

В. В. Собчук

Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна

## МЕТОДИКА СТВОРЕННЯ ЄДИНОГО ІНФОРМАЦІЙНОГО ПРОСТОРУ НА ВИРОБНИЧОМУ ПІДПРИЄМСТВІ З ФУНКЦІОНАЛЬНО СТІЙКИМ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ПРОЦЕСОМ

**Анотація.** В роботі проводиться аналіз існуючих методик щодо управління промисловим підприємством. Найбільш відомими з них є такі нормативні документи управління: MRP II (Manufacturing Resource Planning), ERP (Enterprise Resource Planning), APS (Advanced Planning & Scheduling Systems) і MES (Manufacturing Execution Systems). Наводяться основні переваги та недоліки вказаних систем управління. Проведений аналіз вказує на необхідність створення систем управління нового покоління, яка тісно пов'язане з розвитком методики створення єдиного інформаційного простору підприємства і інтегрованих моделей для автоматизованих систем управління підприємством. Запропонована методика, що ґрунтується на системному підході, який містить формалізований опис всієї сукупності виробничих та бізнес процесів; матеріальних об'єктів та ресурсів, що задіяні в оперативному управлінні виробництвом і його конструкторській та технологічній підготовці. Зазначена методика створення єдиного інформаційного простору підтримується відповідними базовими інформаційними технологіями, що забезпечують: реінжиніринг бізнес-процесів оперативного управління та технічної підготовки виробництва з метою забезпечення переходу від функціонально-орієнтованої до процесної організації управління підприємством; опис і візуальне представлення електронної структури виробу й надання йому статусу стандарту підприємства; управління бізнес-процесами оперативного планування і технічної підготовки виробництва з використанням електронної структури виробу, спрямоване на підтримку функціональних задач APS, MES, PLM-систем. Зокрема, в роботі розглянута математична модель технологічного процесу на промисловому підприємстві. Вводиться поняття та умови функціональної стійкості технологічного процесу на промисловому підприємстві. Вказуються критерії функціональної стійкості технологічного процесу.

**Ключові слова:** управління виробничим підприємством, стандарти управління, оперативно-виробниче планування, мережеві моделі, методи теорії функціональної стійкості.

### Вступ

В даний час підвищення ефективності управління виробничим підприємством тісно пов'язане з вдосконаленням системи оперативно-виробничого планування (ОВП) на підприємстві. При цьому головна мета ОВП полягає в забезпеченні злагодженого, комплексного, ритмічного ходу виробництва по виготовленню та випуску продукції при найповнішому і рівномірному використанні всіх виробничих ресурсів, вчасному виконанні зобов'язань щодо випуску готової продукції на основі рівномірного і комплектного ходу виробництва на кожній виробничій ланці, а також досягненні мінімальної тривалості виробничого циклу (ТВЦ) і, відповідно, скорочення обсягів незавершеного виробництва. Досягнення вищевказаної мети забезпечується за рахунок розв'язання досить складного набору функцій ОВП, до яких, як правило, відносять: розрахунки завантаження виробничих потужностей по підприємству в цілому і виробничих підрозділах зокрема; розрахунки календарно-планових нормативів організації виробничого процесу, в тому числі ТВЦ виготовлення готових виробів та їх елементів, визначення величини незавершеного виробництва, розрахунки партій запуску виробів, визначення термінів випереджуючого запуску виробів у виробництво за фазами і стадіями обробки деталей із виготовленням виробів; розробка календарних графіків запуску-випуску виробів; усталення оперативних виробничих завдань виробничим підрозділам підприємства (цехам, дільницям, робочим місцям); оперативне регулювання, облік і контроль виконання планових

завдань; задачі мережевого планування; задачі побудови розкладів; забезпечення функціональної стійкості систем тощо.

**Аналіз літературних даних та постановка проблеми.** Методам та моделям побудови складних технічних систем присвячено велику кількість наукових робіт О.А. Машкова [1], О.В. Барабаша [2, 3], Г.А. Кучука [4, 5] та і ін. Проблема відмовостійкості складних технічних систем досліджувалась в роботах В.А. Машкова [6], В.А. Савченка [7] та інших вчених. Питання стійкості систем відносно зовнішніх дестабілізуючих впливів досліджувалось О.Г. Додоновим [8], І.В. Рубаном [9] та і ін.

Проблеми побудови та розгортання інформаційних систем, а також кодування даних вирішувались науковцями, серед яких: С.Г. Бунін, В.О. Романов, В.А. Романюк, А.О. Зінченко, І. Akyildiz, С. Fragouli, R. Ahlswede та ін.

В результаті накопиченого досвіду в даній сфері на сьогоднішній день розроблено велика кількість методик ОВП та управління промисловим підприємством. Найбільш відомими з них є такі нормативні документи управління: MRP II (Manufacturing Resource Planning), ERP (Enterprise Resource Planning), APS (Advanced Planning & Scheduling Systems) і MES (Manufacturing Execution Systems) [10]. Ці системні рішення апробовані за останні 15-20 років на різних виробничих підприємствах в багатьох індустріях.

Спільною рисою вищевказаних систем є те, що в них реалізуються принципи, характерні для інтегрованих автоматизованих систем управління підприємством (ІАСУ), коли автоматизується широкий

комплекс функцій управління, що охоплюють задачі стратегічного, виробничого, фінансового планування, оперативного управління постачанням, закупками, запасами в поєднанні з автоматизацією конструкторської, технологічної підготовки виробництва тощо.

