

УДК 621.6

О.М. Шелковий, д-р техн. наук, В.А. Фадєєв д-р техн. наук,  
О.В.Набока, канд. техн. наук, Харків, Україна

## ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗБОРКИ СКЛАДНИХ МАШИНОБУДІВНИХ ВИРОБІВ НА ЗАСАДАХ ІНТЕГРАЦІЇ МЕХАНОСКЛАДАЛЬНИХ ОПЕРАЦІЙ

*Рассмотрены вопросы повышения эффективности сборки сложных машиностроительных изделий на принципах интеграции механосборочных операций.*

**Ключевые слова:** машиностроительные изделия, эффективность сборки, механосборочные операции

*Розглянуто питання підвищення ефективності збирання складних машинобудівних виробів на принципах інтеграції механоскладальних операцій.*

**Ключові слова:** машинобудівні вироби, ефективність збирання, Механоскладальні операції

*The problems of increasing the efficiency of assembly of complex machine-building products on the principles of integration of mechanic-assembly operations are considered.*

**Keywords:** machine-building products, assembly efficiency, mechanical assembly operations

Практика організації виробництва каже про те, що рівень ручної праці та її спеціалізація при складанні виробів залежить як від складності складальної одиниці, так і від програми її виготовлення (рис. 1). У аерокосмічній промисловості найбільш трудомісткими, з точки зору складання, є вироби, в які входять понад 20 з'єднаних деталей (складні машинобудівні вироби - СМВ).

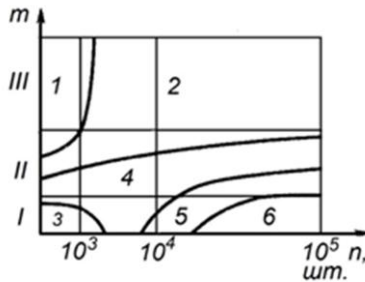


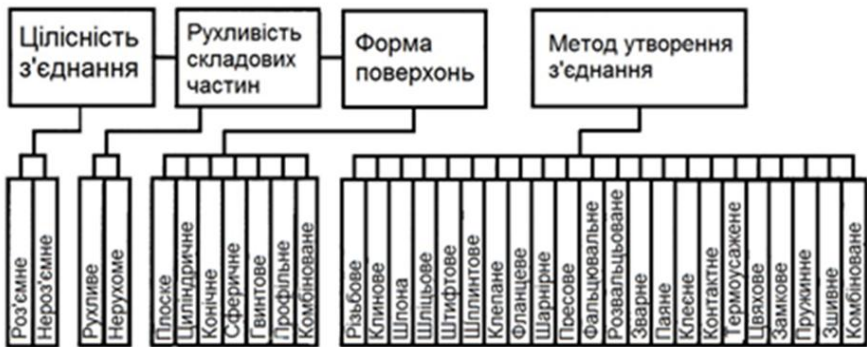
Рисунок 1. Сфери застосування різних способів збирання в залежності від річної програми випуску (n) і складності виробу (m):

I – прості вироби (до 5 – 8 деталей); II – вироби середньої складності (6 – 20 деталей); III – складні вироби (більше 20 деталей);

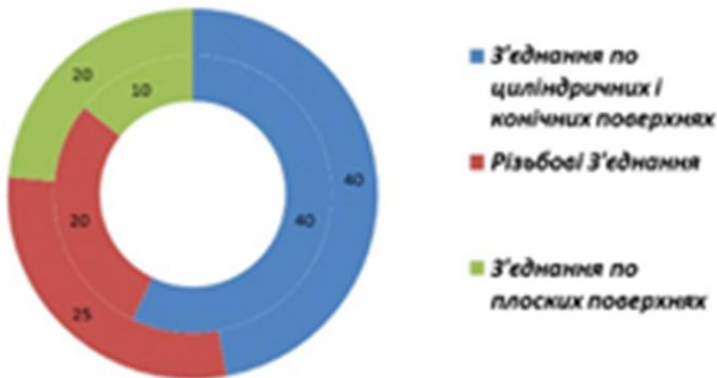
1 – ручна зборка; 2 – ручна механізована зборка; 3 – зборка з використанням універсальних роботів; 4 – зборка з використанням спеціалізованих роботів; 5 – зборка з використанням спеціальних роботів; 6 – спеціалізовані робочі місця.

