

**Ченгар О.В., Скобцов Ю.О., Секірін О.І.**  
Донецький національний технічний університет, м. Донецьк  
Кафедра автоматизованих систем управління  
e-mail: [chengarov@rambler.ru](mailto:chengarov@rambler.ru)

## **АНАЛІЗ МЕТОДІВ, МОДЕЛЕЙ, АЛГОРИТМІВ ОПЕРАТИВНОГО ПЛАНУВАННЯ РОБОТИ ВИРОБНИЧОЇ ДІЛЯНКИ**

### *Анотація*

*Ченгар О.В., Скобцов Ю.О., Секірін О.І. Аналіз методів, моделей, алгоритмів оперативного планування роботи виробничої ділянки. Розглянуті системи моделювання й оперативного планування роботи виробничої ділянки. Проведений аналіз методів штучного інтелекту, які дозволяють знаходити прийнятні рішення завдання складання оптимального розкладу робіт за короткий час.*

*Ключові слова: оперативне планування, системи моделювання, імітаційна модель, аналітична модель, генетичні алгоритми, табу пошук, мурашині алгоритми.*

**Вступ.** Автоматизація обробного й допоміжного устаткування з використанням сучасних комп'ютерних технологій, в умовах бурхливого розвитку машинобудування, є одним з основних напрямків технічного прогресу в машинобудуванні. Для забезпечення високої ефективності роботи виробничих ділянок і максимального використання можливості встаткування, необхідно створювати близькі до оптимального розклади роботи встаткування. Основним інструментом для цього є моделювання й оптимальне керування.

Для підприємств дискретного типу виробництва характерно позаказне планування в умовах великої розмаїтості номенклатури продукції, що випускається, і технологічних операцій [1]. Все це значно ускладнює завдання оперативно-календарного планування на таких підприємствах. Висока розмірність даного завдання й стохастичність характеристик ускладнює використання детермінованих методів для її рішення, а методи, засновані на евристичних, не завжди дозволяють одержати досить гарні рішення [2]. Більшість розроблених до теперішнього часу методик оперативно-календарного планування засновано на спрощених моделях завдання, що знижує їхню практичну значимість, або ці методики можуть бути застосовані лише для певних специфічних умов. Значну складність, крім того, представляє проблема оцінки якості отриманих розкладів. Таким чином, існує необхідність у розробці методики оперативно-календарного планування роботи підприємств дискретного виробництва, що дозволила б проводити оптимізацію розкладу випуску продукції по декількох критеріях якості з урахуванням існуючих обмежень, формувати змінно-добові завдання підрозділам цеху й при цьому забезпечувала б одержання оптимальних рішень. Проблеми оперативного планування вивчаються вже тривалий час. Невивченим залишається рух партій деталей безпосередньо у виробничому середовищі, у виробничій ділянці відповідно до технологічного маршруту. Із впровадженням у виробництво нового технологічного обладнання, постає проблема використання всіх його можливостей [2]. Актуальним завданням є побудова оптимальних розкладів роботи технологічної ділянки, відповідно до технологічного маршруту.

**Аналіз систем моделювання та оперативного планування роботи виробничої ділянки, які використовуються в машинобудуванні.** У цей час створено ряд складних систем моделювання й оперативного планування виробничої ділянки. Розглянемо особливості математичних моделей і методів оптимізації, які застосовуються в деяких системах управління оперативним плануванням.

Модуль оперативно-календарного планування в системі **Omega Production** [4]. У модулі вирішуються завдання оптимального формування розкладу роботи виробничих ресурсів, розрахунку графіків забезпечення комплектуючими й матеріалами відповідно до розкладу, обліку виконання виробничих завдань і формування безлічі звітів для оцінки ходу виробництва й керування їм на основі інформації про планування, виробничий і складський облік. У модулі Omega Production використовується евристичний алгоритм формування розкладу. Керування якістю розкладу при використанні евристичних алгоритмів виробляється через маніпулювання параметрами алгоритму. До недоліків цієї системи треба віднести наступне. У процесі виробництва може виникати відставання від графіка робіт. Це може бути обумовлено різними причинами: не завжди вдається вчасно забезпечити виробництво необхідними матеріалами й комплектуючими, урахувати людський фактор, збої в роботі встаткування й т.п. І якщо не коректувати виробничу програму, то збільшення відхилення фактичних строків виконання операцій від планових приведе до неможливості використати складений розклад.

