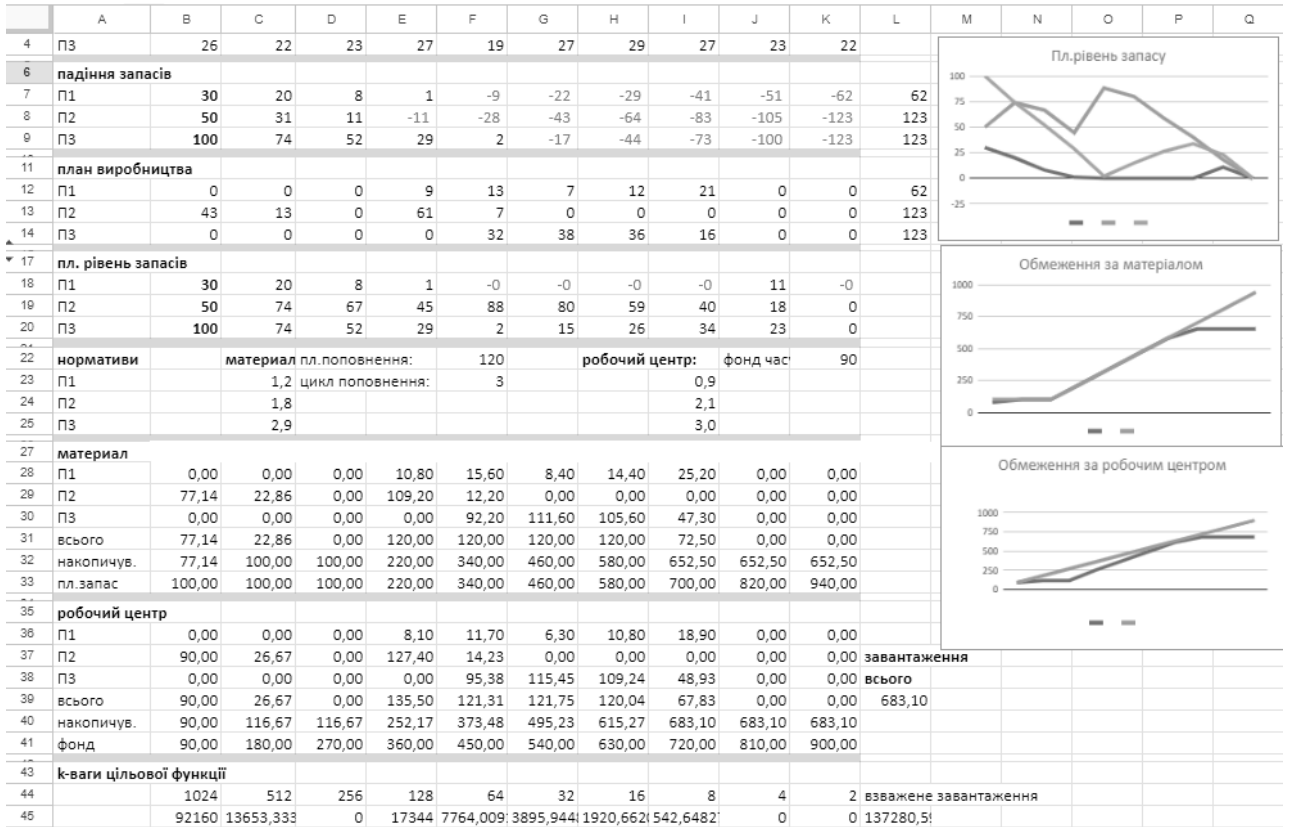


Рисунок 9 – Результати задачі варіанту 0 з вагами $k_t = 2^{T-t+1}$, $t = 1, \dots, T$ (зсув плану якнайраніше)

