

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

Є. О. ПРИЩЕПОВ

**ОСНОВИ
АВТОМАТИЗОВАНОГО
ПРОЄКТУВАННЯ**

Навчальний посібник

Рекомендовано Вченою радою НУК



ВИДАВНИЦТВО
НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
КОРАБЛЕБУДУВАННЯ
ІМ. АДМІРАЛА МАКАРОВА

2025

УДК 004(075)

П75

Автор Є. О. Прищепов, старш. викладач

Рецензенти:

О. П. Гожий, д-р техн. наук, професор кафедри інтелектуальних інформаційних систем Чорноморського національного університету імені П. Могили;

А. В. Обрубов, д-р техн. наук, доцент, в.о. завідувача кафедри судових електроенергетичних систем Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова;

О. О. Черно, д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри комп'ютеризованих систем управління Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

Рекомендовано Вченою радою НУК ім. адмірала Макарова

як навчальний посібник

(протокол № 05 від 31.05.2024 р.)

Прищепов Є. О.

П75 Основи автоматизованого проєктування : навчальний посібник /
Є. О. Прищепов. – Миколаїв : НУК, 2025. – 158 с.

ISBN 978-966-321-481-8

Вміщено загальні відомості про автоматизоване проєктування, історія створення та розвитку САПР. Розглянута структура процесу проєктування, види забезпечення автоматизованого проєктування, спеціальне обладнання для автоматизованого проєктування, системи управління життєвим циклом виробу. Окремо розглянуто питання автоматизованого проєктування радіоелектронної апаратури. Також зроблено огляд сучасних САПР.

Призначено для студентів галузі знань F «Інформаційні технології» спеціальності F7 Комп'ютерна інженерія та галузі знань G «Інженерія, виробництво та будівництво» спеціальності G6 Інформаційно-вимірювальні технології.

УДК 004(075)

© Є. О. Прищепов, 2025

© Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова, 2025

ISBN 978-966-321-481-8

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	6
ВСТУП.....	8
1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО АВТОМАТИЗОВАНЕ ПРОЄКТУВАННЯ.....	9
1.1. Основні поняття та визначення автоматизованого проєктування.....	9
1.2. Задачі САПР.....	12
1.3. Класифікація САПР.....	13
1.4. Основні чинники, що впливають на вибір САПР.....	14
1.5. Історія створення та розвитку САПР.....	16
2. СТРУКТУРА ПРОЦЕСУ ПРОЄКТУВАННЯ.....	28
2.1. Ієрархічні рівні описів проєктованих технічних об'єктів.....	28
2.2. Аспекти описів проєктованих технічних об'єктів.....	30
2.3. Складові частини процесу проєктування.....	31
2.4. Технічне завдання та технічна пропозиція.....	34
2.5. Низхідне і висхідне проєктування.....	37
2.6. Зовнішнє і внутрішнє проєктування.....	38
2.7. Уніфікація проєктних рішень і процедур.....	39
2.8. Моделювання технічних об'єктів.....	40
2.9. Класифікація типових проєктних процедур.....	42
2.10. Типова послідовність проєктних процедур.....	44
2.11. Маршрут проєктування технічного об'єкта.....	45
2.12. Класифікація режимів проєктування.....	47

3. СТРУКТУРА САПР.....	50
3.1. Структура видів забезпечення САПР.....	50
3.2. Технічне забезпечення САПР.....	51
3.3. Математичне забезпечення САПР.....	53
3.4. Програмне забезпечення САПР.....	54
3.5. Інформаційне забезпечення САПР.....	55
3.6. Лінгвістичне забезпечення САПР.....	55
3.7. Методичне забезпечення САПР.....	56
3.8. Організаційне забезпечення САПР.....	57
3.9. Підсистеми САПР.....	58
3.10. Принципи побудови САПР.....	60
4. СПЕЦІАЛЬНЕ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЄКТУВАННЯ.....	62
4.1. Плотери.....	62
4.2. 3D-принтери.....	65
4.3. Дигітайзери.....	68
4.4. 3D-маніпулятори.....	69
4.5. 3D-сканери.....	70
5. СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ЖИТТЄВИМ ЦИКЛОМ ВИРОБУ.....	72
5.1. Життєвий цикл виробу.....	72
5.2. Етапи життєвого циклу виробу.....	74
5.3. Інформація про виріб.....	75
5.4. Автоматизовані системи управління життєвим циклом виробу.....	77
5.5. Поняття PLM-технології.....	84
5.6. Поняття CALS-технології.....	86
5.7. Стандарти інформаційної підтримки життєвого циклу виробу.....	90
5.8. Технології інформаційної підтримки життєвого циклу виробу.....	93
5.9. Переваги застосування CALS-технологій.....	101
5.10. Створення типових АРМ на підприємстві.....	102

6. АВТОМАТИЗОВАНЕ ПРОЄКТУВАННЯ РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ АПАРАТУРИ.....	107
6.1. Рівні та задачі конструкторського проектування радіоелектронної апаратури.....	107
6.2. Задача компонування.....	108
6.3. Задача розміщення.....	111
6.4. Задача трасування.....	112
6.5. Загальні відомості про друковані плати.....	117
6.6. Вимоги до друкованих плат.....	118
6.7. Типи друкованих плат.....	121
6.8. Проектування друкованих плат.....	124
6.9. Стандарти IPC.....	132
7. ОГЛЯД СУЧАСНИХ САПР.....	138
7.1. AutoCAD.....	138
7.2. Autodesk Revit.....	141
7.3. Autodesk Inventor.....	142
7.4. Archicad.....	143
7.5. SolidWorks.....	144
7.6. Altium Designer.....	145
7.7. CircuitMaker.....	150
7.8. EasyEDA.....	152
7.9. Proteus Design Suite.....	153
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	156

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

- АРМ – автоматизоване робоче місце
АСТПВ – автоматизована система технологічної підготовки виробництва
АСУ – автоматизована система управління
АСУП – автоматизована система управління підприємством
АСУТП – автоматизована система управління технологічними процесами
БД – база даних
БНД – банк даних
ДКР – дослідно-конструкторська робота
ДП – друкована плата
ЄІП – єдиний інформаційний простір
КП – комутаційне поле
НВІС – надвелика інтегральна схема
НДР – науково-дослідна робота
ПЗ – програмне забезпечення
ПЛІС – програмована логічна інтегральна схема
САПР – система автоматизованого проектування
СУБД – система управління базою даних
ТЕЗ – типовий елемент заміни
ТЗ – технічне завдання
ЧПУ – числове програмне управління
CAD – computer-aided design
CAE – computer-aided engineering
CAM – computer-aided manufacturing
CNC – computer numerical control

COTS – commercial of the shelf
CPC – collaborative product commerce
CRM – customer requirement management
ERP – enterprise resource planning
IETM – interactive electronic technical manual
MES – manufacturing execution system
MRP – manufacturing requirement planning
PCB – printed circuit board
PDM – product data management
PLCS – product life cycle support
PLM – product lifecycle management
PM – project management
SCM – supply chain management

ВСТУП

Сучасне виробництво висуває жорсткі вимоги до термінів і якості проєктних робіт – швидко та якісно створений виріб матиме конкурентні переваги. Проєктування технічних об'єктів є багатоетапним динамічним процесом. Мета автоматизації проєктування полягає в тому, щоб автоматизувати різні за призначенням та змістом операції, що супроводжують процес створення виробу, та об'єднати їх у автоматизований керований процес. Ця мета досягається за допомогою систем автоматизованого проєктування (САПР). На сьогодні САПР стали невід'ємною частиною сучасної інженерної практики, перетворивши методи проєктування.

Сфера застосування автоматизованого проєктування досить велика. Вона охоплює практично кожен сферу діяльності, пов'язану з проєктуванням, що зумовлює велику різноманітність САПР. Застосування САПР суттєво прискорює та покращує процеси створення продукції в різних галузях – від машинобудування та електроніки до архітектури та будівництва.

САПР належать до найбільш наукоємних систем, оскільки в них використовується багато сучасних інформаційних технологій. Це висуває особливі вимоги до знань і навичок фахівців, які використовують їх у своїй роботі.

САПР постійно вдосконалюються, тому постійно відчувається необхідність у професіоналах, здатних застосовувати їх складні та дорогі засоби для прискорення процесу проєктування та розробки нових рішень. Для цього слід чітко представляти основні методи та прийоми автоматизованого проєктування, його можливості та обмеження, а також уміти оцінювати та правильно інтерпретувати результати проєктування.

1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО АВТОМАТИЗОВАНЕ ПРОЄКТУВАННЯ

1.1. Основні поняття та визначення автоматизованого проєктування

Технічний об'єкт – матеріальний результат інженерної діяльності. Тобто, це будь-який виріб (деталь, вузол, підсистема, функціональна одиниця або система), який можна розглядати відокремлено [1].

Проєктування технічного об'єкта пов'язане зі створенням, перетвореннями та поданням у прийнятій формі образу цього об'єкта. Образ технічного об'єкта та його складових частин може створюватися в уяві людини в результаті творчого процесу або у процесі взаємодії людини та комп'ютера.

Проєктування технічного об'єкта починається за наявності технічного завдання на проєктування, що подається у вигляді документа і є **первинним описом** технічного об'єкта.

Технічне завдання (ТЗ) – документ, що встановлює основну призначеність, показники якості виробу, техніко-економічні та спеціальні вимоги до нього та до обсягу стадій розроблення і складу конструкторської документації [2].

Результатом проєктування слугує повний комплект конструкторської документації, що містить достатні відомості для виготовлення об'єкта в заданих умовах. Ця документація є **остаточним описом** технічного об'єкта.

Проєктування – процес, що полягає в перетворенні первинного опису технічного об'єкта в його остаточний опис на

основі виконання комплексу робіт дослідницького, розрахункового та конструкторського характеру.

Перетворення первинного опису технічного об'єкта в його остаточний опис породжує **проміжні описи**, які називаються **проектними рішеннями** (рис. 1.1).

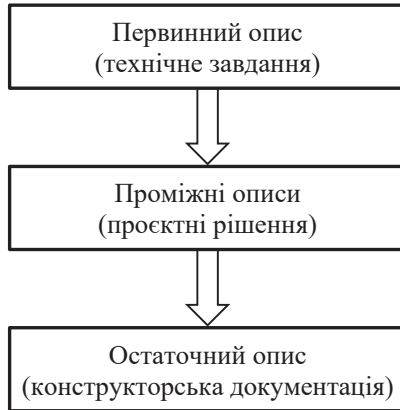


Рис. 1.1. Види описів технічних об'єктів

Автоматизоване проєктування – це проєктування, у якому всі проєктні рішення або частину з них отримують шляхом взаємодії людини та комп'ютера.

Проект – сукупність документів і описів на різних мовах (графічний – креслення, схеми, діаграми, графіки; математичний – формули, розрахунки; інженерних термінів і понять – тексти описів, пояснювальні записки), необхідних для створення технічного об'єкта.

Система автоматизованого проєктування (САПР) – організаційно-технічна система, яка призначена для автоматизації процесу проєктування і складається з персоналу та комплексу технічних, програмних та інших засобів автоматизації.

У САПР використовуються такі основні технології [3]:

- автоматизоване проектування (*англ.* computer-aided design, CAD);
- автоматизоване виробництво (*англ.* computer-aided manufacturing, CAM);
- автоматизоване конструювання (*англ.* computer-aided engineering, CAE).

CAD – це технологія, суть якої полягає у використанні комп'ютерних систем для полегшення створення, змін, аналізу й оптимізації проєктів. Найголовніша функція CAD – визначення геометрії конструкцій (деталей механізмів, архітектурних елементів, радіоелектронних пристроїв, планів будівель тощо). Для цієї мети зазвичай використовуються засоби розробки креслень і геометричного моделювання. До переваг технології CAD відносять економію часу та скорочення кількості помилок.

CAM – це технологія, що полягає у використанні комп'ютерних систем для планування, управління і контролю операцій виробництва через інтерфейс з виробничими ресурсами підприємства. Одним з найбільш широко застосовуваних підходів до автоматизації виробництва є числове програмне управління (ЧПУ). Воно полягає у використанні запрограмованих команд для управління верстатом, який може шліфувати, різати, фрезерувати, штампувати, згинати та іншими способами перетворювати заготовки на готові деталі. Напряму розвитку в цій галузі полягає у скороченні необхідності втручання оператора. Ще одна важлива функція систем автоматизованого виробництва – програмування роботів, які можуть працювати на гнучких автоматизованих ділянках.

CAE – це технологія, що полягає у використанні комп'ютерних систем для аналізу геометрії, моделювання і вивчення поведінки виробу з метою вдосконалення й оптимізації його конструкції. Засоби CAE можуть здійснювати багато різних варіантів аналізу. Наприклад, вони здатні визначати траєкторії

руху і швидкості ланок у механізмах, імітувати роботу складних електронних ланцюгів тощо. Це дозволяє побачити поведінку кінцевого виробу та виявити можливі помилки до створення і тестування реальних прототипів, уникнувши певних витрат.

1.2. Задачі САПР

У межах життєвого циклу промислових виробів САПР розв'язує задачі автоматизації робіт на стадіях проєктування і підготовки виробництва.

Сучасні САПР забезпечують:

- застосування сучасних методів та засобів автоматизації для проєктування виробів, їх виготовлення та обслуговування;
- можливість швидкого обміну конструкторської, технологічної, експлуатаційної та іншої документації;
- можливість інформаційної підтримки всіх етапів життєвого циклу виробу (дослідження, проєктування, виробництва, експлуатації, обслуговування та утилізації);
- автоматизацію обробки конструкторських, технологічних, експлуатаційних та інших видів документів;
- високу якість проєктно-конструкторської, виробничої та експлуатаційної документації;
- скорочення термінів та зниження трудомісткості підготовки виробництва;
- оперативну підготовку документації для швидкого переналагодження діючого виробництва;
- скорочення часу створення різних форм конструкторських, технологічних та інших документів;
- можливість створення єдиного інформаційного простору для кожного виробу;
- гармонізацію із відповідними міжнародними стандартами.

1.3. Класифікація САПР

САПР можна класифікувати за наступними ознаками [3]:

1. За ступенем формалізації розв'язуваних задач.
2. За функціональним призначенням.
3. За спеціалізацією.
4. За технічною організацією.

За ступенем формалізації розв'язуваних задач САПР поділяються на системи, призначені для розв'язання:

- повністю формалізованих задач;
- неформалізованих задач;
- частково формалізованих задач.

САПР, які призначені для розв'язання повністю формалізованих задач, для проектування складних технічних об'єктів зазвичай не придатні, оскільки математичні моделі таких об'єктів та процесів їх функціонування настільки складні, що повний і точний їх математичний опис на сьогодні не можливий. Такі системи можуть застосовуватися тільки для розв'язання простих задач проектування.

САПР, які призначені для розв'язання неформалізованих задач, зараз знаходяться у стадії досліджень і розробки, та для проектування широко не застосовуються.

Необхідно відзначити, що в обох випадках процес проектування відбувається без втручання людини. Таким чином, мова йде не про системи автоматизованого, а про системи автоматичного проектування.

Для вирішення завдань у багатьох галузях промислового виробництва зараз придатні тільки САПР, які призначені для розв'язання частково формалізованих задач.

Безумовно, частина завдань, пов'язаних з проектуванням деяких простих елементів конструкції, може бути вирішена з використанням автоматичного проектування, але для проектування складних технічних об'єктів на сьогодні автоматичне проектування не можливе. Крім того, якщо йдеться

про такі поняття, як форма пристрою, деталі інтер'єру, то на їх конструкцію, крім функціональних вимог (ергономіка, безпека), впливають і суб'єктивні чинники, наприклад, мода, що неможливо описати мовою математичних залежностей.

За функціональним призначенням у залежності від розв'язуваних задач, визначених складом функціональної частини системи, САПР поділяються на наступні:

- розрахунково-оптимізаційні;
- графічні;
- графоаналітичні;
- інформаційні.

За спеціалізацією САПР поділяють на такі:

- спеціалізовані;
- інваріантні.

Оскільки завдання автоматизованого проєктування дуже складні, то зазвичай САПР є спеціалізованими системи, що створюються для розв'язання вузьких задач однієї галузі.

За технічною організацією САПР поділяються на такі:

- однорівневі;
- багаторівневі.

Однорівневі САПР побудовані на базі одного достатньо продуктивного комп'ютера з набором необхідних периферійних пристроїв.

Багаторівневі САПР включають у себе, крім базового комп'ютера, низку підпорядкованих йому комп'ютерів нижчого рівня та периферійні пристрої.

1.4. Основні чинники, що впливають на вибір САПР

Бурхливий розвиток інформаційних технологій сприяв розробці великої кількості специфічних та багатофункціональних САПР, що ускладнює їхній вибір. Під час вибору САПР насамперед ураховуються цілі та сфера використання системи, універсальність системи, економічна ефективність

(співвідношення ціна / якість), накопичений досвід її експлуатації, вартість, а також наведені нижче фактори:

- продуктивність САПР, здатність швидко виконувати завдання, пов'язані з відкриттям великих файлів, швидкість проектування, створення специфікацій, можливість її використання для вирішення завдань, що потребують високої швидкодії та великого обсягу пам'яті;

- можливість комплексного розв'язання спеціалізованих задач, характерних для цієї галузі промисловості (кращі сучасні САПР дозволяють швидко та легко створювати складні поверхні будь-якої геометрії, виконувати інженерні розрахунки проектованої конструкції, розробляти технологію виготовлення окремих деталей та складання виробу);

- наявність системи підказок та електронної документації, зручність інтерфейсу користувача;

- налаштування системи на чинні стандарти;

- наявність тривимірної графіки та моделювання;

- зручність у роботі, можливість використовувати дані з усіх основних форматів обміну інформацією;

- наявність конверторів, які забезпечують обмін інформацією з переважною більшістю сучасних САПР;

- надійність системи, відмовостійкість і масштабованість;

- можливість отримання технічної підтримки від розробника системи в процесі її експлуатації;

- простота інсталяції та адміністрування.

Під час вибору та впровадження САПР безумовно важливі функціональні можливості системи. Вони мають бути достатніми для розв'язання конкретних виробничих задач. Не менш важливими є такі параметри, як ефективність системи та час, необхідний для її впровадження з урахуванням адаптації персоналу.

1.5. Історія створення та розвитку САПР

Відомо, що перші спроби автоматизації процесу створення креслень належать Леонардо да Вінчі, який створив машину для «вирізання файлів».

У зв'язку з низькою продуктивністю інженерної праці під час обробки та аналізу інформації, у середині XX століття виникла необхідність в автоматизації проєктних робіт і почалися розробки, які були направлені на раціоналізацію та автоматизацію проєктних робіт.

У 1955–1959 рр. у Массачусетському технологічному інституті під керівництвом Дугласа Т. Росса була розроблена система програмування АРТ, у рамках якої і сформувалося поняття CAD або САПР [4]. Вона давала фахівцям можливість підготовки програм управління для станків з ЧПУ [5]. У подальшому акцент було зроблено на самій деталі. Дану систему не можна назвати САПР у повному сенсі цього поняття, однак вона більш за інші в той час існуючі системи підходила для даної класифікації. У ті часи цей термін означав просто використання комп'ютера з метою проєктування.

Основоположником сучасних САПР називають Патріка Хенретті [4]. Незважаючи на відсутність навіть освіти в коледжі, Хенретті в 1954 році успішно почав кар'єру програміста в авіабудівній компанії «Convair».

Потім Хенретті перейшов у компанію «General Electric», де в 1957 році створив свій перший САМ-пакет PRONTO. Це була мова, що дозволяла програмістам створювати траєкторію інструменту для обробки деталей. Для управління верстатом була виготовлена паперова перфокарта. Приблизно в той же час Хенретті почав працювати в галузі комп'ютерної графіки.

У 1962 році Хенретті звільнився з компанії «General Electric», щоб приєднатися до компанії «General Motors», де він став частиною команди в дослідницьких лабораторіях.

У 1963 році Хенретті розробив графіку для проекту DAC, вирішуючи завдання, пов'язані з трьох-, чотирьох- і п'ятиосевою обробкою поверхонь. Програма отримала назву «DAC-1» та була насамперед експериментальною роботою, а не системою для виробництва. Як експериментальна система DAC-1 була надзвичайно успішною, але розробники добре розуміли про необхідність додаткового її удосконалення, щоб зробити цей продукт корисним для його виробничого використання.

У 1967 році Хенретті працював у компанії «*Astronautics Corporation*». Після того, як «*Astronautics Corporation*» була поглинена компанією «*McDonnell Douglas*», він організував у 1970 році свою власну компанію «*Integrated Computer Systems*», щоб створити і продати нові рішення в області САПР. Хенретті та його команда розробили CAD/CAM-систему ICS INTERAPT для комп'ютерів Redcor. Незважаючи на високу оцінку, це програмне забезпечення не стало комерційно успішним унаслідок того, що Хенретті написав код на мові програмування, яку він створив сам. Ця компанія довго не проіснувала.

Зрештою Хенретті домогся комерційного успіху у своїй новій компанії під назвою «*Manufacturing and Consulting Services*». Серед продуктів компанії такі відомі системи, як INTERART, ADAM, ANVILL.

Програмне забезпечення ADAM на той час вважалося єдиною комерційно доступною системою креслення й обробки. У 1973 році ADAM придбала компанія «*United Computing*» (нині «*Siemens Industry Software Inc.*»). Хенретті написав програму на широко відомій мові програмування і створив її для роботи практично з будь-яким доступним обчислювальним пристроєм того часу, що, безумовно, допомогло досягти успіху.

У 1980-х роках компанія Хенретті продовжила розробку САПР. Спочатку це був пакет AD-2000, а потім із системи ANVIL CAD/CAM.

Спираючись на новаторську технологію, яка набагато випереджала решту ринку, у системі ANVIL-5000 було реалізовано узгоджений користувацький інтерфейс для всіх додатків, а також базу даних подвійної точності для каркасних, поверхневих і твердотільних моделей та всіх додатків, що використовують ці дані. Одним з найбільш значних доповнень до даної системи став новий додатковий модуль моделювання твердих тіл під назвою «OMNISOLIDS», у результаті чого отримано один з перших пакетів CAD/CAM для щільної інтеграції каркаса, поверхонь і твердих тіл.

Батьком же сучасної інтерактивної комп'ютерної графіки можна назвати Айвена Сазеренда. Саме Сазеренд створив у 1963 році революційну комп'ютерну програму Sketchpad.

Програма Sketchpad стала першим програмним забезпеченням, яке започаткувало принцип взаємодії людини з комп'ютером безпосередньо, інтерактивно, а не шляхом введення командних інструкцій. Sketchpad вважають родоначальником сучасних програм автоматизованої розробки, а також проривом у розвитку комп'ютерної графіки загалом. Наприклад, графічний користувацький інтерфейс бере свій початок зі Sketchpad.

Основною ідеєю програми стало створення графічного об'єкта, з якого можна створити безліч дублікатів. Якщо користувач змінював оригінал, то відбувалася автоматична зміна й у всіх його дублікатах. Програма Sketchpad була створена на комп'ютері TX-2, який використовував графічний дисплей зі світловим пером та клавіатуру для управління. Засобами світлового пера та клавіатури створювали та редагували зображення креслень на екрані.

У 1960 році у компанії «*ITEK Corporation*», що була оборонним підрядником США, розпочалося фінансування нового проєкту з розробки інтерактивної графічної системи проєктування. Базова система була розроблена в 1962 році та спочатку отримала назву «EDM», а пізніше була перейменована на «Digigraphics».

Авіаційна промисловість була одним з перших користувачів комп'ютерних систем для інженерного проектування та аналізу. Джеймс Сміт МакДоннелл та його авіабудівна компанія «*McDonnell Douglas*» були дуже активними в цьому напрямку, починаючи з кінця 1950-х років, використовуючи комп'ютери для проектування літаків. У 1960 році МакДоннелл вирішив використати цей досвід і розпочав бізнес комп'ютерних послуг. Того ж року була створена його дочірня компанія «*McAuto*». Через п'ятнадцять років компанія «*McAuto*» стала однією з найбільших комп'ютерних служб у світі. Компанія продовжувала зростати протягом наступного десятиліття. Важливим проектом протягом 1960–1970-х рр. була розробка внутрішньої системи CAD/CAM для підтримки техніки McDonnell відома як CADD.

Не залишалася осторонь і автомобільна промисловість. Так, у 1967 році компанія «*Ford*» випускає систему PDGS. Того ж року американська військово-промислова корпорація «*Lockheed*» презентує систему CADAM.

Цей період можна назвати етапом зародження галузі з розробки програмних продуктів САПР.

У 1965 році агентство уряду США – NASA для підтримки проєктів, пов'язаних з космічними дослідженнями, починає виконувати завдання для розробки програмного пакету САПР. У 1970 році такий пакет під назвою «*NASTRAN*» був створений та розпочалося його експериментальне використання.

У 1969 році в Західно-Берлінському технічному університеті розпочато роботу з реалізації нової спеціальної програми «Техніка виробництва й автоматизації», у рамках якої розроблено тривимірну систему графічного моделювання.

Норвезька «*САПР AUTOKOM*», створена для вирішення завдань суднобудування в 1971 році, була пристосована для зберігання великих обсягів даних з концепції побудови банку даних.

Далі розпочалися розробки відомих та популярних на сьогодні САПР. Так, у 1973 році виходить перший реліз CAD/CAM/CAE-системи Unigraphics, яка зараз має назву «*NX*».

Спочатку система, яка була розроблена американською компанією «*United Computing*», мала назву «*Unigraphics*». У 1976 році компанія «*McDonnell Douglas*» (сьогодні «*Boeing*») придбала компанію «*United Computing*» і згодом була утворена «*McDonnell Douglas Automation Unigraphics Group*».

NX є результатом злиття у 2002 році систем Unigraphics і I-deas, які вже на той момент вважалися лідерами серед САПР у багатьох галузях промисловості. Біля витоків Unigraphics стояли підприємства аерокосмічної галузі, а пакет I-deas, випущений у 1982 році, розвивався під керівництвом компаній автомобільної індустрії.

Зараз система NX упроваджена в більшості галузей промисловості і для багатьох компаній стала стандартизованим рішенням автоматизації процесів конструкторсько-технологічної підготовки виробництва.

У 70-х роках зароджується компанія «*Dassault Systèmes*» як відділ САПР у компанії «*Dassault Aviation*» (французька літакобудівна компанія, заснована в 1929 році Марселем Дасо). Тут виконують розробки програмного забезпечення для літакобудування.

У 1977 році запускається розробка нового на 100-відсоткового графічного програмного забезпечення, яке має бути інтуїтивним, відображати 3D-моделі та бути простим для використання. Воно отримує назву «CATIA». У 1980 році система CATIA, це лише одна із близько 100 програм, які на той час розроблялися у «*Dassault Systèmes*».

У 1981 році анонсується CATIA V1, а вже в 1984 році компанія «*Boeing*» вибрала CATIA V2 як основний інструмент 3D CAD.

Система CATIA стає першою повномасштабною 3D-системою проектування на світовому ринку, зокрема, в аерокосмічній (компанії «*Airbus*», «*Boeing*») і автомобільній (компанії «*Peugeot*», «*Citroën*», «*Toyota*», «*Mercedes Benz*», «*Renault*») промисловостях.

У 1979 році Майкл Ріддл створює першу у світі САПР для комп'ютерів Interact, яка в 1980 році отримала назву «MicroCAD». Архітектура цієї системи та формат її файлів DWG лягли в основу програми AutoCAD компанії «Autodesk».

Історія компанії «Autodesk» почалася в 1982 році, коли група програмістів почала розробку декількох програм для персональних комп'ютерів. Створену компанію вони назвали «Desktop Solutions» (це була перша робоча назва компанії «Autodesk»). Спочатку група програмістів зосередила свої зусилля над декількома програмними продуктами, серед яких була програма MicroCAD – досить проста, але зручна САПР. Але все-таки основним пріоритетом співзасновники зробили Autodesk – офісну програму для персональних комп'ютерів, що включає в себе календар, електронну картотеку тощо. У той час персональні комп'ютери почали активно проникати в офіси, і розробники Autodesk мали на меті позбавити офісних працівників від кіпи паперів за рахунок автоматизації багатьох процесів. Що ж до програми MicroCAD, спочатку, ще до створення компанії «Desktop Solutions», вона розроблялася одним із співзасновників компанії Ріддлом.

Ріддл представив робочій групі прототип креслярського редактора MicroCAD, який він розробляв. Програма викликала загальний інтерес, у зв'язку з цим офісна програма відійшла на другий план.

Перша демонстрація програми AutoCAD відбулася в листопаді 1982 року на виставці COMDEX та мала значний успіх.

Самуїл Гейзберг заснував компанію «PTC» в 1985 році. У 1987 році компанія випускає першу версію програмного продукту Pro/ENGINEER, який зараз має назву «PTC Creo».

З тих пір кількість упроваджуваних САПР безперервно зростала. За оцінкою фахівців, у 1985 році кількість використовуваних систем істотно перевищувала 1000.

У 1983 році Джон Хірштик отримує ступінь магістра в галузі машинобудування в Массачусетському технологічному інституті та починає реалізовувати низку бізнес-проектів. До початку 1994 року у нього сформувалася ідея створення недорогого САПР на основі твердотільного моделювання.

Хірштик збирає команду та організовує компанію «*Winchester Design Systems*», яка починає розробку програмного продукту SolidWorks. Далі компанія стала називатися «*SolidWorks Corp*».

План Хірштика був дуже простим – програмний продукт SolidWorks працюватиме тільки на персональних комп'ютерах, що працюють під операційною системою Windows (компанія мала намір використати стандартні функції операційної системи Windows по максимуму). У 1995 році виходить перша версія системи SolidWorks. У результаті вийшла програма, схожа на власні продукти Microsoft, такі як Word і Excel. Такий підхід значно зменшив об'єм коду, який треба було розробити. Оскільки програма мала працювати на недорогих персональних комп'ютерах, то і ціна на неї була відповідною. У 1997 році Хірштик продає компанію «*SolidWorks Corp*» компанії «*Dassault Systèmes*».

У 1995 році компанією «*Intergraph*» розроблено систему твердотільного та поверхневого моделювання Solid Edge. У 1997 році компанію «*Intergraph*» купує компанія «*UGS Corp*», а у 2007 році концерн «*Siemens*» купує компанію «*UGS Corp*».

Також у 1995 році компанія «*CADENAS*», яка заснована в 1992 році в Німеччині, створює eCATALOGsolutions – програмне рішення для виробників стандартних деталей і запчастин, призначене для створення, організації і продажу електронних каталогів продукції.

У 1999 році виходить перша версія Autodesk Inventor компанії «*Autodesk Inc.*», як результат наміру компанії вийти на ринок середніх та важких САПР.