Також для рішення завдань оптимального завантаження встаткування розроблена система календарного планування й диспетчерського контролю «**ФОБОС**» (ТОВ «Агентство індустріального розвитку») [5]. Розподіл завдань на робочі місця й автоматизований контроль за виконанням технологічних операцій здійснюється в системі «**ФОБОС**» на підставі оформлення традиційних робочих нарядів, які виписуються комп'ютером відповідно до точного виробничого розкладу. Виробничий розклад наочно описується діаграмою Ганта, де кожної операції ставиться у відповідність відрізок прямій, довжина якого пропорційна її тривалості. Ці відрізки, іменовані лініями Ганта, розташовуються напроти інвентарних номерів основного технологічного встаткування в послідовності, що відповідає виробничому розкладу. У системі реалізований принцип безперервного імітаційного моделювання руху матеріальних потоків. Убудований таймер, синхронізований з таймером комп'ютера, здійснює в реальному часі зрушення шкали. В автоматичному режимі всі лінії Ганта на діаграмі через кожні 5 хвилин зрушуються разом з тимчасовою шкалою. При цьому встаткування переводиться в стан, що відповідає розрахованому виробничому розкладу. Таким чином, відбувається процес імітаційного моделювання матеріальних потоків у реальному масштабі часу за умови, що відсутні збої в роботі встаткування. Треба, однак, помітити, що велика частина технологічних операцій виконується на універсальному встаткуванні. У таких випадках норми часу на обробку відповідних деталей вносяться технологом вручну. Людина, як відомо, може внести в систему й неточні дані. Саме з людським фактором, а також з якістю різального інструменту зв'язані основні порушення виробничого розкладу: на універсальному верстаті робітник дуже часто або закінчує операцію раніше запланованого строку, або не укладається у відведений йому технологічний норматив. Це може викликати лавинний ріст простоїв на інших робочих місцях. Подальша робота цеху за таким розкладом можлива тільки при відповідній комп'ютерній підтримці й належному диспетчерському контролю.

**Основні завдання оптимізації оперативного планування.** Сутність оперативно-календарного планування відображає критерій оптимальності - мінімізація тривалості виконання плану або сумарного часу очікування обслуговування деталей (виробів). Таким чином, пошук оптимального плану - це зведення до мінімуму не стільки простою встаткування, скільки часу, протягом якого деталі очікують обробки. Зведення до мінімуму часу очікування забезпечується розрахунками часу обробки всіх деталей, при якому щонайкраще синхронізується тривалість технологічних операцій і підвищується завантаження встаткування [6].

Завдання оптимізації процесів виробництва часто зустрічаються в оперативному керуванні. Ці завдання ставляться до складних оптимізаційних і комбінаторних завдань (завдання реальної розмірності ставляться до NP-повних) [6]. Розробка єдиної аналітичної моделі виробництва на сучасному етапі розвитку науки залишається дуже трудомістким завданням, для рішення якого необхідно прибігати до спрощень через які можуть бути отримані невірні результати, що в сукупності зі стрімким прогресом електронної обчислювальної

техніки створює передумови до широкого застосування імітаційного моделювання й мережних методів у рішенні управлінських завдань. Тому складання ефективної й гнучкої моделі виробництва є надзвичайно актуальним завданням.

Класична схема рішення завдань оптимізації виробничих процесів наведена на рисунку 1.

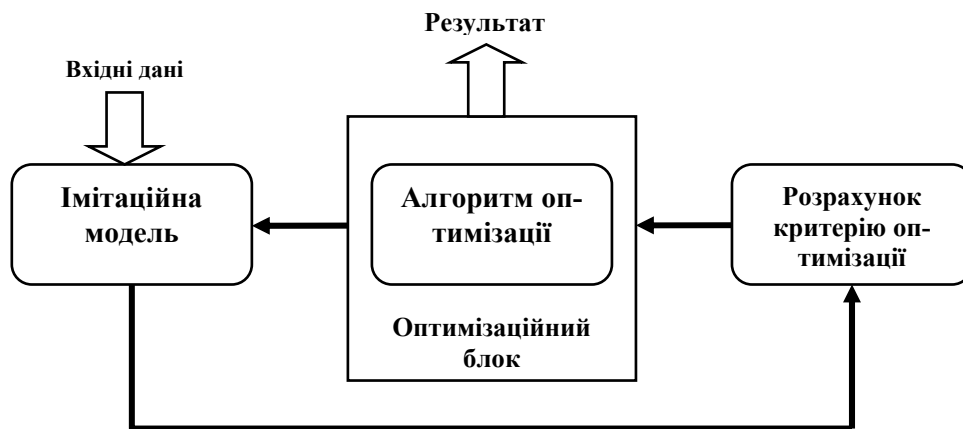


Рисунок 1 – Схема рішення завдань оптимізації виробничих процесів

Як видно з малюнка, об'єкт оптимізації приймається за «чорний ящик», і рішення можна розбити на дві основні частини:

- розробка моделі виробництва;
- розробка алгоритму оптимізації.

