

**МІНІСТЕРСТВО ВНУТРІШНІХ СПРАВ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ВНУТРІШНІХ СПРАВ  
КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ ЛЬОТНИЙ КОЛЕДЖ**

**Циклова комісія технічного обслуговування авіаційної техніки**

**ТЕКСТ ЛЕКЦІЇ**

навчальної дисципліни  
«Системи автоматизованого проектування авіаційних двигунів»  
вибіркових компонент  
освітньо-професійної програми першого (бакалаврського) рівня вищої освіти

**272 Авіаційний транспорт  
Технічне обслуговування та ремонт повітряних суден і авіадвигунів**

**за темою № 3 - Системний аналіз та формалізація проектування двигунів.**

.

.

**ЗАТВЕРДЖЕНО**

Науково-методичною радою  
Харківського національного  
університету внутрішніх справ  
Протокол від 30.08.2023 № 7

**СХВАЛЕНО**

Методичною радою  
Кременчуцького льотного  
коледжу Харківського  
національного університету  
внутрішніх справ  
Протокол від 28.08.2023 № 1

**ПОГОДЖЕНО**

Секцією науково-методичної ради  
ХНУВС з технічних дисциплін  
Протокол від 29.08.2023 № 7

Розглянуто на засіданні циклової комісії технічного обслуговування авіаційної техніки, протокол від 28.08.2023 № 1

**Розробники:**

1. Старший викладач циклової комісії технічного обслуговування авіаційної техніки, к.т.н., спеціаліст вищої категорії, викладач-методист, Владов С.І.
2. Викладач циклової комісії технічного обслуговування авіаційної техніки, викладач-спеціаліст Самохліб Олександр Олександрович

**Рецензенти:**

1. Завідувач кафедри транспортних технологій Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського, доктор технічних наук, професор Мороз М.М.
2. Викладач циклової комісії аеронавігації КЛК ХНУВС, к.т.н., с.н.с. Тягній В.Г.

### План лекції:

1. Методологія традиційного проектування авіаційних двигунів.
2. Структура завдань та шляхи їх вирішення в різних проектних ситуаціях.

### Рекомендована література:

#### Основна:

1. Двигуни внутрішнього згоряння: Серія підручників. Т. 4. Основи САПР ДВЗ. / За ред. проф. А.П. Марченка, засл. діяча науки України проф. А.Ф. Шеховцова – Харків: Видавн. центр НТУ “ХПІ”, 2011. – 428 с.
2. Воронков О.І., Єфремов А.О., Жилін С.С. Сучасні технології проектування та дослідження ДВЗ (САПР ДВЗ). Частина 1. Теоретичні основи САПР: Конспект лекцій. – Харків: ХНАДУ, 2010. – 172 с.
3. Сольніцев Р.І. Автоматизація проектування систем автоматичного управління. Підручник. –К.: Вищ. шк. 2013. – 335 с

#### Інформаційні ресурси в Інтернеті

4. <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/178b106e-773e-4d58-a6ec-e031cdde998a/content>