У 2012 році виходить перша версія Autodesk Fusion 360. Команда розробників Fusion 360 керувалася основними запитами більшості користувачів і трендами в індустрії, які сформувалися в процесі розвитку технологій і збору запитів клієнтів. Вони приділили увагу таким можливостям, як хмарні сервіси, віддалені сховища даних, мобільні додатки, простота застосування, прості інструменти моделювання, висока швидкість підготовки документації і підготовка моделі до випуску на верстатах з ЧПУ і 3D-принтерах, високоякісна візуалізація. Хмарна платформа Autodesk Fusion 360 поєднує в собі можливості повноцінного пакету САПР, хмарних технологій у вигляді сервісів Autodesk A360 і колективної роботи. Важливою перевагою застосування хмарних технологій є забезпечення високої гнучкості в управлінні програмним забезпеченням і сервісами, доступними не лише персональним користувачам, але і цілим групам, у яких кожен учасник виконує певне завдання.

У 2013 році в компанії «*CADENAS*» створюють 3D CAD App – перший мобільний додаток для 3D-моделювання.

У 2015 році з'являється хмарний САПР від Джона Хіршика (розробника SolidWorks) Onshape. Для його роботи на комп'ютері не вимагається встановлювати що-небудь, окрім браузера з підтримкою WebGL (наприклад, Chrome або Firefox). Не потрібні ні спеціальний сервер, ні спеціальне інтернет-підключення, достатньо звичайного Wi-Fi. Зайти в Onshape дуже просто, використовуючи лише адресу електронної пошти і пароль. Для роботи з САПР Onshape для операційних систем iOS і Android були розроблені спеціальні додатки. У тому числі завдяки хмарній архітектурі, ці додатки стали не просто програмами-переглядачами, а повнофункціональними САПР з можливостями редагування тривимірної моделі, управлінням версіями і нотифікаціями. На серверній стороні вони використовують ті ж самі розвинені засоби тривимірного моделювання, що і браузерна версія.

Компанія «*CADENAS*» продовжує свої розробки і поряд з «*CATALOGsolutions*» у 2017 році з'являється *PARTsolutions*. *PARTsolutions* – це система управління для покупних і стандартних деталей.

Багато інженерів з усього світу використовують *PARTsolutions*, вигравши з її допомогою час для важливих дизайнерських завдань. Цей програмний продукт надає інженерам і дизайнерам приладобудівної, машинобудівної, автомобілебудівної і будівельної галузей можливість прямого доступу до тисяч деталей із понад 700 сертифікованих каталогів від провідних міжнародних виробників. Стратегічне управління деталями *PARTsolutions* допомагає сучасним компаніям з легкістю управляти компонентами і стандартними деталями. Програмне забезпечення *PARTsolutions* органічно інтегрується у виробничий ланцюг і таким чином покриває увесь цикл виробництва.

Серед САПР-друкованих плат велику популярність та поширення отримав пакет P-CAD. Свою назву «*Personal Computer-Aided Design*» (P-CAD) пакет отримав від імені компанії-розробника – «*Personal CAD Systems*», яка була заснована в 1982 році.

У 1988 році права на P-CAD отримала компанія «*CADAM Company*», яка випустила версію P-CAD 4.5.

У 1992 році P-CAD знову змінив свого власника – тепер ним стала компанія «*Altium*», яка серйозно змінила пакет. Уже в червні 1992 року вона випустила версію P-CAD 6.0, у якій перейшла до арифметики з плаваючою комою. Завдяки цьому на два порядки підвищилася роздільна здатність графічних редакторів, було усунуто багато проблем і практично знято обмеження на складність проєкту. Ще одна перевага – підвищення якості трасування друкованих плат за рахунок усунення помилок в алгоритмі оптимізації P-CAD 4.5. Але зміна форматів даних через перехід від 16-ти до 32-розрядних форматів вимушено привело до розробки спеціальних програм

для конвертації існуючих бібліотек. У жовтні 1993 року з'явилася версія 7.0, а у вересні 1994 року – версія 8.0. Основні зміни були внесені до інтерфейсу системи, що підвищило зручність роботи з нею.

У 1995 році права на пакет набула американська компанія «*Accel Technologies*», яка незабаром завершила DOS-лінію версій пакета, випустивши на початку 1997 року його заключний реліз – P-CAD 8.7.

За дев'ять місяців до цього компанія організувала презентацію давно очікуваної версії пакета для операційної системи Windows. Він отримав нову назву – «*Accel EDA*», у якому відображалася назва фірми та призначення пакета (EDA – «*Electronic Design Automation*»). Як стартовий номер версії нового програмного забезпечення був вибрано номер «12».

Восени 1997 року було випущено 13-ту версію *Accel EDA*, до якої було внесено деякі зміни порівняно з версією 12. Так, зокрема, було збільшено кількість одночасно відкритих бібліотек з 10 до 99, додано утиліту *InterRoute Gold* для інтерактивного трасування та інше. У 1998 році була випущена версія 14, а у вересні 1999 року – версія 15 пакета *Accel EDA*.

У січні 2000 року відбулося злиття двох провідних розробників EDA-систем: австралійської компанії «*Protel International*» та американської «*Accel Technologies*», які об'єднали свої зусилля під торговою маркою компанії «*Protel*» (з 2001 року «*Altium*»). Компанія «*Protel*» вирішила повернути колишню назву пакета. Він став називатися «P-CAD 2000». Компанія «*Protel*» багато зробила для розвитку пакета P-CAD та доведення його функціональності до рівня свого базового пакета *Protel*. Так, до складу пакета P-CAD 2000 було впроваджено новий безсіточний трасувальник P-CAD Shape Based, який склав конкуренцію трасувальнику SPECTRA фірми «*Cadence*».

У версію P-CAD 2001 було додано систему моделювання аналогових, цифрових та змішаних (аналого-цифрових) схем

SIM99, яка використовує популярний стандарт Spice, що перевело P-CAD із розряду суто конструкторських систем проєктування друкованих плат до системи наскрізного проєктування електронних пристроїв.

Подальший розвиток система проєктування отримала у версії P-CAD 2002, де у всіх графічних редакторах з'явилася підтримка «миші з коліщатком», у редакторі друкованих плат з'явився новий інструмент навігації – «Менеджер проєкту» та можливість розфарбовувати лінії електричних з'єднань у різні кольори.

Наприкінці 2004 року з'явилася версія P-CAD 2004. Система зберегла звичний інтерфейс, усі внесені зміни торкнулися лише редактора друкованих плат. Найбільш значущим з них стала заміна автотрасувальника P-CAD Shape Based на топологічний автотрасувальник Situs.

Улітку 2006 року компанія «Altium» офіційно заявила, що припиняє розвиток P-CAD. Розробникам було запропоновано перейти на Altium Designer – потужніший продукт компанії. Після 30 червня 2008 року легально придбати P-CAD не можна, але багато розробників електронних пристроїв використовують його досі.

P-CAD здатний виконати весь цикл розробки: інтерактивне розміщення елементів та автотрасування провідників, пошук помилок на будь-якій стадії проєкту, підготовку документації, перевірку цілісності всіх сигналів, аналіз перехресних спотворень. Зручна довідкова система та інтерфейс користувача знижують «поріг входження» для новачків.

P-CAD складається з двох основних автономних модулів: Schematic (редактора електричних схем) та PCB (редактора друкованих плат). Проєкти схем можуть містити до 999-ти аркушів, а проєкти плат – до 999-ти шарів розміром 60х60 дюймів. Існують можливості інтерактивного трасування диференціальних пар для мінімізації електромагнітних

перешкод, мультимаршрутне трасування за заданими параметрами, ортогональне перетягування провідників.

Крім основних підпрограм, P-CAD має допоміжні: Library Executive (менеджер бібліотек), Symbol Editor (редактор символів елементів), Pattern Editor (редактор посадкових місць корпусів елементів) та деякі інші. Бібліотеки P-CAD зберігають понад 27 000 елементів, сертифікованих за стандартом ISO 9001. Повністю підтримуються формати Gerber та ODB++.

Повний цикл проектування друкованих плат, що виконується системою P-CAD, включає в себе:

- графічне введення електричних схем;
- змішане аналого-цифрове моделювання на основі ядра Spice3;
- пакування схеми на друкованій платі;
- інтерактивне розміщення компонентів;
- інтерактивне та автоматичне трасування провідників;
- контроль помилок у схемі та на друкованій платі;
- випуск документації;
- аналіз цілісності сигналів та перехресних спотворень;
- підготовку файлів Gerber та NC Drill для виробництва друкованих плат;
- підготовку бібліотек символів, топологічних місць та моделей компонентів.

2. СТРУКТУРА ПРОЦЕСУ ПРОЄКТУВАННЯ

2.1. Ієрархічні рівні описів проєктованих технічних об'єктів

Описи проєктованих технічних об'єктів мають бути за складністю узгоджені з можливостями сприйняття людиною та з можливостями засобів проєктування [6]. Однак виконати цю вимогу в рамках єдиного опису, не поділяючи його на частини, вдається лише для дуже простих технічних об'єктів. Зазвичай потрібен поділ описів технічних об'єктів, що проєктуються, на **ієрархічні рівні**. Це дозволяє розподіляти роботи із проєктування складних технічних об'єктів між підрозділами проєктної організації. Такий підхід сприяє підвищенню ефективності процесу проєктування.

Ієрархічні рівні виникають у результаті поділу описів за ступенем деталізації властивостей технічного об'єкта, що відображаються. Такий поділ є основою блочно-ієрархічного підходу до проєктування.

На кожному ієрархічному рівні використовуються свої поняття системи та елементів (рис. 2.1).

На рівні 1 (верхньому рівні) складний технічний об'єкт S , що підлягає проєктуванню, розглядається як система S , що складається з n взаємопов'язаних і взаємодіючих елементів S_i ($i = 1, 2, \dots, n$, де n – кількість елементів у описі системи S).

Кожен з елементів в описі рівня 1 може являти собою також досить складний технічний об'єкт, який зі свого боку розглядається як система S_i на рівні 2.

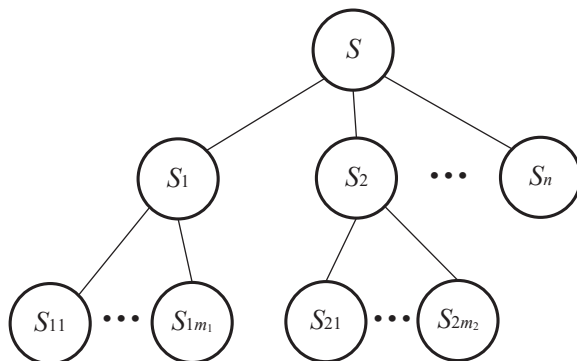


Рис. 2.1. Ієрархічні рівні описів проєктованих технічних об'єктів

Елементами систем S_i є об'єкти S_{ij} ($j=1, 2, \dots, m_i$, де m_i – кількість елементів в описі системи S_i).

Подібний поділ триває аж до одержання на певному рівні елементів, описи яких подальшому поділу не підлягають. Такі елементи стосовно технічного об'єкта S називаються **базовими елементами**.

Під час проєктування радіоелектронної апаратури до базових елементів відносять елементи принципів електричних схем (резистори, конденсатори, транзистори, мікросхеми тощо).

З цих елементів утворюються функціональні вузли (вторинні джерела живлення, підсилювачі, перетворювачі сигналів, суматори тощо).

Функціональні вузли входять як елементи до складу більш складних утворень – пристроїв або блоків (оперативні запам'ятовуючі пристрої, передавачі тощо).

З пристроїв komponуються радіоелектронні системи (комп'ютери, системи управління рухомими об'єктами, радіолокаційні станції тощо).

Можливе виділення як деяких проміжних ієрархічних рівнів, так і більш високих ієрархічних рівнів для опису

об'єднань систем (наприклад, рівня, на якому розглядаються комп'ютерні мережі, що складаються з комп'ютерів, апаратури передачі даних тощо).

2.2. Аспекти описів проєктованих технічних об'єктів

Крім поділу описів за ступенем деталізації властивостей технічного об'єкта, що відображаються (що породжує зі свого боку ієрархічні рівні) використовують поділ описів за характером властивостей технічного об'єкта, що відображаються. Такий поділ приводить до появи низки аспектів описів [6].

Найбільш великими є функціональний, конструкторський та технологічний аспекти. Вирішення завдань, пов'язаних з перетворенням або отриманням описів, що належать до цих аспектів, називають **функціональним, конструкторським та технологічним проєктуванням** (рис. 2.2).

Функціональний аспект пов'язаний з відображенням основних принципів функціонування технічних об'єктів і знаходить вираження у структурних, функціональних, принципових, кінематичних схемах і документах, що їх супроводжують.



Рис. 2.2. Аспекти описів проєктованих технічних об'єктів

Конструкторський аспект пов'язаний з реалізацією результатів функціонального проектування, тобто з визначенням геометричних форм технічних об'єктів та їх взаємним розташуванням у просторі.

Технологічний аспект відноситься до реалізації результатів конструкторського проектування, тобто пов'язаний з описом методів і засобів виготовлення технічних об'єктів.

Можливо більш диференційований опис властивостей технічного об'єкта з виділенням у ньому низки підсистем та відповідної кількості аспектів.

2.3. Складові частини процесу проектування

Проектування як процес, що розвивається у часі, поділяється на стадії, етапи, проектні процедури та проектні операції [6].

Під час проектування складних технічних об'єктів виділяються стадії передпроектних досліджень, технічного завдання та технічної пропозиції, ескізного, технічного, робочого проєктів, випробувань та впровадження.

На **стадіях передпроектних досліджень, технічного завдання та технічної пропозиції** визначаються призначення, основні принципи побудови технічного об'єкта і формулюється ТЗ на його проектування. Ці стадії називаються також **стадіями науково-дослідних робіт (НДР)**.

На **стадії ескізного проєкту** перевіряється коректність і реалізація основних принципів і положень, що визначають функціонування майбутнього технічного об'єкта, і створюється його ескізний проєкт. Ця стадія називається також **стадією дослідно-конструкторських робіт (ДКР)**.

На **стадії технічного проєкту** виконується всебічна проробка всіх частин проєкту, конкретизуються і деталізуються технічні рішення.

На **стадії робочого проєкту** формується вся необхідна документація для виготовлення технічного об'єкта.

Далі створюється та **випробовується** дослідний зразок або пробні партії виробів. За результатами випробувань вносяться необхідні корективи до проєктної документації, після чого здійснюється **впровадження** у виробництво на обраному підприємстві.

Етап проєктування – це частина процесу проєктування, що включає в себе формування всіх потрібних описів технічного об'єкта, що відносяться до одного або декількох ієрархічних рівнів та аспектів. Часто назви етапів збігаються з назвами відповідних ієрархічних рівнів і аспектів.

Складові частини етапу проєктування називаються **проєктними процедурами**. Проєктна процедура – це частина етапу, виконання якої закінчується одержанням проєктного рішення. Кожній проєктній процедурі відповідає задача проєктування, яка розв'язується в рамках цієї процедури. Прикладами проєктних процедур можуть бути: оформлення креслення, розрахунок параметрів підсилювача тощо.

Більш дрібні складові процесу проєктування, що входять до складу проєктних процедур, називаються **проєктними операціями**. Прикладами проєктних операцій можуть бути: креслення типового графічного зображення, розв'язання системи алгебраїчних рівнянь тощо.

Проєктні процедури і проєктні операції відрізняються один від одного не тільки змістом, але й такими властивостями, як детермінованість, евристичність, трудомісткість, об'єктна орієнтованість, об'єктна інваріантність.

Повністю детермінованою називається така процедура чи операція, що зводиться до виконання певного алгоритму, тобто сукупності правил, розпоряджень, програм. До подібних процедур відносяться, наприклад, побудова проєкції будь-якого тіла на площину, пошук в архіві об'єкта із заданими характеристиками і под. Детерміновані процедури та операції характерні тим, що в разі акуратного та точного дотримання запропонованого алгоритму результат їх виконання завжди

буде однаковим, незалежно від досвіду, знань, здібності та кваліфікації виконавця. Ідеальним виконавцем таких процедур є комп'ютер: він не робить помилок і суворо слідує закладеній у нього програмі.

На противагу детермінованим, для повністю евристичних процедур чи операцій неможливо чи надзвичайно складно скласти який-небудь однозначний алгоритм виконання. Тому такі процедури виконуються тільки людиною, бо тільки вона здатна діяти без чіткого алгоритму і повної вихідної інформації. Результат виконання евристичних процедур визначається знаннями, досвідом, здібностями та кваліфікацією виконавця. Для евристичних процедур характерно підвищення ефективності їхнього виконання в міру навчання виконавця. Прикладами евристичних процедур можуть бути оцінка результатів синтезу, оптимізації та прийняття рішень про подальший хід проектування, складання завдання на оптимізацію.

Трудомісткість виконання процедур та операцій визначається необхідними витратами ресурсів. Для комп'ютера – це кількість обчислень та обсяг пам'яті.

Об'єктна орієнтованість будь-якої процедури чи операції визначається ступенем залежності застосовуваних методів, математичного апарату, алгоритмів від специфіки проектного об'єкта. Наприклад, апарат розрахунку ходу променів, що застосовується під час проектування оптичних систем, зовсім не підходить для розрахунків електронних або кінематичних схем, конструювання оправ лінз, але він однаковий для всіх оптичних систем. Говорять, що процедура аналізу оптичних систем шляхом розрахунку ходу променів відрізняється середнім ступенем об'єктної орієнтованості.

Досить універсальними є методи пошуку прототипу в базі даних, математичний апарат оптимізації. Їх зміст та алгоритми не залежать від того, який об'єкт оптимізується чи шукається в архіві: оптична система чи електронний блок,

зубчасте зачеплення чи кулачок. Про такі універсальні процедури говорять, що вони цілком об'єктно-інваріантні.

Визначення ступеня евристичності та детермінованості, об'єктної орієнтованості та об'єктної інваріантності, а також трудомісткості окремих процедур та операцій дозволяє в, здавалося б, безперервному та невпорядкованому процесі проектування безпомилково відокремити виконувані дії одна від одної, найбільш раціонально використовувати комп'ютерні засоби. Зокрема, необхідно чітко відокремити всі евристичні процедури та забезпечити їх виконання людиною-проектувальником. На комп'ютер необхідно покласти виконання всіх детермінованих процедур і насамперед найбільш трудомістких. Для виконання евристичних процедур проектувальнику повинна бути надана з комп'ютера вся необхідна інформація до того ж у наочній і доступній формі зазвичай у графічній. Що стосується об'єктної орієнтованості, то насамперед необхідно виокремлювати максимально об'єктно-інваріантні процедури та їх частини – операції. Такі процедури та операції використовують універсальні алгоритми та методи, добре розвинені та ретельно відпрацьовані зараз безліччю авторів для найрізноманітніших застосувань. Пакети комп'ютерних програм, що реалізують універсальні, об'єктно-інваріантні операції та процедури проектування, є найбільш масовими, широко відомими та порівняно недорогими.

Процес проектування технічного об'єкта зводиться до виконання деяких послідовностей проектних процедур – маршрутів проектування.

2.4. Технічне завдання та технічна пропозиція

Вихідні дані для початку процесу проектування формуються у спеціальному документі – ТЗ. Цей документ установлює, які властивості чи характеристики повинен мати технічний об'єкт. Розрізняють такі характеристики:

- функціональні;

- конструктивні;
- технологічні;
- економічні;
- експлуатаційні;
- ергономічні;
- естетичні.

Функціональні характеристики визначають принципові можливості виконання технічним об'єктом його головного завдання. Наприклад, для багатьох вимірювальних приладів типовими функціональними характеристиками є роздільна здатність або точність виміру, діапазон вимірів тощо.

Конструктивні характеристики визначають такі властивості конструкції технічного об'єкта, як габарити, маса, кількість деталей, складність їх форми, ступінь стандартизації та уніфікації, матеріаломісткість тощо. Під конструктивними характеристиками розуміють не опис конструкції, що є завданням проєкту, а лише опис властивостей конструкції, важливих для технічного об'єкта.

Технологічні характеристики визначають якість процесу виготовлення, складання та випробування технічного об'єкта для заданого типу виробництва. Технологічність технічного об'єкта характеризується трудомісткістю, числом та типом засобів виготовлення, простотою підготовки виробництва, раціональністю вибору заготовок.

Економічні характеристики визначають економічну доцільність виробництва та експлуатації технічного об'єкта.

Експлуатаційні характеристики визначають простоту та зручність експлуатації, можливість переналаштування, стійкість до впливу навколишнього середовища, ремонтпридатність.

Ергономічні характеристики визначають зручність та безпеку взаємодії людини з технічним об'єктом.

Естетичні характеристики визначають якість сприйняття людиною (користувачем) зовнішнього вигляду приладу,

включаючи в себе такі оцінки приладу, як привабливість, сучасність, гармонійність поєднання елементів, досконалість конструкції та форми, колір.

Необхідні значення чи прийнятні інтервали значень усіх необхідних характеристик технічного об'єкта становлять зміст та сутність ТЗ. Воно оформляється відповідно до загальних правил оформлення технічної документації. Типове ТЗ на технічний об'єкт включає в себе наступні розділи:

1. Загальні відомості (стан питання, цілі та підстави розробки).

2. Визначення, призначення та сфера застосування технічного об'єкта.

3. Технічні (функціональні) характеристики (залежно від типу технічного об'єкта).

4. Структура та взаємозв'язок основних функціональних вузлів.

5. Бажані габаритні розміри та маса.

6. Умови експлуатації, ремонтпридатність, стійкість до дії довкілля, перешкод.

7. Вимоги до стандартизації, уніфікації.

8. Екологічні вимоги, вимоги безпеки та ергономіки.

9. Умови транспортування та зберігання.

10. Вимоги патентної чистоти, конкурентоспроможності.

Технічна пропозиція виконується на підставі аналізу ТЗ та різних варіантів можливих конструкцій технічного об'єкта з метою техніко-економічного обґрунтування доцільності розробки об'єкта, а також виявлення додаткових чи уточнених вимог, які не відображені у ТЗ. Типовими видами робіт у рамках технічної пропозиції є наступні:

1. Збір та вивчення матеріалів за проєктом.

2. Установлення основних відмітних ознак технічного об'єкта, що поліпшують його характеристики.

3. Функціональне проєктування на вищих та середніх рівнях, визначення технічних рішень, що забезпечують

досягнення заданих значень функціональних характеристик технічного об'єкта.

4. Спрощене конструювання на найвищих рівнях (спрощені креслення загального виду) з оцінкою можливостей розробки конструкції технічного об'єкта.

5. Техніко-економічне обґрунтування та порівняння різних можливих варіантів.

6. Формулювання остаточного ТЗ.

Пояснювальна записка на етапі технічної пропозиції повинна мати наступні розділи:

1. Введення.

2. Призначення та сфера застосування проєктованого технічного об'єкта.

3. Технічні характеристики.

4. Опис та обґрунтування конструкції.

5. Необхідні розрахунки.

6. Очікувані техніко-економічні показники.

До пояснювальної записки прикладається конструкторська документація (узагальнені схеми, креслення загального виду, габаритне креслення технічного об'єкта та ін.).

2.5. Низхідне і висхідне проєктування

Якщо розв'язання задач високих ієрархічних рівнів передувє розв'язанню задач нижчих ієрархічних рівнів, то проєктування називається **низхідним**. Якщо раніше виконуються етапи, що пов'язані з нижчими ієрархічними рівнями, то проєктування називається **висхідним** [6].

У кожного з цих двох видів проєктування є переваги й недоліки. За низхідного проєктування система розробляється в умовах, коли її елементи ще не визначені і, отже, відомості про їх можливості та властивості носять гіпотетичний характер. За висхідного проєктування, навпаки, елементи проєктуються раніше за систему і, отже, гіпотетичний

характер мають вимоги до елементів. В обох випадках через відсутність вичерпної інформації мають місце відхилення від потенційно можливих оптимальних технічних результатів. Однак слід пам'ятати, що подібні відхилення притаманні блочно-ієрархічному підходу до проєктування і що будь-якої альтернативи блочно-ієрархічному підходу в проєктуванні складних технічних об'єктів не існує. Тому оптимальність результатів блочно-ієрархічного проєктування слід розглядати з позицій техніко-економічних показників, що включають у себе, зокрема, матеріальні й погодинні витрати на проєктування.

Оскільки припущення, що приймаються, можуть не справдовуватися, часто необхідне повторне виконання проєктних процедур попередніх етапів після виконання проєктних процедур наступних етапів. Таке повторення забезпечує послідовне наближення до оптимальних результатів і обумовлює ітераційний характер проєктування. Отже, ітераційність відносять до важливих принципів проєктування складних об'єктів.

На практиці звичайно поєднують висхідне і низхідне проєктування. Наприклад, висхідне проєктування має місце на всіх ієрархічних рівнях, на котрих використовуються уніфіковані елементи. Очевидно, що уніфіковані елементи, які орієнтовані на використання їх у низці різноманітних систем певного класу, розробляються раніше, ніж та чи інша конкретна система з цього класу.

2.6. Зовнішнє і внутрішнє проєктування

За низхідного проєктування формулювання ТЗ на розробку елементів певного ієрархічного рівня відноситься до проєктних процедур цього ж рівня. Інакше складаються справи з розробкою ТЗ на систему вищого ієрархічного рівня чи на уніфіковану систему елементів багатоцільового призначення.

Тут розробка ТЗ є самостійним етапом проектування, який має назву **зовнішнього проектування**. На відміну від нього етапи проектування технічного об'єкта за сформульованим ТЗ називають **внутрішнім проектуванням** [6].

Основою зовнішнього проектування є правильна оцінка сучасного стану техніки й технології, прогноз їх розвитку на період часу, що не менший за життєвий цикл об'єкта. Поряд з технічними факторами необхідним є врахування економічних показників, прогнозів вартості і строків проектування та виготовлення. На основі вивчення стану й перспектив науково-технічного прогресу група експертів формулює первинний варіант ТЗ на систему. Оцінку можливості виконання сформульованого ТЗ і рекомендації щодо його коригування одержують за допомогою проектних процедур внутрішнього проектування. Отже, на початкових стадіях проектування складних систем має місце ітераційний процес, у якому по чергово виконуються процедури зовнішнього і внутрішнього проектування – формулювання ТЗ, його коригування, оцінка можливості виконання, прогноз матеріальних та погодинних витрат на проектування і виготовлення.

2.7. Уніфікація проектних рішень і процедур

Звичайно уніфікація об'єктів має за мету покращення техніко-економічних показників виробництва та експлуатації виробів. Використання типових і уніфікованих проектних рішень приводить також до спрощення і прискорення проектування. Так, наприклад, типові елементи розробляються однократно, але в різних проектах застосовуються багаторазово [6].

Однак уніфікація доцільна тільки в таких класах об'єктів, у котрих з порівняно невеликої кількості різновидів елементів необхідне проектування і виготовлення великої кількості різноманітних систем. Саме ці різновиди елементів і підлягають

уніфікації. Для систем, що складаються з цих елементів, у кожному конкретному випадку доводиться заново виконувати багаторівневе ієрархічне проєктування. У цих умовах доцільно ставити питання не про уніфікацію виробів, а про уніфікацію засобів їх проєктування і виготовлення, зокрема про уніфікацію проєктних процедур у межах САПР. Наявність засобів автоматизованого проєктування типових проєктних процедур дозволяє оперативно створювати проєкти нових виробів.

2.8. Моделювання технічних об'єктів

Моделювання – це дослідження технічного об'єкта шляхом створення його моделі, яка за своїми властивостями відтворює властивості об'єкта, і оперування нею з метою отримання корисної інформації про об'єкт.

У процесі проєктування можуть створюватися такі моделі технічного об'єкта:

- **конструктивна модель** (двовимірна, тривимірна) відображає просторові геометричні співвідношення між елементами технічного об'єкта;

- **фізична модель** відображає технічний об'єкт у певних масштабах та співвідношеннях;

- **імітаційна модель** відображає функціонування технічного об'єкта шляхом відтворення елементарних явищ та актів процесу на комп'ютері у послідовності, що відповідає реальним взаємозв'язкам та взаємозалежностям;

- **мнемонічна модель** відображає ті чи інші властивості технічного об'єкта у вигляді графічних образів (кінематичні, структурні, еквівалентні схеми тощо);

- **математична модель** відображає властивості технічного об'єкта за допомогою системи математичних об'єктів (чисел, змінних, матриць, множин тощо) та відносин між ними.

Важливе значення у проміжних описах (проєктних рішеннях) мають математичні моделі технічних об'єктів, що

проектуються. Під час проектування використовуються математичні моделі, що відображають властивості технічного об'єкта, суттєві з позиції розробника.

Серед властивостей технічного об'єкта (системи), що відображаються в математичній моделі, розрізняють **властивості системи, властивості елементів системи та властивості зовнішнього середовища**, у якому повинен функціонувати об'єкт. Кількісне вираження цих властивостей здійснюється за допомогою величин, які називаються **параметрами**. Величини, що характеризують властивості системи, властивості елементів системи та властивості зовнішнього середовища називаються відповідно **вихідними, внутрішніми та зовнішніми параметрами**.

Наприклад, для електронного підсилювача:

- вихідні параметри: смуга пропускання, коефіцієнт посилення на середніх частотах, вхідний опір, потужність розсіювання;
- внутрішні параметри: значення опорів резисторів, ємностей конденсаторів, параметрів транзисторів;
- зовнішні параметри: опір та ємність навантаження, напруги джерел живлення.

Позначимо кількості вихідних, внутрішніх та зовнішніх параметрів через m , n , l відповідно. А вектори цих параметрів позначимо як

$Y = (y_1, y_2, \dots, y_m)$ – вихідні параметри;

$X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ – внутрішні параметри;

$Q = (q_1, q_2, \dots, q_l)$ – зовнішні параметри.

Властивості технічного об'єкта залежать від внутрішніх та зовнішніх параметрів:

$$Y = F(X, Q).$$

Ця формула є прикладом математичної моделі технічного об'єкта. Наявність такої математичної моделі дозволяє легко оцінювати вихідні параметри, якщо відомі значення векторів X і Q .

У ТЗ на проєктування технічного об'єкта вказуються величини, які називаються **технічними вимогами до вихідних параметрів** y_i ($i = 1, 2, \dots, m$, де m – кількість вихідних параметрів). Технічні вимоги утворюють вектор: $R = (RR_1, RR_2, \dots, RR_m)$, де величини RR_i являють собою межі допустимих діапазонів зміни вихідних параметрів y_i . Необхідні співвідношення між y_i та RR_i називаються **умовами працездатності**.

2.9. Класифікація типових проєктних процедур

Проєктна процедура називається **типовою**, якщо вона призначена для багатократного застосування під час проєктування багатьох типів технічних об'єктів [6]. Класифікація типових проєктних процедур представлена на рис. 2.3.

Розрізняють проєктні процедури аналізу й синтезу.

Синтез полягає у створенні опису технічного об'єкта.

Аналіз полягає у визначенні властивостей та дослідженні працездатності технічного об'єкта за його описом.

Тобто, під час синтезу створюється, а під час аналізу оцінюється проєкт технічного об'єкта.

Проєктні процедури синтезу поділяються на проєктні процедури структурного та параметричного синтезу.

Структурний синтез полягає у визначенні структури технічного об'єкта, тобто переліку типів елементів, що складають об'єкт, та способу зв'язку елементів між собою у складі об'єкта.

Параметричний синтез полягає у визначенні числових значень параметрів елементів за заданій структурі та умовах працездатності на вихідні параметри технічного об'єкта.