**Аналіз сучасних методів моделювання.** Найбільше часто для моделювання роботи об'єкта оптимізації (виробничого процесу) використовуються наступні методи моделювання:

- імітаційні моделі;
- аналітичні моделі;
- теорія мереж масового обслуговування;
- об'єктно-орієнтований підхід.

*Імітаційна модель.* Основними вимогами до імітаційних моделей є адекватність моделі, максимальна наближеність алгоритмів до методології об'єктного програмування й універсальність, як можливість подання всього безлічі дискретних станів системи [6]. У системі керування імітаційну модель варто розглядати як одну з форм подання знань про керований об'єкт для підтримки прийняття рішень поряд з інформаційним забезпеченням, а також як засіб одержання нових знань. При оперативному керуванні за допомогою імітаційного моделювання можуть вирішуватися завдання планування виробництва, зовнішніх поставок, прогнозування ходу виробничого процесу з метою визначення ймовірності виконання плану, необхідності проведення різного роду корекцій, оцінка й вибір стратегій керування [7]. У такий спосіб позитивними рисами імітаційних моделей є висока точність прогнозів (за умови адекватності моделі), гнучкість моделі стосовно нових ситуацій (можливість її швидкої перебудови в силу блокового принципу побудови). До негативних рис звичайно відносять низьку можливість пояснення поведінки системи, необхідність мати досить великий обсяг емпіричної інформації для ідентифікації й верифікації моделі й дуже високу вартість розробки. Однак, при досягненні деякого порога складності імітаційної моделі, можливість безпосереднього аналізу зростає обсягу інформації з її допомогою, стає проблематичною.

*Аналітична модель.* Одним з основних вимог, пропонованих до підсистем оперативно-календарного планування, є точність формованого розкладу робіт. Точність будь-якої моделі, як правило, залежить від повноти її подання, адекватності умовам реальної виробничої системи. У більшості моделей оперативно-календарного планування розклад традиційно будувався щодо основних класів обслуговуючих пристроїв. На множині номенклатури деталей, представлений безліччю одиниць планування, якими є партії-операції, і безліччю обслуговуючих при-

строїв, необхідно скласти оптимальний розклад [7]. Узагальнена аналітична модель для оперативного-календарного планування, що включає наступні елементи:

втрати часу, при надходженні нових партій деталей;

втрати часу, пов'язані з очікуванням партій деталей, що перебувають у необхідний момент на обробці на попередній операції;

втрати часу, пов'язані з очікуванням партій деталей, які транспортуються;

втрати часу, пов'язані із зайнятістю транспортних засобів;

Отримана модель оптимізується одним із чисельних методів і виходить оптимальне рішення на зазначеному тимчасовому інтервалі. Недоліками даного виду моделювання є те, що оперативне планування, є досить складною динамічною системою, аналітична модель якої описується досить складними рівняннями, складання яких неможливо без певного роду допущень, що позначається на її точності.

*Теорія мереж масового обслуговування.* Для дослідження систем, які складаються з різномірних елементів, застосовується також апарат теорії мереж масового обслуговування (ТММО) [6]. Мережа масового обслуговування являє собою сукупність систем масового обслуговування, у якій циркулюють заявки, переходячи з однієї системи в іншу. В основі ТММО лежить мережний опис технологічного процесу обробки виробу. Мережа, при цьому відображає взаємозв'язки між автономно функціонуючими елементами й підсистемами. Мережа являє собою граф, що складається з безлічі вузлів й орієнтованих дуг, що з'єднують вузли. При мережному поданні структури цехів вузли виступають як автономні агрегати або позиції обробки, дуги показують напрямок потоку заявок (виробів) у системі. Залежно від поставленого завдання й досліджуваної функції змінюється число вузлів у мережі, їхній состав і зв'язки між ними.