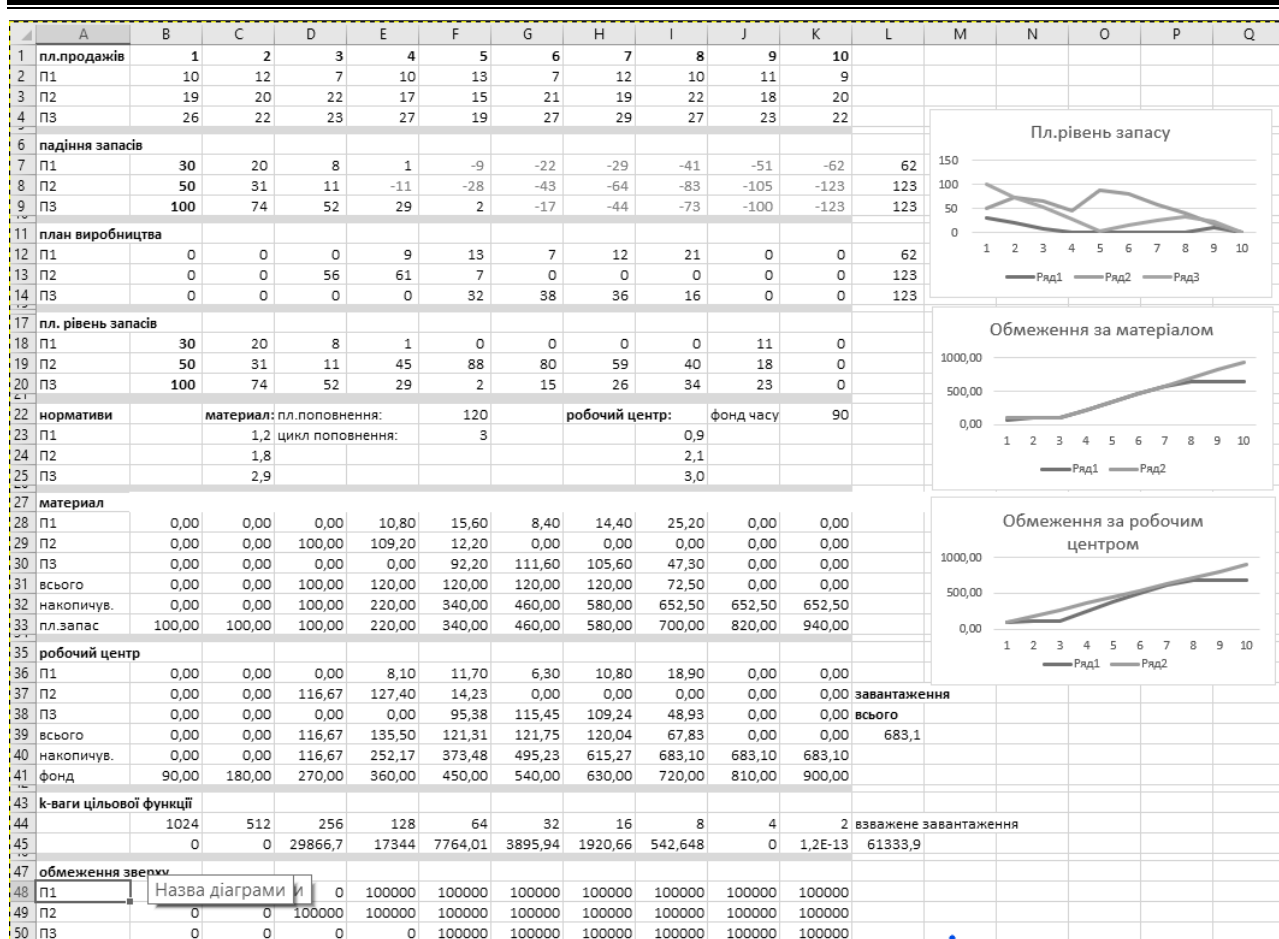


Рисунок 10 – Результати розв’язання задачі варіанту 1

Як бачимо, всі ненульові значення поповнень лежать раніше інтервалів першого дефіциту. Інші обмеження задачі (обмеження 1–5) теж не порушені.

Результати розрахунку варіанту плану 2 з періодичним поповненням представлені на рис. 11.

Як видно, обмеження задачі (обмеження 1–5) не порушені. Останні три обмеження представлені на графіках. Сумарні об’єми виробництва дорівнюють кінцевому дефіциту. План обрахований при вагах цільової функції $k_t = 2(T-t+1)$, $t = 1, \dots, T$, що вимагає розміщати поповнення як можна раніше, але всі ненульові значення поповнень лежать в дозволених періодичних інтервалах.