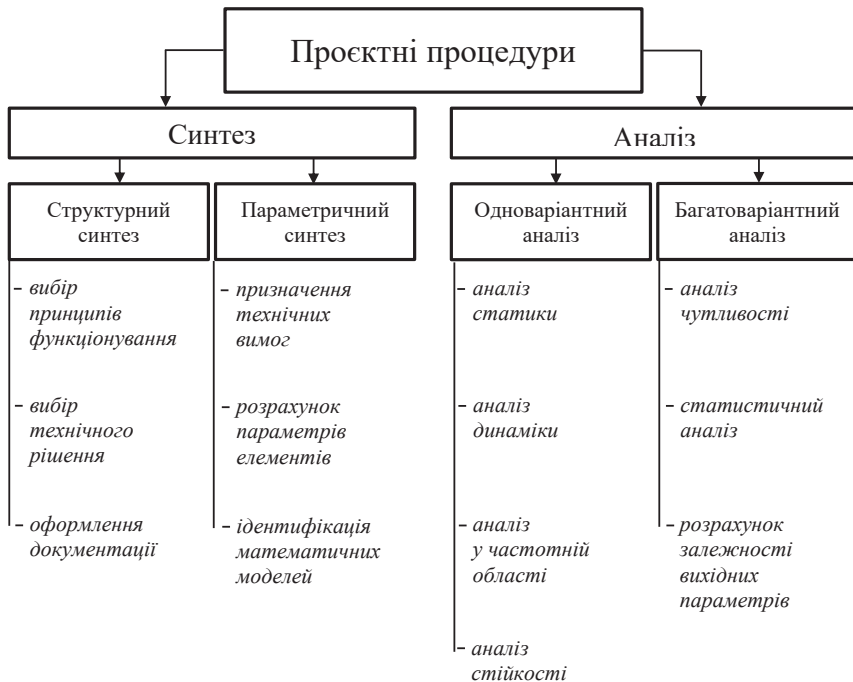


Рис. 2.3. Класифікація типових проектних процедур

Проектні процедури аналізу поділяються на проектні процедури одноваріантного та багатоваріантного аналізу.

Одноваріантний аналіз полягає у визначенні значень вихідних параметрів технічного об'єкта за заданих значеннях внутрішніх та зовнішніх параметрів.

Багатоваріантний аналіз полягає в дослідженні властивостей технічного об'єкта в деякій області простору внутрішніх параметрів. Такий аналіз вимагає багаторазового виконання одноваріантного аналізу.

2.10. Типова послідовність проєктних процедур

На рис. 2.4 подана типова послідовність проєктних процедур на одному з етапів низхідного проєктування.

На попередньому етапі розв'язувалися задачі k -го ієрархічного рівня. Одним з результатів розв'язування цих задач під час низхідного проєктування є формулювання ТЗ на проєктування системи $(k+1)$ -го рівня, що розглядається.

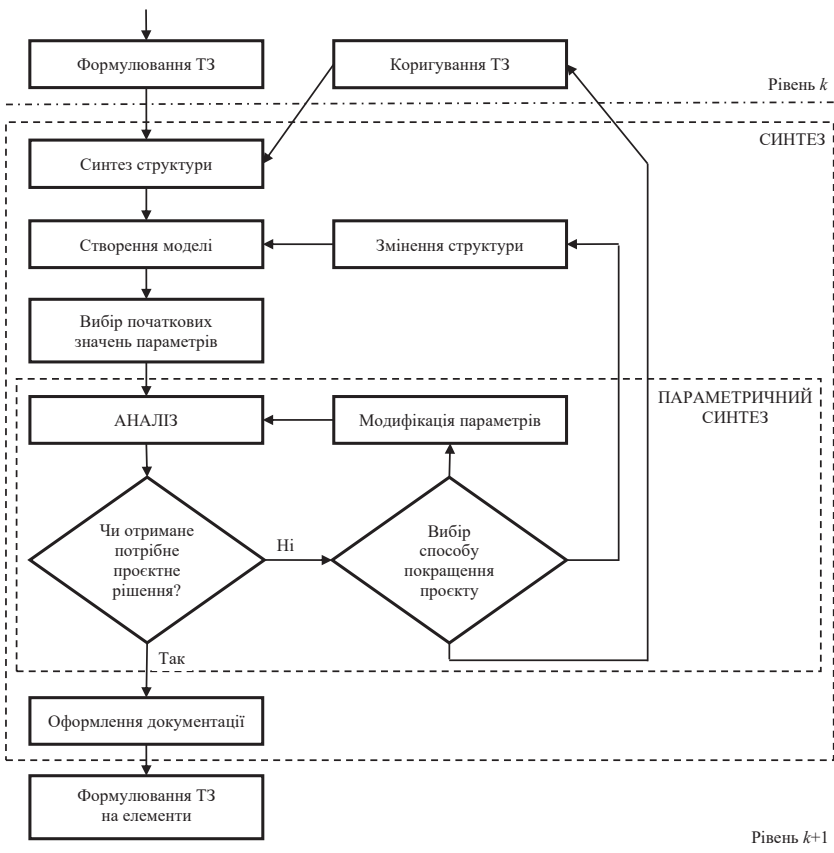


Рис. 2.4. Типова послідовність проєктних процедур

Проектування системи починається із синтезу початкового варіанта її структури. Для оцінки цього варіанта створюється модель. Після вибору початкових значень параметрів елементів виконується аналіз варіанта, за результатами якого стає можливою його оцінка. Звичайно оцінка полягає в перевірці виконання умов працездатності системи, які сформульовані в ТЗ. Якщо умови працездатності виконуються належною мірою, то отримане проєктне рішення приймається, система $(k+1)$ -го рівня описується в прийнятій формі й формулюється ТЗ на проектування елементів даного рівня. Якщо ж отримане проєктне рішення не є задовільним, то вибирається один з можливих шляхів поліпшення проєкту.

Зазвичай найпростіше здійснити зміни числових значень параметрів елементів. Сукупність процедур модифікації числових значень параметрів елементів, аналізу й оцінки результатів аналізу являє собою процедуру параметричного синтезу.

Можливо, що шляхом параметричного синтезу не вдасться досягти прийнятного ступеня виконання умов працездатності. Тоді необхідно використовувати інший шлях, пов'язаний із зміненням структури. Новий варіант структури синтезується і для нього повторюються процедури формування моделі та параметричного синтезу.

Якщо не вдається отримати прийнятне проєктне рішення шляхом змінення структури, то порушується питання про коригування ТЗ, сформульованого на попередньому етапі проектування. Таке коригування може вимагати повторного виконання низки проєктних процедур k -го ієрархічного рівня, що зумовлює ітераційний характер проєктування.

2.11. Маршрут проєктування технічного об'єкта

Маршрут проєктування технічного об'єкта – це послідовність етапів та/або проєктних процедур, що використовується для проєктування цього об'єкта. Маршрут проєктування

називають **типовим**, якщо він застосовується під час проєкування багатьох об'єктів певного класу. На рис. 2.5 представлений типовий маршрут проєкування надвеликих інтегральних схем (НВІС).

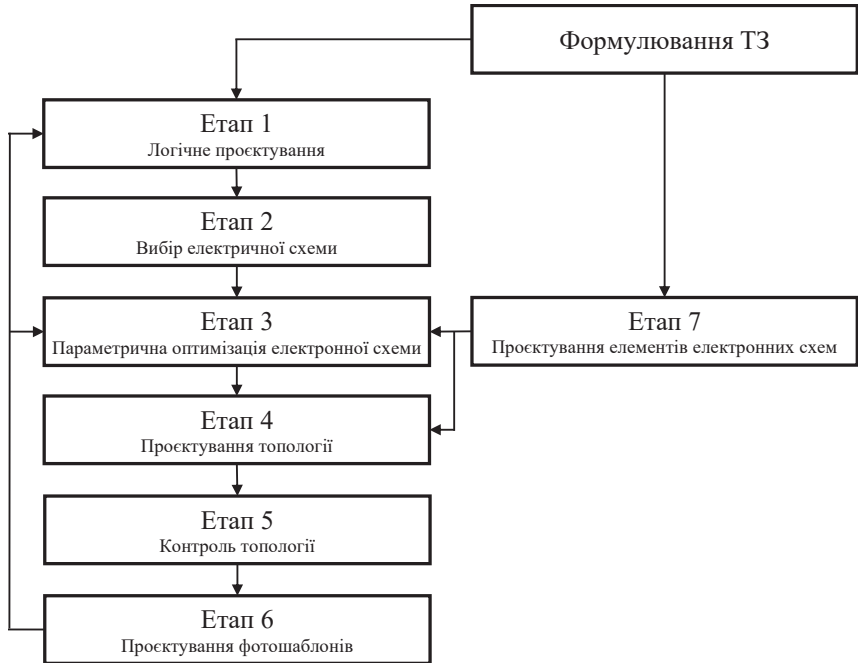


Рис. 2.5. Типовий маршрут проєкування НВІС

На Етапі 1 виконуються процедури верхнього ієрархічного рівня функціонального проєкування НВІС. Це процедури синтезу логічної схеми та її аналізу з урахуванням передбачуваних затримок поширення сигналу в елементах.

На Етапі 2 виконується синтез принципових електричних схем фрагментів НВІС, які вважалися на Етапі 1 елементами. Синтез проводиться на основі перегляду кількох варіантів структури та орієнтовної оцінки цих варіантів.

Паралельно з виконанням Етапу 1 та Етапу 2 виконується Етап 7 – проєктування компонентів (елементів електронних схем). Тут синтезується фізична та топологічна структура компонентів та вибираються технологія виготовлення НВІС.

На Етапі 3 вихідними даними є, по-перше, варіанти структури принципів електричних схем, які були відібрані на Етапі 2, по-друге, характеристики та значення електричних параметрів частини компонентів, отриманих на Етапі 7. Інша частина параметрів компонентів варіюється на Етапі 3 з метою їх оптимізації. Тут же перевіряється працездатність схем за умов впливу різних дестабілізуючих факторів.

Етапи 4–6 відносяться до конструкторського аспекту.

На Етапі 4 синтезується топологія НВІС, тобто конфігурація та взаємне розташування компонентів та електричних з'єднань у напівпровідниковому кристалі. Відомості про раніше спроектовану топологію окремих компонентів надходять від Етапу 7.

На Етапі 5 перевіряється відповідність між топологією та принциповою електричною схемою, а також дотримання конструкторсько-технологічних проєктних норм.

На Етапі 6 проєктуються фотошаблони, які містять інформацію про топологію, і будуть безпосередньо використовуватися в процесі виготовлення НВІС.

Зважаючи на те, що конструкторські рішення впливають на значення низки електричних параметрів, то після виконання Етапів 4–6 потрібно уточнення результатів логічного та схемотехнічного проєктування, тобто ітераційне повернення до Етапу 1 та Етапу 3.

2.12. Класифікація режимів проєктування

Режими проєктування можна класифікувати за характером та ступенем участі людини та використання комп'ютера під час виконання маршруту проєктування (рис. 2.6).



Рис. 2.6. Класифікація режимів проєктування

Ручний режим проєктування характеризується виконанням маршруту проєктування без допомоги комп'ютера.

Автоматизований режим проєктування може бути частково автоматизованим чи діалоговим.

Частково автоматизований режим проєктування характерний тим, що частина проектних процедур у маршруті проєктування виконується людиною вручну, а частина – з використанням комп'ютера. Такий режим характеризується невисоким ступенем автоматизації проєктування.

Діалоговий режим проєктування є більш досконалим режимом стосовно частково автоматизованого режиму. За нього всі проектні процедури в маршруті виконуються за допомогою комп'ютера, а участь людини проявляється в оперативній оцінці результатів проектних процедур та операцій, а також у виборі шляхів продовження проєктування та коригування його ходу.

Якщо ініціатором діалогу є людина, якій надано можливість у будь-який момент часу перервати автоматичні обчислення на комп'ютері, такий діалог називається **активним**.

Якщо переривання обчислень відбувається за командами програми, що виконується на комп'ютері, у певні моменти часу, то такий діалог називається **пасивним**.

У багатьох випадках користувач САПР у режимі діалогу лише вводить та редагує вихідні дані для виконання певного маршруту проєктування, а безпосереднє виконання маршруту провадиться в автоматичному режимі роботи комп'ютера.

Автоматичний режим проєктування має місце під час виконання маршруту проєктування за формальними алгоритмами на комп'ютері без втручання людини в хід рішення.

Розвиток САПР відбувається, зокрема, у напрямі підвищення рівня автоматизації проєктування. Однак робота в режимі діалогу в САПР залишається необхідною у зв'язку з тим, що повністю процес проєктування складних систем формалізувати не вдається, і що участь людини в низці випадків дозволяє прискорити прийняття рішення.

3. СТРУКТУРА САПР

3.1. Структура видів забезпечення САПР

Засоби автоматизації проєктування можна згрупувати за видами забезпечення автоматизованого проєктування. У складі САПР виділяють сім основних видів забезпечення (рис. 3.1).

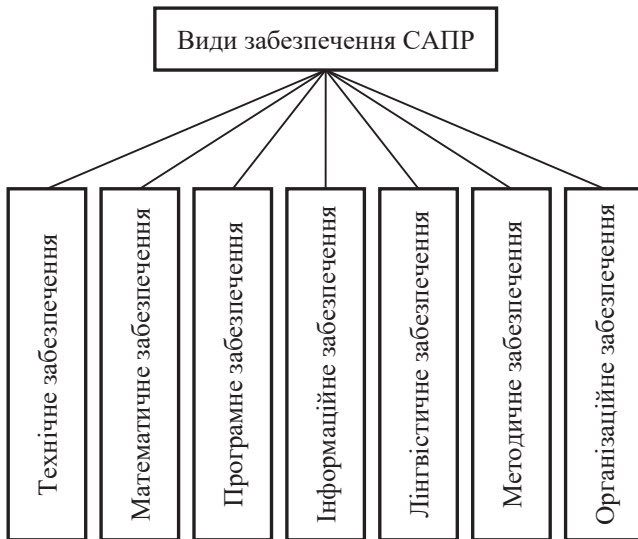


Рис. 3.1. Структура видів забезпечення САПР

3.2. Технічне забезпечення САПР

Сукупність усіх технічних засобів, що використовуються під час експлуатації САПР, утворює технічне забезпечення. Компонентами технічного забезпечення є пристрої обчислювальної та організаційної техніки, засоби передачі даних, вимірювальні та інші пристрої, що забезпечують функціонування САПР.

Загальна структура технічного забезпечення САПР є мережею вузлів, пов'язаних між собою середовищем передачі даних (рис. 3.2).

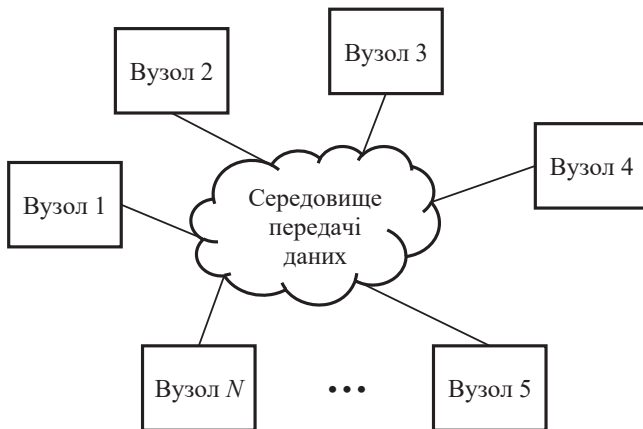


Рис. 3.2. Загальна структура технічного забезпечення САПР

Вузлами є робочі місця проєктувальників, які часто називають **автоматизованими робочими місцями** (АРМ). Вузлами також можуть бути сервери, периферійні, вимірювальні пристрої тощо. Саме в АРМ мають бути засоби для інтерфейсу проєктувальника з комп'ютером. Що ж до обчислювальної потужності, то вона може бути розподілена між різними вузлами.

Середовище передачі даних представлено каналами передачі даних, що складаються з ліній зв'язку та комутаційного обладнання.

Як засоби обробки даних у сучасних САПР широко використовуються робочі станції, сервери, персональні комп'ютери. На основі робочих станцій чи персональних комп'ютерів створюються АРМ. Типовий склад АРМ: комп'ютер з одним або декількома мікропроцесорами, зовнішньою, оперативною, кешпам'яттю та шинами, що слугують для взаємного зв'язку пристроїв; пристрої введення-виведення, що включають у себе, як мінімум, клавіатуру, маніпулятор «миша», монітор. Додатково до складу АРМ можуть входити: принтер, сканер, плотер, графічний планшет (дигітайзер) та деякі інші периферійні пристрої.

Робочі станції в порівнянні з персональними комп'ютерами являють собою обчислювальну систему, орієнтовану на виконання певних функцій. Спеціалізація забезпечується як набором програм, так і апаратно.

Залежно від призначення існують: АРМ конструктора, АРМ технолога, АРМ керівника проєкту тощо. Вони можуть відрізнитися характеристиками комп'ютера та складом периферійних пристроїв.

Специфіка САПР накладає свої особливості навіть на вибір стандартних компонентів обладнання, наприклад, відеокарт. З огляду на особливості завдань, розв'язуваних САПР, для їхнього ефективного використання застосовується досить широкий спектр специфічного устаткування, яке зазвичай не використовується в інших галузях використання комп'ютерів.

До технічного забезпечення САПР висуваються наступні вимоги:

- зручність використання інженерами-проєктувальниками, можливість оперативної взаємодії інженерів з комп'ютерами;

- достатня продуктивність і об'єм оперативної пам'яті комп'ютерів для вирішення завдань усіх етапів проектування за прийнятний час;
- можливість одночасної роботи з технічними засобами необхідного числа користувачів для ефективної діяльності всього колективу розробників;
- відкритість комплексу технічних засобів для розширення та модернізації системи в міру вдосконалення і розвитку техніки;
- висока надійність, прийнятна вартість.

3.3. Математичне забезпечення САПР

Сукупність математичних методів, моделей та алгоритмів, що застосовуються в САПР, називається **математичним забезпеченням**. Основу математичного забезпечення САПР становлять алгоритми та методики розв'язування задач проектування. **Алгоритмом** називається кінцевий набір інструкцій для отримання розв'язання задачі за допомогою кінцевого числа операцій (дій). Розробка математичного забезпечення є найскладнішим етапом створення САПР, від якого здебільшого залежить ефективність її роботи.

Елементи математичного забезпечення САПР дуже різноманітні. Серед них є інваріантні (незалежні) елементи, що широко застосовуються в різних САПР. До них належать принципи побудови функціональних моделей, методи чисельного розв'язання алгебраїчних та диференціальних рівнянь тощо. Специфіка предметних галузей проявляється насамперед у математичних моделях проєктованих технічних об'єктів та способах розв'язування задач структурного синтезу. Форми подання математичного забезпечення також різноманітні. Практичне використання математичного забезпечення відбувається після його реалізації у програмному забезпеченні.

3.4. Програмне забезпечення САПР

Програмне забезпечення САПР – це сукупність програм на носіях даних та програмних документів, призначених для їх налагодження, експлуатації та перевірки працездатності.

Програмне забезпечення (ПЗ) поділяється на системне та прикладне (спеціальне).

Системне ПЗ призначене для організації функціонування технічних засобів, тобто для планування та управління обчислювальним процесом, а також для розподілу наявних ресурсів. Системне ПЗ представлено операційними системами комп'ютера. Системне програмне забезпечення створюється для багатьох додатків і специфіку САПР не відображає.

Прикладне ПЗ включає в себе прикладні програми й пакети прикладних програм, основною функцією яких є формування проєктних рішень. **Прикладною** називається програма, призначена для розв'язання задачі або класу задач у певній галузі застосування комп'ютера. Система прикладних програм, що призначена на вирішення завдань певного класу, називається **пакетом прикладних програм**. У САПР пакети прикладних програм зазвичай застосовують для виконання конкретних проєктних процедур. Прикладне створюють з урахуванням можливостей системного ПЗ.

Склад та структура ПЗ визначаються складом та структурою САПР. ПЗ – це важливий і необхідний засіб автоматизації проєктування, як і технічне забезпечення. Однак, на відміну від технічного забезпечення, що є універсальним інструментарієм, який використовується в майже однаковому складі в різних видах САПР, прикладне програмне забезпечення є оригінальним інструментом автоматизації і відображає всю специфіку конкретної системи.

3.5. Інформаційне забезпечення САПР

Інформаційне забезпечення САПР поєднує всі можливі дані, необхідні для виконання автоматизованого проєктування. Ці дані можуть бути представлені у вигляді тих чи інших документів на різних носіях, що містять відомості довідкового характеру про матеріали, комплектуючі вироби, типові проєктні рішення, параметри елементів тощо.

Основна складова інформаційного забезпечення САПР – це банк даних.

Банк даних (БНД) є сукупністю засобів для централізованого накопичення і колективного використання даних у САПР. Банк даних складається з бази даних та системи управління базою даних.

База даних (БД) – це самі дані, які знаходяться у запам'ятовуваних пристроях і до того ж структуровані відповідно до прийнятих у даному БНД правилами.

Система управління базою даних (СУБД) – це сукупність програмних засобів, які забезпечують функціонування БНД. За допомогою СУБД проводиться запис даних у БНД, їх вибірка на запити користувачів та прикладних програм, забезпечується захист даних від спотворень та несанкціонованого доступу.

3.6. Лінгвістичне забезпечення САПР

Лінгвістичним забезпеченням САПР називається сукупність засобів та правил для формалізації природної мови, що використовуються користувачами та експлуатаційним персоналом САПР під час спілкування з комплексом засобів автоматизації проєктування та експлуатації системи. Лінгвістичне забезпечення використовується для представлення та реалізації інформаційного та програмного забезпечення.

Основу лінгвістичного забезпечення САПР складають спеціальні мовні засоби (мови проєктування та програмування), призначені для спілкування людини з технічними та програмними засобами автоматизації проєктування у процесі проєктування.

Мови проєктування – це мови представлення описів об'єктів проєктування та їх перетворень. Мова проєктування, що використовується для представлення задачі проєктування, називається **вихідною мовою проєктування**. Вихідна мова проєктування призначена для представлення проєктного рішення, включаючи в себе результат проєктування, у формі, що задовольняє вимогам його подальшого застосування.

Мови програмування використовуються для представлення опису способу розв'язання задачі у формі кінцевої послідовності дій для виконання комп'ютером.

3.7. Методичне забезпечення САПР

Методичне забезпечення САПР утворює сукупність документів, що описують технологію функціонування САПР, методи вибору та застосування користувачем технологічних прийомів для отримання конкретних результатів під час використання системи.

Документи, що входять до складу методичного забезпечення САПР, регламентують порядок її експлуатації. У цих документах викладено теорію, методи, способи, математичні моделі, алгоритми, алгоритмічні спеціальні мови для опису об'єктів, термінологія, нормативи та інші дані, що розкривають методологію (ідеологію) функціонування системи. Документи методичного забезпечення носять переважно інструкційний характер і орієнтовані на не автоматизоване використання людиною. У них насамперед розкривається специфічна термінологія, що використовується під час викладу основних принципів побудови, структури та дій, які виконують користувачі та обслуговуючий персонал під час експлуатації САПР.

Допускається ширше тлумачення поняття методичного забезпечення САПР, за якого під методичним забезпеченням мається на увазі сукупність математичного, лінгвістичного забезпечення та названих документів, що реалізують правила використання засобів проєктування.

3.8. Організаційне забезпечення САПР

Організаційним забезпеченням САПР називається сукупність документів, що встановлюють організаційну структуру, права та обов'язки користувачів та експлуатаційного персоналу системи в умовах її функціонування, перевірки та забезпечення працездатності.

Компонентами організаційного забезпечення САПР є правила та накази, що регламентують права, обов'язки та функції кожного учасника розробки та експлуатації САПР: експлуатаційного персоналу, інженерів-програмістів, системних адміністраторів, адміністраторів БНД, проєктувальників. Організаційне забезпечення САПР включає в себе комплект документів (наказів, положень, штатних розкладів, інструкцій, графіків робіт тощо), що встановлюють правила виконання автоматизованого проєктування. Прикладами таких документів є інструкція користувача САПР, інструкція з експлуатації технічних засобів АРМ, посадова інструкція системного адміністратора тощо.

Організаційне забезпечення регламентує:

- взаємодію проєктуючих та обслуговуючих САПР підрозділів;
- відповідальність спеціалістів різного профілю та рівня за певні види робіт;
- правила випуску, використання та коригування вихідних документів САПР;
- правила доступу до БД;
- пріоритети користування засобами САПР.

3.9. Підсистеми САПР

Поряд з видами забезпечення у структуру САПР входить і функціональна частина [3]. Функціональна частина САПР представлена у вигляді набору підсистем, що вирішують питання проєктування: інформаційного пошуку, інженерних розрахунків, машинної графіки, моделювання, випробувань, виготовлення, технологічної підготовки виробництва, управління (рис. 3.3). Підсистеми є основними структурними ланками САПР і розрізняються за призначенням.

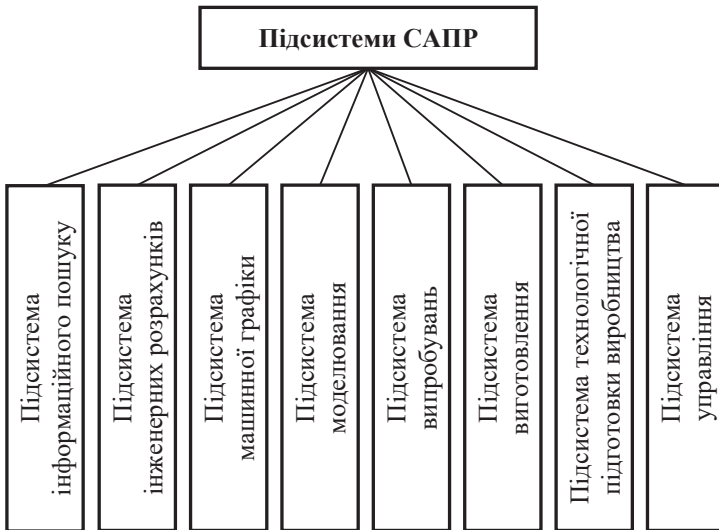


Рис. 3.3. Підсистеми САПР

Підсистема інформаційного пошуку – це комплекс мовно-алгоритмічних засобів, призначений для зберігання та пошуку в певній множині елементів (документів, стандартів, норм, креслень виконаних конструкцій, патентів, характеристик матеріалів тощо) та представлення інформації, що відповідає запиту.

Підсистема інженерних розрахунків разом з підсистемою машинної графіки є сукупністю програмних засобів, призначених для виконання різних розрахунків (наприклад, геометричних) у режимі діалогу «людина–машина». Робота підсистеми інженерних розрахунків тісно пов'язана з використанням різного роду математичних моделей проєктованих об'єктів, для автоматизованого отримання яких призначена **підсистема моделювання**. Більшість сучасних САПР володіє широким спектром можливостей для введення, обробки, зберігання і виведення графічної інформації, що реалізуються програмними засобами підсистеми машинної графіки.

Підсистема випробувань є комплексом програмних засобів, призначених для створення програм управління випробувальним устаткуванням, обробки результатів випробувань, проведення чисельного експерименту з використанням математичних моделей об'єкта проєктування. Чисельний експеримент дуже важливий у процесі проєктування, оскільки дозволяє визначити властивості проєктованого об'єкта без виготовлення дослідних зразків і дає змогу відразу відмовитися від безперспективних варіантів, що значно зменшує витрати часу і матеріальних засобів на створення об'єкта.

Підсистема виготовлення призначена для підготовки програм для верстатів і автоматичних ліній з ЧПУ.

Підсистема технологічної підготовки виробництва зазвичай виходить за рамки САПР і є самостійною системою – автоматизованою системою технологічної підготовки виробництва (АСТПВ).

Підсистема управління призначена для об'єднання роботи інших підсистем на різних етапах процесу проєктування, а також для виконання функцій координатора в колективному процесі ухвалення рішень.

Не обов'язково в кожній САПР має бути представлений весь набір підсистем. Необхідно також відзначити, що всі підсистеми тісно взаємозв'язані, тому часто неможливо провести

між ними чіткі межі. Так підсистема машинної графіки може видавати результати у вигляді програми для устаткування з ЧПУ, що безпосередньо пов'язує її з підсистемами технологічної підготовки виробництва і виготовлення.

Деякі підсистеми, залежно від ступеня їх розвитку або призначення, можуть існувати як самостійні системи (наприклад, підсистеми інформаційного пошуку, машинної графіки).

3.10. Принципи побудови САПР

Сучасні САПР створюються відповідно до наступних принципів:

1. САПР – людино-машинна система. Колектив розробників є складовою частиною САПР, виконуючи проєктні роботи у взаємодії з комп'ютерами.

2. Комплексна автоматизація всіх рівнів проєктування. Вона дозволяє внести такі зміни до структури проєктних організацій, форм документів, які відповідають цілям автоматизації: скороченню матеріальних і тимчасових витрат, підвищенню якості проєктування, збереженню чисельності інженерно-технічних працівників на колишньому рівні, незважаючи на ускладнення проєктованих об'єктів.

3. Інформаційна узгодженість ПЗ. Початкова інформація про об'єкт або про необхідні проєктні операції виконується на єдиній вхідній мові.

4. Відкритість САПР. Властивість відкритості системи означає можливість внесення змін у систему під час її експлуатації. Зміни можуть полягати в додаванні нових або заміні старих елементів у програмному, інформаційному, технічному й лінгвістичному забезпеченнях. Внесення змін має бути максимально спрощене і доступно користувачам САПР. Властивість відкритості приводить до збільшення терміну служби системи, підвищує її універсальність.

5. Сумісність традиційного й автоматизованого проєктування. Цей принцип має значення в тих випадках, коли автоматизоване проєктування впроваджується на вже діючому підприємстві із структурою, що склалася. Саме в цих умовах доцільний еволюційний шлях упровадження САПР, за якого зміни, що диктуються особливостями автоматизованого проєктування, не порушуватимуть на тривалий термін нормального функціонування підприємства.

4. СПЕЦІАЛЬНЕ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЄКТУВАННЯ

4.1. Плотири

Плотер (графобудівник) – пристрій для автоматичного креслення з великою точністю рисунків, схем, складних креслень, карт та іншої графічної інформації на папері великого розміру.

За принципом дії плотери поділяються на пір'яні, струменеві, лазерні, електростатичні та термографічні.

Пір'яні плотери створюють зображення за допомогою пишучих елементів. Ці пишучі елементи (пір'я) конструктивно нагадують фломастери або чорнильні ручки. Є кілька видів таких елементів, які відрізняються один від одного видом рідкого барвника.

Пір'яні плотери зі свого боку діляться на планшетні (пристрої з нерухомим носієм інформації) і рулонні (пристрої з носієм інформації, що переміщується).

У планшетних плотерах носій інформації розміщується на плоскій робочій поверхні планшета. Переміщення пишучого елемента здійснюється електромеханічною координатною системою по двох осях. Недоліком плотерів такого типу є громіздкість конструкції, оскільки потрібен простір, що відповідає області креслення. Перевагою цього рішення є висока точність позиціонування пишучого елемента і зазвичай точність самого рисунка, що наноситься на папір.