В сучасному машинобудівному виробництві формування виробів виконується із застосуванням методів з'єднання, що надані на рис. 2, А. В СМВ найбільш поширеними є з'єднання, що наведені на рис. 2, Б.

Для виконання цих з'єднань в сучасній практиці механоскладального виробництва застосовуються технологічні прийоми, які залежать як від виду об'єкта складання, так і від організаційних умов її виконання (рис. 3, А). В той же час, із рис. 3, Б видно, що в умовах дрібносерійної зборки підгінні, регулювальні та, супроводжуючі їх, демонтажні роботи в загальній трудомісткості зборки складають від 43% до 49%. Зменшення долі цих робіт в загальних витратах робочого часу і трудовитратах на зборку може істотно зменшити собівартість продукції, поліпшити та стабілізувати якість виробів в партії.



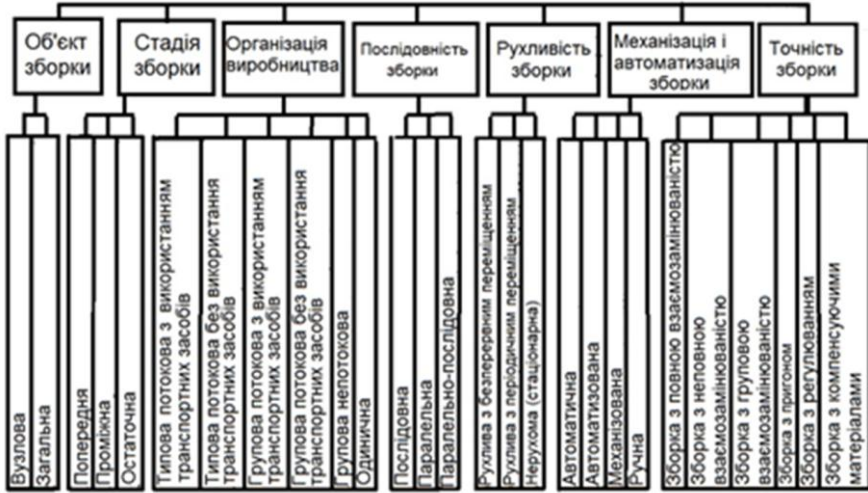
А. – Класифікація видів з'єднання (за А.М. Балабановим)



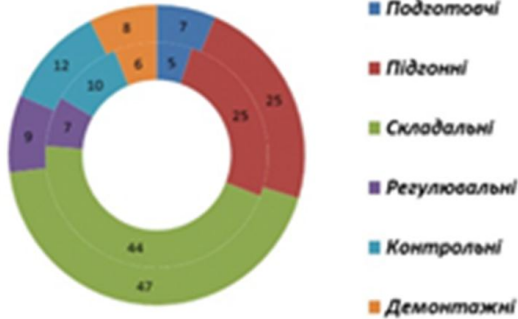
Б. – Відсоток з'єднань, що найбільш часто використовуються у СМВ

Рисунок 2. Класифікація та відсоток з'єднань, що найбільш часто використовуються у СМВ

Складання СМВ передбачає послідовне формування з'єднань між деталям и та складальними одиницями з урахуванням серійності процесу виробництва, точності СМВ і рівня механізації та автоматизації виробничих процесів (рис. 4, А). При цьому вирішується комплекс задач, що пов'язані з послідовністю встановлення деталей, їхнього з'єднання, послідовність зборки складальних одиниць, порядку зборки та формування її функціональних параметрів (рис. 4, Б). При вирішенні кожної з цих задач в умовах серійного виробництва може виникнути ситуація, пов'язана з необхідністю регулювання положення одних деталей відносно інших, або їхньої додаткової механічної обробки з метою формування замикаючих розмірів складальних ланцюгів.