6 ОБГОВОРЕННЯ

Найвний план продажів залишає мало варіантів для варіацій MPS. У межах наявних степеней вільності результат розрахунку реагує на «тиск» цільової функції в сторону пізнішого (рис. 8) або ранішого (рис. 9) виробництва, що видно по рядках 12–14 розрахованого плану, особливо на продукті P2. Відповідно до сформульованої постановки задачі всі варіанти плану, які задовольняють обмеження, економічно рівнозначні. Симплекс-метод використовується для пошуку припустимого рішення в умовах обмежень. Аби врахувати часову вартість більш раннього виробництва продуктів, треба припустити, що покупець виплачує

виробнику певну премію (надбавку) за більш раннє відвантаження продукції.

Проведена апробація розрахунків головного календарного плану виробництва не обмежується наведеними трьома варіантами. Більш привабливою здається ідея розрахунків з так званими динамічними точками поповнення запасів, коли починаючи з першої точки поповнення планується випуск продуктів з максимальним використанням виробничих ресурсів – по принципу «стільки, скільки можливо»; потім розраховується падіння запасів, виникає наступна точка поповнення і так далі. Але це є темою подальших досліджень. У процесі планування на підприємстві наступним кроком має бути перетворення плану поповнень продукції («виробляти розраховану кількість не пізніше розрахованих інтервалів») у план виробництва («виробляти розраховану кількість у розрахованих інтервалах»). Основою такого плану має бути розрахований погодинний розклад завантаження робочих центрів з урахуванням такого значного фактору як час переналадки обладнання.

Розглянутий приклад у вигляді xlsx-файлу доступний за посиланням <https://docs.google.com/spreadsheets/d/1feEKz4oZQAonCibYymN0YVtk6r8DYJQb/edit?usp=sharing&oid=114728324013759458622&trpof=true&sd=true>.