Для рулонних плотерів характерно наявність механізму переміщення пишучого елемента тільки по одній координаті, запис інформації по іншій осі здійснюється шляхом переміщення носія. У порівнянні з планшетними плотерами маса рулонних менше у 3–5 разів, але точність у таких плотерів звичай нижча, ніж у планшетних.

Струменеві плотери – це друкувальні пристрої, які створюють елементи зображення крапельками чорнила, що вилітають із сопла зі швидкістю, достатньою, щоб подолати зазор між соплом та поверхнею, на якій формується зображення.

Технологія струменевого друку використовує спрямоване розпилення крапель чорнила на папір за допомогою дрібних сопел друкувальної головки. У стінку сопла вбудований нагрівальний елемент. Під час подачі електричного імпульсу температура його різко зростає. Практично все чорнило, що знаходиться в контакті з нагрівальним елементом, миттєво випаровується. Розширення пару викликає ударну хвилю. Під дією надмірного тиску крапелька чорнила «вистрелюється» із сопла. Після «пострілу» чорнильний пар конденсується і в соплі утворюється зона зниженого тиску, під дією якого нова порція чорнила всмоктується в сопло.

Лазерні плотери базуються на електрографічній технології. Вони використовують як проміжний носій барабан, що обертається. Барабан покритий шаром напівпровідника. Заряджені променем лазера області напівпровідника притягують сухий тонер, який потім переноситься на папір, що проходить під барабаном. Після цього папір з нанесеним тонером проходить через нагрівач. Під дією тепла тонер запікається та закріплюється на папері, створюючи зображення.

Електростатичні плотери. Електростатична технологія ґрунтується на створенні прихованого електричного зображення (потенційного рельєфу) на поверхні носія – спеціального електростатичного паперу, робоча поверхня якого покрита тонким шаром діелектрика, а основа просочена

гідрофільними солями для забезпечення необхідної вологості та електропровідності. Потенційний рельєф формується під час осадження на поверхню діелектрика вільних зарядів, що утворюються через збудження найтонших електродів записуючої головки високовольтними імпульсами напруги.

Коли папір проходить через вузол з рідким намагніченим тонером, частинки тонера осідають на заряджених ділянках паперу. Повна колірна гама виходить за чотири цикли створення прихованого зображення і проходку носія через чотири вузли з відповідними тонерами.

Термографічні плотери поділяються на пристрої прямого виведення зображення та пристрої на основі термопередачі.

У плотерах прямого виведення зображення створюється на спеціальному термопапері за допомогою лінійки мініатюрних нагрівачів. Термопапір, який зазвичай подається з рулону, рухається вздовж лінійки нагрівачів та змінює колір у місцях нагріву. Зображення виходить високоякісним, але монохромним.

У плотерах на основі термопередачі між термонагрівачами та папером розміщується «донорний кольороносій» – тонка стрічка, звернена до паперу фарбуючим шаром, виконаним на восковій основі з низькою температурою плавлення. На донорній стрічці послідовно нанесені області кожного з основних кольорів розміром, що відповідає аркушу використовуваного формату. У процесі виведення інформації паперовий лист з накладеною на нього донорною стрічкою проходить під друкувальною головкою, що складається з тисяч найдрібніших нагрівальних елементів. Віск у місцях нагрівання розплавляється і пігмент залишається на аркуші. За прохід наноситься один колір і зображення виходить за чотири проходи.

За продуктивністю плотери поділяються на пристрої з високою, середньою та малою продуктивністю. Продуктивність електромеханічних плотерів визначається динамічними

параметрами пристроїв: максимальною швидкістю та прискоренням пишучого елемента.

За точністю плотери поділяються на прецизійні (призначені для виготовлення оригіналів конструкторської документації, шаблонів, карт тощо), середньої точності (для контрольних прорисовок креслень та схем) і малої точності (для ескізної прорисовки).

Плотери можуть працювати автономно, отримуючи вихідні дані з проміжного носія – диска, і безпосередньо з комп'ютером, використовуючи різні типи інтерфейсів.

У сучасних плотерах часто комбінують друкувальну та скануючу головки, установлені на одній каретці. Такий багатофункціональний пристрій дозволяє не лише виводити на друк креслення та схеми, а й сканувати раніше створені документи (наприклад, виконані вручну креслення).

4.2. 3D-принтери

3D-принтер – це периферійний пристрій, який використовує метод пошарового створення фізичного об'єкта за цифровою 3D-моделлю. 3D-друк може здійснюватися різними способами та з використанням різних матеріалів. Він широко використовується для швидкого прототипування.

Швидке прототипування – технологія швидкого створення фізичних макетів деталей, що дозволяють оцінити зовнішній вигляд деталі, перевірити елементи конструкції, провести необхідні випробування, виготовити майстер-модель для подальшого лиття. Уже на етапі проєктування можна кардинально змінити конструкцію вузла або об'єкта загалом. В інженерії такий підхід здатний суттєво знизити витрати у виробництві та освоєнні нової продукції.

Технології швидкого прототипування почали розвиватися у 80-х рр. XX ст. і переважно ґрунтуються на принципі поступового нарощування (додавання) матеріалу або зміни

фазового стану речовини в заданій області простору. На даний момент значного прогресу досягли технології пошарового формування тривимірних об'єктів за комп'ютерними моделями. Побудова прототипу відбувається відповідно до моделі, створеної за допомогою САПР. Модель, записана в цьому форматі, розбивається на тонкі шари в поперечному перерізі за допомогою спеціальної програми, причому товщина кожного шару дорівнює роздільній здатності обладнання. Побудова деталей відбувається пошарово доти, доки не буде отримано фізичний прототип.

Принципова схема всіх пристроїв прототипування однакова: на робочий стіл наноситься тонкий шар матеріалу, що відтворює перший переріз виробу, потім стіл або головка з матеріалом зміщується на один крок та наноситься наступний шар. Таким чином, шар за шаром відтворюється повний набір перерізів моделі, реалізуючи необхідну форму. Основною відмінністю між технологіями є матеріал і спосіб його нанесення. Зупинимося на найголовніших технологіях.

Стереолітографія є історично першим методом прототипування. Метод полягає в пошаровому затвердінні рідкого фотополімеру лазерним променем, який спрямовується системою сканування. Стіл знаходиться в ємності з рідким фотополімером. Маленький крок вертикального переміщення столу дозволяє отримувати достатньо гарну якість поверхні.

Після полімеризації виходить досить твердий, але крихкий напівпрозорий матеріал, схильний до жолоблення під впливом атмосферної вологи. Матеріал легко обробляється, склеюється та фарбується.

Головною перевагою стереолітографії можна вважати високу точність друку. Недоліком є висока вартість обладнання та витратного матеріалу.

Селективне лазерне спікання – це метод адитивного виробництва, який полягає у спіканні дрібнодисперсного порошкового матеріалу за допомогою лазера. Як робочий

матеріал використовуються порошковий пластик, метал чи кераміка. На поверхню наноситься тонкий шар порошку, який спікається лазерним променем, формуючи тверду масу, відповідну перерізу 3D-моделі.

Ця технологія може бути використана для виготовлення металевих деталей. Прототипи з пластмас мають гарні механічні властивості і можуть бути використані для створення повнофункціональних штучних виробів.

Ламінування листових матеріалів. Технологія полягає в послідовному склеюванні листового матеріалу (паперу, пластику, металевої фольги) з формуванням контуру кожного шару за допомогою лазерного різання. Контур шару вирізається лазером, а поверхня, яку потрібно видалити, ріжеться лазером на дрібні квадратики. Після вилучення створеної деталі дрібно нарізані надлишки матеріалу легко видаляються.

Структура одержаного прототипу «боїться» вологи. Особливістю технології є низька собівартість через загальнодоступність витратних матеріалів. Однак роздільна здатність друку поступається таким високоточним методам, як стереолітографія і селективне лазерне спікання.

Багатострумене моделювання. У цій технології головка, що містить від двох до десятків сопел, наносить модельний і підтримуючий матеріали на площину шару. Після нанесення шару можуть проводитись його фотополімеризація та механічне вирівнювання.

Як підтримуючий матеріал зазвичай використовується віск, а як модельний – широкий спектр матеріалів, дуже близьких за властивостями до конструкційних термопластів. Даний метод дозволяє отримувати прозорі та забарвлені прототипи з різними механічними властивостями – від еластичних, схожих на гуму, до твердих, схожих на пластик. Ця технологія, окрім високої якості одержуваних моделей, досить просто реалізується в невеликих габаритах, буквально у вигляді 3D-принтерів, доступних багатьом.

Моделювання методом пошарового наплавлення. Виріб виготовляється видавлюванням (екструзією) і нанесенням мікрокрапель розплавленого термопластика з формуванням послідовних шарів, що застигають відразу після екструдуювання.

Пластикову нитку розмотується з котушки і надходить у екструдер – пристрій, оснащений механічним приводом для подачі нитки, нагрівальним елементом для плавки матеріалу та соплом, через яке здійснюється безпосередньо екструзія. Нагрівальний елемент слугує для нагрівання сопла, яке зі свого боку плавить пластикову нитку і подає розплавлений матеріал на модель, що будується.

Технологія відрізняється високою гнучкістю, але має певні обмеження. Хоча створення структур, що нависають, можливе за невеликих кутів нахилу, у випадку з великими кутами необхідне використання штучних опор, які зазвичай створюються у процесі друку і відокремлюються від моделі після завершення процесу.

Як витратні матеріали доступні всілякі термопластики та композити, полікарбонати, поліаміди, полістирол, лігнін та багато інших.

4.3. Дигітайзери

Дигітайзер (графічний планшет) призначений для професійних графічних робіт. За допомогою спеціального програмного забезпечення він дозволяє перетворювати рух руки оператора на формат векторної графіки. Спочатку дигітайзер був розроблений для систем автоматизованого проєктування, тому що в цьому випадку необхідно визначати та задавати точне значення координат великої кількості точок. На відміну від маніпулятора «миша» дигітайзер здатний точно визначати та обробляти абсолютні координати.

До складу дигітайзера, крім самого планшета, на якому розташовують креслення, призначене для оцифрування, входить спеціальний покажчик – стилус.

За принципом події розрізняють п'ять видів дигітайзерів.

Акустичні дигітайзери. Це одні із історично перших дигітайзерів. Стилус генерує так звані «звукові іскри», які уловлюють мікрофони екрана. Таким чином пристрій визначає координати стилуса. Істотним недоліком роботи з дигітайзером є те, що введення інформації необхідно робити в абсолютній тиші, оскільки акустичні перешкоди можуть зіпсувати картинку.

Електромагнітні дигітайзери. Під поверхнею екрана проходить дротяна сітка, що випромінює слабкі електромагнітні сигнали. Стилус уловлює їх і таким чином відбувається фіксація його розташування.

Дигітайзери з пасивним стилусом. У таких дигітайзерах використовується той самий принцип електромагнітної індукції, тільки в цих пристроях дротяна сітка і передає сигнали, і приймає їх. Уведення інформації відбувається під час натискання стилусу та безконтактним шляхом. Стилус не потребує живлення.

Дигітайзери з активним стилусом. У цих пристроях генератор сигналів знаходиться у стилусі. Він випромінює електромагнітні хвилі, а планшет є приймачем. Відповідно, стилусу необхідне живлення.

Сенсорні дигітайзери. Під поверхнею планшета в сенсорних дигітайзерах знаходяться координатні дроти. Вони поділені тонким ізолятором. Під тиском на стилус змінюється провідність.

4.4. 3D-маніпулятори

3D-маніпулятори – пристрої, які забезпечують інтуїтивну навігацію у тривимірному просторі та можливість працювати обома руками: панорамування, зміна масштабу зображення та поворот виконуються одним плавним рухом, на відміну

від роботи із звичайним маніпулятором «миша», який дозволяє одночасно виконувати лише одну дію, що тягне в себе численні зупинки для позиціонування моделі. 3D-маніпулятор покликаний позбавити від стомлюючих перемикачів між маніпулятором «миша» та клавіатурою для позиціонування моделей або об'єктів на екрані у тривимірних програмах. Під час роботи обома руками управління виглядом здійснюється 3D-маніпулятором, а вказівка координат робочого курсору – маніпулятором «миша», що скорочує кількість перемикачів та прискорює роботу.

Маніпулятори можуть оснащуватися набором кнопок, що перепрограмуються. Це дозволяє миттєво викликати основні команди тих чи інших додатків. Деякі моделі мають невеликі вбудовані дисплеї.

4.5. 3D-сканери

3D-сканер – периферійний пристрій, що аналізує фізичний об'єкт і на основі отриманих даних створює його 3D-модель.

Існує два основні типи 3D-сканерів: контактні та безконтактні.

Контактні сканери побудовані за принципом обведення моделі спеціальним високочутливим щупом, за допомогою якого в комп'ютер передаються тривимірні координати моделі, що сканується. Перевагою контактних сканерів є простота сканування призматичних частин, незалежність від освітлення, точне визначення ребер. Однак контактне сканування вимагає значного часу, щуп повинен торкатися об'єкта сканування, що не завжди прийнятно, оскільки він може пошкодити або змінити форму об'єкта, що сканується. Тому більшого поширення набули безконтактні сканери.

Принцип роботи **безконтактного сканера** ґрунтується на проєктуванні лазерного променя на об'єкт сканування.

Усі спотворення сприймаються вимірювальною камерою, яка відстежує фізичне положення лазера. За сукупністю цих даних обчислюються координати точок на поверхні. Для прив'язки до об'єкта на нього в довільному порядку, на деякій відстані один від одного, наклеюються самоклеючі світловідбиваючі круглі маркери. Це дозволяє сканувати об'єкт загалом, з усіх боків як зсередини, так і ззовні. Отримані методом сканування 3D-моделі надалі можуть бути оброблені засобами САПР.

5. СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ЖИТТЄВИМ ЦИКЛОМ ВИРОБУ

5.1. Життєвий цикл виробу

Мета будь-якого підприємства – прибуток та ефективність бізнесу. Однією з характерних рис сучасного промислового виробництва є жорсткі вимоги до конкурентоспроможності продукції, що зазвичай вимагає швидких темпів розробки та запуску продукції у виробництво, та накладає високі вимоги на якість продукту, його відповідність ринку. Це стало можливим завдяки широкому впровадженню спочатку САПР, потім організації обміну даними між проєктними та виробничими системами і на сучасному етапі створенню систем, що повністю описують життєвий цикл виробу від концепції до опису технологічних процесів його виготовлення та експлуатації.

Життєвий цикл виробу – це сукупність процесів, що виконуються від моменту виявлення потреб суспільства в певній продукції до моменту задоволення цих потреб та утилізації продукту.

Життєвий цикл виробу – це всі етапи «життя» продукції. Він включає в себе етапи дизайнерського задуму, конструкторської та технологічної підготовки виробництва, виготовлення, обслуговування, утилізації тощо.

PLM (*англ.* product lifecycle management) – прикладне програмне забезпечення для управління життєвим циклом виробу.

Відповідно до загальноприйнятих правил установлюються такі види виробів: деталі, складальні одиниці (вузли), комплекси, комплекти, агрегати.

Виробом називається предмет чи набір предметів виробництва, що підлягають виготовленню на підприємстві. Виробом може бути машина, елемент машини і навіть окрема деталь, залежно від того, що є продуктом кінцевої стадії даного виробництва.

Деталь є виробом (або складовою виробу), який виготовлений з однорідного за найменуванням і маркою матеріалу без застосування складальних операцій (наприклад, валик, гвинт, корпус, зубчасте колесо). Деталь – це первинний складальний елемент кожної машини.

Складальною одиницею (вузлом) називається виріб, складові якого підлягають з'єднанню на підприємстві-виробнику складальними операціями, такими як: просте з'єднання деталей, з'єднання деталей їх запресуванням, згвинчування, зварювання, пайка, склеювання тощо (наприклад, верстат, редуктор, зварний корпус, коробка швидкостей, ротор турбіни, шпиндельний вузол).

Комплексом називається два і більше специфікованих виробів, які не з'єднані на підприємстві-виробнику складальними операціями, але призначені для виконання взаємопов'язаних експлуатаційних функцій (наприклад, автоматична лінія). До комплексу, крім виробів, що виконують основні функції, можуть входити деталі, складальні одиниці та комплекти, призначені для виконання допоміжних функцій, наприклад, деталі та складальні одиниці, призначені для монтажу комплексу на місці його експлуатації.

Комплект являє собою два і більше виробів, не з'єднаних на підприємстві-виробнику складальними операціями, і є набором виробів, що мають загальне експлуатаційне призначення допоміжного характеру (наприклад, комплекти запасних частин, інструментів, вимірювальної апаратури, пакувальної тари).

Агрегат – це складальна одиниця, що має повну взаємозамінність, можливість складання окремо від інших складових частин виробу (або виробу загалом) і здатність виконувати певну функцію у виробі або самостійно (наприклад, двигун).

5.2. Етапи життєвого циклу виробу

Життєвий цикл виробу включає в себе наступні етапи:

1. Маркетингові дослідження.
2. Проєктування продукту.
3. Планування.
4. Закупівля.
5. Виробництво чи обслуговування.
6. Перевірка.
7. Пакування та зберігання.
8. Продаж та розподіл.
9. Монтаж та налагодження.
10. Технічна підтримка та обслуговування.
11. Післяпродажна діяльність.
12. Утилізація та/або переробка.

Сукупність видів діяльності та функцій, необхідних для здійснення проєкту та виготовлення виробів, називається **виробничим циклом**. Поведінка цього циклу визначається замовниками виробів та потребами ринків збуту.

Виробничий цикл може активізуватися різними шляхами залежно від особливостей тієї чи іншої групи замовників-споживачів. В одних випадках функції проєктування виконує сам замовник, а виготовлення виробу – сторонні підприємства, в інших проєктування та виробництво виконує та сама організація. Однак як би це не відбувалося, виробничий цикл завжди починається з вироблення концепцій нового виробу (тобто виникнення певної ідеї). Спочатку концепція нового виробу опрацьовується, потім у деталях уточнюється, аналізується, удосконалюється і після

конструкторської розробки втілюється план створення нового виробу. Цей план супроводжується набором конструкторських креслень, що показують, як має виготовлятися виріб, і сукупністю технічних описів, специфікацій, що описують принципи функціонування виробу. Цим завершується діяльність із проектування.

Наступним видом діяльності стає виготовлення виробу, що починається зі складання плану, що визначає послідовність операцій, необхідних для створення виробу. Іноді можуть знадобитися нове обладнання, інструмент та оснащення.

На етапі складання графіка виробництва розробляється план, відповідно до якого підприємство фактично приймає зобов'язання випустити певну кількість виробів у конкретні терміни. Після того, як сформовані плани-графіки з усіх виробів, вони запускаються у виробництво і потім проходять через операції контролю якості та відвантаження замовнику.

Досягнення поставлених цілей на сучасних підприємствах, що випускають складні промислові вироби, виявляється неможливим без широкого використання автоматизованих систем, заснованих на застосуванні комп'ютерів і призначених для створення, переробки та використання всієї необхідної інформації про властивості виробів та супроводжуваних процесів. Специфіка задач, розв'язуваних на різних етапах життєвого циклу виробів, обумовлює різноманітність застосовуваних автоматизованих систем.

5.3. Інформація про виріб

Інформація про виріб – це набір даних, які породжуються та використовуються протягом усього життєвого циклу виробу. Ці дані включають у себе:

- інформацію про конфігурацію та структуру виробу;
- показники та властивості;

- організаційну інформацію (опис процесів, пов'язаних із зміною даних про виробі, необхідні ресурси – люди, матеріали тощо);
- інформацію про проведені контрольні випробування;
- документи, якими «обростає» виріб з моменту його проектування до його продажу та подальшого обслуговування.

Класифікація інформації про виріб наступна:

1. Конструкторські дані про виріб – це сукупність інформаційних об'єктів, що породжуються у процесі проектування виробу. Вони містять відомості про:

- склад виробу;
- геометричні моделі виробу;
- його компоненти та їх технічні характеристики;
- відносини компонентів у структурі виробу;
- результати розрахунків та моделювання;
- допуски на виготовлення деталей.

2. Технологічні дані про вироби – це сукупність інформаційних об'єктів, що породжуються на стадії технологічної підготовки виробництва та асоційовані з інформаційними об'єктами, що описують виріб та його компоненти. Вони містять наступні відомості:

- способи виготовлення та контролю виробу;
- опис маршрутних та операційних технологій;
- норми часу та витрати матеріалів;
- програми з управління для верстатів із ЧПУ;
- дані для проектування обладнання.

3. Виробничі дані про виріб містять відомості про статус конкретних екземплярів виробу та його компонентів у виробничому циклі.

4. Дані про якість виробу – це сукупність інформаційних об'єктів, що породжуються під час виконання всіх видів контролю. Вони містять відомості про ступінь відповідності виробу заданим технічним вимогам, технічним умовам, стандартам та іншому.

5. Експлуатаційні дані про виріб містять посібники з експлуатації, відомості для організації обслуговування, ремонту та інших дій, що забезпечують працездатність виробу.

Єдина інтегрована модель виробу містить усю інформацію про виріб (його властивості, знання про нього та його виробництво), необхідну на будь-якому з етапів життєвого циклу виробу. Вона також супроводжує виріб протягом усього його життєвого циклу від задуму до утилізації та/або переробки. Під час побудови кожного модуля моделі повинні використовуватися єдині засоби та методи побудови моделей. До того ж має забезпечуватися цілісність усієї моделі, що описує виріб.

5.4. Автоматизовані системи управління життєвим циклом виробу

Мета маркетингових досліджень – аналіз стану ринку, прогноз попиту на заплановані вироби та розвиток їх технічних характеристик, пошук схожого продукту та визначення сильних та слабких сторін конкурента. На даному етапі життєвого циклу знаходить застосування система управління взаємовідносинами із замовниками (*англ.* customer requirement management, CRM).

CRM – це система, на вхід якої надходять дані, пов'язані з клієнтами компанії, а на виході з'являється інформація, що впливає на поведінку компанії загалом або на поведінку її окремих елементів (аж до конкретного працівника компанії). CRM – це база даних з інформацією про клієнтів і набір додатків, які дозволяють, по-перше, збирати інформацію про клієнта, по-друге, її обробляти, по-третє, робити певні висновки на базі цієї інформації, експортувати її до інших програм або просто за потреби надавати цю інформацію у зручному вигляді. Ці моменти є ключовими функціями CRM-систем. Результатами роботи CRM-системи можуть

користуватися не тільки співробітники компанії, а й безпосередньо сам клієнт.

Прикладом використання може бути розробка дизайну нового продукту, який підходить за стилем до вже виконаних для даного замовника робіт, доступ до перегляду яких можна легко отримати за допомогою CRM-системи.

Функції навчання обслуговуючого персоналу покладено на інтерактивні електронні технічні посібники (*англ.* interactive electronic technical manuals, IETM). З їх допомогою виконуються діагностичні операції, пошук компонентів, що відмовили, замовлення додаткових запасних деталей і деякі інші операції на етапі експлуатації систем.

Проектування є одним з найважливіших етапів. Автоматизація проектування здійснюється САПР. У САПР прийнято виділяти системи конструкторського (CAD), функціонального (CAE) та технологічного проектування (CAM).

На цьому етапі формується об'ємна геометрична модель виробу або так звана майстер-модель, яка відіграватиме визначальну роль на багатьох наступних етапах. На цьому етапі виконуються різноманітні види інженерного аналізу. Для створення об'ємної моделі виробу конструктор може скористатися методами тривимірного твердотілого, поверхневого моделювання або поєднанням цих методів.

Більшість систем CAE використовують метод кінцевих елементів. Для проведення будь-якого виду аналізу зазвичай у CAD-системі, на основі точної геометричної моделі створюється розрахункова (спрощена) модель шляхом видалення тих конструктивних елементів, які не суттєво впливають на результати аналізу. Розрахункова модель передається до пакета аналізу за допомогою стандартних інтерфейсів. Окремі пакети аналізу мають внутрішні засоби побудови геометричної моделі, за допомогою яких можна розв'язати задачу моделювання простих форм.

Сучасні програмні засоби CAE дозволяють вирішувати широкий спектр завдань аналізу лінійної та нелінійної

статистики та динаміки, стійкості, теплопередачі, акустики, аеропружності, оптимізації конструкції та багато інших.

Призначення етапу підготовки виробництва зводиться до вирішення наступних основних завдань:

- розробки технологій виготовлення виробу, пресформ та штампів на основі їх геометричних моделей, отриманих на етапі проектування;
- підготовки програм для верстатів із ЧПУ за спроектованими технологіями;
- контролю якості роботи програм з управління для верстатів з ЧПУ.

Проектування технологічних процесів становить частину технологічної підготовки виробництва та виконується в системах САМ. У виробництві машинобудівних та частини приладобудівних виробів використовуються технології, в основі яких лежать різні фізичні процеси: механообробка, лиття металів і пластмас тощо.

Під час виконання різних видів механообробки використовується загальна база даних для підтримки зв'язку між геометричною моделлю оброблюваної деталі та програмою з управління для верстата з ЧПУ, де проходи інструменту створюються по геометрії моделі. Зміна геометрії відбиваються у програмі з управління. Траєкторія руху інструменту створюється інтерактивно по поверхні моделі виробу, забезпечуючи технологів можливістю візуально спостерігати на моніторі імітацію процесу видалення стружки, контролювати зарізи і швидко вносити зміни в цикли обробки.

Підготовка програм для всіх видів обладнання з ЧПУ виконується автоматично, коли вибрано верстат і вказаний тип процесора, установлений на даний верстат.

Для розв'язання проблем спільного функціонування компонентів САПР різного призначення, координації роботи систем САЕ/CAD/CAM, управління проєктними даними та проєктуванням розробляються системи, які отримали назву

систем управління проєктними даними (*англ.* product data management, PDM).

PDM або входять до складу модулів конкретної САПР, або мають самостійне значення і можуть працювати разом з різними САПР.

Головна мета PDM – підтримка електронного опису виробу на всіх стадіях його життєвого циклу. Ця підтримка має забезпечити вирішення наступних завдань:

1. Ведення проєктів (управління роботами, процедурами та документами у складі проєкту, контроль за виконанням проєкту).

2. Планування та диспетчування робіт.

3. Розподіл прав доступу до інформації між окремими учасниками проєкту або їх групами.

4. Організація та ведення розподілених архівів конструкторської, технологічної та управлінської документації (електронні архіви).

5. Управління змінами в документації (контроль версій документів, ведення протоколу роботи з документами, листів реєстрації змін та сповіщень).

6. Фіксування стандартних етапів проходження документів, контроль проходження документів за етапами.

7. Інтеграція з CAD/CAM-системами та їх додатками, що використовуються під час проєктування.

8. Контроль цілісності проєкту.

9. Пошук необхідної інформації у проєкті на підставі запитів.

На більшості етапів життєвого циклу, починаючи з визначення підприємств-постачальників матеріалів і компонентів та закінчуючи реалізацією продукції, потрібні послуги системи управління ланцюжками постачання (*англ.* supply chain management, SCM). Ланцюг поставок зазвичай визначають як сукупність стадій збільшення доданої вартості продукції під час її руху від компаній-постачальників до компаній-споживачів.

Управління ланцюгом поставок має на увазі просування матеріального потоку з мінімальними витратами.

Координація роботи багатьох підприємств-партнерів з використанням технологій «Intrenet» покладається на системи E-commerce, які називаються системами управління даними в інтегрованому інформаційному просторі (*англ. collaborative product commerce, CPC*).

Організована віддалена робота різних підприємств над одним продуктом утворює віртуальне підприємство.

Управління у промисловості, як і в будь-яких складних системах, має ієрархічну структуру. У загальній структурі управління виділяють кілька ієрархічних рівнів, показаних на рис. 5.1. Автоматизація управління на різних рівнях реалізується за допомогою автоматизованих систем управління (АСУ).

Інформаційна підтримка етапу виробництва здійснюється автоматизованими системами управління підприємством (АСУП) і автоматизованими системами управління технологічними процесами (АСУТП).



Рис. 5.1. Загальна структура управління у промисловості

До АСУП належать системи планування та управління підприємством (*англ.* enterprise resource planning, ERP), планування виробництва та вимог до матеріалів (*англ.* manufacturing requirement planning, MRP), а також згадані раніше системи SCM. Найбільш розвинені системи ERP виконують різні бізнес-функції, пов'язані з плануванням виробництва, закупівлею, збутом продукції, аналізом перспектив маркетингу, управлінням фінансами, персоналом, складським господарством, обліком основних фондів тощо. Системи MRP орієнтовані, головним чином, на бізнес-функції, безпосередньо пов'язані з виробництвом. У деяких випадках системи SCM та MRP входять як підсистеми в ERP. Останнім часом їх найчастіше розглядають як самостійні системи.

Проміжне положення між АСУП та АСУТП посідає виробнича виконавча система (*англ.* manufacturing execution systems, MES), призначена для вирішення оперативних завдань управління проєктуванням, виробництвом та маркетингом.

Для виконання диспетчерських функцій (збору та обробки даних про стан обладнання та технологічних процесів) та розробки ПЗ для вбудованого обладнання до складу АСУТП вводять систему збору даних та диспетчерського контролю (*англ.* supervisory control and data acquisition, SCADA).

Безпосереднє програмне управління технологічним обладнанням здійснюють за допомогою системи CNC (*англ.* computer numerical control) на базі контролерів (спеціалізованих промислових комп'ютерів), які вбудовані в технологічне обладнання з ЧПУ.

Поняття **єдиного інформаційного простору (ЄІП)** є ключовим поняттям CALS-технологій (детально будуть розглянуті пізніше). Споживач є повноправним учасником життєвого циклу виробу на етапі експлуатації виробу та йому необхідно забезпечити доступ до ЄІП. Однак використання для цих цілей PDM-системи недоцільно через її велику

вартість і значний термін упровадження та освоєння. Ураховуючи це, а також те, що споживачеві необхідні лише експлуатаційні дані про виріб, як засіб доступу до ЄІП, він використовуватиме не PDM-систему, а інтерактивні електронні технічні посібники IETM.

Інтерактивні електронні технічні посібники IETM також виконують функції навчання обслуговуючого персоналу. З їх допомогою виконуються діагностичні операції, пошук компонентів, що відмовили, замовлення додаткових запасних деталей і деякі інші операції на етапі експлуатації виробів.

Конкретизація завдань IETM представлена наступним списком:

- забезпечення користувача довідковим матеріалом про влаштування та принципи роботи виробу;
- навчання користувача правилам експлуатації, обслуговування та ремонту виробу;
- забезпечення користувача довідковими матеріалами, необхідними для експлуатації виробу, виконання регламентних робіт та ремонту виробу;
- забезпечення користувача інформацією про технологію виконання операцій з виробом, потреби в необхідних інструментах і матеріалах, про кількість і кваліфікацію персоналу;
- діагностика стану обладнання та пошук несправностей;
- підготовка та реалізація автоматизованого замовлення матеріалів та запасних частин;
- планування та облік проведення регламентних робіт;
- обмін даними між споживачем та постачальником.

