



Факультет інформатики та обчислювальної техніки

Кафедра автоматики і управління в технічних системах

Дисципліна «Системна інженерія»

<https://do.ipk.kpi.ua/>

Семестр 6.

Розділ 2.

Тема 2-1. Процес розробки системи.

Викладач: Сокульський Олег Євгенович –
старший викладач кафедри автоматики і управління в технічних
системах, кандидат технічних наук

Київ, 2019

Умовні скорочення

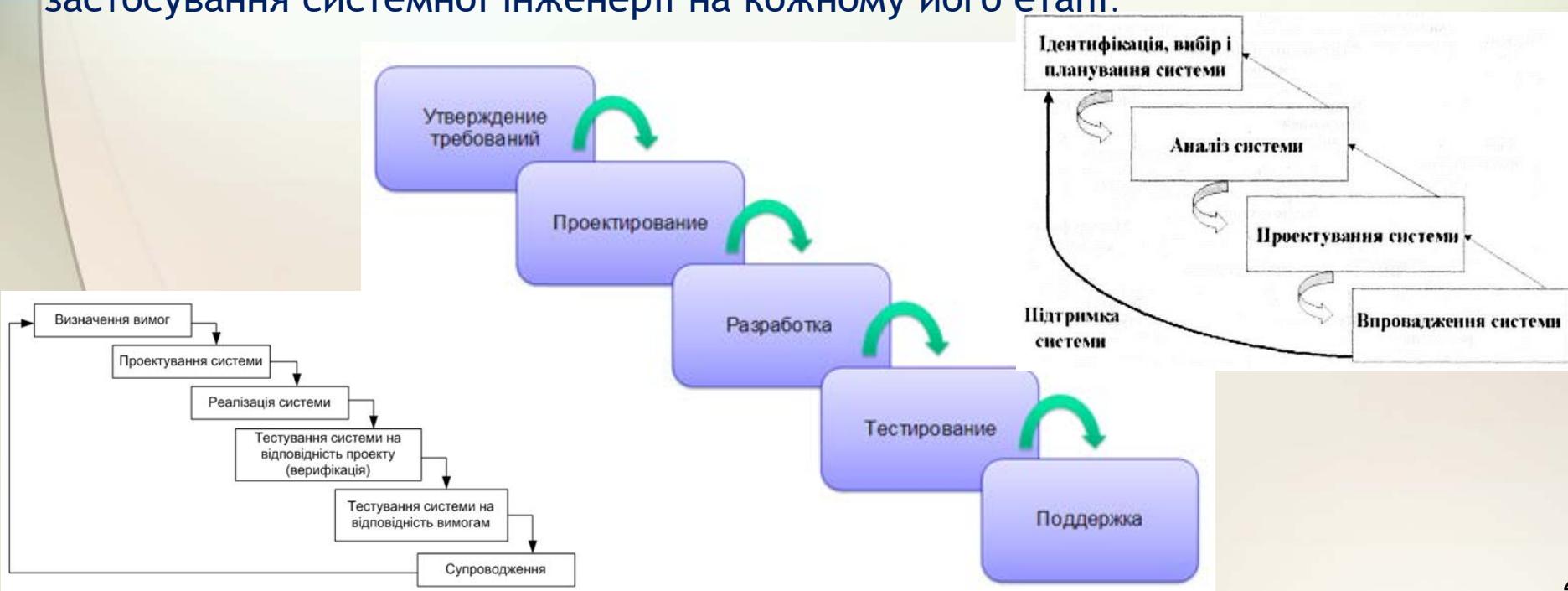
скорочення	повна назва
ЖЦ	життєвий цикл
МО	міністерство оборони
ПЗ	програмне забезпечення

План лекцій:

1. Застосування системної інженерії протягом життєвого циклу системи.
2. Життєвий цикл системи.
3. Еволюційні характеристики процесу розробки.
4. Метод системної інженерії.
5. Випробування протягом розробки системи.