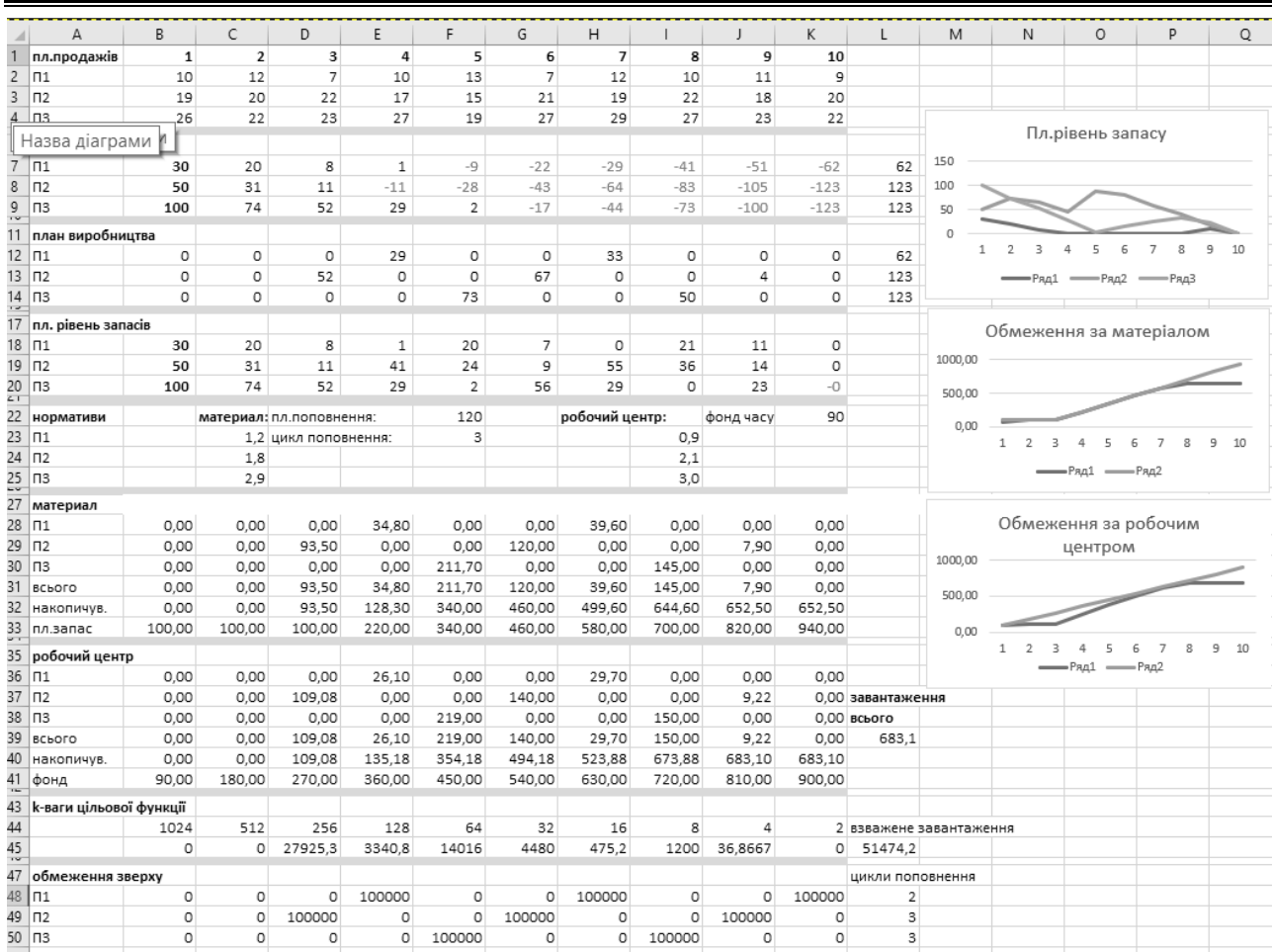


Рисунок 11 – Результати розв’язання задачі варіанту 2

ВИСНОВКИ

Запропоновано вдосконалення стандарту планування ресурсів підприємства MRP II, а саме розрахунку плану MPS.

Наукова новизна результатів: застосування лінійного програмування в алгоритмі, який традиційно має характер прямого послідовного розрахунку, дозволяє об’єднати два його кроки (генерація плану і перевірка його припустимості) в один, при цьому генерується MPS, який одразу задовольняє обмеження виробничої потужності і доступності матеріалів, якщо це в принципі можливо.

Практична значимість результатів полягає в тому, що запропонована модифікація алгоритму спрощує процес створення MPS, що важливо з огляду на високі вимоги до організаційної спроможності підприємства, які висуває стандарт MRP II.

Напрямами подальших досліджень ми бачимо включення в процедуру створення MPS розрахунку денного або змінного розкладу обробки партій продукції робочими центрами з урахуванням часу переналадок, який часто є суттєвим фактором.

ПОДЯКИ

Робота виконана в рамках ініціативної наукової теми Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» «Створення гібридної обчислювальної технології побудови квазі-формалізованої моделі прогнозування в умовах неоднорідності даних та ненормативних відхилень в системах організаційного управління» (державний реєстраційний номер 0117U002448). Автори висловлюють щире подяку колективу київського заводу «ФАРМАК», який у свій час підтримав одного з авторів у впровадженні на підприємстві стандарту управління MRP II.

ЛІТЕРАТУРА

1. APICS Dictionary, 16th Edition. [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.ascm.org/apics-dictionary-16th-edition/> (appeal date: 09.05.2024) – Title from screen.
2. Landvater D. MRP II Standard System. A Handbook for Manufacturing Software Survival / D. Landvater, G. Christopher. – John Wiley & Sons Inc., 1989. – 315 p.
3. Browne J. Production Management Systems: An Integrated Perspective / J. Browne, J. Harhen, J. Shivnan. – Boston : Addison-Wesley, 1996. – 425 p.
4. Goldratt E. What is this Thing Called Theory of Constraints and how Should it be Implemented? / E. Goldratt. – North River Press, 1990. – 162 p.