А. – Класифікація видів зборки (за А.М. Балабановим)



Б. – Пітова вага трудомісткості робіт дрібносерійної зборки  
 Рисунок 3. Класифікація видів зборки та пітова вага трудомісткості робіт дрібносерійної зборки

Таким чином, виникає потреба в інтеграції зборки з механічною обробкою деталей на окремих операціях. Це призводить або до селекції деталей, що збираються, або їхньої механічної обробки чи просторовому регулюванні.

Управління цими процесами ще до з'єднання деталей в складальні одиниці можливо в тому випадку, якщо будуть встановлені причинно-наслідкові зв'язки між процесами зборки та механічної обробки окремих деталей.

Аналіз послідовності утворення виробу та її зв'язок механічною обробкою деталей (рис. 5) вказують на наявність причинно-наслідкових зв'язків між відстанями поміж деталями в складальній одиниці, властивостями з'єднань та способами забезпечення точності вузла, з однієї сторони, та етапами механічної обробки деталей, на яких формуються ці параметри, з іншої.

<b>Організаційна форма зборки</b> Склад складальних одиниць	<b>Сформуувати базові структурні одиниці виробу.</b> Сформуувати складальні одиниці з елементів виробу, що відповідають вимогам: можливість незалежної зборки; винесення максимального об'єму складальних робіт із загальної зборки на вузлову; окреме виділення з'єднань, що вимагають спеціального устаткування; визначеність базування усіх елементів складальної одиниці; відсутність елементів, що закривають доступ елементам з інших складальних одиниць; можливість забезпечення точності заданим способом.
<b>Спосіб забезпечення точності</b>	Побудувати схему базування. Виявити і розрахувати розміри ланцюги. Виявити деталі-компенсатори і визначити умови їх постачання.
<b>Порядок утворення виробу.</b>	Побудувати можливий порядок установки деталей. Побудувати порядок з'єднань. Побудувати порядок складальних одиниць. Побудувати порядок складальних операцій по видах
<b>Склад операції.</b>	Побудувати порядок переходів по виконанню складальних робіт. Визначити межі етапу послідовності утворення виробу, що виконується в окремій операції. Визначити технологічні засоби, необхідні для виконання робіт на даному етапі. Визначити або розрахувати параметри (розмірні або функціональні), які необхідно забезпечити на цьому етапі.

А. Завдання на проектування технології зборки СМВ.



Б. Зміст завдання що до побудови порядку утворення виробу за технологічним процесом зборки.

Рисунок 4. Завдання на проектування та порядок утворення виробу методами дрібносерійного складання

Відомо, що навіть правильно виготовлені деталі не дають гарантії того, що з них може бути зібраний вузол без допоміжних операцій и переходів, на

яких має бути «підігнано» положення деталі в просторі згідно зі складальним кресленням. Практика такої зборки, як правило, підвищує собівартість вузла на 10 – 25 %, і подовжує час складання на 70 – 100 % порівняно зі збіркою без підгонки.

Запобігти цьому можна в тому випадку, якщо процес складання (його послідовність та розміри замикаючих складальних ланцюгів) буде безпосередньо впливати на процеси формування розмірів деталей і властивості їхніх поверхонь.

Тоді при обробці деталі буде виникати два рівні контролю за її розмірами та властивостями поверхонь:

перший – традиційний, пов'язаний з необхідністю виконання вимог креслення деталі;

другий – пов'язаний з корегуванням розмірів обробки та характеристик поверхонь з врахуванням того, чи входять розміри, що формуються, до складальних ланцюгів і яким чином вони впливають на розміри, що контролюються у складальній одиниці.