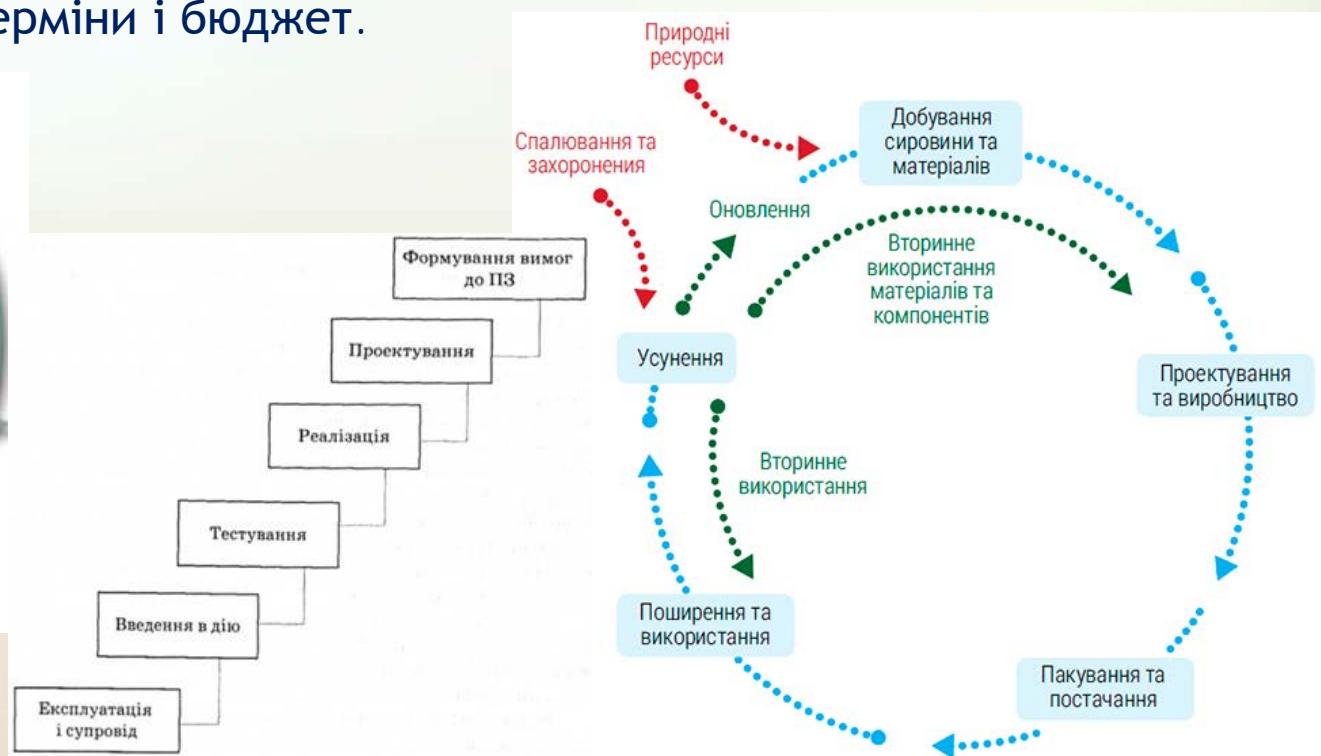
1. Застосування системної інженерії протягом життєвого циклу системи.

Раніше зазначалося, що сучасні комплексні системи виникали або у відповідь на потреби суспільства, або внаслідок нових технічних можливостей, що з'являлися у міру розвитку технологій, або по обидва причин відразу. Еволюція нової системи з моменту усвідомлення потреби в ній і ідентифікації технічного підходу, придатного для реалізації задуму на всьому протязі розробки і подальшого введення в експлуатацію, є складною послідовністю перетворень, яку ми далі будемо називати процесом розробки системи. Тема присвячена опису базового процесу розробки системи і застосування системної інженерії на кожному його етапі.



Розробка типової великої системи характеризується наступними ознаками:

- це комплексна і складна діяльність;
- має на меті задоволення важливої потреби користувача;
- займає багато часу (від початку до завершення розробки зазвичай проходить кілька років);
- має на увазі рішення великого числа взаємопов'язаних завдань;
- використовує досягнення декількох різних дисциплін;
- зазвичай здійснюється кількома організаціями;
- має конкретні терміни і бюджет.



Розробка і подальше введення в експлуатацію складної системи, по суті, вимагають все більших і більших ресурсів у міру еволюції цієї системи від появи задуму до подальшої розробки інженерно-технічних рішень і далі до виробництва та використання за призначенням. До того ж, впровадження нових технологій неминуче пов'язане з ризиками, які необхідно якомога раніше виявити і спробувати усунути. Ці фактори змушують вести розробку крок за кроком, коли перед прийняттям рішення про перехід до наступного кроку демонструється успішне завершення попереднього і перевіряється правильність обґрунтування продовження робіт.



2. Життєвий цикл системи.

Термін «життєвий цикл системи» зазвичай вживається для позначення покрокової еволюції нової системи від задуму через розробку до виробництва, експлуатації та, в кінцевому рахунку, ліквідації.

Життєвий цикл системи (System Life Cycle) - 1. Еволюція в часі цільової системи від концепції до утилізації (ISO/IEC 15288). 2. Хід пов'язаних з розвитком змін, через які проходить система, починаючи від її задуму і до виходу з обігу (ISO/IEC 2382).