5. Schragenheim E. Manufacturing at Warp Speed. Optimizing Supply Chain Financial Performance / E. Schragenheim, W. Dettmer. – London, New York, Washington : CRC Press, 2001. – 333 p.
6. Ohno Taiichi Just-In-Time for Today and Tomorrow / Taiichi Ohno, Setsuo Mito. – Productivity Press, 1988. – 145 p.
7. Yasuhiro M. Toyota Production System, An Integrated Approach to Just-In-Time / M. Yasuhiro. – Springer Science & Business Media, 2012. – 424 p.
8. Modeling of the Master Production Schedule for the Digital Transition of Manufacturing SMEs in the Context of Industry 4.0 / [E. Tobon-Valencia, S. Lamouri, R. Pellerin et al.] // Sustainability. – 2022. – № 14. – P. 12562. Access mode: <https://doi.org/10.3390/su141912562>
9. Setting MRP Parameters and Optimizing the Production Planning Process / [M. Malindzakova, P. Garaj, J. Trp̃cevska et al.] // Processes. – 2022. – № 10. – P. 690. Access mode: <https://doi.org/10.3390/pr10040690>
10. Ptak C. A. Orlicky's Material Requirements Planning, Third Edition / C. A. Ptak, C. Smith. – McGraw Hill Professional, 2011. – 352 p.
11. Demand Driven Material Requirements Planning (DDMRP): A systematic review and classification / [A. Az-zamouri, P. Baptiste, G. Dessevre et al.] // Journal of Industrial Engineering and Management. – 2021. – № 14(3). – P. 439–456. Access mode: <https://doi.org/10.3926/jiem.3331>
12. Orue A. Demand Driven MRP – The need to standardise an implementation process / A. Orue, A. Lizarralde, A. Kortabarria // International Journal of Production Management and Engineering. – 2020. – Vol. 8, Issue 2. – P. 65–73. Access mode: <https://doi.org/10.4995/ijpme.2020.12737>.
13. An empirical comparison of MRPII and Demand-Driven MRP / [R. Miclo, F. Fontanili, M. Luras et al.] // IFAC-PapersOnLine. – 2016. – Vol. 49. – Issue 12. – P. 1725–1730.
14. Effective Prototyping with Excel: A Practical Handbook for Developers and Designers / [N. Berger, M. Arent, J. Arno-vitz, F. Sampson]. – Elsevier, 2009. – 240 p.
15. Новінський В. П. Застосування методу лінійного програмування в процедурах планування MRP II / В. П. Новінський, В. Д. Попенко // Економічний простір. – 2024. – № 189. – С. 196–206. Режим доступу: <https://doi.org/10.32782/2224-6282/189-36>
Стаття надійшла до редакції 12.03.2024.
Після доробки 10.05.2024.

UDC 658.5

FORMALIZATION OF THE MASTER PRODUCTION SCHEDULE FORMATION TASK IN THE MRP II PLANNING SYSTEM

Novinskyi V. P. – PhD, Associate Professor of the Department of Informatics and Software Engineering, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine.

Popenko V. D. – PhD, Associate Professor of the Department of Information Systems and Technologies, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine.

ABSTRACT

Context. Considered the task of forming the Master Production Schedule in the process of production management based on the MRP II standard. The object of the study is the algorithm for forming this plan for further planning of materials supply for production and the organization of production itself.

Objective. Improvement of the algorithm of Master Production Schedule formation to avoid unnecessary stages of the algorithm.

Method. It is proposed to improve the algorithm of the Master Production Schedule formation. It consists in simultaneously taking into account the requirements for timely delivery of products to customers, limitations regarding the capacities of the company's work centers, and limitations regarding the duration of procurement cycles in the process of supplying materials. The MRP II standard envisages first planning the terms and quantity of product releases, and only at the next step checking the formed plan for admissibility with regard to the required time of operation of the equipment and the availability of the required materials quantity. In case of the calculated plan limitations violation, it is necessary to either plan and implement measures to overcome the specified limitations, i.e. organize additional shifts for work centers, use additional capacities, speed up the delivery of some materials, or reduce the sales plan. All these measures are associated with additional costs. In the proposed version of the planning process, this should be done only if the algorithm does not find an acceptable solution. The task of forming the Master Production Schedule, which is central to the MRP standard, is formulated by the authors as a linear programming task due to the linear nature of the specified restrictions on production capacities and materials. In particular, in the case of sufficiently severe restrictions on the work centers capacity, the plan for replenishing the remaining products from production is shifted to earlier planning intervals and only then rests against the restrictions. Several strategies are proposed for planning replenishments from the production of products stock.