### Текст лекції

#### 1. Методологія традиційного проектування авіаційних двигунів.

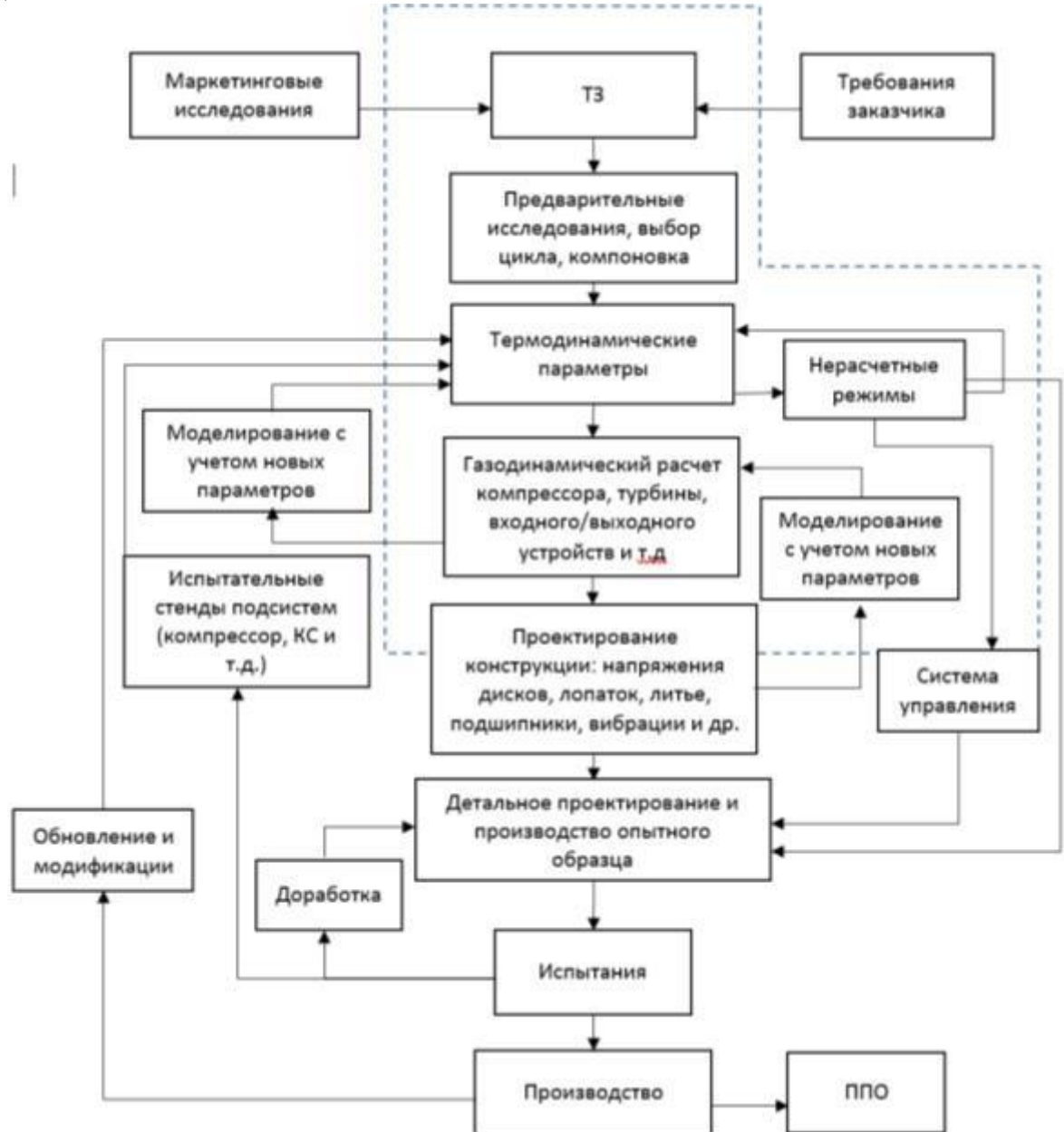
Створення газотурбінного двигуна згідно з чинним з часів СРСР ГОСТ 2.103-2013 на стадії розробки включає етапи:

- розробка технічного завдання на проектування (ТЗ);
- розробка технічної пропозиції;
- виконання ескізного проекту;
- виконання технічного проекту;
- розробка конструкторської документації. Тут немає опису зв'язків між етапами і процесами розробки двигунів.

На вітчизняних підприємствах відбувається поділ на відділи за фахом, які пов'язані між собою тільки за рахунок безлічі нарад, які часто суперечать один одному, в залежності від організатора і складу. Кожне підприємство методом проб і помилок самостійно розробляло ГТД, спираючись на авторитарну думку однієї людини - головного (генерального) конструктора, який відповідає не тільки за розробку, але і за терміни, бюджет і т. д. Як відомо з психології, одна людина може тримати в голові одночасно не більше 7 завдань. Тоді як кількість завдань, які одночасно необхідно вирішувати при розробці газотурбінного двигуна, доходить до декількох тисяч.