Сьогодні найбільшу увагу при вивченні питань автоматизації управління підприємствами приділяється ERP-системам. Їх концепція побудована на автоматизації та інформатизації бізнес-процесів (БП) планування продажів, об'ємного виробничого та фінансового планування, управління ланцюжками постачання, задач обліку та ін. До переваг ERP-систем слід віднести реалізацію в них процесного підходу до управління промисловим підприємством, що є основою міжнародних стандартів ISO й, по суті, яке визначило представлення ERP-систем як загальноприйнятої міжнародної практики створення систем управління промисловими підприємствами.

Однак ERP-системи мають і суттєві недоліки. Зокрема, в більшості систем ERP планування базується на застосуванні стандарту MRP II. В цьому стандарті передбачається лише об'ємне планування, як правило, на рівні місячного плану. Це обумовлює той факт, що планування робіт, технологічних операцій для верстатів та іншого технологічного обладнання в ERP-системах ведеться без врахування поточного завантаження виробничих ланок і стану незавершеного виробництва. У досить примітивній формі здійснюється визначення тривалості виробничого процесу (ВП) засобами простого підсумовування тривалості всіх його операцій, хоча в дійсності тривалість ВП залежить від завантаженості обладнання на момент виконання замовлення. Це є причиною того, що будь-який детальний ERP-план буде виконати практично неможливо. Коригувати такі плани оперативно, зазвичай, не вдається.

В цих умовах одним із дієвих варіантів є створення на підприємстві системи виробничого планування класу APS (*Advanced Planning & Scheduling Systems*) або, при досить високому рівні автоматизації виробництва, MES-системи (*Manufacturing Execution Systems*), які забезпечують більш точне планування ходу виробництва. Дані системи з'явилися на ринку в кінці 1990-х років і мають головною метою складання детального в порівнянні з ERP-системами цехових і міжцехових розкладу роботи для всього парку обладнання на всіх портфелях замовлень на тривалий термін з врахуванням реального стану незавершеного виробництва.

Системи APS складають розклад роботи всього підприємства, всіх його виробничих ділянок і робочих центрів (РЦ). Але завдання видаються не на окремі робочі місця (це завдання MES-систем), а за окремими цехами. Кожен цех в результаті отримує свій власний розклад на тривалий період роботи. При цьому в порівнянні з алгоритмами MRP II, алгоритми APS при складанні розкладів одночасно враховують як потреби в матеріалах, так і потужності підприємства з врахуванням їх поточного і запланованого завантаження. В алгоритмах APS враховуються переналадження і деякі інші параметри

технологічного середовища [10]. Також APS-системи дозволяють розв'язувати задачі планування з врахуванням комплектації. При цьому під завданнями комплектації ПП в задачах планування будемо розуміти процедуру, яка відповідає за те, що для виготовлення тієї чи іншої одиниці планування (ОП) з портфеля замовлень є в наявності всі необхідні матеріали, всі технологічні та допоміжні ресурси, всі комплектуючі, вся оснастка, весь інструмент, всі норми і вся документація. Якщо все це є в наявності, то виготовлення даної ОП можна планувати в часі.

Розглянемо зазначену процедуру планування детальніше. Припустимо, що є ОП  $e_i$  (рис. 1), представлена технологічним процесом у вигляді множини операцій  $\{e_{ij}, j=1, \dots, p_i\}$  для кожної операції відомі необхідні для виконання: ресурси, обладнання, інструмент, оснастка, комплектуючі, документація тощо [10].

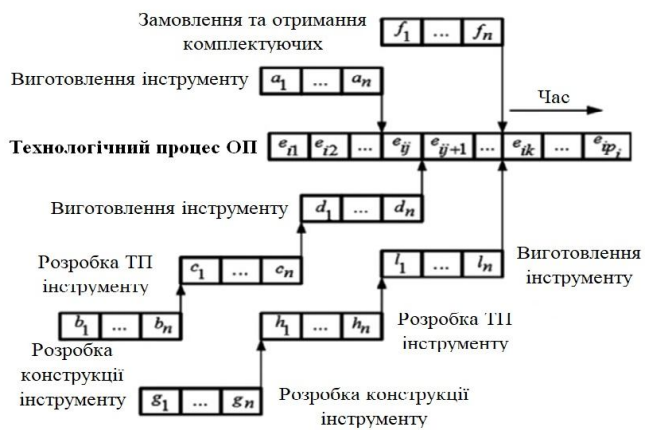


Рис. 1. Процеси комплектації одиниці планування (ОП)

В процесі комплектації при перевірці будь-якої  $j$ -ої операції  $e_{ij}$ -ої ОП може виявитися, що для неї потрібен спеціальний інструмент, який не може бути придбаний в силу унікальності, а, отже, повинен бути виготовлений раніше, ніж почнеться по плану  $j$ -а операція. На  $j+1$ -й операції може виявитися, що для неї потрібне спеціальне пристосування і цього пристосування не тільки немає в наявності, але воно навіть не спроектовано. І, врешті, на якій-небудь  $k$ -й операції аналіз покаже, що, по-перше, необхідно придбання стандартних комплектуючих, яких немає на складі підприємства, і немає спеціального вимірювального інструменту, який ще необхідно розробити і виготовити, і т. і. Інакше, ми бачимо, що навіть один технологічний процес виготовлення ОП може породити безліч суміжних бізнес-процесів, виконання яких необхідно забезпечити до моменту початку відповідної основної технологічної операції.