*Об'єктно-орієнтований підхід.* Об'єктне моделювання - моделювання, при якому всі модельовані компоненти системи представляються у вигляді об'єктів з особливою структурою, набором параметрів і методів, описаних за допомогою комп'ютерних мов моделювання. Такий підхід у моделюванні дозволяє легко створювати моделі об'єктів з вже створених прототипів, що робить процес моделювання й організації процесу взаємодії простішим [8]. Об'єктно-орієнтоване моделювання ґрунтується на описі структури й поведінки проектованої системи, тобто, фактично, відповідає на два основні питання:

- 1) з яких частин складається система;
- 2) у чому полягає відповідальність кожній з частин.

Виділення частин виробляється так, щоб кожна мала мінімальний за об'ємом і точний набір виконуваних функцій (обов'язків), і при цьому взаємодіяла з іншими частинами якомога менше. Подалі уточнення приводить до виділення дрібніших фрагментів опису. У міру деталізації опису й визначення відповідальності виявляються дані, які необхідно зберігати, наявність близьких по поведінці агентів, які стають кандидатами на реалізацію у вигляді класів із загальними предками. Після виділення компонентів і визначення інтерфейсів між ними реалізація шкірного компонента може проводитися практично незалежно від останніх [7].

**Аналіз сучасних алгоритмів оптимізації.** З погляду оптимізації, усі рішення, які отримуються в результаті вироблення планів, можна розділити на наступні: оптимальні за всіма критеріями; оптимізовані по одному/декільком критеріям; прийнятні по всіх обмеженнях. Процес побудови виробничого розкладу можна розділити на два етапи: знаходження можливих розкладів виробничих робіт на основі різних пріоритетних правил і виділення з них найкращого (оптимального або близького до оптимального), згідно необхідних критеріїв.

Вибір оптимального рішення заданого набору робіт на наявному обладнанні досліджується вже давно, але оптимальні рішення отримані лише для найпростіших випадків. Алгоритми побудови розкладів без проведення повного або часткового перебору варіантів є вирішальними евристичними правилами й відіграють важливу роль у прикладній теорії розкладів. Однак евристичні алгоритми засновані на прийомі, який називається "зниженням вимог".

Він полягає у відмові від пошуку оптимального рішення й знаходження замість цього "гарного рішення" за прийнятний час. Методи, застосовувані для побудови алгоритмів такого типу, сильно залежать від специфіки завдання [6,7]. Тобто універсального алгоритму не існує й використання того або іншого евристичного правила потрібно починати після того, як конкретне виробниче завдання було вирішено різними методами й обране більш підходяще рішення, згідно з експертними оцінками з урахуванням необхідних обмежень і критеріїв оптимальності. Науковий напрямок Natural Computing, що інтенсивно розвивається останнім часом, заснований на принципах природних механізмів прийняття рішень і включає генетичні алгоритми, нейромережні обчислення, клітинні автомати, мурашині алгоритми, методи часток, що рояться, Табу пошук і ін. [8]

*Генетичні алгоритми*, використовуючи аналогію між природним добром і процесом вибору найкращого рішення з множини можливих, є одним з найпоширеніших варіантів реалізації еволюційних алгоритмів [9]. Моделюючи відбір кращих планів як процес еволюції в популяції особин, можна одержати рішення завдання оптимізації, задавши початкові умови еволюційного процесу. У сучасних умовах локальний пошук на базі генетичних алгоритмів реалізується досить просто. Перевагою генетичних алгоритмів перед іншими є простота їх реалізації, відносно висока швидкість роботи, паралельний пошук рішення відразу декількома особинами, що дозволяє уникнути влучення в "пастку" локальних оптимумів (знаходження першого, що попався, але не самого вдалого оптимуму). Недолік - складність вибору схеми кодування, тобто вибору параметрів і виду їх кодування у "хромосомах", можливість виродження популяції, складність опису обмежень планування. У силу цих факторів, генетичні алгоритми потрібно розглядати як інструмент наукового дослідження, а не засіб аналізу даних.

*Метод часток, що рояться*, (particle swarm) найбільш простий і один з наймолодших методів еволюційного програмування [8]. Група дослідників дійшла висновку про можливість розв'язку завдань оптимізації за допомогою моделювання поведінки груп тварин. У реалізації даного алгоритму багатомірний простір пошуку населяється роєм часток (елементарних рішень). Координати частки в просторі однозначно визначають рішення завдання оптимізації. Крім координат кожна із часток описується швидкістю переміщення й прискоренням. У процесі переміщення частки здійснюють "прочісування" простору рішень і тим самим знаходять поточний оптимум, до якого на наступному кроці спрямовуються інші частки. Для введення випадкової складової в процес пошуку можуть бути включені "божевільні" частки, закон руху яких відрізняється від закону руху інших. Цей алгоритм завдяки своїй простоті (менш десяти рядків коду) і швидкості вважається дуже перспективним для завдань планування.