Типовий склад IETM:

- опис функціонування виробу та його частин;
- правила експлуатації виробу, включаючи в себе обмеження, підготовку, використання;
- діагностика обладнання та пошук несправностей;
- регламент технічного обслуговування, планування та облік регламентних робіт;

- каталоги запасних частин, відомості;
- обмін інформацією із заводом-постачальником, автоматизоване замовлення матеріалів та запасних частин;
- пакування, транспортування, консервація, зберігання;
- утилізація.

Використання ІЕТМ дає такі переваги в порівнянні з традиційними паперовими технічними посібниками:

- скорочення на 20–25 % термінів освоєння нових виробів споживачем;
- в інтегрованому ІЕТМ організувати оновлення інформації набагато простіше, ніж у паперових посібниках;
- в ІЕТМ високого рівня вбудовується система діагностики несправностей.

5.5. Поняття PLM-технології

Під PLM розуміють систему управління життєвим циклом продукції, що реалізує технології управління даними в інформаційному просторі, єдиному для різних автоматизованих систем. Технології PLM поєднують методики та засоби інформаційної підтримки виробів протягом усіх етапів їх життєвого циклу. Характерна особливість PLM – забезпечення взаємодії як засобів автоматизації різних виробників, так і різних автоматизованих систем багатьох підприємств. Тобто технології PLM (включаючи в себе технології CPC) є основою, що поєднує інформаційний простір, у якому функціонують CAD, ERP, PDM, SCM, CRM та інші автоматизовані системи багатьох підприємств.

Загалом PLM – це сукупність програмних систем CAE/CAD/CAM/PDM та ERP/CRM/SCM, методики їх застосування, а головне – людей, які мають належну компетентність. Можна сказати, що це ціла філософія життя виробництва, яка спирається на ці програмні засоби. Переклад думок, ідей, досвіду співробітників підприємства в дійсні знання

підприємства у вигляді документів, схем, креслень тощо є важливим завданням в управлінні життєвим циклом виробу. Процес наповнення банку знань підприємства постійний та безперервний.

PLM – це стратегічний підхід до бізнесу, за якого застосовується набір інтелектуальних інструментальних засобів, що підтримують спільне створення, управління, зміну та використання даних про продукцію в рамках розширеної моделі підприємства (тобто моделі підприємства, що включає в себе, крім виробництва, залучення до роботи з даними про продукцію як контрагентів, так і кінцевих замовників продукції). Обмін даними здійснюється в рамках ЄІП (включаючи в себе єдині бізнес-процеси, бізнес-додатки та дані). До того ж PLM управляє даними, що знаходяться переважно в цифровому вигляді. Особливо підкреслюється, що PLM не є конкретною технологією або яким-небудь окремих програмним продуктом. Таким чином, мова йде про стратегічний підхід, для реалізації якого потрібно використовувати не одну, а кілька систем у рамках єдиного інтегрованого рішення (причому не виключено, що ці системи можуть бути від різних виробників).

Концепція PLM виникла в галузях, пов'язаних з розробкою та виробництвом складних технічних виробів (авіаційно-космічна галузь, оборонно-промисловий комплекс, точне машинобудування тощо). Тепер уже немає значення, що саме розуміється під словом «продукція» – верстат, корабель, літак, нафтопровід чи складна інформаційна система.

Задачі, розв'язувані PLM-системою в управлінні життєвим циклом виробу, наступні:

1. Життєвий цикл операційної складової (взаємодія та обмін даними між учасниками проекту).
2. Життєвий цикл виробництва (управління матеріальними ресурсами підприємства).
3. Життєвий цикл виробів (інтелектуальні ресурси підприємства).

Концепція PLM передбачає, що створюється єдина інформаційна база, що описує три основні компоненти: **Продукт–Процеси–Ресурси** та взаємозв'язки між ними. Наявність такої об'єднаної моделі забезпечує можливість швидко, ефективно ув'язувати всі ці три компоненти, оптимізуючи рішення під вимоги бізнесу. Робота всіх проєктантів, конструкторів, технологів з єдиною моделлю забезпечує зниження витрат на численні узгодження, неминучі під час традиційної технології роботи, і виключає наявність дублюючих або взаємовиключних документів. На практиці це дозволяє значно скоротити матеріальні витрати та витрати часу на створення продукту і запуск його у виробництво, минаючи численні проміжні варіанти, тобто отримати проєкт продукту, готового буквально з перших екземплярів до відправки споживачеві. Світова практика вже має приклади навіть у таких складних галузях, як, наприклад, авіабудування, коли перший зібраний літак нового проєкту після перевірочних випробувань було передано в реальну експлуатацію. Звичайно, такі ідеальні випадки все-таки рідкісні, але кількість випробувально-доводочних варіантів продукції в сучасній промисловості скоротилася кардинально. Існують цілі класи технічних об'єктів, у яких дослідні зразки просто неможливі (наприклад, цілий завод), і «натурні експерименти» на доведення їх функціонування до оптимального рівня надзвичайно дорогі.

5.6. Поняття CALS-технології

Безперервна інформаційна підтримка постачання та життєвого циклу виробу (*англ.* continuous acquisition and life cycle support, CALS) – сучасний підхід до проєктування та виробництва технологічної та наукомісткої продукції, що полягає у використанні комп'ютерної техніки та сучасних інформаційних технологій на всіх стадіях життєвого циклу.

Спочатку CALS створювалася як сукупність методів і засобів вирішення логістичних завдань та абревіатура CALS розшифровувалась як «Computer Aided Logistics Systems». Надалі сфера застосування CALS розширилася та охопила всі сторони інформаційної підтримки промислових виробів, включаючи проектування, управління підприємствами та технологічними процесами. Відповідно CALS отримала нову інтерпретацію і почала розглядатися як «Continuous Acquisition and Life cycle Support».

Існує та використовується кілька тлумачень поняття «CALS».

У широкому значенні слова «CALS» – це методологія створення ЄП промислової продукції, що забезпечує взаємодію всіх промислових автоматизованих систем. У цьому сенсі предметом CALS є методи та засоби як взаємодії різних автоматизованих систем та їх підсистем, так і самі автоматизовані системи з урахуванням усіх видів їх забезпечення. Практично синонімом «CALS» у цьому сенсі стає термін «PLM», який останнім часом широко використовується провідними виробниками автоматизованих систем.

У вузькому значенні слова «CALS» – це технологія інтеграції різних автоматизованих систем зі своїми (лінгвістичним, інформаційним, програмним, математичним, методичним, технічним та організаційним) видами забезпечення.

За рахунок безперервної інформаційної підтримки забезпечуються однакові способи управління процесами та взаємодії всіх учасників цього циклу: замовників продукції, постачальників, виробників продукції, експлуатаційного та ремонтного персоналу. Інформаційна підтримка реалізується відповідно до вимог системи міжнародних стандартів, які регламентують правила зазначеної взаємодії переважно за допомогою електронного обміну даними.

Стратегія CALS поєднує в собі такі основні принципи:

- застосування сучасних інформаційних технологій (електронний обмін даними, розраховані на багато

користувачів, бази даних, розподілені системи підтримки прийняття рішень, віртуальне підприємство);

- єдність подання та інтерпретації даних у процесах інформаційного обміну між автоматизованими системами та їх підсистемами, що зумовлює розробку онтологій додатків і відповідних мов подання даних;

- доступність інформації для всіх учасників життєвого циклу виробів у будь-який час та в будь-якому місці, що обумовлює застосування сучасних телекомунікаційних технологій;

- інжиніринг та реінжиніринг бізнес-процесів;

- підтримка процедур суміщеного (паралельного) проектування виробів;

- уніфікація та стандартизація засобів спільного використання автоматизованих систем та електронного обміну даними;

- інтеграція освіти та виробництва, підготовки та перепідготовки фахівців, зв'язок ефективності виробництва з якістю підготовки та перепідготовки фахівців.

Метою реалізації CALS-стратегії є якісне підвищення ефективності діяльності за рахунок прискорення процесів дослідження, розробки та модернізації продукції.

Застосування CALS-технологій дозволяє істотно скоротити обсяги проектних робіт, оскільки описи багатьох складових частин устаткування, машин і систем, що раніше проектувалися, зберігаються в уніфікованих форматах даних на мережевих серверах, доступних будь-якому користувачеві технологій CALS.

Істотно полегшується розв'язання проблем ремонтпридатності, інтеграції продукції до різного роду системи, адаптації до змінних умов експлуатації тощо. Успіх на ринку складної технічної продукції неможливий поза технологією CALS.

Суть концепції CALS полягає в організації єдиного інформаційного простору (інтегрованого інформаційного

середовища), що поєднує автоматизовані системи, призначені як для ефективного вирішення завдань інженерної діяльності, так і для планування та управління виробництвом і ресурсами підприємства. У єдиний процес залучається безліч проєктуючих та машинобудівних підприємств з віддаленим доступом до інформації, прямою передачею інформації від комп'ютера до машинобудівного устаткування тощо.

Інтегроване інформаційне середовище є сукупністю розподілених баз даних, у якій діють єдині, стандартні правила зберігання, оновлення, пошуку та передачі інформації, через яку здійснюється безпаперова інформаційна взаємодія між усіма учасниками життєвого циклу виробу. До того ж створена інформація зберігається в інтегрованому інформаційному середовищі, не дублюється, не вимагає будь-яких перекодувань у процесі обміну, зберігає актуальність і цілісність.

Цілісність даних підтримується у процесі управління конфігурацією проєкту, а також тим, що не можна одночасно змінювати той самий об'єкт різними розробниками (кожен з них повинен працювати зі своєю робочою версією). Інакше кажучи, необхідно забезпечення синхронізації зміни даних, використовуваних багатьма користувачами. Для цього виконується авторизація користувачів та розробляються засоби ведення багатьох версій проєкту. По-перше, користувачі поділяються на класи (адміністрація системи, керівництво проєктом та частинами проєкту, групи виконавців-проєктувальників) і для кожного класу вводяться певні обмеження, пов'язані з доступом до даних; по-друге, доступ регламентується за типами даних. Даним можуть надаватися різні значення статусу, наприклад, «правильно», «необхідна переробка», «затверджено як остаточне рішення» тощо.

Концепція CALS реалізується у вигляді відповідних CALS-технологій і визначає набір правил, регламентів, стандартів, взаємодії учасників процесів проєктування, виробництва, випробувань тощо.

Призначення CALS-технологій – забезпечувати надання необхідної інформації в потрібний час, у потрібному вигляді, у конкретному місці будь-якому з учасників життєвого циклу промислових виробів.

Розвиток CALS-технологій має привести до появи так званих віртуальних виробництв, у яких процес створення специфікацій з інформацією, достатньої для виготовлення виробу, може бути розподілений у часі та просторі між багатьма організаційно-автономними проєктними організаціями. Серед безперечних досягнень CALS-технологій слід зазначити легкість розповсюдження передових проєктних рішень, можливість багаторазового відтворення частин проєкту у нових розробках та інше.

5.7. Стандарти інформаційної підтримки життєвого циклу виробу

Стандарти є основним компонентом технології CALS. Стандарти CALS є набором стандартів, що описують правила електронного представлення даних про вироби, процеси, середовище і правила обміну цими даними.

Умовно нормативні документи в області CALS можна поділити на три основні групи:

- стандарти, що описують загальні принципи електронного обміну даними, що визначають організаційно-технічні аспекти електронної взаємодії;
- стандарти, що регламентують технології забезпечення безпеки даних, зокрема їх шифрування в процесі обміну, застосування електронного цифрового підпису для підтвердження їх достовірності тощо;
- технічні стандарти, що визначають формати і моделі даних, технології подання даних, способи доступу та використання даних, що описують вироби, процеси та середовище, у якому протікає життєвий цикл виробу.

Напрями стандартизації в CALS:

- застосування для вирішення завдань CALS уже існуючих стандартів;

- розробка принципово нових стандартів.

Класифікація стандартів за місцем розробки:

- національні стандарти;
- стандарти Міжнародної організації зі стандартизації (ISO);
- військові стандарти та специфікації НАТО;
- стандарти Міністерства оборони США;
- стандарти Міністерства оборони Великої Британії;
- федеральні стандарти США;
- міжнародні специфікації Європейського авіаційного консорціуму (AECMA).

Стандартом подання інформації про продукт є ISO/IEC 10303 Standard for Exchange Product Model Data (STEP). Цей стандарт (один з перших у сімействі спеціалізованих CALS-стандартів) є прикладом інформаційного стандарту нового покоління, на основі якого будуються наступні CALS-стандарти. STEP визначає «нейтральний» формат подання даних про виріб у вигляді інформаційної моделі.

Дані про продукт включають у себе:

- склад та конфігурацію виробу;
- геометричні моделі різних типів;
- адміністративні дані;
- спеціальні дані.

Для забезпечення можливості одноманітного опису виробів у різних прикладних галузях передбачається, що інформаційні моделі (у термінах стандарту «прикладні протоколи» або «протоколи застосування») створюються на базі типових блоків («інтегрованих ресурсів»), до того ж для опису схем даних використовується спеціально введена мова Express.

Стандарт ISO 13584 Industrial Automation – Parts Library (PLIB) регламентує:

- засоби опису та технологію подання інформації про компоненти та комплектуючі;
- технологію обробки даних, у тому числі зберігання, передачі, доступу, зміни та архівування;
- на відміну від стандарту ISO 10303, призначеного для опису конкретного екземпляра продукції, стандарт ISO 13584 дозволяє описувати класи продукції (компонентів та комплектуючих);
- стандартні деталі, визначені міжнародними або національними стандартами, наприклад, кріпильні деталі, ущільнення, підшипники;
- бібліотеки (бази) даних, що містять дані про деталі конкретного постачальника.

Подання текстової та графічної інформації регламентується наступними стандартами:

- ISO/IEC 10179 Document Style Semantics and Specification Language (DSSSL);
- ISO/IEC IS 10744 Information Technology – Hypermedia / Time Based Document Structuring Language (HyTime);
- ISO/IEC 8632 Information Processing Systems – Computer Graphics – Metafile;
- ISO/IEC 10918 Coding of Digital Continuous Tone Still Picture Images (JPEG);
- ISO 11172 MPEG2 Motion Picture Experts Group (MPEG) Coding of Motion Pictures and associated Audio for Digital Storage Media;
- ISO/IECS 13522 Information Technology – Coding of Multimedia and Hypermedia Information (MHEG);
- ISO 8879 Information Processing – Text and Office System – Standard Generalised Markup Language (SGML).

Зараз розроблено і вважається перспективним сімейство нових форматів для створення інформаційного інтегрального середовища, що підтримує всі етапи життєвого циклу виробу – PLCS (Product Life Cycle Support).

5.8. Технології інформаційної підтримки життєвого циклу виробу

Основний зміст концепції CALS становлять інваріантні поняття, які реалізуються (повністю або частково) протягом життєвого циклу виробу.

Ці інваріантні поняття умовно поділяються на три групи:

- базові принципи технології CALS;
- базові управлінські технології;
- базові технології управління даними.

До перших відносяться:

- системна інформаційна підтримка життєвого циклу виробу на основі використання інтегрованого інформаційного середовища, що забезпечує мінімізацію витрат під час життєвого циклу;

- інформаційна інтеграція за рахунок стандартизації інформаційного опису об'єктів управління;

- розподіл програм та даних на основі стандартизації структур даних та інтерфейсів доступу до них, орієнтація на готові комерційні програмно-технічні рішення (*англ.* commercial of the shelf, COTS), що відповідають вимогам стандартів;

- безпаперове подання інформації, використання електронного цифрового підпису;

- паралельний інжиніринг (*англ.* concurrent engineering);

- безперервне вдосконалення бізнес-процесів (*англ.* business processes reengineering).

До других відносяться технології управління процесами, інваріантні по відношенню до об'єкта (продукції):

- управління проектами та завданнями (*англ.* project management / workflow management);

- управління ресурсами (*англ.* manufacturing resource planning);

- управління якістю (*англ.* quality management);

– інтегрована логістична підтримка (*англ.* integrated logistic support).

До третіх відносяться технології управління даними про вироб, процеси, ресурси та середовище.

Системна інформаційна підтримка та супровід життєвого циклу виробу здійснюється в інтегрованому інформаційному середовищі, яке можна визначити як сукупність розподілених баз даних, що містять відомості про вироби, виробниче середовище, ресурси та процеси підприємства, що забезпечує коректність, актуальність, збереження та доступність даних тим суб'єктам виробничо-господарської діяльності, що беруть участь у здійсненні життєвого циклу виробу. Усі відомості (дані) в інтегрованому інформаційному середовищі зберігаються у вигляді інформаційних об'єктів.

Інтегроване інформаційне середовище, відповідно до концепції CALS, є модульною системою, у якій реалізуються наступні базові принципи CALS:

- прикладні програмні засоби відокремлені від даних;
- структури даних та інтерфейс доступу до них стандартизовані;
- дані про вироб, процеси та ресурси не дублюються, кількість помилок у них мінімізується, забезпечується повнота та цілісність інформації;
- прикладні засоби роботи з даними являють собою зазвичай типові комерційні рішення різних виробників, що забезпечує можливість подальшого розвитку інтегрованого інформаційного середовища.

Усі процеси інформаційного обміну за допомогою інтегрованого інформаційного середовища мають своєю кінцевою метою максимально можливе виключення з ділової практики традиційних паперових документів та перехід до прямого безпаперового обміну даними. Переваги та техніко-економічна ефективність такого переходу очевидні. Тим не менш, на перехідному періоді потрібно забезпечити співіснування

та спільне використання як паперової, так і електронної форми подання інформації.

Чинні стандарти, що регламентують конструкторсько-технологічну діяльність, стосуються лише візуальної форми подання інформації. Тому одним із першочергових практичних завдань упровадження CALS є розвиток чинних стандартів та вироблення нових стандартів і специфікацій, що регламентують електронну форму подання та обігу даних.

Ключовим питанням використання інформації в електронній формі є питання її авторизації, яке вирішується за допомогою електронного цифрового підпису. Процедура електронного цифрового підпису ґрунтується на математичних принципах, так званих «систем з відкритим ключем».

Для формування електронного цифрового підпису використовується індивідуальне число, так званий «закритий ключ» користувача, який породжується за допомогою генератора випадкових чисел і зберігається користувачем у секреті весь час його дії.

Для перевірки автентичності електронного цифрового підпису застосовується інше число, так званий «відкритий ключ перевірки електронного цифрового підпису» (або коротко – «відкритий ключ»), який за відомим алгоритмом обчислюється з індивідуального закритого ключа і надається всім, кому це необхідно для автентифікації електронного цифрового підпису.

Принцип паралельного інжинірингу передбачає виконання процесів розробки та проектування одночасно з моделюванням процесів виготовлення та експлуатації. Сюди відноситься одночасне проектування різних компонентів складного виробу.

Під час паралельного інжинірингу багато проблем, які можуть виникнути на більш пізніх стадіях життєвого циклу виробу, виявляються та вирішуються на стадії проектування. Такий підхід дозволяє покращити якість виробу, скоротити час його виведення на ринку, скоротити витрати.

Відмінністю паралельного інжинірингу від традиційного підходу до організації процесів інженерної діяльності є наступне:

- ліквідація традиційних бар'єрів між функціями окремих фахівців та організацій шляхом створення, а за потреби і подальшого перетворення, багатoproфільних робочих груп, у тому числі територіально розподілених;
- ітеративність процесу наближення до необхідного результату.

Багатoproфільні робочі групи, як випливає з їхньої назви, включають у себе фахівців різного профілю та створюються для вирішення конкретних завдань. Наприклад, представники експлуатанта, генерального розробника й постачальника комплектуючих виробів, тобто фахівці з різних організацій, можуть бути зібрані в одну багатoproфільну робочу групу для розв'язання проблеми, що виникає у процесі експлуатації.

Паралельний інжиніринг передбачає заміну традиційного послідовного підходу комплексом операцій, що перекриваються в часі, спрямованих на систематичне поліпшення розроблюваного рішення аж до досягнення необхідного результату.

Початкове розуміння завдання веде до першої версії документованих вимог, з урахуванням яких розробляється початкове проєктне рішення. Воно породжує нові питання та дозволяє уточнити постановку завдання. Оскільки жорстка вимога завершити поточну фазу роботи перед початком наступної відсутня, послідовне проєктування замінюється «роботою по спіралі».

Ефективна реалізація такого підходу неможлива поза інтегрованого інформаційного середовища. Можливість застосування принципів паралельного інжинірингу виникає тому, що в інтегрованому інформаційному середовищі всі результати роботи представлені в електронному вигляді, актуальні, доступні всім учасникам і легко можуть бути скориговані.

Концепція CALS передбачає послідовну, безперервну зміну та вдосконалення бізнес-процесів розробки, проєктування, виробництва та експлуатації виробу. Для цього використовується набір різноманітних методів, у тому числі:

- реінжиніринг бізнес-процесів (*англ.* business process reengineering) – фундаментальне переосмислення та радикальне перепроєктування бізнес-процесів підприємств для досягнення різких, стрибкоподібних покращень в основних актуальних показниках їх діяльності: вартості, якості, послуг та темпів;

- бенчмаркінг (*англ.* benchmarking) – порівняльна оцінка конкурентоспроможності;

- безперервне покращення процесів (*англ.* continuous process improvement).

Побудові інтегрованої системи інформаційної підтримки життєвого циклу виробу мають передувати:

- аналіз існуючої ситуації;
- розробка комплексу функціональних моделей бізнес-процесів, що описують поточний стан середовища, у якому реалізується життєвий цикл виробу;

- вироблення та зіставлення можливих альтернатив удосконалення як окремих бізнес-процесів, так і системи загалом.

Результатами аналізу є наступне:

- функціональні моделі бізнес-процесів життєвого циклу виробу «як є зараз»;

- функціональні моделі альтернативних варіантів удосконалення бізнес-процесів життєвого циклу виробу «як має бути»;

- оцінка витрат і ризиків для кожного варіанта;
- вибір кращого варіанта на основі виваженого критерію мінімуму витрат та ризиків;

- опис технічної архітектури інтегрованого інформаційного середовища для обраного варіанта;

- оцінка технічних характеристик інтегрованого інформаційного середовища для обраного варіанта;

– план дій щодо реалізації обраного варіанта вдосконалення бізнес-процесів життєвого циклу виробу та інтегрованого інформаційного середовища.

Загальна методика зміни бізнес-процесів у зв'язку із впровадженням CALS-технологій на підприємстві включає в себе наступні етапи:

- мотивація необхідності змін;
- розробка плану змін та його затвердження керівництвом;
- створення організаційної структури (робочої групи CALS), яка реалізовуватиме розроблений план;
- навчання членів групи CALS та іншого персоналу, причетного до проведення змін;
- визначення проміжних (тактичних) цілей та способів оцінки результатів (визначення метрик);
- розробка робочих планів для всіх учасників групи CALS;
- створення тимчасових багатофункціональних робочих груп для вирішення тактичних завдань;
- реалізація планів;
- оцінка досягнутих результатів.

У сучасній літературі та практиці проектом прийнято називати сукупність дій, спрямованих на досягнення поставленої виробничої чи комерційної мети та пов'язаних з використанням та витратою ресурсів різного типу. Прикладом проекту є виконання контракту на постачання виробу, що передбачає виконання цілої низки завдань. Іншим прикладом проекту може бути розв'язання окремої складної задачі, такої як розробка комплексу документації або введення виробу в експлуатацію.

Технологія управління проектами не залежить від змісту проектів, що дозволяє розглядати її як базову (інваріантну) технологію.

Термін «Project Management» (PM) позначає клас управлінських завдань, пов'язаних з плануванням, організацією та

управлінням діями, спрямованими на досягнення поставленої мети за заданих обмежень на використання ресурсів.

Типовими завданнями РМ є наступні:

- розробка планів виконання проєкту, у тому числі розробка структурної декомпозиції робіт проєкту та мережевих графіків;
- розрахунок та оптимізація календарних планів з урахуванням обмежень на ресурси;
- розробка графіків потреби проєкту в ресурсах;
- відстеження ходу виконання робіт та порівняння поточного стану з вихідним планом;
- формування управлінських рішень, пов'язаних із впливом на процес або з коригуванням планів;
- формування різних звітних документів.

Дії, що приводять до виконання проєкту, та потреба в яких виявляється в ході його планування, можуть бути типовими бізнес-процесами (закупівля комплектуючих, розробка документації, виробництво тощо). Такі бізнес-процеси часто виконуються за наперед визначеними формальними схемами (моделями), що фактично визначають технологію їх виконання. У ході виконання проєкту виконавці (організації або співробітники), діючи відповідно до заданої технології (моделлю процесу), отримують і виконують завдання, що відповідають структурним елементам бізнес-процесу (операціям).

Поняття MRP та ERP на даний час є загальноприйнятим описом комплексу завдань управління фінансово-господарською діяльністю підприємства. Автоматизовані системи, побудовані на цих принципах, широко застосовуються як у виробництві, так і для управління проєктної діяльністю (конструкторські бюро), комерцією, експлуатацією складної техніки (авіакомпанії). Це дозволяє розглядати принципи та стандарти MRP та ERP як базову технологію управління ресурсами під час вирішення різних завдань.

Забезпечення необхідної якості продукції є однією з цілей реалізації концепції CALS, тому систему управління якістю слід віднести до базових технологій управління.

Управління якістю необхідно розуміти як управління процесами, спрямоване на забезпечення якості їх результатів. Такий підхід відповідає ідеям загального управління якістю, суть яких і полягає в управлінні підприємством через управління якістю.

У контексті концепції CALS методи та технології управління якістю набувають нового розвитку. Застосування інтегрованого інформаційного середовища забезпечує інформаційну підтримку та інтеграцію процесів, а, відповідно, і можливість використання електронних даних, створених у ході різних процесів підприємства, для завдань управління якістю.

Розробка та підготовка виробництва складної, технологічної продукції – груповий процес, до якого залучені десятки та сотні фахівців підприємства або навіть групи підприємств. У процесі розробки виробу виникає низка проблем, що впливають на загальний успіх. Це насамперед відсутність можливості бачити ключові ресурси, залучені в процес розробки, в їх фактичному стані на даний момент часу. Це також організація спільної роботи колективу фахівців із залученням компаній, що постачають будь-які компоненти для виробу, що розробляється.

Істотно скоротити терміни підготовки виробництва можна лише одним способом – за рахунок паралельного виконання робіт та тісної взаємодії всіх учасників процесу. Це завдання можна вирішити за рахунок створення єдиного інформаційного простору підприємства, тобто єдиного простору цифрових даних про корпоративну продукцію.

5.9. Переваги застосування CALS-технологій

Існує низка основних аспектів, що визначають ефективність застосування CALS-технологій:

1. Централізоване, масштабоване місце зберігання інформації.

2. Гнучкий, масштабований цифровий інформаційний простір підприємства, не зав'язаний на географічне розташування співробітників.

3. Можливість поєднати дані від різноманітного програмного забезпечення, що використовується на підприємстві.

4. Багаторазове повторне використання вже наявних напрацювань під час розробки виробу.

5. Управління доступом до даних.

6. Високоєфективні засоби представлення інформації у візуальному вигляді.

7. Розвинені засоби документообігу та протоколювання.

8. У разі використання механізму електронного цифрового підпису або його аналога можлива безпаперова технологія роботи.

9. Тісна інтеграція з офісними пакетами програм.

10. Інтеграція з науковим програмним забезпеченням.

11. Інтеграція з розрахунковими системами, можливість управління ходом розрахунків безпосередньо із середовища PDM-системи.

12. Безпосередня участь в обміні актуальною інформацією не лише технічного персоналу, а й менеджерів середньої ланки та верхнього рівня.

13. Взаємодія з постачальниками комплектуючих у єдиному інформаційному просторі підприємства.

Застосування CALS-технологій дозволяє підприємству отримати такі вигоди:

– скорочення витрат та трудомісткості процесів технічної підготовки та освоєння виробництва нових виробів;

- скорочення календарних термінів виведення нових конкурентоспроможних виробів на ринок;
- скорочення частки браку та витрат, пов'язаних із внесенням змін до конструкції;
- збільшення обсягів продажу виробів з електронною технічною документацією (зокрема, експлуатаційною), відповідно до вимог міжнародних стандартів;
- скорочення витрат на експлуатацію, обслуговування та ремонти виробів, які для складної наукомісткої продукції іноді рівні або перевищують витрати на її закупівлю.

5.10. Створення типових АРМ на підприємстві

З погляду життєвого циклу виробу науково-технічну діяльність підприємства можна поділити на традиційні етапи чи напрями: конструкторська та технологічна підготовка виробництва, нормування, планування виробництва та виробництво. Відповідно до цих напрямів раніше розглядалися і засоби автоматизації: САПР конструктора, САПР технолога, АРМ нормувальника і так далі. Однак сучасний рівень розвитку САПР та технічної підготовки виробництва дає змогу поглянути на цю проблему по-новому.

Основне завдання будь-якого підприємства – якнайшвидший випуск якісної та затребуваної продукції, тому в основу його науково-технічної діяльності лягає саме виробництво.

Виходячи з цього принципу, можна виділити лише два етапи науково-технічної діяльності підприємства:

1. Підготовка виробництва та накопичення даних про нього.
2. Використання накопиченої інформації для планування, управління та контролю за ходом виробництва.

Підрозділи, задіяні на цих етапах, повинні об'єднуватись єдиним інформаційним простором, який забезпечить узгодженість дій та оперативне внесення змін як у конструкцію та склад, так і в технологію виготовлення виробу або у виробничий план.

На першому етапі в рамках єдиного інформаційного простору забезпечується формування дизайну та складу виробу (розробка тривимірної моделі, оформлення робочої документації, конструкторських специфікацій та відомостей), описуються можливі способи його виготовлення (варіанти технологічних маршрутів, способи формоутворення тощо) та необхідні для виробництва ресурси (трудомісткість виготовлення, необхідні інструменти, матеріали, комплектуючі). Іншими словами, створюється опис того, що саме вироблятиме підприємство, як і за допомогою чого.

Другий етап – це виконання програми. На жаль, він не завжди суворо і повністю відповідає їй, так як відсутність необхідних матеріалів, технологічні та конструктивні особливості виробництва і продукції вимагають внесення оперативних змін уже в ході виробництва. На цьому ж етапі формується статистична інформація, яка надалі слугує вихідним матеріалом для аналізу та внесення змін до виробничих планів, технологій і конструкцій.

Тому після проведення реінжинірингу, тобто реорганізації всієї бізнес-діяльності на підприємстві (аналізу всіх бізнес-процесів на підприємстві та створення бізнес-моделі «ЯК Є»), з подальшою оптимізацією всіх процесів на підприємстві та створенням бізнес-моделі «ЯК БУДЕ»), ухвалюється рішення про початок проведення комплексної автоматизації підприємства.

Насамперед на початку проведення комплексної автоматизації підприємства створюються типові АРМ для кожної категорії фахівців, які працюють на підприємстві.

АРМ – це робоче місце фахівця у предметній галузі, обладнане комп'ютером і спеціальним програмним забезпеченням, що допомагає вирішувати завдання в рамках діяльності цього фахівця, або іншими словами – це програмно-технічний комплекс, призначений для автоматизації діяльності певного виду (наприклад, АРМ бухгалтера, АРМ конструктора, АРМ технолога тощо).