У міру переходу від аналізу на ранніх стадіях розробки концепції до розробки інженерно-технічних рішень і випробувань і далі до виробництва і експлуатації роль системної інженерії змінюється. Як було сказано вище, організація курсу відповідає структурі ЖЦ системи, щоб студенту було зрозуміло, як функції системної інженерії співвідносяться з її ролями протягом різних періодів існування системи. У цій темі ми дамо огляд процесу розробки системи і тим самим закладемо основи для більш докладного розгляду кожної стадії в наступних темах.



Розробка прийнятої в курсі моделі життєвого циклу для системного інженера

Моделі ЖЦ систем за останні 20 років бурхливо розвивалися. Зросла і кількість моделей - як реакція на дослідження нових унікальних і нестандартних додатків. До всього іншого, програмна інженерія дала початок численним моделям розробки, які були позитивно сприйняті спільнотою фахівців з системної інженерії. В результаті виявилося, що не існує єдиної моделі ЖЦ, яка 1) була б прийнята повсюдно і 2) відповідала будь-якій ситуації. Різні організації по стандартизації, урядові агентства та інженерні спільноти опублікували власні моделі або концептуальні засади, за допомогою яких можна сконструювати модель. Тому покласти в основу якусь одну модель було б нерозумно.



На щастя, всі відомі моделі припускають дроблення періоду існування системи на ряд основних кроків, які поділяються точками прийняття найбільш важливих рішень. Тому при побудові моделі ЖЦ, яка могла б стати підходящею концептуальною основою, ми тримали в полі зору 2 основних мети: 1) стадії ЖЦ повинні відповідати поступового переходу від одного принципово важливого виду діяльності системного інженера до іншого; 2) повинна існувати можливість встановлення відповідності між цими стадіями і найбільш вживаними моделями ЖЦ, які застосовуються системними інженерами. Отриману в результаті модель будемо називати «життєвим циклом для системного інженера». В її основу покладено три джерела: модель керівництва закупівлями Міністерства оборони США (DoD 5000.2), міжнародна модель ISO/IEC 15288 та модель Національної асоціації професійних інженерів (National Society of Professional Engineers - NSPE).



DO D INSTRUCTION 5000.02

OPERATION OF THE ADAPTIVE ACQUISITION FRAMEWORK



NATIONAL SOCIETY OF
PROFESSIONAL ENGINEERS

INTERNATIONAL
STANDARD

ISO/IEC/
IEEE
15288

First edition
2015-05-15

Systems and software engineering —
System life cycle processes

Ingénierie des systèmes et du logiciel — Processus du cycle de vie du système

Модель управління закупівлями МО США

У другій половині ХХ в. США були на передньому краї розробки великомасштабних складних бойових систем: військових кораблів, літаків, танків і систем командування і управління. Для управління ризиками, пов'язаними із застосуванням передових технологій, і мінімізації збитку від технічних і адміністративних невдач МО розробило всеосяжні керівництва щодо закупівлі систем озброєнь, які були випущені в вигляді директив МО США серії 5000. На рисунку показана версія моделі ЖЦ МО США (осінь 2008 р.).



PDR – предварительный анализ проектных решений;
CDR – критический анализ проектных решений;

LRIP – начальное производство в небольших объемах;

FRP – производство в промышленных объемах;

IOT & E – приемочные испытания и аттестация;

IOC – начальная готовность к эксплуатации;

FOC – полная готовность к эксплуатации

Модель включає 5 стадій: аналіз рішення про матеріали, розробка технології, розробка інженерних і виробничих рішень, виробництво і розгортання, експлуатація та супровід. Два види діяльності - визначення потреб користувача і технічних можливостей і ресурсів - вважаються частиною процесу, але не представлені в якості формальної складової частини циклу закупівель.



PDR – предварительный анализ проектных решений;
 CDR – критический анализ проектных решений;
 LRIP – начальное производство в небольших объемах;
 FRP – производство в промышленных объемах;
 IOT & E – приемочные испытания и аттестация;
 IOC – начальная готовность к эксплуатации;
 FOC – полная готовность к эксплуатации

Модель орієнтована на управління розробкою великих і складних систем, коли проведення аналізу та прийняття рішень зв'язуються з ключовими подіями протягом ЖЦ. Найбільш відповідальний аналіз виконується в так званих точках прийняття рішень (A, B і C). Для кожної з цих 3 найважливіших точок прийняття рішень визначаються умови входу і виходу. Наприклад, в точці A документ з описом вимог повинен бути затверджений військово-технічним комітетом з нагляду - тільки після цього дозволено перехід до наступної стадії. Крім 3 ключових точок прийняття рішень процес передбачає 4 додаткові: рішення про розробку матеріалів, попередній аналіз проектних рішень (PDR), критичний аналіз проектних рішень (CDR) і аналіз рішення про виробництво в промислових обсягах (FRP).