Неважко зрозуміти, що одній людині, навіть дуже добре підготовленим, таке завдання не під силу. Більшість завдань виникають і вирішуються «по ходу справи». Звідси виникають величезні витрати по часу, засобів і людських ресурсів. Системно-інженерний підхід є необхідністю, щоб упорядкувати і систематизувати відносини між учасниками процесу розробки двигуна. Для вирішення такого завдання можливо застосувати системно-інженерний підхід

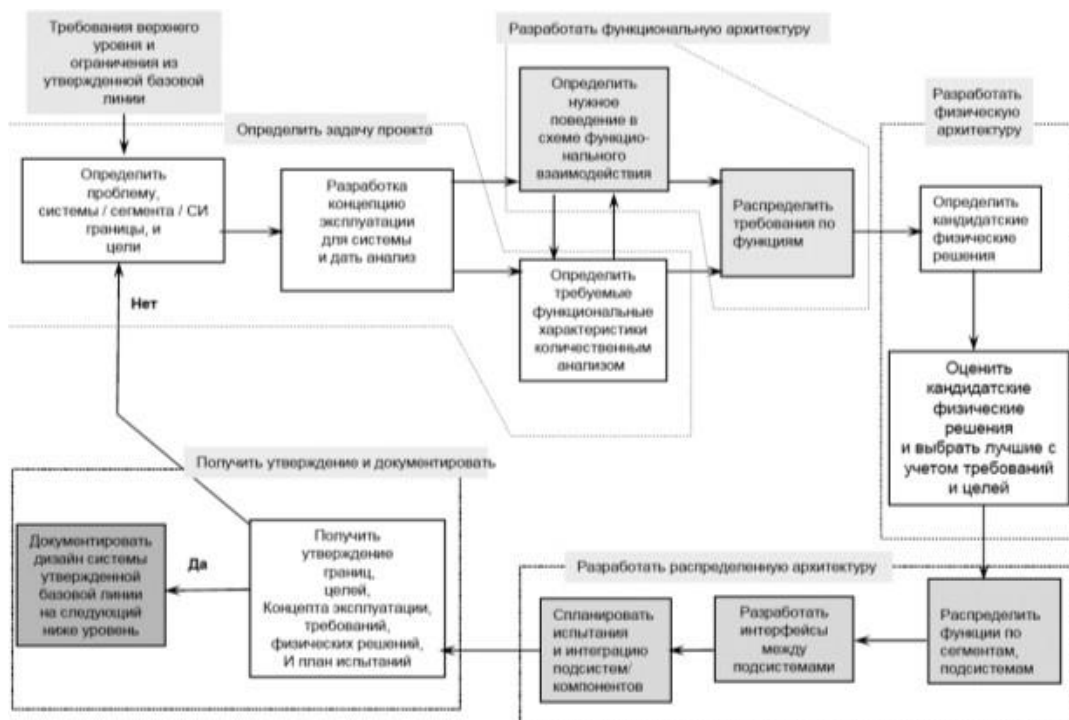
до розробки нових продуктів, в нашому випадку до розробки ГТД, де передбачена методологія ефективного використання наявного інструментарію та технологій взаємозв'язків. На початковому етапі проекту потрібно створити єдину дорожню карту розробки двигуна, всі кроки в ній залежать від досвіду підприємства і наявних ресурсів. У загальному вигляді схема розробки представлена нижче.



Область, виділена пунктиром, є однією з найважливіших складових в розробці двигуна, помилки на цьому етапі ведуть до багаторазового збільшення термінів, бюджету та, при невдалому виборі вихідних рішень, до можливого закриття проекту нового двигуна. Однією з причин таких помилок є недостатнє опрацювання вимог до двигуна і, як наслідок, до його підсистем, що веде до неоднозначного трактування вимог з боку учасників процесу розробки. При класичному підході до розробки замовник передає ТЗ на двигун виконавцям, ТЗ узгоджується по пунктах, запропонованими замовником, і виконавець приступає до розробки на основі отриманих «базових» вимог. Далі, їх потрібно

переформатувати в технічні вимоги, а також декомпонувати на вимоги до вхідних підсистем і компонентів майбутнього виробу. В результаті відбувається переузгодження вимог на стадії проектування, далі випробувань і т. д. Це відбувається в зв'язку з тим, що замовник, безумовно, знає загальні принципи, можливості, структуру ГТД і т. п. Але при цьому його знання є «одними», він не може дивитися на можливість виконання вимог «з боку розробника».