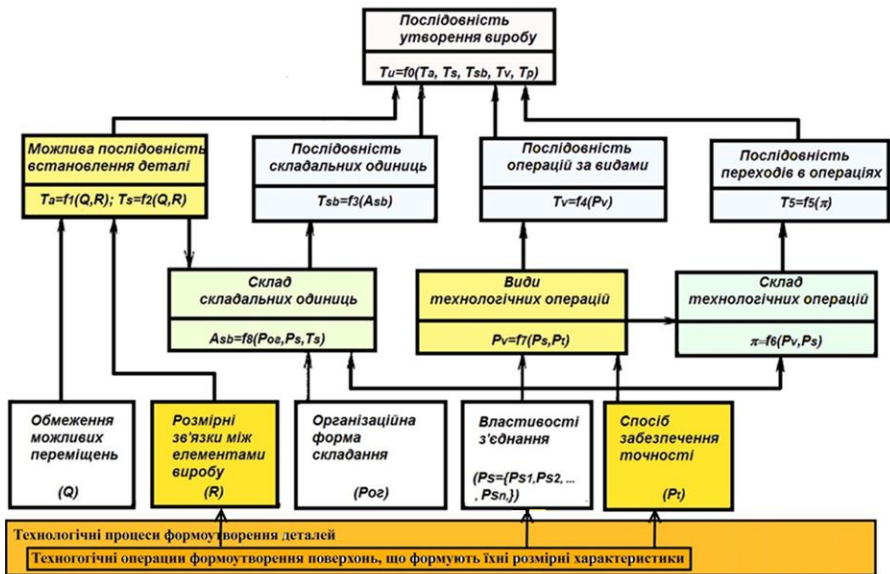


Рисунок 5. Схема формування послідовності утворення виробу та її зв'язок з механічною обробкою деталей

Такий підхід наводить на думку про те, що паралельно з процесом виготовлення деталей повинен виконуватись віртуальний процес їхньої зборки з урахуванням реальних розмірів поверхонь деталі, які вже отримані в результаті механічної обробки різанням.

Тоді інформація про послідовність зборки деталей в складальну одиницю стає тією керуючою інформацією, яка задає послідовність обробки деталей, що входять до цього вузла. Такий підхід до проектування технологічних процесів складання і механічної обробки (ТПСіМО) деталей вузла в купі з реальною обробкою деталей та їхньою зборкою в складальну одиницю зображено на рис. 6.

**У якості вихідних даних для проектування ТПСіМО** використовуються: 3D модель складального вузла; планування дільниць, на яких виконується зборка вузла та механічна обробка його деталей; параметри устаткування, що використовується; структури ТПСіМО, які можуть бути використані; розміри виробничих завдань та послідовність їхнього виконання.

**На етапі формування варіантів упорядкування послідовностей зборки деталей у вузлі** розраховується коефіцієнт зборки ( $k_{sb}$ ), за значенням якого ранжуються базові деталі у складальному вузлі (тобто такі деталі, на які базуються інші деталі в зборці).

Вибір деталі для кріплення виконується після того, як до  $i$ -ї базової деталі приєднується  $i+1$  базова деталь.

Узагальнену методику 3D - моделювання функціональних характеристик СДЗ СМВ можна навести у вигляді наступних етапів (рис. 6):

**I етап – розробка зборки 3D моделі обладнання, що моделюється**, яка відповідає початковому положенню об'єктів імітації в CAD Solid Works .

**II етап – конвертація елементів 3D моделі:** \*.SLDASM  $\rightarrow$  \*.STL зі зберіганням їхнього положення у просторі.

**III етап – встановлення лінійного та кутового положення локальних осей координат елементів 3D моделі.** В подальшому результати цього етапу застосовуються для програмування процесу переміщення елементів 3D моделі (рис. 6). **IV етап - накладення зв'язків (прив'язка) об'єктів, що входять до імітаційної моделі.** Перед початком прив'язки об'єктів моделі визначають їхню функціональну взаємозалежність (зміщення, поворот та інші), а потім шляхом формування відносин взаємозалежності між елементами моделі формується граф прив'язки (рис. 6).

**V етап - побудова програми 3D моделювання складального модуля.** Для написання програми використовуємо команди: зсув, поворот, очікування, цикл, умова, одночасно, команда.

Зберігаємо модуль. Модуль зберігається у форматі (\*.GPM3D).

Для реалізації методики оптимізації організаційно-технологічної структури СДЗ СМВ побудовано функціональну модель системи імітаційного 3D - моделювання складальних процесів. В неї закладено принцип єдиного простору функціонування системи імітаційного моделювання виробничих систем складання вузлів. СДЗ СМВ складається з системного монітора (СМ), який керує перетворенням інформації як в процесі моделювання, так і при підготовці вхідної інформації (рис. 7).