Таким чином, керівництво МО США має можливість проаналізувати і прийняти рішення про майбутнє програми в 7 різних точках протягом ЖЦ.

PDR – предварительный анализ проектных решений;
 CDR – критический анализ проектных решений;
 LRIP – начальное производство в небольших объемах;
 FRP – производство в промышленных объемах;
 IOT & E – приемочные испытания и аттестация;
 IOC – начальная готовность к эксплуатации;
 FOC – полная готовность к эксплуатации

Міжнародна модель ISO / IEC 15288

У 2002 році Міжнародна організація по стандартизації (International Organization for Standardization - ISO) і Міжнародна електротехнічна комісія (International Electrotechnical Commission - IEC) випустили плід багаторічної праці - стандарт з системної інженерії ISO/IEC 15288 «Системна інженерія - процеси життєвого циклу системи». У базовій моделі виділяються 6 стадій і 25 основних процесів. Передбачається, що процеси включають сукупність різних видів діяльності, яка може здійснюватися на основних стадіях. Стандарт навмисно не розподіляє процеси по стадіях. Шість базових стадій такі: задум, розробка, виробництво, експлуатація, супровід і списання.

Модель Національної асоціації професійних інженерів

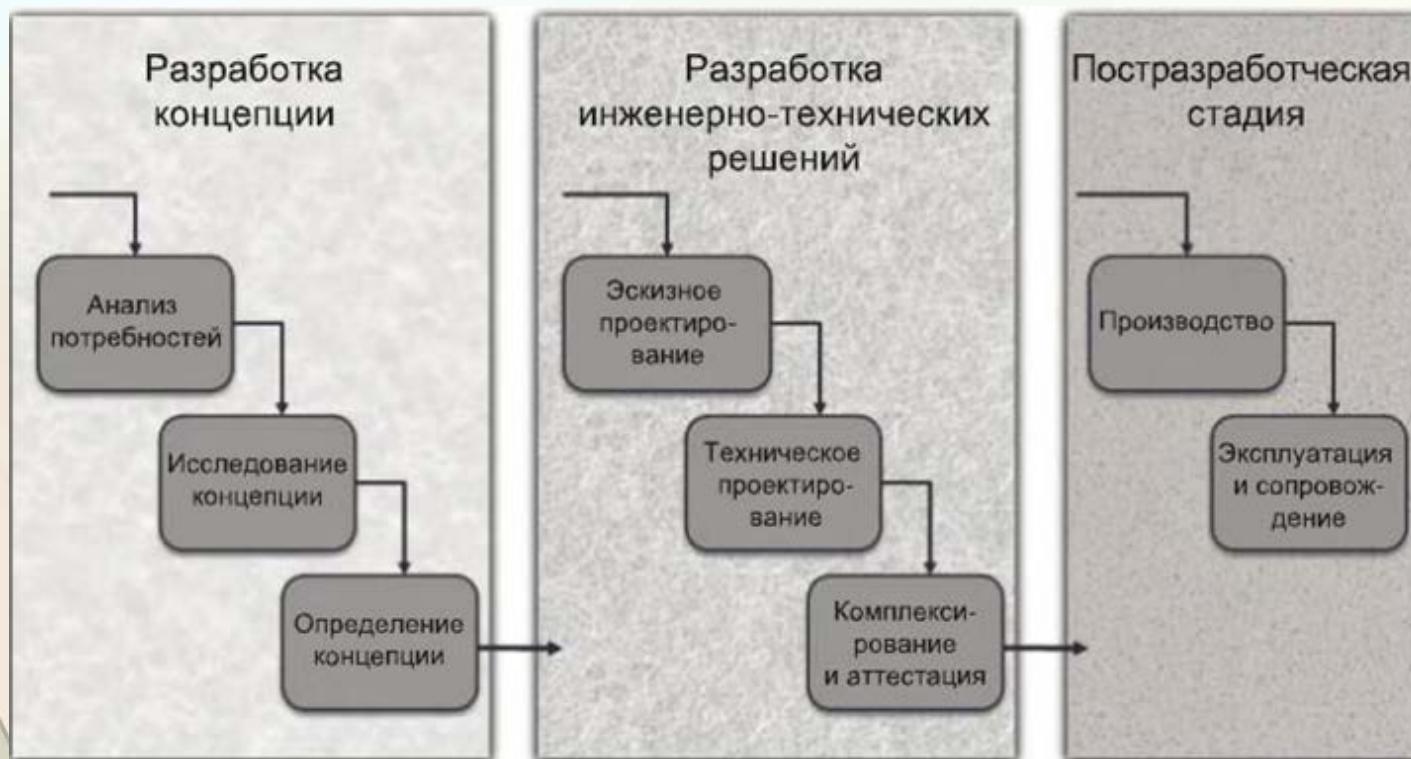
Модель NSPE орієнтована на розробку комерційних систем і, перш за все, нових виробів, виробництво яких, як правило, стимулюється технічним прогресом («технологічно обумовлено»). Таким чином, модель NSPE - це корисна альтернатива моделі МО США в тому, що стосується поділу ЖЦ типової системи на стадії. В ЖЦ NSPE виділяються 6 стадій: задум, оцінка технічної можливості бути реалізованим, розробка, комерційна валідація і підготовка до виробництва, повномасштабне виробництво і супровід виробу.