В основі побудови алгоритму розкладів в APS лежить простий інструментарій. Є безліч операцій для всієї сукупності виробів, множини верстатів, і на кожен виріб є обмеження – за термінами випуску, за наявністю матеріалів і т. д. Обмеження поділяються на суттєві та несуттєві. Спочатку, при першому проході алгоритму, складається виробничий

розклад з врахуванням здійсненності суттєвих обмежень, наприклад, відсутність порушень термінів поставок. Якщо розклад сформовано, то він вважається допустимим і приймається як базовий для подальшої «оптимізації» – на наступних проходах алгоритму реалізується спроба врахувати інші, менш важливі, обмеження.

За своєю суттю це не що інше, як ітераційний процес отримання прийнятеного розкладу з врахуванням нових обмежень, які вносяться на новій ітерації. В ряді випадків процес планування спрощують ще більше. Спочатку планують одну деталь, потім іншу, до тих пір, поки всю множину деталей не буде сплановано. Таким чином, спростивши алгоритм побудови виробничого розкладу, APS-системи забезпечують можливість в межах наявних обчислювальних потужностей отримувати допустимі виробничі розклади і більш точно прогнозувати терміни поставок. При цьому APS-системи не ставлять собі складних задач на зразок мінімізації в складених розкладах термінів переналадок, транспортних операцій, зменшення кількості задіяного обладнання і т. і., оскільки облік цих вимог неминуче призведе до ускладнення алгоритмів й неможливості за найкоротший час отримувати розклади для великих розмірностей. В зв'язку з цим APS-системи мають обмежений склад критеріїв планування.

Далі відзначимо, що APS-системи при можливості повинні тісно взаємодіяти з MES-системами, які визначаються як системи оперативного характеру, націлені на формування розкладів роботи не тільки для верстатів, а й для транспортних засобів, систем управління процесами складування, бригад наладчиків і т. п. При цьому основними функціями MES-систем є не тільки планування, але й диспетчеризація виробничих процесів в цеху [10].

Зазвичай MES-системи включають в себе розвинені засоби підтримки технологічної підготовки того чи іншого типу виробництва. Інакше вони можуть мати засоби інтеграції з системами автоматизації проектування технологічних процесів САПР ТП / АСТПВ. Такі ІАСУ іменуються системами класу PLM (product lifecycle management) і характеризуються тим, що в них зникає функціональний і інформаційний розрив між контурами оперативного управління та технічної підготовки виробництва.

**Метою роботи** є створення систем управління нового покоління, яка тісно пов'язане з розвитком методик створення єдиного інформаційного простору підприємства і інтегрованих моделей для ІАСУ. Методика повинна ґрунтуватися на системному підході, який містять формалізовані описи всієї сукупності виробничих та бізнес процесів; матеріальних об'єктів та ресурсів, що задіяні в оперативному управлінні виробництвом і його конструкторській та технологічній підготовці. Очевидно, що зазначена методика створення єдиного інформаційного простору повинна підтримуватись відповідними базовими інформаційними технологіями, що забезпечують:

- реінжиніринг бізнес-процесів оперативного управління та технічної підготовки виробництва з метою забезпечення переходу від функціонально-

орієнтованої до процесної організації управління підприємством;

- опис і візуальне представлення електронної структури виробу (ЕСВ) й надання йому статусу стандарту підприємства;

- управління бізнес-процесами оперативного планування і технічної підготовки виробництва з використанням ЕСВ, спрямоване на підтримку функціональних задач APS, MES, PLM-систем ІАСУ.

При цьому слід зауважити, що пріоритетною складовою в наведеному переліку компонент ІАСУ, з нашої точки зору, є система середньострокового і оперативного планування. Подібний акцент значимості даної системи обумовлюється тим, що ефективне виробниче планування є найбільш дешевим способом підвищення пропускної спроможності виробничих систем. Причому важливим моментом тут є вибір відповідного методу виробничого планування.

### Виклад основного матеріалу

Аналіз відомих методів розв'язування задач виробничого планування показує, що останні при всьому своєму розмаїтті можна розділити на два класи:

- методи мережевого планування;
- методи, що відносяться до загальної теорії розкладів.

При цьому до переваг методів мережевого планування відноситься їх відносна простота, орієнтація на процесне представлення загальної схеми організації робіт з виконання виробничої програми замовлень, природне сприйняття управляючим персоналом мережевих графіків і прив'язки робіт (технологічних операцій), які в них входять до часу і т. і. До недоліків цих методів відносять те, що планування виконання виробничих операцій в них здійснюється з використанням спрощених схем розподілу виробничих потужностей технологічних ланок, без врахування стану незавершеного виробництва і т. і.

До переваг загальної теорії розкладів, що використовує методи імітаційного моделювання, при формуванні виробничих програм відносять можливість врахування великої кількості технологічних і організаційних обмежень, поточного завантаження виробничих ланок та стану незавершеного виробництва. При цьому загальна теорія розкладів дозволяє розв'язувати лише задачі планування з невеликою розмірністю, водночас, вузька орієнтація методу спрямована на підвищення завантаження виробничого обладнання без чіткого управління термінами виконання виробничої програми за відсутності процесного представлення загальної схеми організації робіт у виробничій системі.