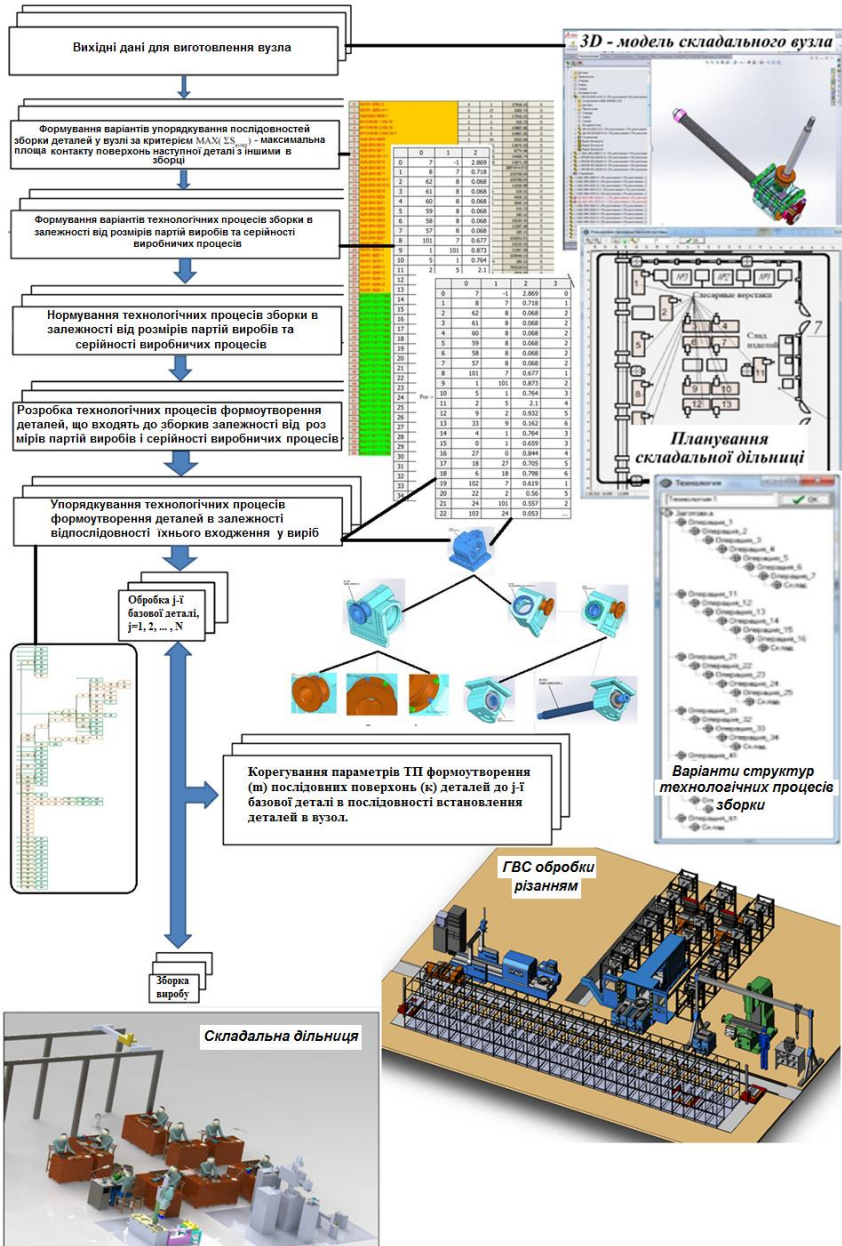


Рисунок 6. Загальна схема інтегрованої технології механоскладального виробництва СМВ

У системі керування базами даних (СУБД) сконцентровані всі дані імітаційного моделювання. До них відносяться: опис моделей; вхідні параметри для моделювання; результати моделювання. Підсистема опису структури елементів моделі описує взаємозв'язки елементів моделі. Підсистема опису структури моделі формуює структури моделі, чітку послідовність вхідних елементів у моделі.