Принципи створення будь-яких АРМ мають бути такими:

Системність. Відповідно до принципу системності, АРМ слід розглядати як системи, структура яких визначається функціональним призначенням.

Гнучкість. Цей принцип означає пристосованість системи до можливих перебудов, завдяки модульності побудови всіх підсистем та стандартизації їх елементів.

Стійкість. Цей принцип полягає в тому, що система АРМ повинна виконувати основні функції незалежно від впливу на неї внутрішніх та зовнішніх факторів. Це означає, що неполадки в окремих її частинах повинні легко усуватися, а працездатність системи швидко відновлюватися.

Ефективність. Відповідно до цього принципу, ефективність використання АРМ слід розглядати як інтегральний показник усіх рівнів реалізації наведених вище принципів, стосовно витрат на створення та експлуатацію системи.

Функціонування АРМ може дати бажаний ефект за умови правильного розподілу функцій та навантаження між людиною та машинними засобами обробки інформації.

Створення такого «гібридного інтелекту» нині є проблемою. Однак реалізація цього підходу під час розробки та функціонування АРМ може принести відчутні результати – АРМ стане засобом підвищення не лише продуктивності праці та ефективності управління, а й соціальної комфортності фахівців. До того ж людина в системі АРМ має залишатися провідною ланкою.

Система АРМ, яка є людиною–машиною, має бути відкритою, гнучкою, пристосованою до постійного розвитку та вдосконалення. У такій системі мають бути забезпечені:

- максимальна наближеність фахівців до машинних засобів обробки інформації;
- робота в діалоговому режимі;
- оснащення АРМ відповідно до вимог ергономіки;
- висока продуктивність комп'ютера;

- максимальна автоматизація рутинних процесів;
- моральна задоволеність фахівців умовами праці, що стимулює їхню творчу активність, зокрема, у подальшому розвитку системи;
- можливість самонавчання фахівців.

Задачі, які розв'язуються на АРМ, можна умовно поділити на такі:

Інформаційні. До таких задач належать кодування, класифікація, збір, структурна організація, коригування, зберігання, пошук та видача інформації. Часто інформаційні задачі включають у себе нескладні обчислювальні та логічні процедури арифметичного і текстового характеру. Інформаційні задачі є зазвичай найбільш трудомісткими та займають більшу частину робочого часу фахівців.

Обчислювальні. Ці задачі бувають як формалізовані, так і не повністю формалізовані. Формалізовані задачі розв'язуються на базі формальних алгоритмів і поділяються на дві групи: задачі прямого розрахунку та задачі на основі математичних моделей. Задачі прямого розрахунку розв'язуються за допомогою найпростіших алгоритмів. Для складніших задач потрібно застосовувати різні математичні моделі.

Останнім часом значна увага приділяється розробці способів розв'язання не повністю формалізованих задач, які називають **семантичними**. Такі задачі виникають дуже часто в ході оперативного управління економічними об'єктами, особливо під час ухвалення рішень в умовах неповної інформації.

АРМ – це робоче місце користувача-фахівця тієї чи іншої професії, обладнане засобами, необхідними для автоматизації виконання ним певних функцій, тому структура будь-якого типового АРМ являє собою програмно-апаратний комплекс.

До того ж першорядну роль у цьому комплексі відіграє програмна складова, яка висуватиме певні вимоги щодо технічних характеристик апаратної складової комплексу.

Програмне забезпечення складається із системного програмного та прикладного забезпечення.

Основою системного забезпечення є операційна система. Системні програми забезпечують раціональну технологію обробки інформації. Так звані сервісні програми, якими АРМ комплектується залежно від потреби, розширюють можливості операційної системи.

Прикладне програмне забезпечення становлять програми користувачів та пакети прикладних програм різного призначення. Стандартні програми користувачів є програмними рішеннями певних задач. Майже все прикладне програмне забезпечення виконано за модульним принципом і орієнтоване на розв'язання певного класу задач. Прикладне програмне забезпечення є основним видом програмного забезпечення користувача. Воно зазвичай дозволяє автоматизувати діяльність певного фахівця.

Прикладами прикладного програмного забезпечення є:

- програми для формування різних документів з виконанням розрахункових операцій;
- програми виконання бухгалтерських задач;
- програми для створення автоматизованих інформаційних систем, які можуть мати різне призначення: довідкові, документальні, для обробки таблиць, ведення масивів інформації, створення та ведення баз даних;
- графічні САД-системи;
- розрахункові САЕ-системи;
- багато інших програм.

Технічне забезпечення є комплексом технічних апаратних засобів, основою якого є професійний персональний комп'ютер, що передбачає роботу фахівця без посередників (програмістів, операторів). У групових АРМ таким комп'ютером можуть скористатися кілька людей. До комплексу технічних засобів слід віднести і засоби комунікації.

6. АВТОМАТИЗОВАНЕ ПРОЄКТУВАННЯ РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ АПАРАТУРИ

6.1. Рівні та задачі конструкторського проєктування радіоелектронної апаратури

Конструкції радіоелектронної апаратури (РЕА) зазвичай мають ієрархічну структуру, у якій конструктиви нижчого рівня об'єднуються в конструктиви вищого рівня (рис. 6.1).

Компонент – неподільна частина мікросхеми, яку не можна специфікувати та постачати як окремий виріб (транзисторна, резисторна, діодна область тощо).

Елемент – специфікований конструктив, що перевіряється за своїми технічними умовами та постачається як окремий виріб (транзистор, резистор, мікросхема тощо).

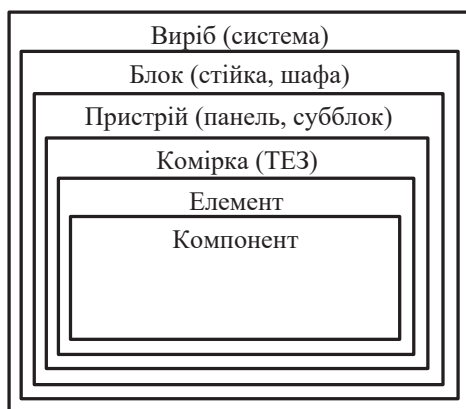


Рис. 6.1. Ієрархія конструкцій РЕА

Комірка, типовий елемент заміни (ТЕЗ) – об’єднання елементів у єдиному конструктивному виконанні на основі друкованої плати.

Наступні ієрархічні рівні займають конструктиви, які називаються **пристроями (панелями, субблоками) і блоками (стійками, шафами)**.

Кожен з конструктивів наступного рівня складається з кількох конструктивів попереднього рівня, що розміщуються в деякій тримальній конструкції (каркасі) і з’єднуються між собою провідним монтажем, гнучкими шлейфами або багатошаровими об’єднувальними друкованими платами.

Сійки поєднуються зазвичай кабельними з’єднаннями.

У конструкторському проєктуванні РЕА виділяють три групи задач:

1. Синтез конструкції.
2. Контроль отриманих конструктивних рішень.
3. Оформлення конструкторської та технологічної документації.

Основними задачами синтезу конструкцій РЕА є наступні комутаційно-монтажні задачі:

1. **Компонування** конструктивів i -го рівня в конструктивах $(i-1)$ -го рівня, наприклад, компонування електронних елементів у комірки, комірок у блоки тощо.
2. **Розміщення** конструктивів i -го рівня в конструктивах $(i-1)$ -го рівня, наприклад, розміщення електронних елементів на друкованій платі, розміщення комірок у пристроях тощо.
3. **Трасування** монтажних з’єднань між конструктивами на всіх рівнях, наприклад, друкований монтаж.

6.2. Задача компонування

Процес переходу від електричної схеми до конструктивного розподілу (розбиттю) усіх елементів на групи, що відповідають конструктивам різних рівнів, тобто процес

перетворення функціонального опису апаратури на конструктивне, називається **компонуванням**.

Компонування може виконуватися «знизу догори» і «згори донизу». У першому випадку здійснюється послідовне компонування конструктивів нижчих ієрархічних рівнів (мікросхем, ТЕЗ, пристроїв, блоків, стійок тощо) у конструктиви вищих ієрархічних рівнів. У другому випадку конструктиви вищого рівня послідовно розбиваються на конструктиви меншої складності до тих пір, поки не буде отримана схема зв'язків конструктивів нижчого рівня, що увійшли до конструктиву вищого рівня. На практиці застосовуються обидва способи та різні їх комбінації.

У всіх випадках у результаті розв'язання задачі компонування вихідна схема перетворюється на схему з'єднань елементів, визначається склад конструктивів та зв'язків між ними на різних ієрархічних рівнях.

Під час вирішення завдань компонування можливі такі умови:

- номенклатура (кількість типів) модулів невідома і необхідно розбити вихідну схему на модулі, мінімізуючи кількість різних типів модулів під час виконання обмежень на кількість виводів кожного модуля;
- номенклатура модулів нижчого типу відома (є опис типів модулів у БД) і потрібно покрити вихідну схему модулями із заданого набору за максимального використання функціональних можливостей і виводів у заданих модулях;
- номенклатура модулів нижчого рівня відома і потрібно перетворити вихідну функціональну схему на схему електричних з'єднань елементів, одночасно послідовно розподіляючи їх у модулі зростаючої складності.

Таким чином, задачею компонування є розрізання великої схеми (якою може бути структурна, функціональна, логічна, електрична принципова) на частини. Залежно від цілей та умов компонування можна виділити три постановки задачі:

1. **Типізація** – розбиття схеми на конструктивні елементи різних типів та визначення їхньої мінімальної номенклатури.

2. **Покриття** – перетворення вихідної схеми на схему з'єднань елементів (модулів), номенклатура яких задана.

3. **Розрізання** – розбиття вихідної схеми на частини, типи яких або задані, або мають бути визначені у процесі розв'язання задачі, з мінімізацією числа зв'язків між ними.

Це розподіл умовний і можуть вирішуватися всі три задачі в комплексі, чи окремі з них. Серед різних варіантів результатів компоновання вибираються ті, які мають мінімальну кількість типів модулів (комірок, елементів) та зупиняються на тому, у якого між модулями буде мінімальна кількість зв'язків. Крім названих критеріїв числа типів модулів та числа міжмодульних зв'язків, використовуються такі:

- загальна кількість модулів;
- число використовуваних елементів у всіх модулях скомпонованої схеми;
- сумарна площа, займана елементами та з'єднаннями;
- електромагнітна сумісність елементів у модулі;
- параметри теплообміну між елементами в модулі.

Оптимізація за цими критеріями виконується з урахуванням обмежень на довжину певних критичних з'єднань, що впливають на процес передачі інформації.

Усі ці критерії застосовуються в різних поєднаннях. Найкращими умовами для автоматизації конструкторського проектування РЕА є уніфікація та стандартизація конструктивів усіх рівнів від елементів до панелей та стійок.

Відомі алгоритми компоновання можна умовно поділити на п'ять груп:

1. Алгоритми, що використовують методи цілочисельного програмування.
2. Послідовні алгоритми.
3. Ітераційні алгоритми.
4. Змішані алгоритми.
5. Алгоритми, засновані на методі гілок і меж.

Алгоритми першої групи можуть забезпечити точне рішення, але через їхню складність і великі витрати машинного часу вони не знайшли широкого застосування. Найбільш поширені алгоритми другої, третьої та четвертої груп, які хоч і є наближеними, але приводять до задовільних результатів та дозволяють урахувати основні критерії компонування.

Зазвичай в алгоритмах компонування математичною моделлю об'єкта є граф, вершини якого відповідають модулям, а ребра – міжмодульним з'єднанням.

6.3. Задача розміщення

Розміщення – це задача визначення розташування елементів на комутаційному полі (КП), за якого створюються найкращі умови для розв'язання наступної задачі трасування з'єднань з урахуванням конструктивно-технологічних вимог і обмежень.

Задачі розміщення елементів та трасування з'єднань тісно пов'язані і в неавтоматизованих методах конструювання розв'язуються одночасно. Роздільне розв'язання цих задач у САПР пояснюється лише складністю їхнього спільного автоматичного розв'язання.

У САПР знаходять застосування такі критерії розміщення:

- сумарна довжина всіх з'єднань;
- відстань між елементами, з'єднаними найбільшою кількістю зв'язків;
- число перетинів провідників на КП;
- довжина найбільш довгих зв'язків;
- число ланцюгів з можливо більш простою конфігурацією;
- число перегинів провідників;
- число міжшарових переходів;
- параметри паразитних зв'язків між елементами та провідниками;
- рівномірність температури на поверхні КП.

У більшості випадків основним критерієм є сумарна довжина з'єднань, який опосередковано враховує інші з перерахованих критеріїв і є простим з математичної точки зору.

Можна виділити три типи задач розміщення:

1. Розміщення однотипних елементів із заздалегідь заданими однотипними настановними місцями на КП (під однотипністю розуміється, що будь-який елемент може бути поміщений на будь-яке посадкове місце).

2. Розміщення елементів кількох різних типів кратних розмірів із заздалегідь визначеними настановними місцями на КП.

3. Розміщення різноманітних елементів на КП довільної конфігурації.

Найважчий третій тип задач. У цьому випадку зазвичай синтезуються проміжні псевдомодулі (що об'єднують елементи за групами) з певними геометричними посадковими розмірами.

Вихідною інформацією для задачі розміщення є:

- габарити і конфігурація КП;
- геометричні розміри всіх типів елементів, що розміщуються;
- обмеження на взаємне розташування окремих елементів.

Під час розміщення елементи замінюються точками, що значно полегшує розв'язання задачі, причому труднощів під час зворотного переходу від точок до елементів немає.

6.4. Задача трасування

Трасування – це задача геометричної побудови на КП всіх електричних ланцюгів даного конструктиву, координати початку та кінця яких визначені під час розміщення елементів.

Розв'язуючи цю задачу, необхідно враховувати різні конструктивно-технологічні обмеження (допускаються перетини

чи ні, чи можливий перехід із шару на шар, скільки шарів відводиться для трасування, допустимі ширина провідників і відстані між ними і т. д.).

Алгоритми трасування суттєво залежать від прийнятої конструкції та технології виготовлення РЕА.

Трасування провідних з'єднань простіше, оскільки провідники ізолювані один від одного. У даному випадку не треба думати про обмеження на перетини, тому достатньо мінімізувати довжину з'єднань.

Для високочастотних пристроїв необхідно враховувати електромагнітну сумісність ланцюгів.

Трасування друкованих плат залежить від метричних (розміри елементів, ширина та граничні довжини провідників тощо) та топологічних (планарність, можливість перетинів, метод переходу з шару на шар тощо) параметрів. Для друкованого монтажу є неприпустимим перетин трас на одному шарі й необхідно будувати з'єднання як типу «вивід–вивід», так і типу «вивід–провідник» та «провідник–провідник». Найвідповідальнішим під час трасування ланцюгів є визначення координат перехідних отворів на друкованій платі.

Залежно від технології можна виділити три способи прокладання ланцюгів на друкованій платі:

- ланцюг реалізується на одному шарі;
- ланцюг реалізується на кількох шарах, але міжшаровий перехід здійснюється через контактні майданчики для виводів елементів;
- ланцюг реалізується на кількох шарах, але перехід здійснюється через спеціальні перехідні отвори, число яких може бути значним і місця розташування їх довільні.

Спочатку все КП (друкована плата) покривається масштабною сіткою. Кожна клітина сітки називається дискретом. Розмір дискрета вибирають, виходячи з технологічних обмежень на ширину провідників і відстань між провідниками таким чином, щоб в одному дискреті містився один провідник

і зазор. Трасування ланцюгів здійснюється в результаті послідовного заповнення комірок масштабної сітки трасами. Оскільки окремі провідники здебільшого конкурують між собою, їх конфігурація визначається послідовністю виконання трасування окремих з'єднань.

Усі відомі та реалізовані в САПР алгоритми трасування друкованих плат є послідовними. Їх умовно можна поділити на наступні групи:

- хвильові алгоритми;
- променеві алгоритми;
- каналні алгоритми;
- алгоритми гнучкого (топологічного) трасування;
- алгоритми евристичного типу, що ґрунтуються на евристичному прийомі пошуку шляху в лабіринті.

Розглянемо деякі з цих алгоритмів.

Хвильовий алгоритм. Основні операції хвильового алгоритму такі:

1. На масштабній сітці КП відзначаються зайняті та вільні дискрети (траса може проходити лише через вільні дискрети; усі раніше прокладені провідники через дискрети та контактні майданчики – це зайняті дискрети).

2. Вводиться вагова функція $F(f_1, f_2, \dots, f_n)$ як критерій якості шляху (наприклад, f_1 – допустима довжина, f_2 – число перетинів, f_3 – число вигинів, $\dots, f_n$ – число перехідних отворів).

3. Поширення хвилі для кожного ланцюга від початку A (джерела) на всі боки до кінця B (приймача) полягає у присвоєнні дискретам, сусіднім з раніше розглянутими, певного значення вагової функції F . Процес поширення хвилі триває до тих пір, поки фронт хвилі, що розширюється, не досягне дискрета B (кінця ланцюга). Це означає, що шлях можна побудувати. Якщо на черговому етапі розповсюдження хвилі не виявиться жодного вільного дискрета, шлях побудувати не можна.

4. Прокладається шлях траси від дискрета A пройденими дискретами. Для усунення невизначеності проведення траси в разі, якщо кілька сусідніх дискретів мають однакову вагу, використовуються вагові координати (пріоритет поворотів: угору, праворуч, униз, ліворуч), які вказують на перевагу напрямку траси.

Для підвищення швидкодії хвильових алгоритмів застосовується одночасне поширення хвилі від джерела і приймача до їх зустрічі, поширення хвилі тільки в області прямокутника, що створює штучні межі по дискретах початку і кінця ланцюга, поширення хвилі не по всій множині клітин, а по потоковій мережі, уповільнення хвилі, стиснення та розтягування мережі.

Приклад роботи хвильового алгоритму поданий на рис. 6.2.

Машинний час для реалізації хвильового алгоритму порівняно великий. До того ж на поширення хвилі витрачається 90 % усіх обчислень, а на проведення ланцюга – 10 %.

Променевий алгоритм. Алгоритм передбачає дослідження вільних дискретів КП за заздалегідь заданими напрямками подібно променям. Для побудови шляху від точки A до точки B поширюють промені одночасно з обох джерел (A і B) до їх зустрічі у точці C .

Зазвичай вибирають два промені, що йдуть у двох напрямках з кожної точки. Наприклад, для з'єднання точок A (5, 10) і B (14, 3) ланцюгом візьмемо по два промені з протилежними напрямками (рис. 6.3):

a_1 – вниз і вправо;

a_2 – вправо і вниз;

b_1 – вгору і вліво;

b_2 – вліво і вгору.

Після першого кроку займаються клітини з координатами (5, 9), (14, 4), (6, 10), (13, 3). На шостому кроці промінь з A заблокований. На сьомому кроці промінь з B заблокований. На одинадцятому кроці промінь з B зустрів промінь з A . Траса між точками A і B прокладена.

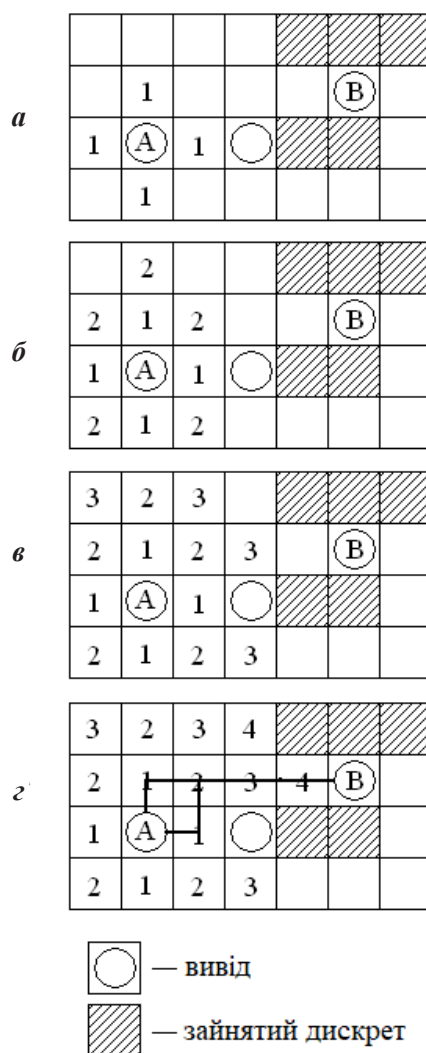


Рис. 6.2. Приклад роботи хвильового алгоритму:
a – 1-ше поширення хвилі; *б* – 2-ге поширення хвилі;
в – 3-тє поширення хвилі; *г* – 4-те поширення хвилі

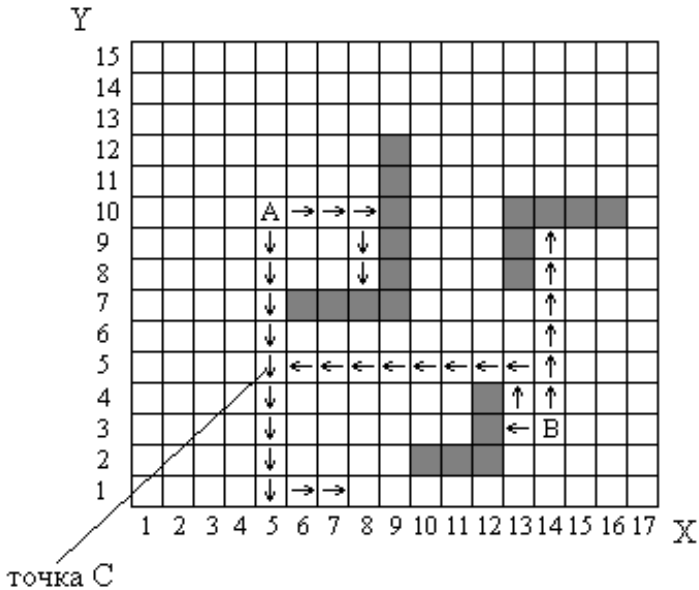


Рис. 6.3. Приклад роботи променевого алгоритму

Зазвичай за допомогою променевих алгоритмів можна прокласти 50–60 % трас, інші проводяться за допомогою хвильового алгоритму. Променевий алгоритм більш економічний за хвильовий за витратами машинного часу.

6.5. Загальні відомості про друковані плати

Друкована плата (ДП) (англ. printed circuit board, PCB) – це пластина, виконана з діелектрика (склотекстоліт, текстоліт, гетинакс тощо), на якій або/ї всередині якої сформований хоча б один шар з провідними доріжками [7].

Друкована плата є одним із поширених різновидів КП. Вони набули широкого поширення у виробництві модулів, комірок та блоків РЕА завдяки наступним перевагам, у порівнянні з традиційним об'ємним монтажем провідниками та кабелями:

- підвищення щільності розміщення компонентів та щільності монтажних з'єднань, можливість суттєвого зменшення габаритів та ваги виробів;

- гарантована стабільність та повторюваність електричних характеристик (провідності, паразитної ємності та індуктивності);

- підвищення швидкодії та перешкодозахищеності схем;

- підвищена стійкість до кліматичних та механічних впливів;

- уніфікація та стандартизація конструктивних та технологічних рішень;

- збільшення надійності;

- поліпшення технологічності за рахунок комплексної автоматизації монтажно-складальних та контрольно-регулювальних робіт;

- зниження трудомісткості, матеріаломісткості та собівартості.

До недоліків слід віднести складність внесення змін до конструкції та обмежену ремонтпридатність.

6.6. Вимоги до друкованих плат

Елементами ДП є діелектрична основа, металеве покриття у вигляді рисунка друкованих провідників та контактних майданчиків, монтажні та фіксуючі отвори (рис. 6.4).

Діелектрична основа ДП повинна бути однорідною за кольором, монолітною за структурою і не мати внутрішніх міхурів та раковин, сторонніх включень, сколів, тріщин та розшарувань. Допускаються поодинокі вкраплення металу, подряпини, сліди від видалення одиночних невинуватих ділянок, прояв структури матеріалу, які не погіршують електричних параметрів ДП та не зменшують мінімально допустимих відстаней між елементами провідного рисунка.

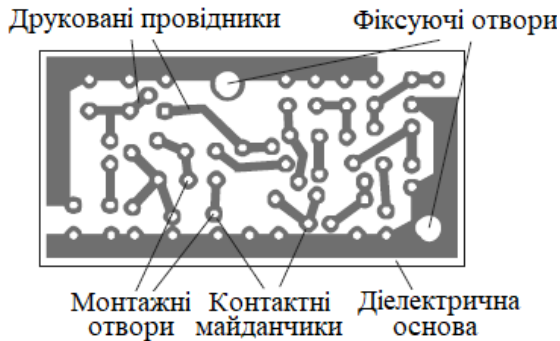


Рис. 6.4. Основні елементи друкованої плати

Провідний рисунок ДП повинен бути чітким, з рівними краями, без здуття, відшарувань, розривів, слідів інструменту та залишків технологічних матеріалів. Допускаються: окремі місцеві протрави не більше п'яти точок на 1 дм² за умови, що ширина провідника, що залишилася, відповідає мінімально допустимою по кресленню; risks глибиною не більше 25 мкм та довжиною до 6 мм; залишки металізації на ділянках ДП, що не зменшують допустимих відстаней між елементами.

Для підвищення корозійної стійкості та покращення паяння на поверхню провідного рисунка наносять електролітичне покриття, яке має бути суцільним, без розривів та відшарувань. В окремих випадках допускаються: ділянки без покриття площею не більше 2 мм² на 1 провідник, але не більше п'яти на платі; місцеві нарости заввишки трохи більше 0,2 мм; потемніння і неоднорідність кольору покриття, що не погіршують паяння; відсутність покриття на торцях провідників. У разі наявності на друкованих провідниках критичних дефектів, їх дублюють об'ємними (не більше п'яти дрітників для плат, розміром до 120 × 180 мм і десяти провідників для плат розміром понад 120 × 180 мм).

Монтажні та фіксуючі отвори повинні бути розташовані відповідно до вимог креслення та мати допустимі відхилення, що визначаються класом точності ДП. Для підвищення надійності паяних з'єднань внутрішню поверхню монтажних отворів покривають шаром міді завтовшки не менше 25 мкм. Покриття має бути суцільним, без включень, пластичним, з дрібнокристалічною структурою і міцно зчепленою з діелектричною основою. Воно має витримати струмове навантаження 250 А/мм² протягом 3 с за навантаження на контакти 1...1,5 Н і три-чотири перепаювання виводів без зміни зовнішнього вигляду та відшарування. Після циклічного впливу зміни температур опір переходу металізованого отвору не повинен відрізнятися більш ніж на 20 % від значення опору в нормальних кліматичних умовах. Допускаються в отворах точкові неметалізовані ділянки діаметром не більше 0,2 мм. Число таких отворів на платі не повинно перевищувати 0,3 % від загального числа. У разі неприпустимого пошкодження металізовані отвори відновлюють за допомогою порожнистих заклепок, але їх число не повинно перевищувати 2 % від загального числа отворів, але не більше ніж 10 штук на ДП. Перехідні ненаскрізні металізовані отвори між зовнішніми та внутрішніми шарами багатошарової ДП повинні бути заповнені смолою в процесі пресування, яка не повинна мати газових включень та натікати на контактні майданчики.

Контактні майданчики є ділянками металевого покриття, які з'єднують друкарські провідники з металізацією монтажних отворів. Їхня площа повинна бути такою, щоб не було розривів під час свердління і залишився гарантійний пояс міді шириною не менше 50 мкм. Розриви контактних майданчиків не допускаються, тому що зменшуються струмопровідна здатність провідників і адгезія до діелектрика. Допускається часткове відшарування окремих (до 2 %) контактних майданчиків поза зоною провідників та їх ремонт за

допомогою епоксидного клею. Контактні майданчики монтажних отворів повинні рівномірно змочуватися припоєм за 3...5 с і витримувати не менше трьох перепайок без розшарування діелектрика, здуття та відшаровування.

Технологічний процес виготовлення ДП не повинен погіршувати електрофізичні та механічні властивості конструкційних матеріалів, що застосовуються.

У процесі виробництва виникає деформація ДП, що призводить до їх вигину та скручування. Величина деформації визначається механічною міцністю фольгованих діелектриків, характером напруженого стану після стравлювання фольги, правильністю режимів нагрівання та охолодження. На платах товщиною 0,8 мм і менше деформація не контролюється, за товщинах 1,5...3 мм деформація на 100 мм довжини не повинна перевищувати: для двошарових ДП на склотекстоліті – 0,8 мм, на гетинаксі – 0,9 мм; для одношарових на склотекстоліті – 0,9 мм, на гетинаксі – 1,5 мм. У разі дії на ДП підвищеної температури 260...290 °С протягом 10 с не повинно спостерігатися розривів провідного покриття, відшарування від діелектричної основи.

6.7. Типи друкованих плат

Стандартом ДСТУ 2646-94 визначені такі типи ДП [8]:

- одностороння ДП – плата, на одній стороні якої виконаний провідний рисунок;
- багатошарова ДП – плата, що складається з перемежованих шарів ізоляційного матеріалу з провідними рисунками на двох або більше шарах, між якими виконані необхідні з'єднання;
- двостороння ДП – плата, на обох сторонах якої виконані провідні рисунки і всі необхідні з'єднання;
- гнучка ДП – плата, що має гнучку основу;
- гнучкий друкований кабель – система паралельних друкованих провідників, розміщених на гнучкій основі.

Односторонні ДП виконуються на шаруватій пресованій або рельєфній литій основі без металізації або з металізацією монтажних отворів. Плати на шаруватому діелектрику прості за конструкцією та економічні у виготовленні. За неможливості стовідсоткового трасування друкованих провідників застосовуються навісні перемички. Їх застосовують для монтажу побутової радіоапаратури, блоків живлення, пристроїв техніки зв'язку, у простій РЕА та допоміжній апаратурі. Низькі витрати, високу технологічність та нагрівостійкість мають рельєфні литі ДП, на одній стороні яких розташовані елементи друкарського монтажу, а на іншій – об'ємні елементи (корпуси з'єднувачів, периферійна арматура для кріплення деталей та елементів, тепловідводи та інше). У цих платах за один технологічний цикл виходить уся конструкція з монтажними отворами та спеціальними заглибленнями для розташування елементів, що монтуються на поверхню. Зараз технологія рельєфних ДП інтенсивно розвивається.

Двосторонні ДП мають рисунок провідників на обох боках діелектричної або металевої основи та забезпечують високу щільність установки елементів та трасування. Переходи провідників з шару на шар здійснюються через металізовані перехідні отвори. Плати допускають як монтаж елементів на поверхні, у тому числі з двох боків, так і монтаж елементів з осьовими та штиревыми виводами в металізовані отвори. Двосторонні ДП є найпоширенішим різновидом ДП у виробництві модулів РЕА, що використовуються у вимірювальній техніці, системах управління та автоматичного регулювання. Розташування елементів друкованого монтажу на металевій основі дозволяє розв'язати проблему тепловідведення.