Модель життєвого циклу для системного інженера

При побудові моделі ЖЦ, яка відображала б істотні переходи від одного виду діяльності системного інженера до іншого протягом існування системи, виявилося, що зручніше за все розбити ЖЦ на 3 великих стадії, а їх, у свою чергу, - на 8 етапів.

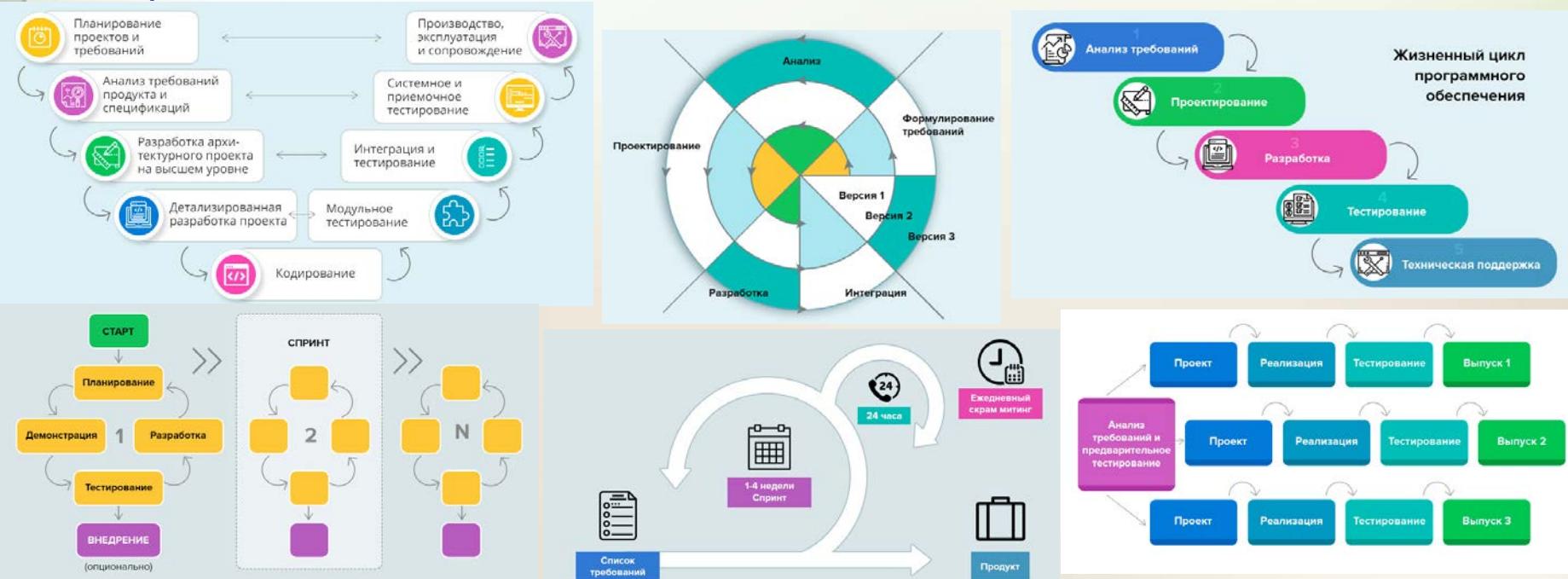
Стадія (Stage) - період часу протягом ЖЦ об'єкта, який відноситься до певного стану його реалізації або опису (ISO/IEC 12207, ISO/IEC 15288).