Часто для розв'язання задач виробничого планування на практиці використовують комбінований підхід, представляючи задачі мережевого планування і розподілу наявних виробничих ресурсів мережі робіт як розширення загальної задачі побудови виробничих розкладів [10].

Будемо вважати, що у виробничій системі задано множину одиниць планування  $\{z\}$ ,  $z = 1, \dots, Z$ , з портфелю замовлень, представлених технологічними процесами з множини операцій

$$\{o_{zir}\}, z = 1, \dots, Z; i = 1, \dots, I, r = 1, \dots, R.$$

Множина операцій

$$\{o_{zir}\}, z = 1, \dots, Z; i = 1, \dots, I, r = 1, \dots, R$$

визначає множину робіт на мережі  $S = \{s\}$ , де  $s = o_{zir}$  відповідає  $i$ -й операції виконання  $z$ -го замовлення з використанням ресурсу  $r$ -го типу. Також будемо вважати, що виробнича система має множину типів ресурсів  $\mathcal{R} = \{r\}$ ,  $r = 1, \dots, R$ , в якості яких можуть виступати виробничі ділянки, робочі центри і т.і. Множина  $\mathcal{R}$  розглядається як система обслуговування щодо виконання  $\{o_{zir}\}$ .

Порядок встановлено технологічний реалізації робіт в мережі, який може бути представлений у вигляді мережевого графіка, тобто у вигляді безконтурного орграфа  $S = \langle I, *, *, *, V \rangle$  з однією початковою вершиною "\*", кінцевою вершиною "\*\*", множиною робіт  $I$  та множиною дуг  $V$ , що визначають технологічний порядок виконання робіт.

Відповідно до технології, кожна робота  $i$  виконується з використанням певного виду ресурсу  $r$ -го типу, тобто виконується на обладнанні  $r$ -го виробничої ланки, що дозволяє ідентифікувати будь-яку з робіт трійкою  $\langle zir \rangle$ . При цьому в якості вихідної характеристики роботи  $\langle zir \rangle$  є її обсяг  $w_{zir}$  (трудомісткість виконання) та інтенсивність виконання  $N_{zir}$ . Тут під інтенсивністю роботи  $\langle zi \rangle$  розуміється кількість одиниць  $r$ -го ресурсу, що виділяється для її виконання. З врахуванням введених характеристик роботи її тривалість  $t_{zir}$  визначається як деяка функція вигляду

$$t_{zir} = f(w_{zir}, N_{zir}),$$

зокрема,

$$t_{zir} = w_{zir} / N_{zir}.$$

Тоді, визначаючи  $\tau_{zir}^{noch}$  як момент часу початку виконання роботи  $iz$ , а  $\tau_{zir}^{zag}$  як момент часу її завершення, формально виробничий розклад процесу виконання того чи іншого замовлення можна представити як множину пар вигляду

$$\langle \tau_{zir}^{noch}, \tau_{zir}^{zag} \rangle, z = 1, \dots, Z, i = 1, \dots, I, r = 1, \dots, R.$$

Введені позначення дозволяють виділити загальну методику формування виробничого розкладу по виконанню замовлень як процедуру, що складається з кроків, які циклічно повторюються:

1) вибрати зі списку нерозглянутих замовлень  $Z$  чергове замовлення  $\{z\}$  для включення його в розклад і встановити тимчасову точку відліку, що дорівнює номеру дня виконання замовлення;

2) виділити з мережевого графіка замовлення  $\{Z\}$  максимальний фронт робіт, що претендують на включення в розклад, тобто таких у яких всі наступні за технологією роботи вже включені в розклад;

3) виділити з сформованого фронту робіт операцію з найбільшою трудомісткістю  $w_{zir}$  (дана евристика забезпечує першочергове включення в розклад робіт критичного напрямку);

4) включити в розклад виділену роботу, перевірявши умови наявності для її виконання всіх комплектуючих, необхідних матеріалів, технологічних і допоміжних ресурсів, оснастки, необхідного інструменту, документації, і призначити для її виконання «мінімально достатнє» число одиниць, що звільняється після виконання чергової операції виробничого ресурсу з врахуванням вимог виконання за термінами розглянутого замовлення, недопущення збільшення тривалості критичного напрямку замовлення і забезпечення рівномірності ходу технологічного процесу. Після чого визначаються моменти часу початку і завершення виділеної роботи.

На кожному циклі даної процедури в розклад вбудовується одна робота виділеного замовлення. Отже, після скінченної кількості повторів кроків 2–4, рівного потужності множини операцій  $\{o_{zir}\}$ , процес побудови розкладу для виділеного замовлення завершиться. При цьому, в разі виявлення дефіциту ресурсу на тій чи іншій ділянці, для виконання будь-якої роботи з множини  $\{o_{zir}\}$  всі роботи даної множини виключаються з сформованого розкладу і виконання замовлення розглядається повторно за умови виділення на останню роботу його критичного напрямку більшої (наприклад, на одиницю) величини ресурсу.

Відзначимо, що описана методика побудови розкладів дозволяє, з одного боку, здійснювати виробниче планування з врахуванням діючих на підприємстві технологічних і організаційних обмежень, а з іншого, реалізовувати принципи «витягуючого» (Pull Scheduling) планування, забезпечує виконання замовлень за принципом «just in time» з мінімізацією обсягів незавершеного виробництва.