Відправною точкою для формування імітаційної моделі виробничої системи є організаційно-технічна структура підрозділу. До її складу входять структура і параметри транспортно-накопичувальної і складальної підсистем та їхнє розміщення. Тому процес створення імітаційної моделі розпочинається з накопичення переліченої вище інформації. Для цього використовуються наступні підсистеми:

Генератор імітаційної моделі транспортної системи (ГІМТС) розташовує на плануванні цеху транспортно-накопичувальне і оброблювальне устаткування, а так само створює транспортні шляхи, по яких переміщуються матеріальні потоки в ході виконання виробничого завдання.

Транспортно-накопичувальне і збиральне устаткування має свої моделі, що управляють, синтезуються Генератором імітаційних моделей виробничих модулів (ГІМВМ).

Основою для його роботи є 3D моделі вузлів і механізмів, що зберігаються у базі даних (БД устаткування), а так само технологічна інформація про режим їх роботи (БД процес), рис. 7.

*Структурно-функціональна схема системи імітаційного моделювання виробничих процесів*

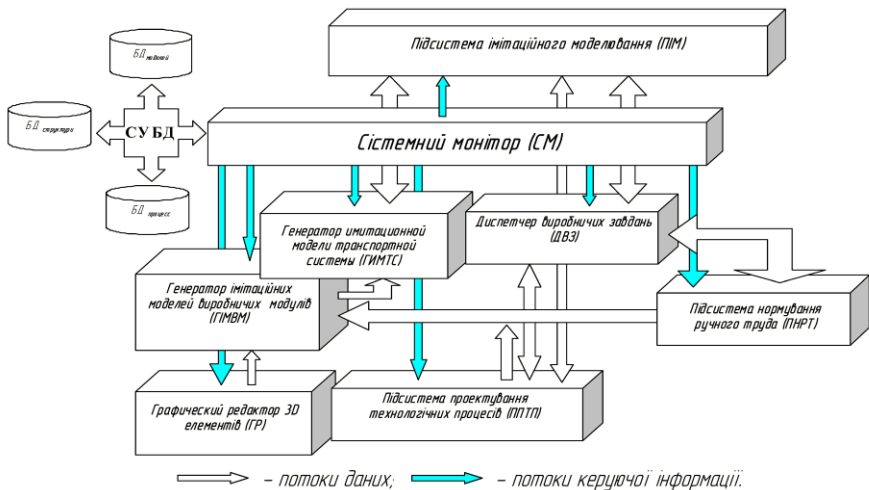


Рисунок 7. Функціональна модель системи імітаційного 3D - моделювання складальних процесів



Джерелами інформації для БД про устаткування і технологічні процеси є: Під-система проектування типових технологічних процесів (ПП ТП); підсистема нормування ручної праці (ПНРП). Вони реалізовані у вигляді автономних підсистем і управляються системним монітором.

Графічний редактор 3D елементів (ГР) генерує графічні 3D моделі динамічних і статичних об'єктів візуальної частини імітаційної моделі (це може бути: Solid Works, ProEngineer, Inventor або інша CAD системи).

ПП ТП здійснює пошук типових технологічних маршрутів складання виробів у базі даних (БД процес, рис. 7), як для початкової стадії проектування, так і в ході імітації процесу складання (рис. 9). Особливість системи моделювання полягає в тому, що технологічний процес, прийнятий як початковий у момент запуску партії виробів на збирання може коригуватися залежно від поточної виробничої ситуації (відмови силових агрегатів або відсутність вільного устаткування для виконання завдання та ін.). Для цього передбачений механізм опитування усіх об'єктів моделювання з метою аналізу їх стану (зайнятий, вільний, чекає завантаження та ін.). Якщо вільне устаткування дозволяє реалізувати один з варіантів типового технологічного процесу так, щоб з одного боку, виконати складання усієї партії виробів в терміни, що не перевищують час встановлене завданням, а з іншою, щоб час на переміщення і зборку виробу на новому робочому місці по новому технологічному процесу не перевищував часу на складання і переміщення до верстата, по існуючому технологічному процесу, зайнятому на момент опитування, то він приймається як робочий процес. При цьому враховується наявність вільних транспортних пристроїв.