Наприклад, поставлена ним вага виробу виявляється помилковою після конструктивного опрацювання проекту, з урахуванням виконання в конструкції великої кількості інших параметрів. У системно-інженерному підході (СІ) вимоги є системоутворюючим початком. Без чіткого формулювання всієї піраміди (ієрархії) вимог немає можливості успішно продовжувати роботу. Вимоги поділяються на зовнішні (замовника) і внутрішні (системні). Повинні бути враховані навіть ті вимоги, про які замовника стадії запропонованого ТЗ ще не знає. Важливо розуміти, що відповідальність за невиконання лежить не на замовнику, а на інженерах, виконавцях. Тому в формулюванні та документуванні вимог повинні брати участь всі зацікавлені сторони без винятків. На схемі нижче представлений попередній етап процесу розробки в СІ, на ньому можна побачити важливість вищесказаного, зв'язок фундаментальних і деталізованих вимог на всіх рівнях підготовки до проектування ГТД.



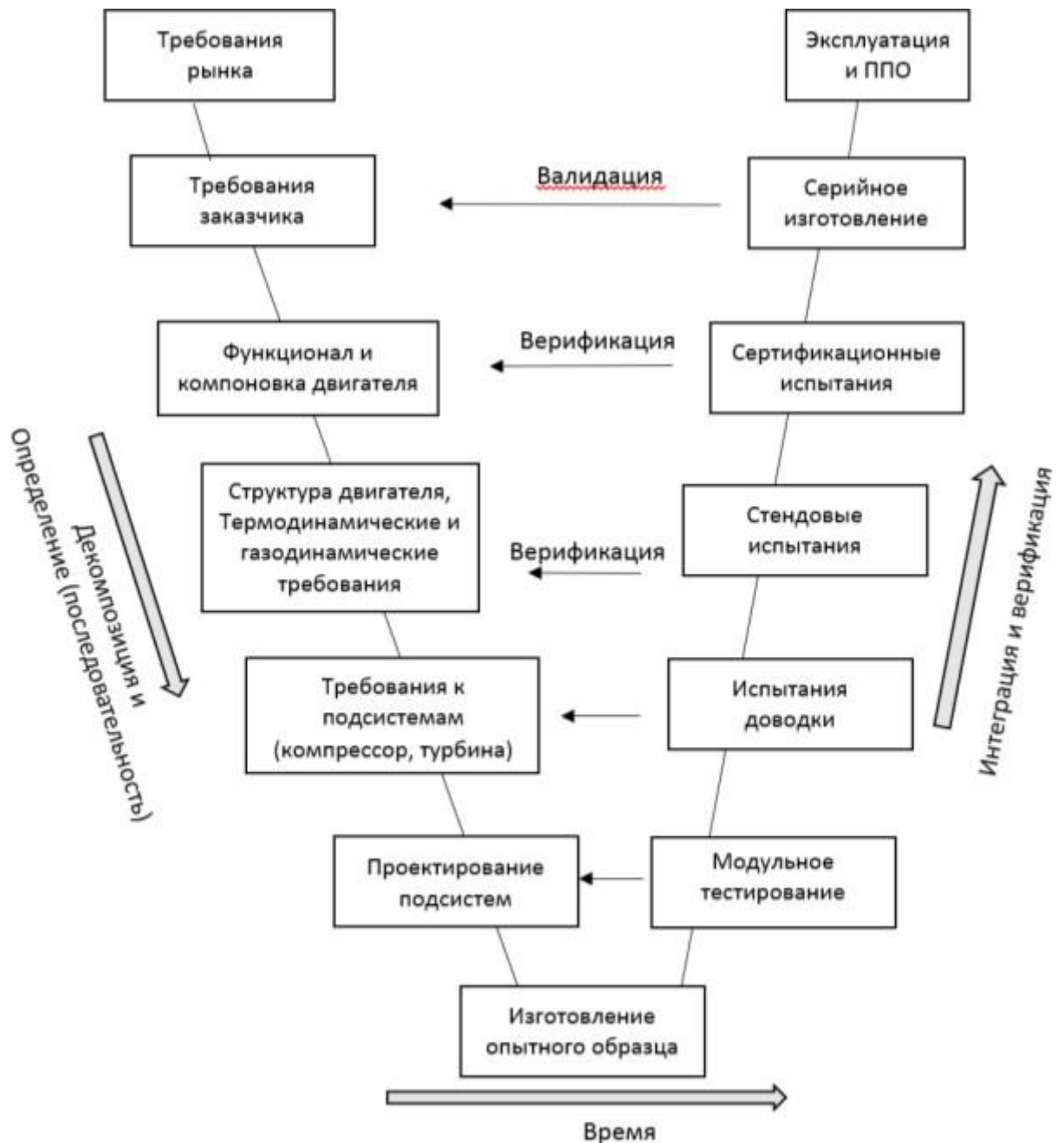
На представленій схемі згадується ще одне базове поняття процесу розробки - архітектура системи. Спочатку її визначають вимоги і обмеження верхніх рівнів - архітектурні вимоги (вага двигуна, габарити, питома витрата палива і т. д.). Архітектура проекту / системи являє собою простір, обмежений периметром, всі подальші рішення можуть бути тільки всередині заданого периметра. Припустимо структура двигуна визначена: компресор, камера згоряння, турбіна і т. д. Турбіна може бути двоступенева, а може бути і