Запропонована методика має рекурсивний характер та дозволяє будувати виробничі розклади з перевіркою дотримання таких інтегральних критеріїв ефективності розкладів як критерій мінімальної календарної тривалості виконання розкладу, критерій мінімуму вартості виконання розкладів тощо.

При цьому сформований виробничий розклад, орієнтований на процесне представлення загальної схеми організації робіт у виробничій системі, дозволяє здійснити перехід від виробничого планування по часовим інтервалам та цехам до позаказно-орієнтованого менеджменту, а також до побудови на її основі систем процесно-орієнтованого бюджетного планування і позаказно-орієнтованого контролю та управління витратами [10].

Розглянемо нижче власне критерій, який забезпечить неперервність роботи сучасного підприємства. Вважатимемо, що виконано все вищеписане – підприємство працює в умовах ресурсної забезпеченості з чітко запланованими графіками випуску готової продукції. Власне дослідимо як працює даний процес на атомарному рівні. Дослідимо як це працює на рівні окремого виробничого процесу на

певній виробничій ділянці (робочому центрі), що випускає конкретний вид продукції.

Без автоматизації процесу контролю параметрів виробничих процесів на сучасних підприємствах неможливо організувати серійний випуск якісної продукції. Власне, для розв'язання подібних задач на виробничих підприємствах, забезпечення функціональної стійкості виробничих процесів завдяки контролю в режимі реального часу ключових виробничих параметрів пропонується математична модель, яка може бути невід'ємно інтегрованою в автоматизовану систему управління підприємством.

Випуск продукції зазвичай складається з низки етапів, на кожному з яких висуваються певні вимоги до параметрів та характеристик сировини, напів-

фабрикатів чи то в кінцевому підсумку готової продукції. Позначимо такі набори параметрів на кожному  $i$ -му етапі  $x(i)$ ,  $i = 1, 2, \dots, N$  (рис. 2).



Рис. 2. Топологія технологічного виробничого процесу

Технологічні виробничі процеси (рис. 3) для гарантування досягнення параметрів  $x(i)$  на кожному етапі вимагають зовнішніх впливів на виробничий процес –  $u(i)$  (ефект від роботи, енергетичний ефект, хімічні чи то інші технологічні впливи на кожному з етапів).

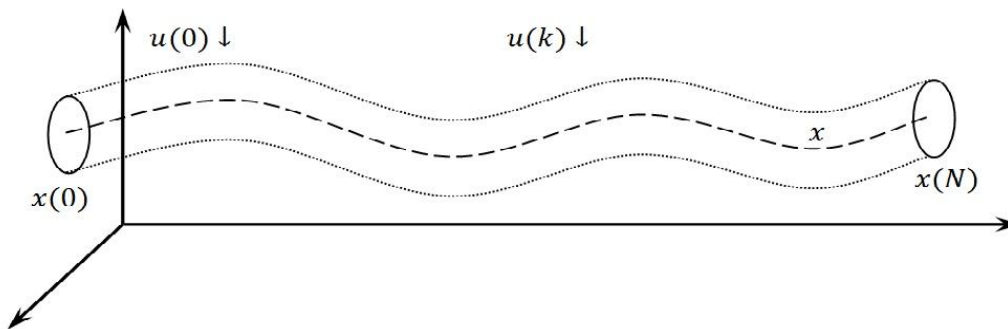


Рис. 3. Схема виконання виробничого процесу

Зрозуміло, що кінцева якість продукції та проміжна кількість на кожному етапі залежить від дотримання технології та забезпечення витримки необхідних параметрів на кожному попередньому кроці. Далі вважатимемо, що ця апріорна вимога виконана.

Зауважимо, що в реальних виробничих умовах хід виробничого процесу забезпечить повторюваність та інтенсивність випуску продукції, яка задовольняє наперед заданим вимогам та стандартам з певними відхиленнями (допусками)  $\varepsilon(i)$ , які характерні для кожного виробничого процесу чи то виробу взагалі кажучи індивідуально. Тобто, всі лінійні, хімічні, механічні, геометричні чи інші характеристики виробу повинні відповідати еталонному зразку не перевищуючи пороги технологічних похибок. В протилежному випадку, при значних відхиленнях, продукція вважатиметься бракованою, що потягне за собою додаткове виділення ресурсів, оснастки, інструменту, внесення змін у виробничі плани та змінить час виконання всього замовлення (тобто, знову виникне необхідність виконання вищеписаних процедур).

Також позначимо:

$A(i)$  – матрицю залежності показників якості продукції на  $i+1$ -му етапі від показників на  $i$ -му етапі, власне матриця виробничого процесу;

$C(i)$  – матрицю, яка визначає структуру впливу на виробничий процес  $u(i)$ .