Внаслідок чого формується новий технологічний процес, який в якості типового процесу заноситься у базу даних (БД процес, рис. 7).

Моделювання оброблювальних і транспортних модулів з використанням ручної праці припускає знання функціональних характеристик робітників (швидкостей переміщення, повороту, підйому і опускання вантажу, вантажопідйомності, помилковості, стомлюваності та ін.). Ці характеристики нормуються в Підсистемі нормування ручної праці (ПНРП) і передаються ГИМТС і ГИМПМ.

У функції ГИМТС так само входить рішення задачі створення транспортних шляхів і "прив'язки" до них технологічного устаткування. З цією метою для кожного виробничого підрозділу (цеху, ділянки, оброблювального модуля) створюється своя транспортна мережа (рис. 8) і за нею закріплюються оброблювальні модулі, склади і транспортне устаткування. У рамках транспортної мережі вказуються місця завантаження, розвантаження устаткування, перераховуються технологічні і складські модулі обслуговувані різними видами транспортних пристроїв. Уся пере-лічена вище інформація зберігається у БД устаткування і БД планування.

Диспетчер виробничих завдань (ДВЗ) реалізує функції планування і контролю їх виконання. Завдання на збирання виробів можуть бути сформовані не лише до моменту запуску ПІМ, але і в ході моделювання виробничого процесу. ДВЗ "прив'язує" виробничі завдання до конкретних технологічних процесів і ставить їх в чергу. Витягання завдань з черги здійснюється ПІМІВ відповідно до концепції максимальної пропускної спроможності системи збирання. ДВЗ фіксує стан партій зборки на момент переривання процесу моделювання. Він дозволяє зберегти цю інформацію у базі даних і в подальшому запусити процес моделювання не з початку, а з точки зупинки. Такий підхід до моделювання особливо актуальний в тих випадках, коли процес імітації поєднується з роботою виробничої системи.

Переміщення інформації між підсистемами, контроль її цілісності і актуальності здійснює СУБД.

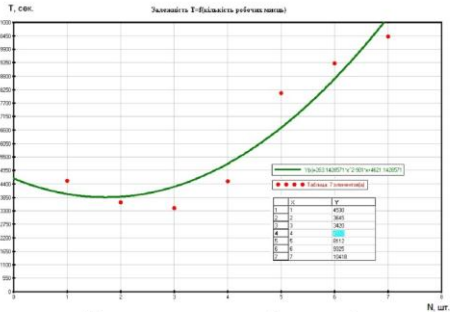
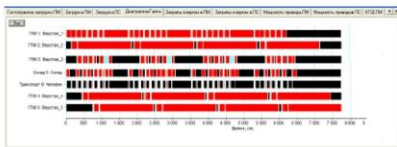
Після того, як усі структурно-параметричні складові моделі введені, СМ тестує її і передає управління ПІМ.

До складу ПІМІВ входить візуальна, текстова і графічна компоненти. Візуальна компонента ПІМІВ дозволяє спостерігати за процесом моделювання по діях, що відбуваються на плануванні. Вона реалізована у вигляді 3D динамічної векторної графіки, та у вигляді графіків стану обладнання та систем (рис. 9).

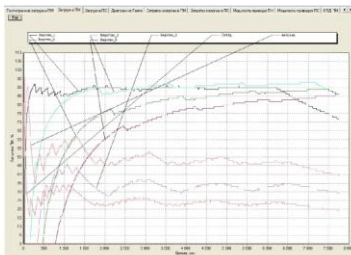
*Залежність між часом складання виробу і кількістю робочих місць*



*Діаграма Ганта роботи складальної ділянки*



*Рівень завантаження 5 верстаків при виконанні виробничого завдання*



*Рівень завантаження 7 верстаків при виконанні виробничого завдання*

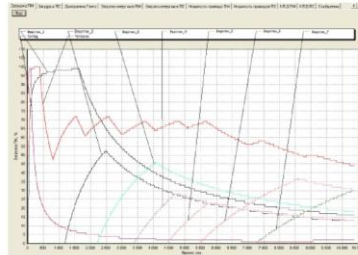


Рисунок 9. Приклади побудови графіків функціонування механоскладального виробництва