триступенева, головне вона повинна задовольняти вимогам і обмеженням, що описує згадане вище простір. Архітектурний опис містить елементи звичного нам ескізного проекту, служить базою для видачі завдань нижче по структурній декомпозиції робіт. Архітектура системи включає:

- фізичні характеристики (структура);
- функції (поведінку);
- параметри (продуктивність);
- технологію;
- вартість;
- ризики;
- обмеження;
- межі системи;
- інтерфейси системи.

В рамках даної статті розглядаються пункти, які не використовуються в традиційних підходах проектування. Подальша розробка продукту на кожному етапі, після кожної ітерації, «зверху вниз» (декомпозиція) і «знизу вгору» (синтез рішення), обов'язково перевіряється на відповідність архітектурі системи. Тим самим мінімізуються втрати з початкових стадій розробки до кінцевих, мобілізуючи великі ресурси на вироблення проектних рішень на початковому етапі. Така схема розробки в системній інженерії контролюється процесами верифікації та валідації. Наочно уявити ці процеси, поряд з вищесказаними описами вимог і архітектури двигуна, можливо у вигляді V-діаграми / V-моделі, що широко відома в системному інжинірингу. У цій діаграмі наочно показані описані вище складові і переваги системно-інженерного підходу. Кожен етап верифіціюється. Процес верифікації і валідації займає близько 30% витрат на розробку, але ці витрати виправдані, так як дозволяють покроково фіксувати відповідність вимогам на всіх рівнях розробки. В даний час, з активним розвитком у бік якості відповідного програмного забезпечення, існує можливість знизити ці витрати - деякі випробування і тести можна проводити на віртуальних моделях двигуна або підсистем. Відповідність таких тестів натурних випробувань контролюється по обмеженому обсязі натурних випробувань, і по деяких позиціях досягає 99%.

Відсутність верифікації хоча б на одному з нижніх рівнів може привести далі до багаторазового збільшення вартості і термінів всієї розробки. Важливо відзначити, що процес валідації (приймання) повинен не тільки задовольнити ТЗ на двигун, а й задовольняти використання системи (повітряному судну) до складу якої входить розроблена система (двигун), що є в цьому випадку підсистемою.



Проектування проводиться в декілька стадій, які складаються з етапів.

- Стадія 1. Формування вимог до автоматизованих систем (АС). На цій стадії необхідно провести обстеження об'єкта, сформулювати вимоги до АС.
- Стадія 2. Розробка концепції АС. Проводиться вивчення об'єкта проведенням необхідних науково-дослідних робіт. Аналізуються, вибираються і обґрунтовуються варіанти концепцій, аналізуються варіанти АС.
- Стадія 3. Технічне завдання. На основі 1 та 2 стадій затверджуються проектні рішення по всій системі і її частинах у вигляді документації.
- Стадія 4. Ескізний проект. Є продовженням стадії 3. В ескізному проекті розглядаються попередні проектні рішення для всієї АС і її частин, оформляється додаткова документація.
- Стадія 5. Технічний проект. Розробляється проектне рішення по всій АС і її частинах. Розробляється і оформлюється документація на обладнання,

його розробку і комплектацію. Розробляються і оформлюються технічні завдання на розробку засобів автоматизації для проектування системи в суміжних підрозділах.

- Стадія 6. Робоча документація. Це та проектна документація, за якою реалізується проект, проводиться уточнення проектних рішень. Розробляється і адаптується проектне забезпечення.