Тоді математична модель технологічного процесу можна записати таким чином:

$$x(i+1) = A(i)x(i) + C(i)u(i), \quad i = 0, 1, 2, \dots, N-1. \quad (1)$$

$$x(i) \in \mathbb{R}^n, \quad A(i) \in \mathbb{R}^{n \times n},$$

$$C(i) \in \mathbb{R}^{n \times n}, \quad u(i) \in \mathbb{R}^n.$$

Представимо (1) у вигляді

$$Ax = Cu. \quad (2)$$

Таке представлення демонструє, що всі етапи технологічного виробничого процесу можуть бути описані системою алгебраїчних рівнянь (2), де:

$$x = \begin{pmatrix} x(0) \\ x(1) \\ \vdots \\ x(N) \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{n \times N},$$

$$u = \begin{pmatrix} u(0) \\ u(1) \\ \vdots \\ u(N-1) \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{n \times N}.$$

$$C = \begin{pmatrix} C(0) & \dots & 0 \\ 0 & C(2) & \dots & 0 \\ 0 & 0 & C(3) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C(N-1) \end{pmatrix} -$$

блочна матриця  $(Nn) \times (Nm)$ .

$$A = \begin{pmatrix} -A(0) & E & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & -A(1) & E & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 0 & -A(2) & E & \dots & \dots & 0 \\ \vdots & \dots & \dots & \dots & \ddots & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -A(N-1) & E \end{pmatrix} -$$

матриця  $((N-1)n) \times ((N+1)n)$ .

При цьому матриці  $A$  та  $C$  визначають топологію виробничого процесу.

Вектор  $u$  описує технологічні особливості виробничого процесу.

Нехай  $\bar{x} = \begin{pmatrix} \bar{x}(0) \\ \bar{x}(1) \\ \vdots \\ \bar{x}(N) \end{pmatrix}$  – еталонний процес. Ета-

лонний процес гарантує повну відповідність набору параметрів  $x(k)$ ,  $k=0,1,\dots,N$ , які мають бути дотримані при ідеальному виконанні виробничого процесу на всіх етапах та на кожній з ланок. Тобто, це певне медіанне значення, яке водночас передбачає наявність апріорної сукупності допустимих відхилень параметрів системи.

Задано параметр  $\varepsilon > 0$ , що визначає сукупність допустимих відхилень (толерансів) від еталонних значень.

**Означення 1.** Якщо при заданих матрицях  $A$ ,  $C$  та векторі  $u$  існує розв'язок  $x = \bar{x} + e$  системи (2) такий, що  $\|e\| \leq \varepsilon$ , то такий технологічний процес називатимемо функціонально стійким.

Позначимо

$$Z(A^T) = E - AA^+ -$$

проектор на ядро матриці  $A^T$ ,  $A^+$  – псевдообернена матриця [11].

Справджується теорема.

**Теорема 1.** Нехай виконується умова

$$u^T Q u = 0, \quad (3)$$

де  $Q = C^T Z(A^T) C$ . При цьому

$$\|A^+(Cu - A\bar{x})\| \leq \varepsilon. \quad (4)$$

Тоді технологічний процес, описаний рівнянням (2), є функціонально стійким.

**Доведення.** Нехай  $u^T Q u = 0$ . Врахуємо, що  $AA^+$  – симетрична матриця і  $Z^T(A^T) = Z(A^T)$  [11].

Так як  $Z(A^T)$  – проектор, то

$$Z^2(A^T) = Z(A^T).$$

Тоді з (3) випливає

$$\begin{aligned} u^T Q u &= u^T C^T Z(A^T) C u = \\ &= u^T C^T Z^T(A^T) Z(A^T) C u = 0. \end{aligned}$$

Звідси

$$\|Z(A^T) C u\|^2 = 0 \text{ і } Z(A^T) C u = 0.$$

Оскільки

$$Z(A^T) = E - AA^+,$$

то

$$(C - AA^+ C) u = 0.$$

Як наслідок,  $AA^+ C u = C u$ . Тоді

$$AA^+ C u - A\bar{x} = C u - A\bar{x}.$$

Оскільки  $A = AA^+ A$  [11], то

$$\begin{aligned} AA^+ C u - A\bar{x} &= \\ &= AA^+ C u - AA^+ A\bar{x} = AA^+ (C u - A\bar{x}). \end{aligned}$$

Тому

$$AA^+ (C u - A\bar{x}) = C u - A\bar{x}.$$

Це означає, що  $C u - A\bar{x} \in \text{Im } A$  [11]. Звідси випливає, що існує  $e \in \mathbb{R}^n$  таке, що

$$Ae = C u - A\bar{x}. \quad (5)$$

З (5) одержуємо

$$A(e + \bar{x}) = C u.$$

Отже, вектор  $e + \bar{x}$  є розв'язком (2). Оскільки виконується (5) та  $e \in \text{Im } A$ , то

$$e \in \{A^+(C u - A\bar{x}) + v\}, \quad (6)$$

де  $v \in \text{Ker}(A)$ , тобто  $Av = 0$  [11]. Серед векторів сукупності (6) найменше за нормою значення вектора  $e$  досягається при  $v = 0$ , а саме [11]

$$e = A^+(C u - A\bar{x}).$$

Оскільки має місце (4), то  $\|e\| \leq \varepsilon$ ,  $x = \bar{x} + e$ . Отже, технологічний процес є функціонально стійким. Теорему доведено.

Справджується також обернена теорема до теореми 1.

**Теорема 2.** Якщо технологічний процес є функціонально стійким, то

$$u^T Q u = 0,$$

при цьому

$$\|A^+(C u - A\bar{x})\| \leq \varepsilon.$$

**Доведення.** З умови теореми 2 випливає, що існує розв'язок системи (2)  $x = \bar{x} + e$ ,  $\|e\| \leq \varepsilon$ , де  $Ax = Cu$ . Отже  $A(\bar{x} + e) = Cu$ .