Назви стадій обрані з тим розрахунком, щоб в них відбивалася принципово важлива діяльність, що має місце на кожному етапі процесу. Деякі назви неминуче збігаються або, у всікому разі, корелюють з назвами аналогічних частин в інших існуючих моделях ЖЦ.



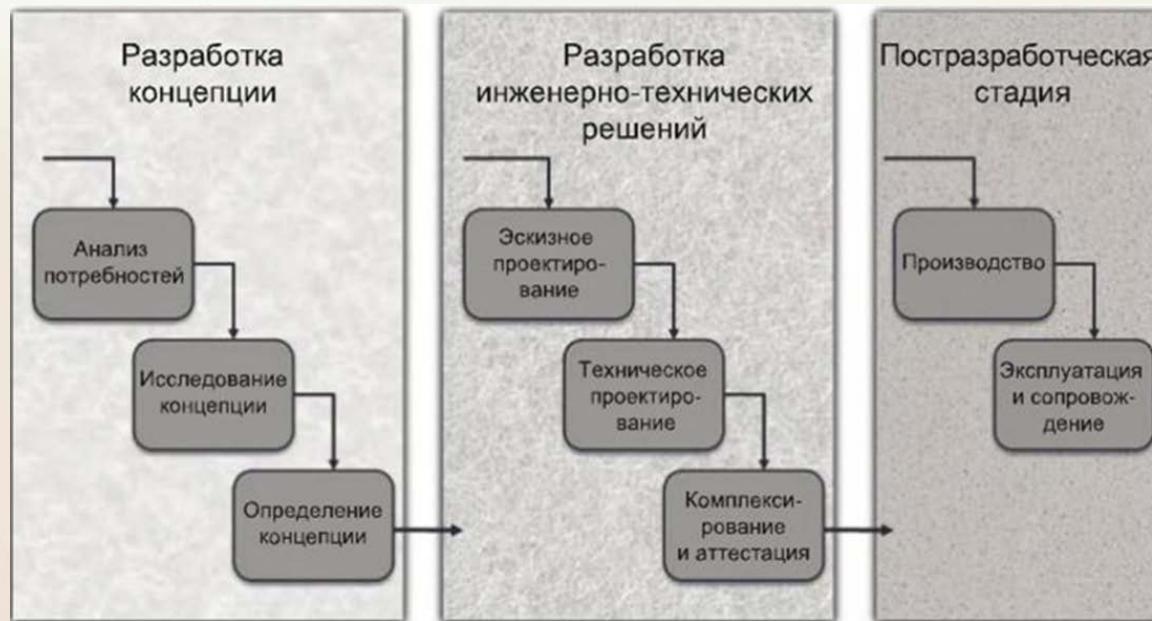
Моделі життєвого циклу програмного забезпечення

Стадії ЖЦ системи та складові їх етапи, представлені в розглянутих вище моделях, застосовні до більшості складних систем, в тому числі зі значною часткою ПЗ на рівні компонентів. Однак ЖЦ систем, в яких практично всі функціональні можливості втілені в ПЗ (наприклад, в сучасних фінансових системах, системах резервування авіаквитків, веб- та інших ІС), хоча і схожий за формою, але в загальному випадку включає кілька ітерацій і розробку прототипу. Далі описуються відмінності між ПЗ і обладнанням, обговорюються види діяльності на основних стадіях розробки ПЗ і наведена тема з прикладами ЖЦ програмно насичених систем. З цим застереженням модель ЖЦ для системного інженера, яка вивчається, дає природну основу для опису переходу системного інженера від одного виду діяльності до іншого протягом існування інженерно насичених систем.