*Табу пошук* (Tabu Search) являє собою варіацію відомого методу градієнтного спуску з пам'яттю [8]. У процесі пошуку ведеться Табу список (заборонених для переходу) позицій із числа вже розрахованих. Критичними параметрами алгоритму є діапазон заборон. У процесі пошуку здійснюються операції включення в заборонений список станів навколо поточного стану, що додає фактор випадковості в процес пошуку.

*Мурашині алгоритми* являють собою новий перспективний метод рішення завдань оптимізації, в основі якого лежить моделювання поведінки колонії мурах [8,10]. У відмінності від вищеописаних алгоритмів, мурашиний алгоритм для оптимізації завдань, подібних до оперативного планування, не вимагає наявності моделі об'єкта оптимізації. Поведінка «мурах» можна розцінювати як рух партій деталей по виробничій ділянці. Існують різні типи мурашиних алгоритмів: простий мурашиний алгоритм, мурашина система, система мурашиних колоній, максі-мінна мурашина система, Q-мурашина система, швидка мурашина система й ін. [8] Основною ідеєю мурашиного алгоритму є моделювання поведінки мурах, колективної адаптації. Колонія являє собою систему з дуже простими правилами автономного поведінки особин. Однак, незважаючи на примітивність поведінки кожної окремої мурахи, поведінка всієї колонії виявляється досить розумним. Таким чином, основою поведінки мурашиної колонії служить низькорівнева взаємодія, завдяки якій, у цілому, колонія

являє собою розумну багатоагентну систему. Взаємодія визначається через хімічну речовину - феромон, що відкладається мурахами на пройденому шляху. При виборі напрямку руху мураха виходить не тільки з бажання пройти найкоротший шлях, але й з досвіду інших мурах, інформацію про який одержує через рівень феромонів. Із часом відбувається процес випару феромонів, що є негативним зворотним зв'язком. Ці принципи перевірені часом – вдала адаптація до навколишнього світу протягом мільйонів років означає, що природа виробила дуже дієвий механізм поведження. Перевагою даного алгоритму для завдання оптимізації маршруту обробки деталей є, то що алгоритм не вимагає моделі виробничої ділянки, рух мурах відповідає руху деталей по технологічному маршруті [10]. Також треба відмітити, що використання мурашиних алгоритмів дає найбільш вагомий результат для оптимізації динамічних процесів, параметри яких суттєво змінюються у реальному часі.

Використання еволюційних методів, наприклад, мурашиного алгоритму, дозволяє розв'язати задачу мінімізації переналагодження й простоїв устаткування при великій кількості верстатів [10]. Процес переналагодження займає важливе місце в системі планування, тому що він займає значну частину загального календарного часу (від декількох годин до цілої зміни). Чим частіше потрібна переналагодження (за умовами виробництва), тим більше виявляються втрати часу. Тому однією з основних задач є вдосконалювання систем переналагодження обладнання, а також використання методів, які дозволяють одержати оптимальну послідовність обробки деталей на верстатах з мінімальними втратами часу на переналагодження. У порівнянні з іншими методами даний алгоритм дає найкращі рішення, але вимагає більше часу на обчислення, ніж, наприклад, Табу пошук, який знаходить гарне рішення (але не оптимальне) у п'ять разів швидше. Порівнюючи мурашиний алгоритм із точними методами, наприклад динамічним програмуванням або методом галузей і границь, можна сказати, що він знаходить близькі до оптимального рішення за значно менший час навіть для завдань невеликої розмірності.

**Висновки.** В результаті аналізу існуючих систем планування виявлені наступні недоліки:

розроблені моделі не дозволяють урахувати багато факторів, що впливають на хід виробництва, які для різних підприємств можуть бути індивідуальні;

використання тільки математичних методів обмежується неможливістю швидкого реагування на виникаючі ситуації, що вимагають негайного коректування планів.

відсутність механізму оптимізації технологічного процесу обробки деталей, у найкращому разі система дає кілька варіантів комбінацій партій деталей (розміри, черговість запуску в обробку), щоб користувач сам вибрав той, який його задовольняє.