Звідси випливає

$$Ae = Cu - A\bar{x}. \quad (7)$$

За означенням образу матриці  $Cu - A\bar{x} \in \text{Im } A$ . Тому одержуємо [11]

$$AA^+(Cu - A\bar{x}) = Cu - A\bar{x}.$$

Таким чином

$$AA^+Cu - AA^+A\bar{x} = Cu - A\bar{x}.$$

Але  $AA^+A = A$  [11], тому  $AA^+Cu = Cu$ . Звідси  $(E - AA^+)Cu = 0$ .

Отже

$$Z(A^T)Cu = 0 \text{ і } \|Z(A^T)Cu\|^2 = 0.$$

Таким чином  $u^T C^T Z^T (A^T) Z (A^T) C^T u = 0$  і  $u^T Qu = 0$ . З формули (7) випливає, що [11]

$$e \in \{A^+(Cu - A\bar{x}) + Z(A)v, v \in \mathbb{R}^{n \times n}\}.$$

Оскільки

$$\|A^+(Cu - A\bar{x})\| \leq \varepsilon,$$

то при  $v = 0$   $\exists e$  таке, що  $\|e\| \leq \varepsilon$ . Теорему доведено.

Якщо розв'язок системи (2), який відповідає умовам функціональної стійкості не існує, це означає, процес не може гарантовано реалізуватись. В такому випадку технологічний процес слід зупинити, щоб проаналізувати, які параметри призводять до функціональної нестійкості.

При цьому розв'язуємо задачу

$$I(e) = \|Ae - Cu - A\bar{x}\| \rightarrow \min_e. \quad (8)$$

Розв'язком даної задачі мінімізації є сукупність векторів [11]

$$e \in \{A^+(Cu - A\bar{x}) + Z(A)v, v \in \mathbb{R}^{n \times n}\}.$$

при цьому вектор

$$e = A^+(Cu - A\bar{x})$$

має найменшу норму [11]. Власне він фактично окреслює гранично допустиму межу відхилень від еталонного значення. В разі подальшого зростання відхилень, процес потрібно негайно припинити, адже при цьому процес продукувати неприпустимі відхилення заданих стандартів.

На практиці це означає, що існування точного розв'язку системи гарантує функціональну стійкість системи, якщо відхилення від еталонного значення задовольняють (4), то виробничий процес функціонально стійкий випускаючи продукцію згідно зі стандартом з дотриманням гарантованих технологічних допусків, якщо ж умова (4) не виконується, проте існує розв'язок (8) це означає, що система функціонує в умовах близьких до втрати стійкості (технологічно це означає, що процес забезпечує випуск продукції неналежної якості, яка буде

обов'язково дефектована, наприклад, продукції буде присвоєно низький ґатунок, розряд тощо). Якщо не має розв'язків задачі (8), то процес має бути негайно зупинений.

Система повернеться у вихідне положення на рівень функціональних задач APS, MES, PLM-систем ІАСУ та застосовується вище описаний алгоритм повторного планування та рестарту скоректованого виробничого плану.

Припустимо, що ми маємо еталонні показники значення вектора  $\bar{x}$ .

*Актуальною є задача, чи можливо організувати виробничий процес таким чином, щоб дотримуватись заданих еталонних показників за рахунок вибору вектора  $u$ ?*

Тобто пропонується механізм, який в реальній практиці з методикою, що забезпечує дотримання технологічних вимог на всіх етапах виробничого процесу.

Справджуються наступні твердження.

**Теорема 3.** Нехай структура виробничого процесу визначається матрицями  $A$  та  $C$ , а вектором  $\bar{x}$  задані еталонні значення параметрів  $x$  та характеристик продукції в кінці кожного етапу виробництва. Тоді необхідною і достатньою умовою того, що у виробничому процесі будуть реалізовані еталонні вимоги  $\bar{x}$  є виконання умови

$$\bar{x}^T P \bar{x} = 0, \quad (9)$$

де матриця

$$P = A^T Z(C^T)A, \quad Z(C^T) = E - CC^+.$$

*Доведення.* Для того, щоб еталонні показники  $\bar{x}$  були реалізовані необхідно і достатньо щоб існував вектор  $u$  для якого виконується співвідношення (2). Ця умова еквівалентна тому, що

$$A\bar{x} \in \text{Im } C. \quad (10)$$

де  $\text{Im } C$  – образ оператора  $C$ . Позначимо  $Y(C) = CC^+$  – матрицю ортогонального проектування на півпростір  $\text{Im } C$  [11]. Тоді умова (10) еквівалентна виконанню рівності

$$Y(C)A\bar{x} = A\bar{x}. \quad (11)$$

Звідси  $CC^+A\bar{x} = A\bar{x}$  й

$$(E - CC^+)A\bar{x} = 0. \quad (12)$$

Оскільки  $Z(C^T) = E - CC^+$ , то  $Z(C^T)A\bar{x} = 0$ .

Отже  $\|Z(C^T)A\bar{x}\|^2 = 0$ , звідки

$$\bar{x}^T A^T Z^T (C^T) Z (C^T) A \bar{x} = \bar{x}^T A^T Z (C^T) A \bar{x} = 0. \quad (13)$$

Таким способом одержуємо (5). І навпаки, виконання (13) впливає (12) і звідси (11). Отже  $A\bar{x} \in \text{Im } C$ , тобто  $\exists u$  таке, що  $A\bar{x} = Cu$ . Теорему доведено.