Багатошарові ДП складаються з шарів ізоляційного матеріалу з рисунками провідників на двох або більше шарах, з'єднаних у монолітну структуру шляхом пресування. Електричний зв'язок між шарами виконується спеціальними

об'ємними деталями, друкованими елементами або хіміко-гальванічною металізацією. Порівняно з односторонніми та двосторонніми ДП, вони характеризуються підвищеною надійністю та щільністю монтажу, стійкістю до механічних та кліматичних впливів, зменшенням розмірів та числа контактів. Однак велика трудомісткість виготовлення, висока точність рисунка та поєднання окремих шарів, необхідність ретельного контролю на всіх операціях, низька ремонтпридатність, складність технологічного обладнання та висока вартість дозволяють застосовувати багатшарові ДП тільки для ретельно відпрацьованих конструкцій РЕА.

У РЕА застосовуються також гнучкі ДП, виконані конструктивно як односторонні або двосторонні ДП, але на еластичній основі завтовшки 0,1...0,5 мм. Вони застосовуються в тих випадках, коли плата після виготовлення піддається вібраціям, багаторазовим вигинам або після встановлення елементів їй необхідно надати вигнуту форму.

Різновидом гнучкої ДП є гнучкі друкарські кабелі, які складаються з одного або кількох непровідних шарів з розміщеними друкарськими провідниками. Товщина гнучких друкованих кабелів коливається від 0,06 до 0,3 мм. Вони застосовуються для з'єднань вузлів та блоків РЕА, займають менші обсяги та легше круглих джгутів і кабелів. Їх виробництво може здійснюватися безперервно на рулонному матеріалі.

За видом матеріалу основи ДП поділяють на такі:

- виготовлені на основі органічного діелектрика (текстоліту, гетинаксу, склотекстоліту);

- виготовлені на основі керамічних матеріалів;

- виготовлені на основі металів.

За видами з'єднань між шарами розрізняють такі ДП:

- з металізованими отворами;

- з пістонами;

- виготовлені пошаровим нарощуванням;

- із відкритими контактними майданчиками.

За способом виготовлення ДП поділяють на плати, виготовлені:

- хімічним травленням;
- електрохімічним осадженням;
- комбінованим способом.

За способом нанесення провідників ДП поділяють на плати, одержані:

- обробкою фольгованих діелектриків;
- нанесенням тонких струмопровідних шарів.

Останній спосіб добре відпрацьований на технології гібридних схем.

Широкого поширення набувають багатошарові ДП на керамічній основі.

У порівнянні з органічними діелектриками кераміка дозволяє покращити тепловідведення, підвищити щільність компонування мікросхем (особливо з використанням мікрокорпусів). До недоліків керамічних багатошарових ДП слід віднести їх велику масу та невеликі максимальні лінійні розміри (обмежені технологією порядку 150×150 мм).

Металеві ДП виготовляються на основі сталевих, алюмінієвих та інварових листів. Пластини окислюються і покриваються шаром кераміки, емалі, лаку чи іншого діелектрика. Поверх наносяться друкарські провідники, плівкові резистори, конденсатори, індуктивності, а потім монтуються мікросхеми (зазвичай безкорпусні). Переваги: порівняно невисока вартість, необмежені розміри, висока теплопровідність, висока схибленість, висока міцність і теплостійкість. Недоліки: висока ємність провідників та велика маса.

6.8. Проектування друкованих плат

У РЕА ДП застосовують практично на всіх рівнях конструктивної ієрархії: на нижньому – як основу гібридних схем і мікроскладань, на наступних – як основу, що механічно

і електрично об'єднує всі елементи, що входять в електричну принципову схему РЕА та її вузлів. Під час розробки конструкції ДП розв'язуються такі взаємозалежні між собою задачі:

- схемотехнічні (трасування друкованих провідників, мінімізація шарів);
- радіотехнічні (розрахунок паразитних наведень, параметрів ліній зв'язку);
- теплотехнічні (температурний режим роботи ДП, тепловідведення);
- конструктивні (розміщення елементів на ДП, контактування);
- технологічні (вибір методу виготовлення, захист).

Основні правила конструювання ДП:

1. Максимальний розмір сторони ДП не повинен перевищувати 500 мм. Це обмеження визначається вимогами міцності та щільності монтажу.

2. Співвідношення розмірів сторін ДП для спрощення компонування блоків та уніфікації розмірів ДП рекомендуються наступні: 1:1, 2:1, 3:1, 4:1, 3:2, 5:2 і т. д.

3. Вибір матеріалу ДП, способу її виготовлення, класу щільності монтажу повинні здійснюватися на стадії ескізного проектування, оскільки ці характеристики визначають багато електричних параметрів пристрою.

4. У разі розбиття схеми на шари, слід прагнути мінімізації числа шарів. Це диктується економічними міркуваннями.

5. По краях плати слід передбачати технологічну зону завширшки 1,5...2,0 мм. Розміщення отворів, а також друкованих провідників у цій зоні не допускається.

6. Усі отвори повинні розташовуватися у вузлах координатної сітки. У крайньому випадку, хоча б перший вивід мікросхеми повинен розташовуватися у вузлі координатної сітки.

7. На ДП бажано передбачити орієнтуєчий паз (або зрізаний лівий кут) або технологічні базові отвори, необхідні для правильної орієнтації плати.

8. Друкарські провідники слід виконувати мінімально короткими.

9. Прокладання поруч провідників вхідних та вихідних ланцюгів небажано, щоб уникнути паразитних наведень.

10. Провідники найбільш високочастотних ланцюгів прокладаються в першу чергу і мають завдяки цьому коротку довжину.

11. Заземлювальні провідники слід виготовляти максимально широкими.

Ширину друкованих провідників розраховують та обирають залежно від допустимого струмового навантаження, властивостей струмопровідного матеріалу, температури навколишнього середовища під час експлуатації. Краї провідників мають бути рівними, провідники без здуття, відшарувань, розривів, протравів, пір, крупнозернистості та тріщин, так як ці дефекти впливають на опір провідників, щільність струму, хвильовий опір і швидкість поширення сигналів.

Відстань між елементами провідного рисунка, розташованими на зовнішніх або в сусідніх шарах ДП, залежить від допустимої робочої напруги, властивостей діелектрика та умов експлуатації.

Координатна сітка креслення ДП необхідна для координації елементів друкованого рисунка. У вузлах перетинів сітки розташовуються монтажні та перехідні отвори. Основним кроком координатної сітки прийнято розмір 0,5 мм в обох напрямках. Якщо цей крок не відповідає вимогам конкретної конструкції, можна застосовувати крок, що дорівнює 0,05 мм. Під час використання мікросхем та елементів з кроком виводів 0,625 мм допускається застосування кроку координатної сітки 0,625 мм. У разі використання мікросхем зарубіжного виробництва з відстанями між выводами за дюймовою

системою допускається використання кроку координатної сітки, кратного 2,54 мм.

Діаметри монтажних та перехідних отворів (металізованих та неметалізованих) повинні вибиратися з ряду 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0; 1,1; 1,2; 1,3; 1,4; 1,5; 1,6; 1,7; 1,8; 2,0; 2,1; 2,2; 2,3; 2,4; 2,5; 2,6; 2,7; 2,8; 3,0. Монтажні отвори призначені для встановлення мікросхем та елементів, а перехідні отвори – для електричного зв'язку між шарами ДП.

Розміри ДП, якщо вони спеціально не обумовлені, визначаються з урахуванням кількості елементів, їх установчих площ, кроку установки, зон установки роз'єму та іншого. Співвідношення лінійних розмірів сторін ДП має становити не більше 3:1.

Кривизна ДП (циліндричне чи сферичне викривлення основи) може з'явитися внаслідок впливу високої температури та вологості. Допустиме значення вигину ДП на довжині 100 мм становить: для односторонніх та двосторонніх ДП – 1,5 мм; для багатошарових ДП – 2,0 мм.

У загальному випадку типорозміри ДП вибираються, виходячи з вимог двох напрямів – функціонального та технологічного.

Вимоги функціонального напрямку в конструктивному плані виражаються щільністю компонування, що залежить від розмірів і кількості корпусів мікросхем та виду монтажу активних і пасивних зв'язків електричної схеми.

Вимоги технологічного напрямку визначають обмеження типорозмірів з точки зору технологічних можливостей та ефективності виробництва заготовок, роздільної здатності фотолітографії, механічної міцності, можливостей систем автоматизованого проектування.

Габаритні, настановні та приєднувальні розміри ДП зазвичай координуються з тією чи іншою системою базової тримальної конструкції. Відомо безліч систем базової тримальної конструкції, і всі вони припускають прямокутну форму плат усіх типів та розмірів. Лише у виняткових,

технічно обґрунтованих випадках, допускається відступати від прямокутної форми.

З європейських стандартів, які знайшли широке застосування у вітчизняній практиці, відзначимо два стандарти Міжнародної електротехнічної комісії: стандарт МЕК 297 (ТЕС 297-3) і метричний стандарт МЕК 917 (ІЕС 917-2-2), який, на думку його авторів, має замінити стандарт МЕК 297.

Стандарт МЕК 297 носить назву 19-ти дюймового (за розміром ширини попередньої панелі базового модуля 2-го рівня). Геометричні розміри ДП у стандарті становлять гібрид метричних та дюймових розмірів. Базовий розмір друкованої плати складає 100×100 мм. Одиниця збільшення розміру по висоті дорівнює $1,75'' = 44,45$ мм. Цій величині кратна висота передніх панелей блоків. Значення цієї кратності входить до позначення ДП, хоча самого цього розміру на платі немає. Одиниця збільшення розміру в довжину (глибину) становить 60 мм. Одиниця кратності по ширині передньої панелі становить $0,2'' = 5,08$ мм.

Маркування ДП поділяється на обов'язкове та додаткове. До обов'язкового маркування відноситься позначення у відповідності до чинних стандартів або будь-який умовний шифр, дата виготовлення та номер версії фотошаблону, а також технологічні маркери, що вводяться у фотошаблон виробником плати. Додаткове маркування містить позначення заводського номера плати або партії плат, позначення контурів місць встановлення та позиційні позначення елементів, а також іншу інформацію, що слугує для зручності монтажу, регулювання та експлуатації.

Частина маркування може бути виконана травленням, одночасно з провідниками, але для цього на платі має бути вільне місце. Під час виконання проекту засобами САПР маркувальні знаки, що виконуються травленням у шарах провідників, отримують статус ланцюгів, що не мають підключених елементів, і САПР видає повідомлення про

помилки. Тим не менш, таке маркування застосовується для позначення номера креслення ДП або її шифру з тим, щоб у масовому виробництві можна було ідентифікувати плати, що надходять з операцій хімічної обробки, коли на них ще немає іншого маркування. Висота символів маркування має бути не менше 2,5 мм.

Дефіцит вільного місця на ДП не заважає маркуванню способами офсетного друку (сеткографії, шовкографії тощо). Маркування лише не повинно потрапляти на місця паяння.

Мистецтво проектування контактних майданчиків на ДП (знакоміст) пов'язано з необхідністю забезпечення заданої щільності вузла, що передбачає мінімізацію топології знакомісця. Водночас проектування має допускати оптимізацію рисунка комутації та спрощувати проектування пристроїв шляхом зменшення кількості шарів ДП та числа міжшарових, що використовуються, переходів.

Проектування топології «знакоміст» зазвичай складається з трьох окремих етапів: розробки рисунка контактних майданчиків, розробки рисунка для маскуючого покриття та рисунку-трафарету для нанесення припійної пасти.

Основне обмеження, що накладається на ДП під час поверхневого монтажу елементів, пов'язане з досяжним рівнем роздільної здатності головних розмірів: кроку контактних майданчиків, кроку «контактний майданчик – комутуюча доріжка» та кроку комутувальних доріжок. При малому кроці припойні майданчики можуть з'єднуватися між собою перемичками припою. З метою мінімізації перемичок розмір самих контактних майданчиків можна зменшити, але для формування надійного з'єднання необхідно, щоб контактний майданчик виступав з-під корпусу елемента на деяку мінімальну відстань. У цьому випадку поверхні, що змочуються припоєм, будуть мати достатню площу для утворення меніска припою. Слід уникати попадання адгезиву, що використовується для фіксації

елементів під час складання, на контактні майданчики знакоміст-елементів.

Паяння є ключовим аспектом проектування для забезпечення відтворюваності технологічного процесу. Найбільший вплив на вихід придатних плат під час первинних відбракувальних випробувань надає частота появи дефектів у процесі паяння та очищення. Сам по собі процес паяння оплавленням дозованого припою не породжує дефектів. Вони можуть виникнути, наприклад, унаслідок неоптимального проектування топології плати та у процесі нанесення припійної пасти через трафарет.

Проектування контактних майданчиків для елементів на ДП залежить від технології паяння вузла. У цьому відношенні пайка хвилею припою та пайка розплавленням дозованого припою суттєво відрізняються один від одного.

Паяння хвилею припою застосовується тільки до елементів, що монтуються на поверхню та встановлюються з нижнього боку плати, які можуть витримати занурення у ванну з припоєм. Застосування паяння хвилею припою для поверхневих елементів обмежується через ефект затінення корпусами елементів контактних майданчиків, що піддаються пайці.

Для усунення ефекту затінення потрібно збільшення топологічних розмірів знакоміст-елементів, наприклад, у напрямку руху ДП через ванну з припоєм. Тобто щільність компонування плати (вузла) залежить від типу процесу паяння, що застосовується.

Орієнтація елементів не менш важлива для ефективного паяння хвилею припою деяких класів приладів. Найкращі результати спостерігаються в тому разі, коли поздовжня вісь корпусу паралельна напрямку руху плати під час пайки. Така орієнтація сприяє зменшенню утворення перемичок із припоєм. Цьому також сприяє, як довела практика, створення додаткової пари майданчиків, що не використовується, на кінці посадкового місця корпусу елемента в напрямку руху

плати. Ці майданчики діють як «пастки припою», що перешкоджають його накопиченню на кінцевих майданчиках посадкового місця елемента. Прості корпуси типу *SO* або прямокутні можуть бути орієнтовані паралельно або перпендикулярно до потоку хвилі.

Під час паяння оплавленням дозованого припою потрібна підвищена точність позиціонування елементів та нанесення припойної пасти в разі підвищеної щільності монтажу. Потрібно враховувати ефект ковзання елемента по розплавленому припою. Цей ефект є результатом дії сил поверхневого натягу рідкого припою (під час оплавлення), які прагнуть затягнути елемент у центр припійного майданчика, що зазвичай приводить до необхідності підвищення точності позиціонування елемента.

З цієї причини важливо, щоб контактні майданчики були однакові за формою та розмірами, особливо для елементів поверхневого монтажу. В іншому випадку нерівність сил поверхневого натягу на кожному контактному майданчику сприятиме зміщенню елемента зі встановленої позиції. Якщо довжина контактних майданчиків значно перевищує їх ширину, то елемент може зрушити і зайняти тільки одну з них, що приводить до утворення розімкнутого електричного ланцюга. У випадку коли майданчики надто широкі, елемент може легко втратити потрібну орієнтацію. Існують також специфічні проблеми, які можуть бути, коли контактні майданчики під елемент поверхневого монтажу з'єднуються одна з одною. Якщо великий контактний майданчик спроектований у вигляді одного топологічного елемента, то під час паяння оплавленням дозованого припою кожен елемент буде притягуватися до центру цього майданчика внаслідок більшої величини сил поверхневого натягу припою. Доцільніше замість одного великого майданчика проектувати два меншого розміру, з'єднаних вузькою доріжкою, що обмежує кількість акумульованого припою.

За потреби підвищення величини комутованих струмів рекомендується збільшувати кількість доріжок, а не збільшувати ширину однієї доріжки, оскільки для широкої доріжки можливі акумулювання припою під елементом та зміщення елемента. Якщо розведення комутації під елементом усе ж таки необхідно, одну широку доріжку слід розділяти на кілька паралельних меншої ширини. Небажаний ефект ковзання може проявитися також тоді, коли два паралельні елементи поверхневого монтажу розташовані дуже близько один до одного. У процесі паяння ковзний елемент може фактично вступити в контакт із припоєм під корпусом сусіднього елемента. Зазор не менше 0,635 мм, а ще краще 1,27 мм, зменшує ймовірність цього ковзання.

Хороший практичний результат дає з'єднання між собою зон великих контактних майданчиків за допомогою вузьких або звужених комутуючих доріжок. Це стосується контактних майданчиків, з'єднаних із наскрізними міжшаровими переходами, які в іншому випадку можуть бути збіднені припоєм.

6.9. Стандарти IPC

Галузеві стандарти IPC розроблено для забезпечення надійності й технологічності ДП та інших електронних вузлів. Метою стандартів IPC є забезпечення того, щоб електронні вироби були надійними, безпечними та технологічними [7].

Стандарти IPC містять численні виробничі вимоги для всіх аспектів ДП. Ці виробничі вимоги зрештою перетворюються на вимоги до конструкції, і розробникам потрібне програмне забезпечення для проєктування ДП, щоб забезпечити відповідність їхніх плат стандартам IPC.

Існує багато розділів стандартів IPC, але не всі розділи підходять до конкретної конструкції ДП. Крім того, кожен стандарт є дуже довгим документом, який містить низку

вимог до розробників, виробників або обох. Деякі з важливих стандартів проєктування IPC включають у себе:

- IPC 2221: установлює деякі загальні вимоги до проєктування, кріплення елементів або з'єднувальних структур;

- IPC 4101: визначає вимоги до матеріалів для ламінату ДП та інших матеріалів, які використовуються для створення стека шарів;

- IPC 2152: стандарт, який визначає вимоги до струмопровідності в мідних трасах і площинах у низці різних застосувань;

- IPC 4761: охоплює вказівки щодо проєктування захисту прохідних каналів для забезпечення надійності, технологічності та якості;

- IPC 6011: загальна класифікація ДП;

- IPC 6012: визначає загальні вимоги згідно з IPC 2221, IPC 4101 та інші вимоги до якості (відповідний стандарт IPC 6013 застосовує ті самі ідеї до гнучких ДП);

- Серія IPC-A-600: визначає показники прийнятності для ДП, а також три стандартні класи IPC для різних збірок ДП;

- IPC 7351: установлює вимоги до площі та поверхні для елементів *SMT* (виробники елементів використовують ці специфікації під час проєктування своїх моделей контактів, щоб забезпечити можливість спаювання та надійні електричні з'єднання);

- IPC-1752A: стандарт управління декларацією матеріалів визначає формати звітності для даних, якими обмінюються розробники, дистриб'ютори та виробники.

Існує багато інших стандартів, які впливають на проєктування, виробництво та кваліфікацію ДП, але не всі вони критичні для розробників ДП. Важливі вимоги до конструкції зі списку вище значною мірою впливатимуть на такі речі, як зазори, вимоги до тестування, розміри функцій, вимоги до механічної конструкції та вимоги до захисту для забезпечення високої якості.

У виробництві ДП поділяються на три класи: 1, 2 і 3. Клас відображає рівень якості кожного типу плати, від найнижчого (стандарти класу 1) до найвищого (стандарти класу 3). Ця система класифікації була розроблена та контролюється організацією IPC відповідно до стандарту IPC-6011 [9].

Згідно з IPC-6011 класи розподіляються наступним чином:

- Електроніка класу 1 – Загальна електроніка.
- Електроніка класу 2 – Спеціальна сервісна електроніка.
- Електроніка класу 3 – Високонадійна електроніка.
- A-Level або IPC 6012 клас 3. Спеціалізована електроніка.

Розглянемо кожен клас детальніше [7].

Клас 1 – Загальні електронні вироби. Ці вироби мають прості функції та короткий термін служби. Вони складають повсякденний електронний продукт, який ми маємо вдома, і який легко знайти. Серед них такі продукти, як пульт дистанційного керування телевізором, світлодіодні світильники та дитячі іграшки. Термін служби більшості продуктів залежить від їх вартості.

Мінімальні параметри друкованого рисунку на ДП згідно з 1 класом IPC 6011:

- мінімальна ширина провідників: зазвичай мінімальна ширина провідників визначається залежно від вимог до струму і товщини мідного шару на платі. За 1 класом IPC 6011 мінімальна ширина провідника може бути в межах 0,1 мм або більше;
- мінімальний відступ між провідниками: мінімальний відступ від краю провідника до сусіднього провідника або від інших структур повинен бути визначений. За 1 класом IPC 6011 мінімальний відступ може становити 0,1 мм або більше;
- мінімальний діаметр отворів: мінімальний діаметр отвору визначається вимогами до компонентів, які будуть установлені на плату. Зазвичай мінімальний діаметр отвору може становити 0,3 мм або більше;

– мінімальний відступ від отвору до провідників: мінімальний відступ від отвору до найближчого провідника також може бути визначений. За 1 класом IPC 6011 цей відступ може бути 0,2 мм або більше.

Варто враховувати, що це лише загальні вказівки, і конкретні вимоги можуть відрізнятися залежно від конкретних специфікацій та вимог проекту.

Клас 2 – Електронні продукти спеціального обслуговування. Цей клас демонструє вищі характеристики в порівнянні з ДП класу 1. Плати 2-го класу мають збільшений термін служби і більш надійні. Щоб досягти такого тривалого терміну служби та надійності, продукти проходять через суворі стандарти у своєму виробництві. Плати класу 2 не дуже критичні, і вони працюють безперервно. Плати класу 2 можна знайти на таких пристроях, як планшети, комунікаційне обладнання, ноутбуки та смартфони.

За класом 2 IPC 6011 мінімальні параметри друкованого рисунку на ДП зазвичай більш жорсткі порівняно з класом 1, оскільки клас 2 вимагає вищої надійності та якості з'єднань на платі. Деякі з мінімальних параметрів:

– мінімальна ширина провідників: за класом 2, мінімальна ширина провідників може бути більшою, зазвичай 0,15 мм або більше;

– мінімальний відступ між провідниками: мінімальний відступ між провідниками може бути більший, зазвичай 0,15 мм або більше;

– мінімальний діаметр отворів: мінімальний діаметр отворів може бути більший, зазвичай 0,4 мм або більше;

– мінімальний відступ від отвору до провідників: мінімальний відступ від отвору до найближчого провідника може бути більший, зазвичай 0,3 мм або більше.

Варто зазначити, що це лише загальні вказівки, і конкретні вимоги можуть різнитися залежно від версії стандарту IPC 6011 та вимог проекту. Рекомендується завжди

перевіряти актуальну версію стандарту та специфікацій для конкретної ситуації.

Клас 3 – Високонадійні електронні вироби. Це надзвичайно важливі продукти, які повинні постійно забезпечувати необхідну продуктивність у будь-який час. У обладнання з платами класу 3 не повинно виникати простоїв. Під час виробничого процесу продукти класу 3 проходять ретельний контроль, щоб переконатися, що вони надійні. Обладнання, яке використовує плати класу 3, включає в себе електронні виробничі системи, системи підтримки та військові пристрої.

За класом 3 IPC 6011 мінімальні параметри друкованого рисунку на ДП є ще більш жорсткими порівняно з класом 2. Клас 3 вимагає найвищої якості та надійності з'єднань на платі. Деякі з мінімальних параметрів:

- мінімальна ширина провідників: за класом 3 мінімальна ширина провідників може бути ще більшою, зазвичай 0,1 мм або більше;
- мінімальний відступ між провідниками: мінімальний відступ між провідниками може бути більший, зазвичай 0,1 мм або більше;
- мінімальний діаметр отворів: мінімальний діаметр отворів може бути більший, зазвичай 0,25 мм або більше;
- мінімальний відступ від отвору до провідників: мінімальний відступ від отвору до найближчого провідника може бути більший, зазвичай 0,2 мм або більше.

A-Level або IPC 6012 клас 3 – Advanced Electronic Products [10]. IPC 6012 клас 3 є найвищим рівнем і проходить дуже суворі виробничі процеси. Продукти цього класу включають у себе аерокосмічне застосування, військові бортові системи, ракетні системи, космічне обладнання та військову авіоніку. Їхня конструкція та вартість виробництва дуже високі.

За класом 3 IPC 6012 мінімальні параметри друкованого рисунку на ДП є надзвичайно жорсткими, оскільки цей клас

вимагає найвищого рівня якості, надійності та довговічності з'єднань. Деякі з мінімальних параметрів:

- мінімальна ширина провідників: за класом 3 мінімальна ширина провідників може бути дуже мала, зазвичай 0,075 мм або більше;

- мінімальний відступ між провідниками: мінімальний відступ між провідниками може бути дуже малим, зазвичай 0,075 мм або більше;

- мінімальний діаметр отворів: мінімальний діаметр отворів може бути малим, зазвичай 0,15 мм або більше;

- мінімальний відступ від отвору до провідників: мінімальний відступ від отвору до найближчого провідника може бути дуже малим, зазвичай 0,075 мм або більше;

- вимоги до контролю якості: за класом 3 можуть бути встановлені вимоги до контролю якості, такі як вимоги до дотримання технологій, контроль якості під час виробництва тощо.

7. ОГЛЯД СУЧАСНИХ САПР

7.1. AutoCAD

AutoCAD, яка розроблена компанією «Autodesk» [11], відноситься до класу САПР, які призначені насамперед для розробки конструкторської документації: креслень, моделей об'єктів, схем тощо (рис. 7.1). Перша версія системи була випущена в 1982 р.

Це програмне забезпечення дозволяє створювати 2D- та 3D-креслення будь-якого призначення та різної складності з максимальною точністю. Широке поширення AutoCAD у світі зумовлено не в останню чергу розвиненими засобами

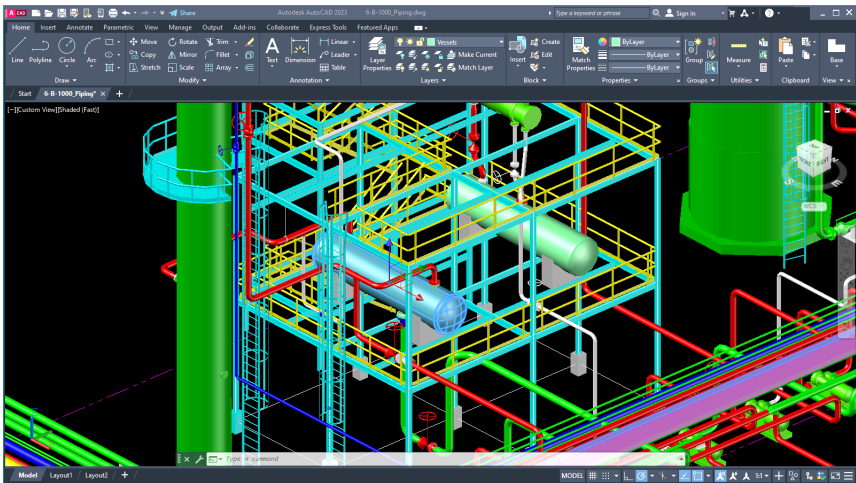


Рис. 7.1. AutoCAD

розробки та адаптації, які дозволяють налаштувати систему під потреби конкретних користувачів та значно розширити функціонал базової системи. AutoCAD включає в себе наступні набори інструментів:

AutoCAD Architecture являє собою додаткові інструменти для архітектурного проєктування та креслення, засоби випуску будівельної документації.

AutoCAD Electrical розроблений для проєктувальників електричних систем управління.

AutoCAD Mechanical призначений для проєктування в машинобудуванні.

AutoCAD Plant 3D являє собою інструмент для проєктування технологічних об'єктів.

AutoCAD Map 3D створено для фахівців, які виконують проєкти у сфері транспортного будівництва, енергопостачання, земле- та водокористування.

AutoCAD Raster Design являє собою програму векторизації зображень, що підтримує оптичне розпізнавання символів.

AutoCAD MEP орієнтований на проєктування інженерних систем об'єктів цивільного будівництва: систем сантехніки й каналізації, опалення та вентиляції, електрики і пожежної безпеки.

Ранні версії AutoCAD оперували невеликою кількістю елементарних об'єктів (круги, лінії, дуги та текст), з яких склалися більш складні. В останніх версіях можливості AutoCAD значно розширились. В області двовимірного проєктування AutoCAD, як і раніше, дозволяє використовувати елементарні графічні примітиви для отримання більш складних об'єктів. Крім того, програма надає дуже великі можливості роботи з шарами, розмірами, текстом.

Файли AutoCAD мають розширення DWG та DXF. Файли з розширенням DWG є популярним форматом зберігання цифрових креслень. Володіє цим форматом компанія «Autodesk», і для її продуктів він є основним. Програмні

середовища для проектування інших виробників можуть працювати з даним форматом.

AutoCAD LT – це «полегшена» версія AutoCAD, яку архітектори, інженери, будівельники й дизайнери використовують для створення 2D-креслень і документації (рис. 7.2) [12].

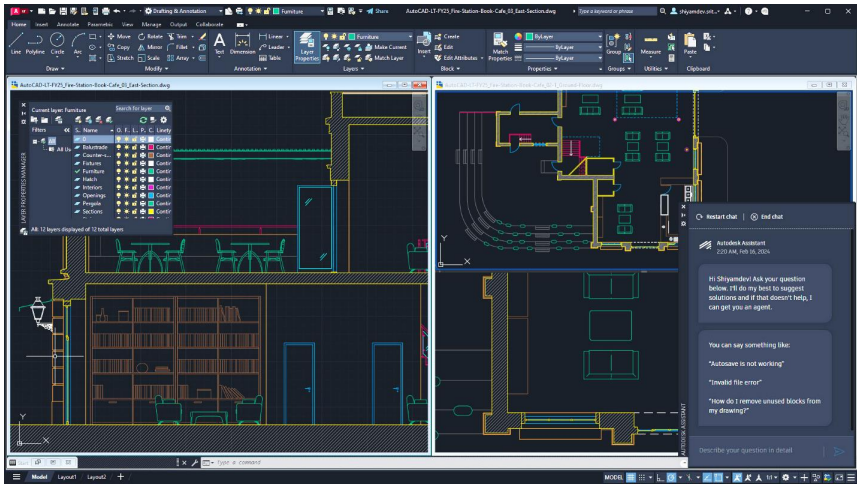


Рис. 7.2. AutoCAD LT

Основні можливості:

- створення та редагування 2D-геометрії;
- анотація креслень за допомогою тексту, розмірів, виносок і таблиць;
- адаптація стрічки та інструментальних палітр;
- вставка та імпорт даних з файлів PDF;
- загальний доступ і використання даних з файлів DGN і карт Bing.

7.2. Autodesk Revit

Autodesk Revit – програмне забезпечення, розроблене компанією «Autodesk» для інформаційного моделювання будівель (рис. 7.3) [13].

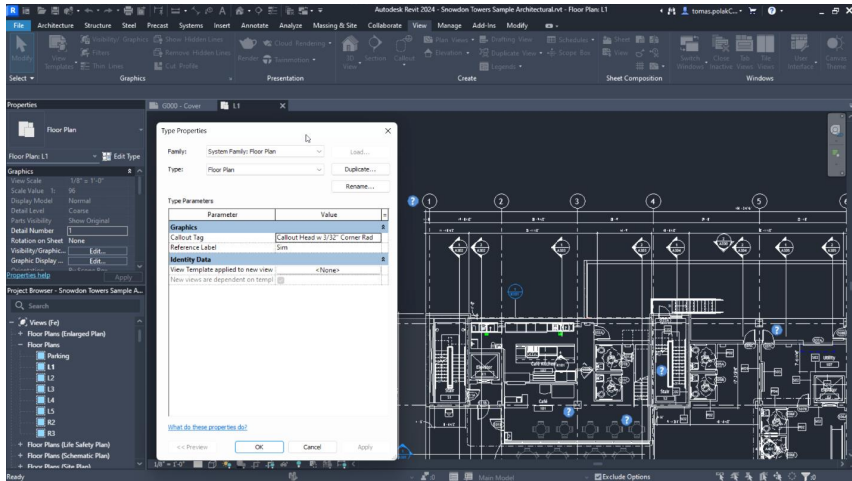


Рис. 7.3. Autodesk Revit

Призначено для архітекторів, проектувальників тримірних конструкцій та інженерних систем. Надає можливості тривимірного моделювання елементів будівлі та плоского креслення елементів оформлення, створення об'єктів, організації спільної роботи над проектом, починаючи від концепції і закінчуючи випуском робочих креслень та специфікацій.