Для виключення недоліків подібних розробок необхідно використати еволюційні методи, які дозволили б одержувати оптимальні рішення проблем реальних виробничих ситуацій за малий час. При розв'язку такі методи розглядають систему планування як чорний ящик, коли на вході задаються різні значення параметрів планування, після чого оцінюється ефективність одержуваних розкладів з погляду ключових показників ефективності. Таким чином, календарне планування, що становить основу оперативного керування підприємством, дуже трудомістке завдання. Її рішення має важливе значення для роботи всього підприємства. У традиційному підході рішення присутні істотні недоліки, тому в результаті роботи планується одержати нові методи, які будуть ґрунтуватися на системах штучного інтелекту, які дозволять створювати більш гнучкі моделі, ніж методи статистичної обробки інформації.

На основі аналізу існуючих розробок в області еволюційних методів перспективним рішенням складних комбінаторних завдань оптимізації (особливо динамічних задач) є використання мурашиного алгоритму. Це дозволить суттєво поліпшити систему оперативного планування, тим самим скоротивши час одержання оптимальних або прийнятних виробничих розкладів. Також з появою випадкових подій, що впливають на процес виробництва, дозволить швидко реагувати на зміну й внесення коректив у вихідні дані. Для розвитку систем

планування можлива розробка програмного продукту, що дозволяє будувати оптимальні виробничі плани, використовуючи інструменти еволюційних методів.

### Література

1. Сачко Н.С. Организация и оперативное управление машиностроительным производством / Н.С. Сачко. – Минск: Новое знание, 2005. – 635 с.
2. Михайлова Л.В. Формирование и оперативное управление производственными системами на базе поточно-группового производства в автоматизированном режиме / Л.В. Михайлова, Ф.И. Парамонов, А.В. Чудин. – М.: ИТЦ МАТИ, 2002. – 60 с.
3. Тюленев Л. В. Организация и планирование машиностроительного производства: Учебное пособие / Л. В. Тюленев. – СПб: Бизнес-пресса, 2001. – 304 с.
4. Omega Production“Корпоративная информационная система предприятия “Omega Production”. – Электронные данные. – Режим доступа: <http://www.omegasoftware.ru/> – Дата доступа: вересень 2009. – Загол. з екрану.
5. Инженерная компания Глосис. Интегрированная система технологической подготовки производства, оперативного календарного планирования и диспетчерского контроля цеха механообработки FOBOS. – Режим доступа: <http://www.glosys.ru/products/fobos2.htm> – Дата доступа: жовтень 2009. – Загол. з екрану.
6. Маляренко И. Планирование и оптимизация / И. Маляренко // Корпоративные системы. – 2006. – № 27. – С. 29-32.
7. Люгер Дж. Ф. Искусственный интеллект. Стратегии и методы решения сложных проблем / Дж. Ф. Люгер // – 4-е изд. – М.: Вильямс, 2005. – 864 с.
8. МакКоннелл Дж. Основы современных алгоритмов / Дж. МакКоннелл — М.: Техносфера, 2004. — 368 с.
9. Bryant K. Genetic Algorithms and the Traveling Salesman Problem / K. Bryant, A. Benjamin. – Department of Mathematics, HarveyMudd College, 2000.
10. Dorigo M. Swarm Intelligence, Ant Algorithms and Ant Colony Optimization // Reader for CEU Summer University Course «Complex System». — Budapest, Central European University, 2001.— P. 1–38.

### Аннотация

**Ченгарь О.В., Скобцов Ю.А., Секирин А.И. Анализ методов, моделей, алгоритмов оперативного планирования работы производственного участка. Рассмотрены системы моделирования и оперативного планирования работы производственного участка. Произведен анализ методов искусственного интеллекта, которые позволяют находить приемлемые решения задачи составления оптимального расписания работ за короткое время.**

**Ключевые слова:** оперативное планирование, системы моделирования, имитационная модель, аналитическая модель, генетические алгоритмы, табу поиск, муравьиные алгоритмы.

### Abstract

**Chengar O.V, Skobtsov J.A., Sekirin A.I. Analysis of methods, models, algorithms of operational planning of work of an industrial site. Systems of modelling and operational work planning an production area are considered. The analysis of an artificial intelligence methods which allow to find comprehensible decisions of a optimum works schedule in a short space of time is made.**

**Keywords:** operational planning, modelling systems, imitating model, analytical model, genetic algorithms, a taboo search, ant algorithms.

Здано в редакцію:  
26.03.2010р.

Рекомендовано до друку:  
д.т.н, проф. Чичикало Н.И.