Results. The developed algorithms are implemented in the form of Microsoft Excel templates and are available for use in order to deepen the understanding of the MRP II standard. They are also used in the educational process.

Conclusions. Approbation of the solution by the authors confirmed its workability, as well as the expediency of implementing the developed modification of the MRP II planning process into the software of leading ERP class systems suppliers. Prospects for further research may consist in a comparative analysis of the proposed options for placement of products replenishment from production, through economic evaluation of these options, as well as through simulation modeling.

KEYWORDS: planning, production, materials, products, intermediate products, MRP II.

REFERENCES

1. APICS Dictionary, 16th Edition. [Electronic resource]. Access mode: <https://www.ascm.org/apics-dictionary-16th-edition/> (appel date: 09.05.2024). Title from screen.
2. Landvater D., Christopher G. MRP II Standard System. A Handbook for Manufacturing Software Survival. John Wiley & Sons Inc., 1989, 15 p.
3. Browne J., Harhen J., Shivan J. Production Management Systems: An Integrated Perspective. Boston, Addison-Wesley, 1996, 425 p.
4. Goldratt E. What is this Thing Called Theory of Constraints and how Should it be Implemented? North River Press, 1990, 162 p.
5. Schragenheim E., Dettmer W. Manufacturing at Warp Speed. Optimizing Supply Chain Financial Performance. London, New York, Washington, CRC Press, 2001, 333 p.
6. Ohno Taiichi, Mito Setsuo Just-In-Time for Today and Tomorrow. Productivity Press, 1988, 145 p.
7. Yasuhiro M. Toyota Production System, An Integrated Approach to Just-In-Time. Springer Science & Business Media, 2012, 424 p.
8. Tobon-Valencia E., Lamouri S., Pellerin R. et al. Modeling of the Master Production Schedule for the Digital Transition of Manufacturing SMEs in the Context of Industry 4.0, *Sustainability*, 2022, № 14, P. 12562. Access mode: <https://doi.org/10.3390/su141912562>
9. Malindzakova M., Garaj P., Trpčevská J. et al. Setting MRP Parameters and Optimizing the Production Planning Process, *Processes*, 2022, № 10, P. 690. Access mode: [<https://doi.org/10.3390/pr10040690>]
10. Ptak C. A., Smith C. Orlicky's Material Requirements Planning, Third Edition. McGraw Hill Professional, 2011, 352 p.
11. Azzamouri A., Baptiste P., Dessevre G. et al. Demand Driven Material Requirements Planning (DDMRP): A systematic review and classification, *Journal of Industrial Engineering and Management*, 2021, № 14(3), pp. 439–456. Access mode: <https://doi.org/10.3926/jiem.3331>
12. Orue A., Lizarralde A., Kortabarria A. Demand Driven MRP – The need to standardise an implementation process, *International Journal of Production Management and Engineering*, 2020, Vol. 8, Issue 2, pp. 65–73. Access mode: <https://doi.org/10.4995/ijpme.2020.12737>.
13. Miclo R., Fontanili F., Luras M. et al. An empirical comparison of MRPII and Demand-Driven MRP, *IFAC-PapersOnLine*, 2016, Vol. 49, Issue 12, pp. 1725–1730.
14. Berger N., Arent M., Arnovitz J., Sampson F. Effective Prototyping with Excel: A Practical Handbook for Developers and Designers. Elsevier, 2009, 240 p.
15. Novinsky V. P., Popenko V. D. Zastosuvannya metodu linijnogo programuvannya v procedurah planuvannya MRP II, *Ekonomichnyj prostir*, 2024, № 189, pp. 196–206. Rezhym dostupu: <https://doi.org/10.32782/2224-6282/189-36>