Загалом робота в Autodesk Revit іде таким чином: загальна тривимірна модель будівлі умовно розбивається на робочі площини, звідки беруться всі елементи, що аналізуються (колони, стіни, фундаменти, перекриття). Елементи беруться із завантажених сімейств (у програмі передбачено можливість створення своїх сімейств).

7.3. Autodesk Inventor

Autodesk Inventor – система тривимірного твердотільного та поверхневого параметричного проєктування компанії «Autodesk», яка призначена для створення цифрових прототипів промислових виробів (рис. 7.4) [14].

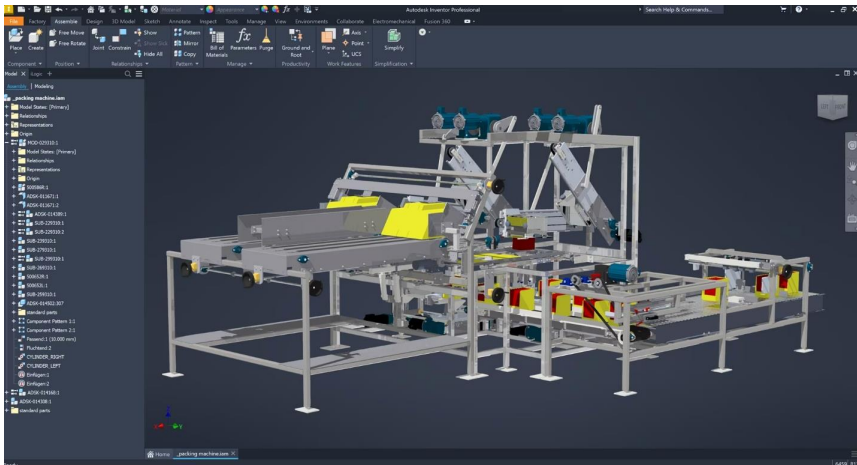


Рис. 7.4. Autodesk Inventor

Моделі деталей та виробів, що створюються в Autodesk Inventor, є їх точними цифровими 3D-прототипами, що дозволяють усебічно вивчати поведінку виробів у міру їх розробки.

Інструменти Autodesk Inventor забезпечують повний цикл проєктування та створення конструкторської документації:

- 2D- / 3D-моделювання;
- створення виробів з листового матеріалу та отримання їх розгорток;
- розробка електричних та трубопровідних систем;
- проєктування оснащення для лиття пластмасових виробів;
- динамічне моделювання;

- параметричний розрахунок напружено-деформованого стану деталей та складання;
- візуалізація виробів;
- автоматичне отримання та оновлення конструкторської документації.

7.4. Archicad

Archicad – програмний пакет для архітекторів, що базується на технології інформаційного моделювання будівель, створений компанією «Graphisoft» [15]. Призначений для проектування архітектурно-будівельних конструкцій та рішень, а також елементів ландшафту, меблів тощо (рис. 7.5).

Під час роботи в пакеті використовується концепція віртуальної будівлі. Суть її полягає в тому, що проєкт Archicad надає віртуальну модель реальної будівлі, яка існує в пам'яті комп'ютера. Для її виконання проєктувальник на початкових етапах роботи з проєктом фактично «будує» будинок, використовуючи одночасно інструменти, що мають свої повні

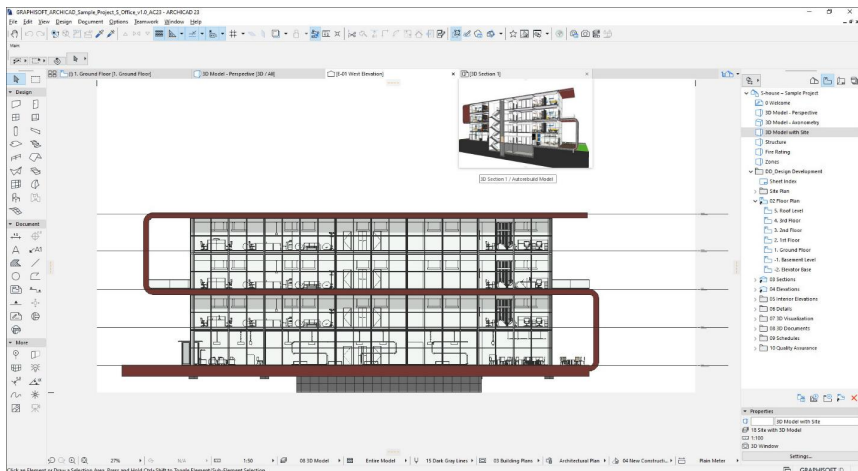


Рис. 7.5. Archicad

аналоги в реальності: стіни, перекриття, вікна, сходи, різноманітні об'єкти тощо. Завершивши етап моделювання, користувач може витягти з «віртуальної будівлі» усі необхідні дані для створення проєктної документації: плани поверхів, фасади, розрізи, експлікації, специфікації, візуалізації та інше.

7.5. SolidWorks

SolidWorks – це єдина інтегрована CAD/CAM/CAE/PDM-система, побудована за ієрархічним принципом, що базується на єдиній інформаційній моделі та встановлює загальні принципи взаємодії прикладних модулів. Вона дозволяє здійснювати автоматизоване проєктування, підготовку виробництва різних виробів та детальний інженерний аналіз (рис. 7.6).

Розроблена компанією «SolidWorks Corporation», а з 1997 року є незалежним підрозділом компанії «Dassault Systèmes» [16].

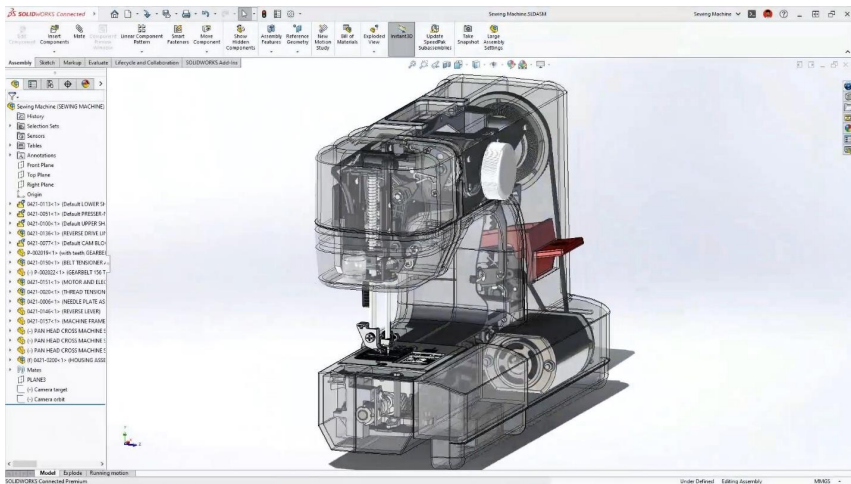


Рис. 7.6. SolidWorks

Прикладні модулі працюють на рівні єдиної інформаційної моделі, що дозволяє вирішувати низку специфічних завдань:

- виконання точних інженерних розрахунків моделі;
- аналіз технологічності виробу (сукупності властивостей конструкції, що визначає її пристосованість до досягнення оптимізації витрат на її виробництво, експлуатацію та ремонт);
- автоматизація документообігу з можливістю узгодження різних форматів документів.

Програмний пакет SolidWorks багато в чому створено на базі технології SolidWorks Intelligent Feature Technology (SWIFT). Це комплекс вбудованих експертних систем, що дозволяють на ранніх етапах проектування з високим ступенем автоматизації вирішувати завдання оптимізації проекту. Це інженерний експрес-аналіз (міцність, аеромеханіка, кінематика та динаміка механізмів), аналіз технологічності (стосовно механічної обробки або вимог до лиття пластмас), комплексна перевірка відповідності електронного документа вибраним стандартам, а також аналіз розмірних ланцюгів, перевірка складання виробу, пошук конфліктів, автоматичне проставлення розмірів та технологічних позначень і навіть автоматичне створення нового проекту на основі існуючого по низці формальних параметрів.

SolidWorks – це потужний засіб проектування, ядро інтегрованого комплексу автоматизації підприємства, що дозволяє здійснювати підтримку виробу на всіх етапах життєвого циклу в повній відповідності до концепції CALS-технологій.

7.6. Altium Designer

Altium Designer – комплексна система автоматизованого проектування електронних пристроїв, яка розроблена компанією «Altium» [17]. Ця програма з'явилася у 2000 році і спочатку мала назву «Protel». У 2006 році було проведено ребрендинг програмного продукту, і він отримав поточну назву (рис. 7.7).

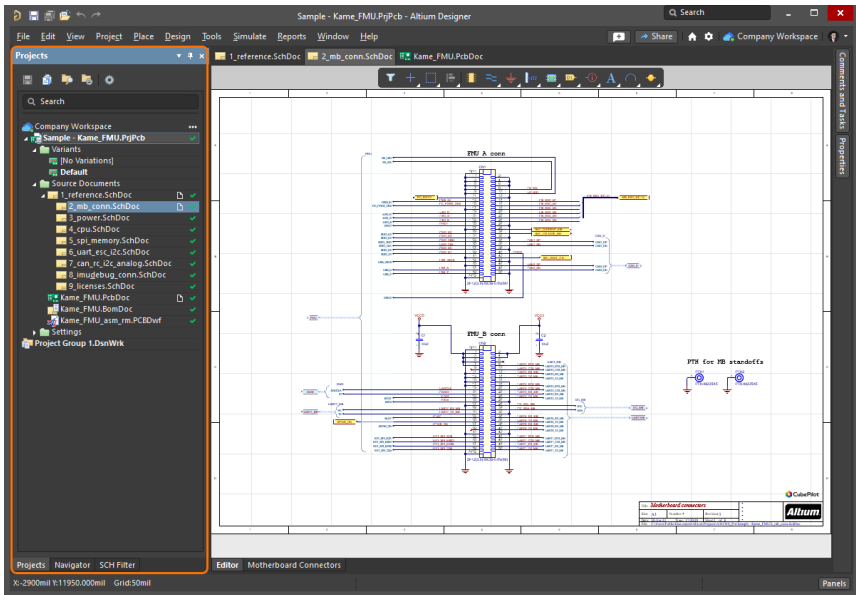


Рис. 7.7. Altium Designer

Сьогодні Altium Designer – це система, що дозволяє реалізовувати проекти електронних засобів на рівні схеми або програмного коду з подальшою передачею інформації проєктувальнику програмованих логічних інтегральних схем (ПЛІС) або ДП. Відмінною особливістю програми є проєктна структура та наскрізна цілісність ведення розробки на різних рівнях проєктування (синхронізація). Іншими словами, зміни в розробці на рівні плати можуть миттєво бути передані на рівень схеми та назад (рис. 7.8).

Розробка ДП можлива у тривимірному вигляді (рис. 7.9) з передачею інформації в механічні САПР, наприклад, Solid Works.

Цей пакет складається з двох продуктів, що базуються на єдиній інтегрованій платформі DXP. Можливість роботи з тим чи іншим залежить від типу придбаної ліцензії:

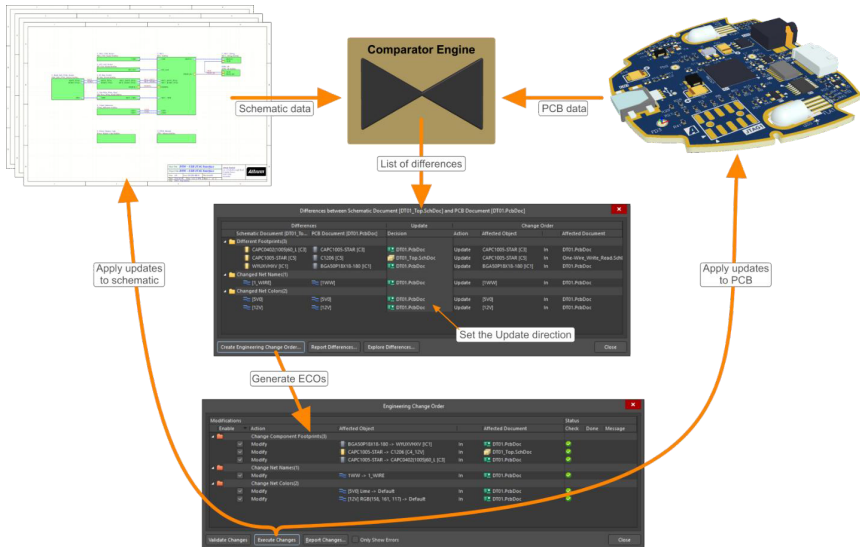


Рис. 7.8. Синхронізація між схемою та платою в Altium Designer

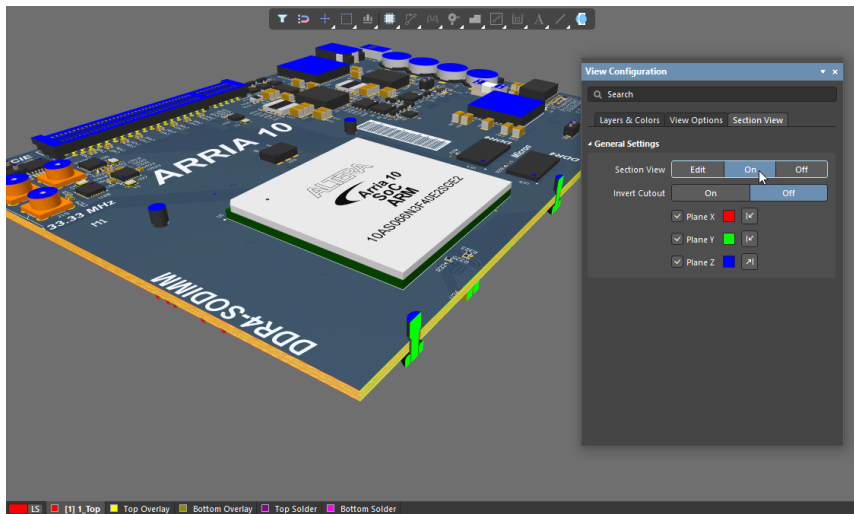


Рис. 7.9. Тривимірний вигляд плати в Altium Designer

Altium Designer Custom Board Front-End Design – проектування ПЛІС, схемотехнічне проектування та моделювання; Altium Designer Custom Board Implementation – проектування друкованих плат та ПЛІС.

До складу програмного комплексу Altium Designer входить увесь необхідний інструментарій для розробки, редагування і налагодження проєктів на базі електричних схем та ПЛІС. Редактор схем дозволяє вводити багатоієрархічні та багатоканальні схеми будь-якої складності, а також проводити змішане цифро-аналогове моделювання. Бібліотеки програми містять понад 90000 готових компонентів, у багатьох з яких є моделі посадкових місць, Spice та Ibis-моделі, а також тривимірні моделі. Будь-яку із згаданих вище моделей можна створити внутрішніми засобами програми.

Редактор друкованих плат Altium Designer містить потужні засоби інтерактивного розміщення компонентів та трасування провідників, які спільно з інтуїтивною і повністю візуалізованою системою встановлення правил проектування максимально спрощують процес розробки електроніки. Інструменти трасування враховують усі вимоги, які висуваються сучасними технологіями розробок. До складу програми входить автоматичний трасувальник Situs, у якому використовуються найпрогресивніші алгоритми трасування друкованих провідників.

Altium Designer також надає такі можливості:

Редактор бібліотек. Бібліотеки програми містять більше 90000 компонентів і постійно оновлюються, до того ж є можливість імпорту вже готових бібліотек з P-CAD 2000-2006, а також можливість створювати власні бібліотеки символів, посадочних місць, тривимірних моделей та текстових Spice-моделей для моделювання.

Моделювання. Altium Designer дозволяє виконувати стандартний набір процедур змішаного цифро-аналогового моделювання. Запуск цифро-аналогового моделювання на базі

Spice 3f5/XSpice відбувається безпосередньо із введеної принципової схеми та надає в розпорядження розробника потужні засоби аналізу, включаючи такі, як варіація параметрів та статистичний аналіз методом Монте-Карло. У комплект поставки включено понад 20000 математичних моделей.

Аналіз цілісності сигналів. Попередній розрахунок імпедансу та можливих відбитків може бути виконаний на схемотехнічному рівні ще до етапу компонування та трасування ДП, дозволяючи запобігти можливим проблемам на ранніх стадіях проектування і правильно підібрати елементну основу. Імпеданси, відбитки та можливі перехресні відбитки можуть бути уточнені на заключних етапах розробки й контролю топології. Цілісність сигналів може бути проаналізована під час верифікації топології.

Редактор друкованих плат. За допомогою потужної, повністю візуалізованої системи завдання та перевірки правил проектування, користувач отримує повний контроль над процесом розробки топології.

Трасування. Потужні можливості інтерактивного трасування, такі як трасування кількох паралельних провідників і трасування диференціальних пар, разом з раціональним набором правил проектування значно прискорюють роботу конструктора.

Вихідна документація. Altium Designer підтримує широкий перелік вихідних форматів, таких як ODB++, Gerber, NC Drill, IPC-D-356, VHDL. Він може генерувати списки з'єднань у форматах більшості сторонніх систем проектування, а також генерувати різноманітні звіти.

Робота над усіма частинами проекту ведеться в єдиній оболонці Design Explorer, що дозволяє розробнику контролювати цілісність проекту на всіх етапах проектування. Таким чином, зміни, внесені на будь-якому етапі, автоматично передаються на всі пов'язані стадії проекту. На додаток до потужних засобів розробки, Altium Designer має широкі можливості

імпорту та експорту для сторонніх систем проектування та підтримує практично всі стандартні формати вихідних файлів. Цілком підтримуються всі розробки у вигляді схем, плат та бібліотек з усіх останніх версій P-CAD.

7.7. CircuitMaker

CircuitMaker — програмне забезпечення компанії «Altium» для автоматизації проектування ДП, яке орієнтоване на професійних розробників та любителів [18]. CircuitMaker доступний як безкоштовне програмне забезпечення. Апаратне забезпечення, розроблене за його допомогою, може використовуватися в комерційних та некомерційних цілях без обмежень (рис. 7.10).

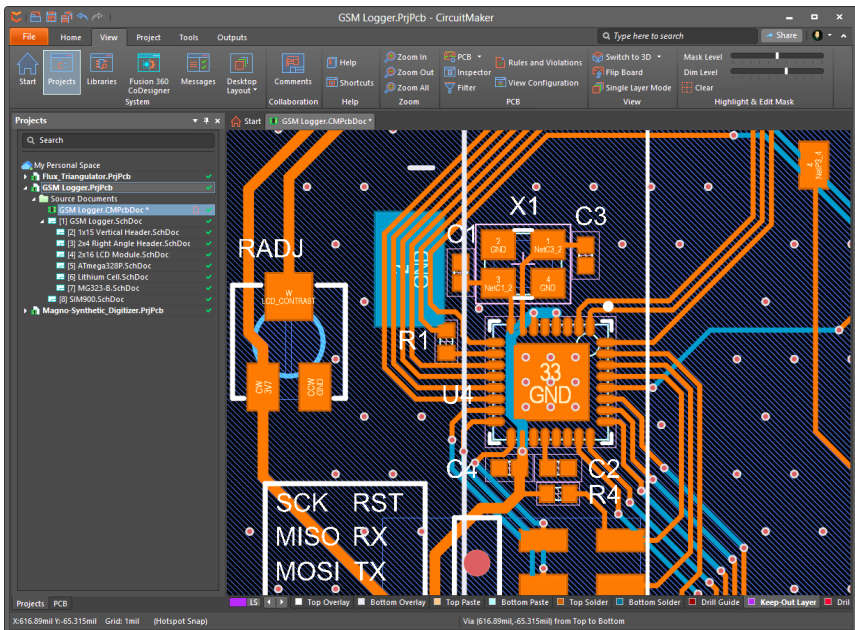


Рис. 7.10. CircuitMaker

CircuitMaker – це унікальне поєднання широкого співтовариства розробників, безкоштовного програмного забезпечення та послуг для проектування ДП, яке дозволяє кожному працювати та з легкістю ділитися знаннями.

Редактор ДП CircuitMaker має всі можливості, необхідні для розробки високоякісних схем і топологій без обмежень на площу плати.

CircuitMaker побудований на основі загальнодоступної бібліотеки із сотнями тисяч елементів, усі з яких підтримуються комплексною базою даних Octopart, що працює в режимі реального часу. Розміщувати елементи у проєктах CircuitMaker так само просто, як шукати їх за номером деталі виробника або параметрами конструкції. Також можна додавати власні елементи.

За допомогою платформи Altium 365 можна створювати проєкти та працювати над ними разом зі своєю командою або запрошувати інших членів спільноти працювати над проєктом. Проєкти можна розгалужувати та модифікувати, що дозволяє створювати нові проєкти, використовуючи досвід спільноти.

Технологія Altium Native 3D дозволяє, перебуваючи в редакторі ДП, відразу побачити трасування плати в інтерактивному тривимірному вигляді.

CircuitMaker використовує той самий простий у використанні редактор схем, що й Altium Designer. Це дозволяє створювати складні багатосторінкові проєкти та використовувати ієрархічні блоки.

Топологічний автотрасувальник Situs працює відповідно до правил проектування, що задаються, допомагаючи швидко розробити ДП. Є також можливість інтерактивно прокладати кілька ланцюгів чи окремі ланцюги, а також використовувати ручне трасування з автозаповненням.

CircuitMaker генерує вихідні дані CAM відповідно до галузевих стандартів (Gerber, NC Drill, ODB++).

7.8. EasyEDA

EasyEDA – кросплатформне веборієнтоване середовище автоматизації проектування електроніки (рис. 7.11) [19].

Проект розробляється програмістами Діллоном Хе та Еріком Куї з 2010 року. Перший реліз відбувся у 2013 р.

До складу середовища входять наступні засоби:

- редактор принципів схем;
- редактор ДП;
- SPICE-симулятор;
- редактор електронних елементів;
- генератор файлів формату GERBER;
- програма перегляду файлів GERBER;
- система управління проектами;
- система замовлення виготовлення ДП;
- хмарне сховище файлів.

Редактор схем підтримує складні проекти, що містять понад 500 аркушів та 100 000 контактів.

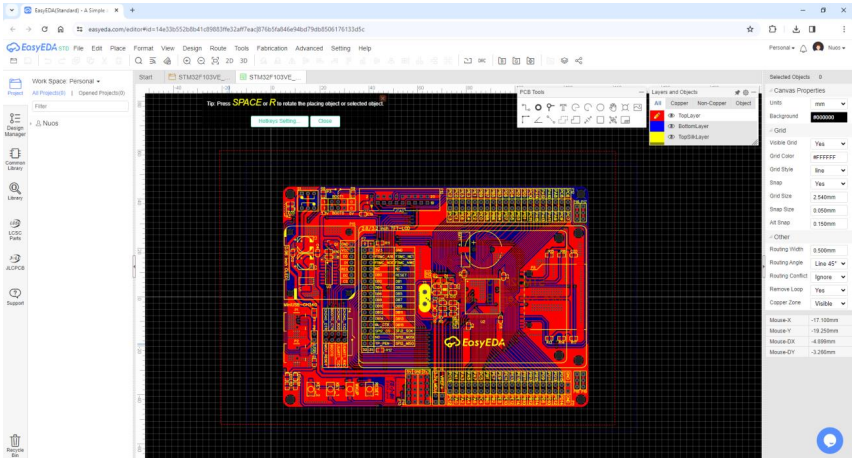


Рис. 7.11. EasyEDA

Простий у використанні інструмент вибору елементів, мільйони безкоштовних бібліотек, що включають у себе символи, посадкові місця та 3D-моделі, а також гнучке проектування модулів оптимізує процес проектування та допомагає проектувати швидше та ефективніше.

EasyEDA підтримує складні проекти з більш як 5000 елементами. Під час розробки ДП також забезпечується інтерактивне трасування. Інтуїтивно зрозумілі інструменти полегшують завдання компоновання, а також оптимізують розміщення елементів на ДП.

Уніфікований інтерфейс середовища EasyEDA пропонує як 2D-, так і 3D-візуалізацію ДП, а також програму перегляду файлів Gerber для спрощення перевірки. Власна 3D-графіка забезпечує яскраве уявлення механічного компоновання з миттєвими оновленнями.

Середовище працює на основі моделі клієнт-сервер. Клієнтська частина програми може повністю виконуватися у браузері, який підтримує стандарт HTML5. Також можлива інсталяція клієнтської частини на комп'ютері користувача.

EasyEDA забезпечує такі можливості спільної роботи:

- спільне редагування кількох користувачами одного проекту;
- створення відгалуження від опублікованого проекту;
- спільне створення бібліотек елементів;
- обговорення проектів та елементів.

7.9. Proteus Design Suite

Proteus Design Suite – пакет програм для автоматизованого проектування електронних схем, розроблений компанією «*Labcenter Electronics*» (рис. 7.12) [20].

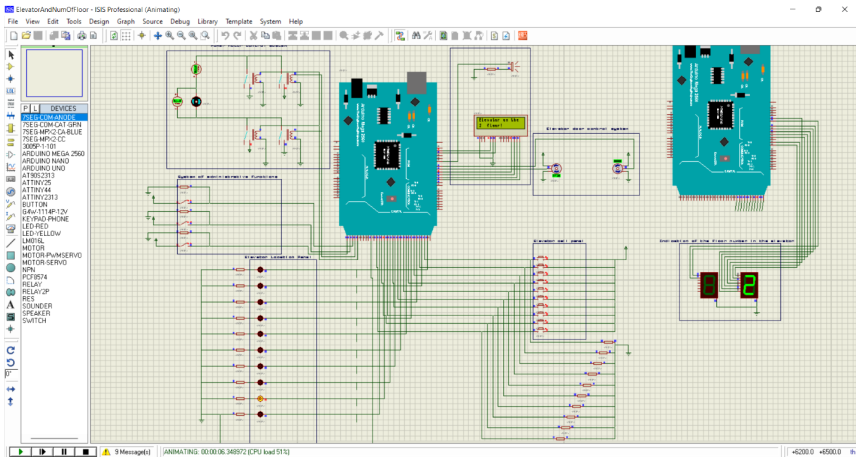


Рис. 7.12. Proteus Design Suite

Пакет є системою моделювання, що базується на основі моделей електронних компонентів, прийнятих у PSpice. Відмінною рисою пакета є можливість моделювання роботи програмованих пристроїв: мікроконтролерів, мікропроцесорів тощо. У Proteus Design Suite повністю реалізована концепція наскрізного проєктування, коли, наприклад, розробник змінює щось у логіці роботи схемотехніки, програмний пакет тут же «підхоплює» дані зміни в системі трасування. Бібліотека компонентів містить довідкові дані. Додатково до пакета входить система проєктування ДП.

Proteus Design Suite складається з двох основних частин:

- програми синтезу та моделювання електронних схем;
- програми розробки ДП.

Додатково встановлюється набір проєктів для ознайомлення.

Також до складу пакета входить додаткове середовище розробки, що дозволяє швидко написати програму для мікроконтролера, що використовується у проєкті, та скомпілювати її.

Важливою особливістю є те, що в пакеті можна побачити 3D-модель ДП, що дозволяє розробнику оцінити свій пристрій ще на стадії розробки.

Пакет підтримує підключення нових елементів (SPICE) та підключення різних компіляторів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Бучинський М. Я., Горик О. В., Чернявський А. М., Яхін С. В. Основи творення машин / за ред. О. В. Горика. Харків : Вид-во «НТМТ», 2017. 448 с.
2. ДСТУ 3321:2003 Система конструкторської документації. Терміни та визначення основних понять.
3. Наумчук О. М. Основи систем автоматизованого проєктування: Інтерактивний комплекс навчально-методичного забезпечення. Рівне : НУВГІ, 2008. 136 с.
4. Барандич К. С., Подолян О. О., Гладський М. М. Системи автоматизованого проєктування: конспект лекцій : навч. посіб. для студ. : 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», спеціалізації «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 97 с.
5. Саєнко С. Ю. Основи САПР. Харків : ХДУХТ, 2017.
6. Товстолуг З. М., Півень О. М. Інженерне проєктування технології : навч. посіб. Харків : НТУ «ХПІ», 2018. 135 с.
7. Зінгер Я. Л., Адаменко Ю. Ф. Наскрізна розробка інтелектуальної техніки. Частина 2: конспект лекцій : навч. посіб. для студ. : 172 «Електронні комунікації та радіотехніка». Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 105 с.
8. ДСТУ 2646-94. Плати друковані. Терміни та визначення.
9. IPC-6011. Generic Performance Specification for Printed Boards.
10. IPC-6012. Qualification and Performance Specification for Rigid Printed Boards.

11. AutoCAD. URL: <https://www.autodesk.com/products/autocad/overview?term=1-YEAR&tab=subscription> (дата звернення: 06.04.2024).

12. AutoCAD LT. URL: <https://www.autodesk.com/products/autocad-lt/overview?term=1-YEAR&tab=subscription> (дата звернення: 06.04.2024).

13. Autodesk Revit. URL: <https://www.autodesk.com/products/revit/overview?term=1-YEAR&tab=subscription> (дата звернення: 06.04.2024).

14. Autodesk Inventor. URL: <https://www.autodesk.com/products/inventor/overview?term=1-YEAR&tab=subscription> (дата звернення: 06.04.2024).

15. Archicad. URL: <https://graphisoft.com/solutions/archicad> (дата звернення: 06.04.2024).

16. SolidWorks. URL: <https://www.solidworks.com> (дата звернення: 06.04.2024).

17. Altium Designer. URL: <https://www.altium.com/altium-designer> (дата звернення: 06.04.2024).

18. CircuitMaker. URL: <https://circuitmaker.com> (дата звернення: 06.04.2024).

19. EasyEDA. URL: <https://easyeda.com> (дата звернення: 06.04.2024).

20. Proteus Design Suite. URL: <https://www.labcenter.com> (дата звернення: 06.04.2024).

Навчальне видання

ПРИЩЕПОВ Євген Олегович

**ОСНОВИ
АВТОМАТИЗОВАНОГО
ПРОЄКТУВАННЯ**

Навчальний посібник

Комп'ютерна правка й коректура *О. Г. Костенко*
Комп'ютерне верстання *Ю. С. Семенченко*

Формат 60×84/16. Ум. друк. арк. 9,18. Тираж 100 прим. Вид. № 33. Зам. № 0705-25.

Видавець і виготівник Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

просп. Героїв України, 9, м. Миколаїв, 54007

E-mail : publishing@nuos.edu.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6402 від 19.09.2018 р.