- Стадія 7. Введення в експлуатацію. Проводиться підготовка об'єкта до введення в дію, підготовка обслуговуючого персоналу. Виконуються будівельно-монтажні роботи, пуско-налагоджувальні роботи, проводяться попередні випробування, проводиться дослідна експлуатація.

- Стадія 8. Супроводження АС. Проводяться приймальні випробування відповідно з гарантійними зобов'язаннями, а також післягарантійне обслуговування системи.

## **2. Структура завдань та шляхи їх вирішення в різних проектних ситуаціях**

Етапи з засобу створення проекту САПР на системному рівні:

1. Збір даних про зміст і обсяги проектних робіт.
2. Побудова маршрутів проектування: індивідуальні маршрути поєднуються в узагальнені, тобто послідовності проектних процедур з можливими розгалуженнями; встановлюються основні інформаційні зв'язки між процедурами і середовищем; визначаються які зв'язки будуть здійснюватися через БД із конкретизацією типів БД.
3. Установлення залежності між характеристиками проєктованих об'єктів розмірності їхніх математичних моделей і витратами обчислювальних ресурсів проектних процедур.
4. Визначення структури технічного забезпечення САПР: □ вибір типу локальної обчислювальної мережі;
  - розподіл функцій керування по рівнях структури або вузлам мережі;
  - розподіл БД по рівнях або вузлам мережі;
  - вибір ЕОМ для кожного з рівнів.
5. Формулювання завдань на модернізацію або розробку (придбання) нових програмних комплексів і їхніх компонентів (використовуються в каталозі програмних і технічних засобів, аналізується САПР у даній або родинній операціях); досліджуються можливості адаптації існуючих САПР до конкретних умов застосування.
6. У випадку відсутності результату формується ТЗ на розробку оригінальних програм і програмних комплексів.
7. Розподіл проектних процедур і ПЗ по вузлах обчислювальної мережі по рівнях комплексу технічних засобів.
8. Оцінка кількості обладнання. Ця задача вирішується з використанням залежностей, отриманих на етапі 3 і параметрах, отриманих на етапах 4, 5. Визначають потреби обчислювальних ресурсів для виконання одного проекту для кожного класу проєктованих об'єктів. Потім перераховують у загальні



потреби з урахуванням даних першого етапу. Результати цих розрахунків дозволяють установити кількість одиниць обладнання тих типів, що вибрали на етапі 4.

9. Вибір структури і методу доступу до обчислювальної системи (способи зв'язку проектувальників і ЕОМ).

10. Складання моделі, що імітує функціонування САПР. Структура моделі визначається за даними етапів 2, 4, 6, 7, 8.

Технічні засоби відображаються у виді обслуговуючих апаратів.

Маршрути проектування представляються у виді шляхів проходження заявок між обслуговуючими апаратами і вузлами мережної моделі.

Виконувані проекти в базі заявок визначається даними, отриманими на етапі 1; часи обслуговування в пристроях задаються з урахуванням параметрів обслуговуючих апаратів (дані етапів 4.5), а також параметрів заявок, що надходять. У системі імітаційного моделювання також відображується дисципліна обслуговування заявок, що обслуговує черговість виконання проектних робіт.

Виконання чисельних експериментів з мережною й експертною моделлю і коректування проекту САПР по їх результатах.

Результати моделювання:

- терміни виконання проекту;
- оцінка продуктивності САПР;
- коефіцієнти завантаження обладнання САПР;
- довжини черг для обраної структури САПР і дисципліни обслуговування.

Коректування проекту САПР.

Перевіряється правильність рішень, прийнятих на етапах 4-8. Оцінюється прийнятність прийнятої дисципліни обслуговування, вносяться зміни в проект САПР, повторюється процедура верифікації САПР, повторюються етапи 9-10.

Техніко-економічний аналіз проекту, його оформлення і утвердження.

Реалізація етапів розробки САПР доцільно з застосуванням інструментальної системи розробки САПР. Для цих цілей використовується:

- експертна система синтезу проектних рішень – містить базу знань, створену на основі накопиченого досвіду розробки САПР і баз даних;
- системи програмування – сучасні системи для швидкісної розробки додатків САПР.
- підсистеми імітаційного моделювання – базуються на загальнометових мовах моделювання, або мовах мереж Петри.