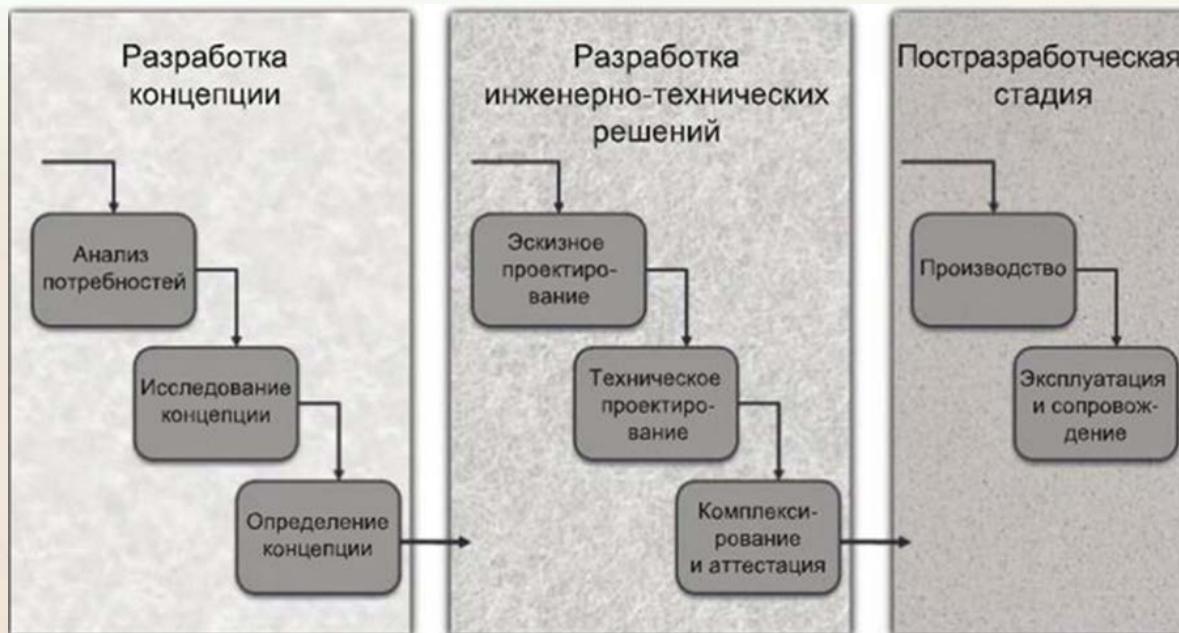


Стадії в моделі життєвого циклу для системного інженера

Як було сказано вище і показано, модель ЖЦ системи включає 3 стадії, з яких перші 2 охоплюють частину ЖЦ, що відноситься до розробки, а остання - період після закінчення розробки. Ці стадії відзначають найбільш важливі переходи в ЖЦ системи, а також зміни типу і предмета діяльності системного інженера. Ми будемо називати стадії наступним чином: 1) стадія розробки концепції - вона охоплює початковий період, коли формується і вибирається концепція системи, реалізація якої дозволяє найкращим чином задоволити встановлені потреби; 2) стадія розробки інженерно-технічних рішень - вона охоплює переход від концепції системи до минулого успішну валідацію проекту фізичної реалізації системи, що відповідає експлуатаційним, вартісним і тимчасовим вимогам; 3) построзвробницька стадія - вона включає виробництво, розгортання, експлуатацію та супровід системи протягом усього терміну її служби. Назви стадій обрані відповідно до основним типом діяльності.