### Висновки:

1. У статті виконано теоретичне узагальнення і нове розв'язання науково-технічної задачі підвищення ефективності механоскладального виробництва складних машинобудівних виробів шляхом прогнозування структур та параметрів систем організаційно-технологічної і технічної підготовки виробництва на засадах 3D імітаційного моделювання.
2. Запропонована узагальнена математична тривимірна модель функціональної структури системи обробки- зборки на основі об'єктно-орієнтованого проектування.
3. Наведено механізм імітаційного 3D - моделювання роботи системи обробки - зборки.
4. Розроблено математичні моделі переходу від 3D моделі вузла до 3D моделей складального та механообробного технологічних процесів.
5. Розроблено узагальнену методику формування структури і параметрів технологічних процесів складання і механічної обробки та синхронізації їхнього часу виконання.

**Список використаних джерел:** 1. *Фадеев В.А., Пермяков А.А., Тимофеев Ю.В., Шелковой А.Н.* Опыт организационно-технологической подготовки предприятий аэрокосмической промышленности //Технологические системы, научно-технический журнал. - 2010, № 1(50). - С.82 – 87. 2. *Тимофеев Ю. В., Фадеев В. А., Шелковой А. Н., Хицан В. Д., Клочко А. А.* Интеграционная технологическая подготовка промышленного предприятия PLM-решением // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник науково-вих праць. Серія : Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ». – 2015. – № 4(1113). – С. 4–10. 3. *Шелковий О. М., Мартинов М. С., Набока О. В.* Дослідження продуктивності і надійності складання вузла «Гідроагрегат» в умовах автоматизованого виробництва // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Серія : Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ». – 2015. – № 40(1149). – С. 108–112. 4. *Беловол А.В., Клочко А.А., Набока Е.В., Скоркин А.О., Шелковой А.Н.* Имитационное моделирование в задачах машиностроительного производства в 2-х томах, Т. 1: учеб. пособие /под редакцией А.Н. Шелкового // - Х.: НТУ «ХПИ», 2016. - 407 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. *Fadeev V.A., Permyakov A.A., Timofeev Yu.V., Shelkovej A.N.* Opyt organizacionno-tehnologicheskoy podgotovki predpriyatij aerokosmicheskoy promyshlennosti //Tehnologicheskie sistemy, nauchno-tehnicheskij zhurnal. - 2010, № 1(50). - S.82 – 87. 2. *Timofeev Yu. V., Fadeev V. A., Shelkovej A. N., Hican V. D., Klochko A. A.* Integracionnaya tehnologicheskaya podgotovka promyshlennogo predpriyatiya PLM-resheniem // Visnik Naciona-nal'nogo tehnicnogo universitetu «Harkivskij politehnicnij institut». Zbirnik nauko-vih prac. Seriya : Tehnologiyi v mashinobuduvanni. – Harkiv : NTU «HPI». – 2015. – № 4(1113). – S. 4–10. 3. *Shelkovij O. M., Martynov M. S., Naboka O. V.* Doslidzhennya produktivnosti i nadijnosti skladannya vuzla «Gidroagregat» v umovah avtomatizovanogo virobництва // Visnik Nacional'nogo tehnicnogo universitetu «Harkivskij politehnicnij institut». Zbirnik naukovih prac. Seriya : Tehnologiyi v mashinobuduvanni. – Harkiv : NTU «HPI». – 2015. – № 40(1149). – S. 108–112. 4. *Belovol A.V., Klochko A.A., Naboka E.V., Skorin A.O., Shelkovej A.N.* Imitacionnoe modeliro-vanie v zadachah mashinostroitel'nogo proizvodstva v 2-h tomah, T. 1: ucheb. posobie /pod redakcij A.N. Shelkovogo // - H.: NTU «HPI», 2016. - 407 s.

Надійшла до редколегії 20.06.2018