**Наслідок 1.** Нехай виконуються умова (9) теореми 3. Тоді сукупність реалізації вектора  $u$  за ета-

лонними значеннями вектора  $\bar{x}$  визначається співвідношенням

$$C^+ A\bar{x} + Z(C)w : w \in R^{n^{\text{ЧН}}},$$

де  $Z(C) = E - C^+C$  – оператор проектування на ядро матриці  $C$ .

### Висновок

Підсумовуючи наведені міркування необхідно зазначити, що в даній роботі проведено аналіз проблеми створення інформаційних систем управління підприємством та на його підставі запропоновано методику побудови систем автоматизованого

керування підприємством. Викладено особливості авторського підходу до вирішення задач виробничого планування, як пріоритетної складової в системі управління.

Зокрема, в роботі запропоновано математичну модель технологічного процесу на промисловому підприємстві. Вводиться поняття та умови функціональної стійкості технологічного процесу на промисловому підприємстві. Вказуються критерії функціональної стійкості технологічного процесу. Викладений теоретичний матеріал може слугувати підґрунтям створення єдиного інформаційного простору на виробничому підприємстві з функціонально стійким технологічним процесом.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Машков О.А., Аль-Тамімі Р.К.Н., Ламі Д.Д.Х., Косенко В.Р. Застосування неформальних підходів до управління складними динамічними системами. Наукове періодичне видання «Системи управління, навігації та зв'язку». Полтава: ПНТУ, 2015. Вип. 4 (36). С. 31 – 37.
2. Барабаш О.В., Мусієнко А.П., Саланда І.П. Система показників та критеріїв формалізації процесів забезпечення локальної функціональної стійкості розгалужених інформаційних мереж. Наукове періодичне видання «Системи управління, навігації та зв'язку». Полтава: ПНТУ, 2017. Вип. 1 (41). С. 122 – 126.
3. A.P. Musienko, O.V. Barabash, N.V. Lukova-Chuiko, I.P. Salanda Diagnostic model of wireless sensor network based on the random test of checks. Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences, 2018. – VI (18), Issue 158, Budapest, Hungary, pp. 25 – 28.
4. Кучук Г.А., Королев А.В., Пашнев А.А. Адаптивная маршрутизация в корпоративных сетях. Харків: ХВУ, 2003. 224 с.
5. Кучук Г.А. Інформаційні технології управління інтегральними потоками даних в інформаційно-телекомунікаційних мережах систем критичного призначення // Харків: ХУ ПС, 2013. 264 с.
6. V.A. Mashkov, O.V. Barabash Self-checking and Self-diagnosis of Module Systems on the Principle of Walking Diagnostic Kernel Engineering Simulation. – Amsterdam: OPA, 1998. Vol. 15. pp. 43 – 51.
7. Савченко А.В., Кравець В.О., Шевцова В.В. Аналіз методів побудови функції належності при обробці експертних знань. Вісник НТУ «ХПІ». Сер.: Техніка та електрофізика високих напруг. Х.: НТУ «ХПІ». 2012. № 52 (958). С. 126 – 132.
8. Додонов А.Г., Кузнецова М.Г., Горбачик Е.С. Введение в теорию живучести вычислительных систем // Отв. Ред. Гуляев В.А.; АН УСССР. Ин-т проблем регистрации информации. Киев: Наукова думка, 1990. 184 с.
9. Рубан И.В., Лукова-Чуйко Н.В., Мартовицкий В.А. Подход к классификации состояния сети на основе статистических параметров для обнаружения аномалий в информационной структуре вычислительной системы. Кибернетика и системный анализ. 2018. Том 54, № 2. С. 142 – 150.
10. Загидуллин Р.Р. Управление машиностроительным производством с помощью систем MES, APS, ERP. Монография. – Старый Оскол: ТНТ, 2011. 372 с.
11. Albert, Arthur Regression and the Moore-Penrose pseudoinverse. Burlington, MA: Elsevier, 1972. 195 p.

Надійшла (received) 22.10.2019

Прийнята до друку (accepted for publication) 20.11.2019

### Method of creating a single information space in a production enterprise with a functionally sustainable technological process

V. Sobchuk

**Abstract.** This paper analyzes the existing techniques for managing an industrial enterprise. The most famous of these are the following regulatory documents: MRP II (Manufacturing Resource Planning), ERP (Enterprise Resource Planning), APS (Advanced Planning & Scheduling Systems) and MES (Manufacturing Execution Systems). The main advantages and disadvantages of these management systems are outlined. The analysis shows the need to create new generation of management systems, which is closely related to the development of the method to create a single enterprise information space and integrated models for automated enterprise management systems. A methodology based on a systematic approach that provides formalized descriptions of the entire set of production and business processes is proposed; material objects and resources involved in the operational management of production and its design and technological preparation. This technique of creating a single information space is supported by the relevant basic information technologies that provide: reengineering of business processes of operational management and technical preparation of production in order to ensure the transition from functionally oriented to process organization of enterprise management; description and visual presentation of the electronic structure of the product and giving it the status of an enterprise standard; management of business processes of operational planning and technical preparation of production with the use of electronic product structure, aimed at supporting the functional tasks of APS, MES, PLM-systems. In particular, the paper deals with the mathematical model of technological process in an industrial enterprise. The concept and conditions of functional stability of technological process in an industrial enterprise are introduced. The criteria of functional stability of technological process are specified.

**Keywords:** production enterprise management, management standards, operational and production planning, network models, methods of theory of functional stability.