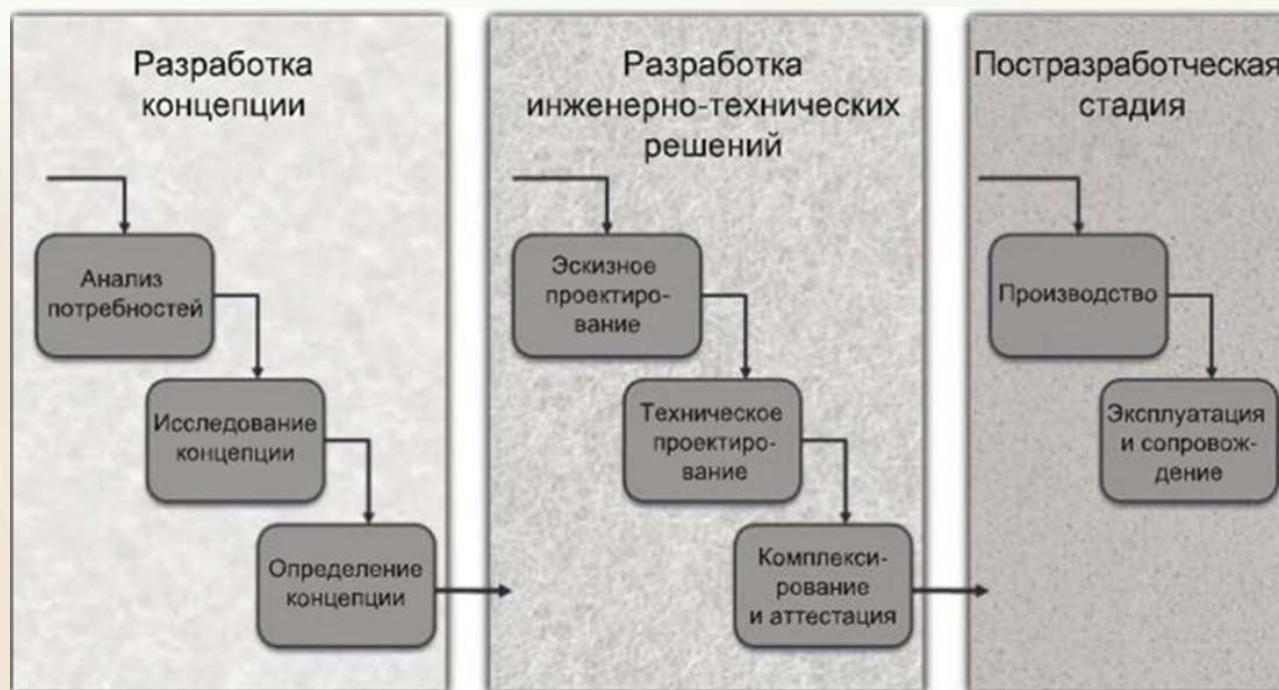


На стадії розробки концепції, як випливає з самої назви, виконуються аналіз і планування з метою встановити, чи дійсно є потреба в новій системі, чи існує технічна можливість її реалізації і яка архітектура зможе найкращим чином задоволити потреби користувача. Системна інженерія грає провідну роль в перекладі з мови практичних потреб на мову технічно і економічно реалізованої концепції системи. Майер і Рехтін (Maier, Rechtin, 2009) називають цей процес «розробкою системної архітектури» (systems architecting), використовуючи аналогію з архітектором будівлі, який переводить потреби замовника на мову планів і специфікацій, завдяки чому підрядник може взяти участь в тендерах і приступити до будівництва. Обсяг роботи на цій стадії зазвичай набагато менше, ніж на наступних. Вона відповідає аналізу рішення про застосування матеріалів і розробці технології в моделі МО США.

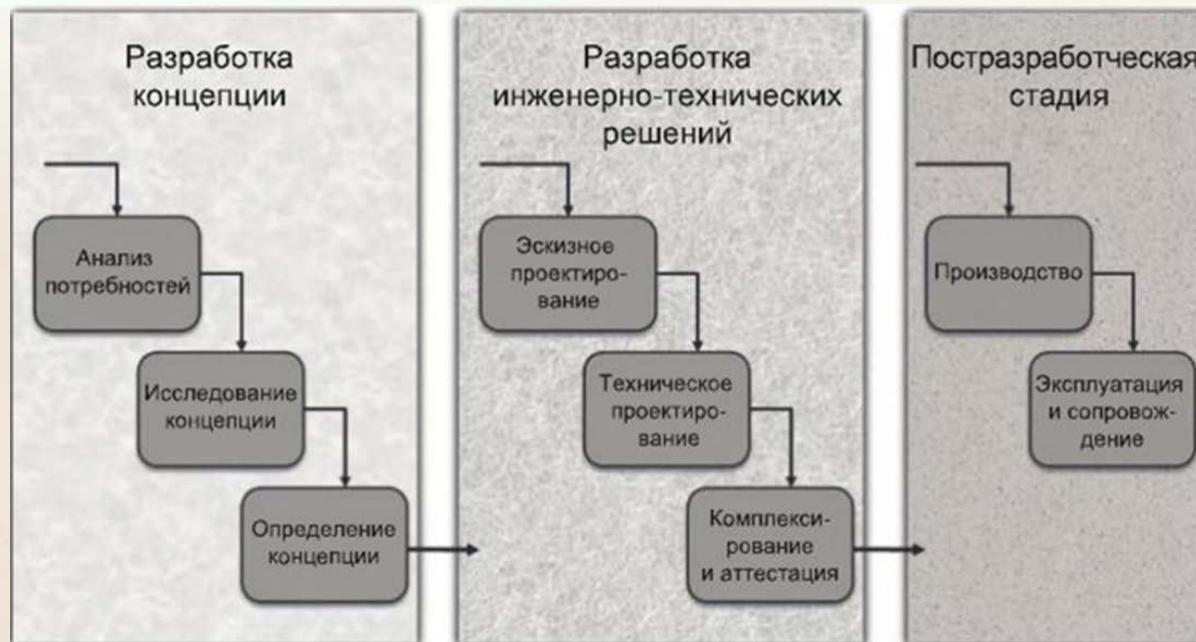


Основні цілі стадії розробки концепції такі:

1. Переконатися в тому, що потреба в новій системі, так само як і ринок для неї, дійсно існують, а також в тому, що є технічні та економічні можливості її створення.
2. Дослідити можливі концепції системи, сформулювати і схвалити сукупність вимог до її поведінки.
3. Вибрати найкращу концепцію системи, визначити її функціональні характеристики і скласти детальний план подальших етапів розробки, виробництва і введення системи в експлуатацію.
4. Розробити нові технології, необхідні для реалізації прийнятої концепції, і переконатися в їх здатності задовольняти вимоги.

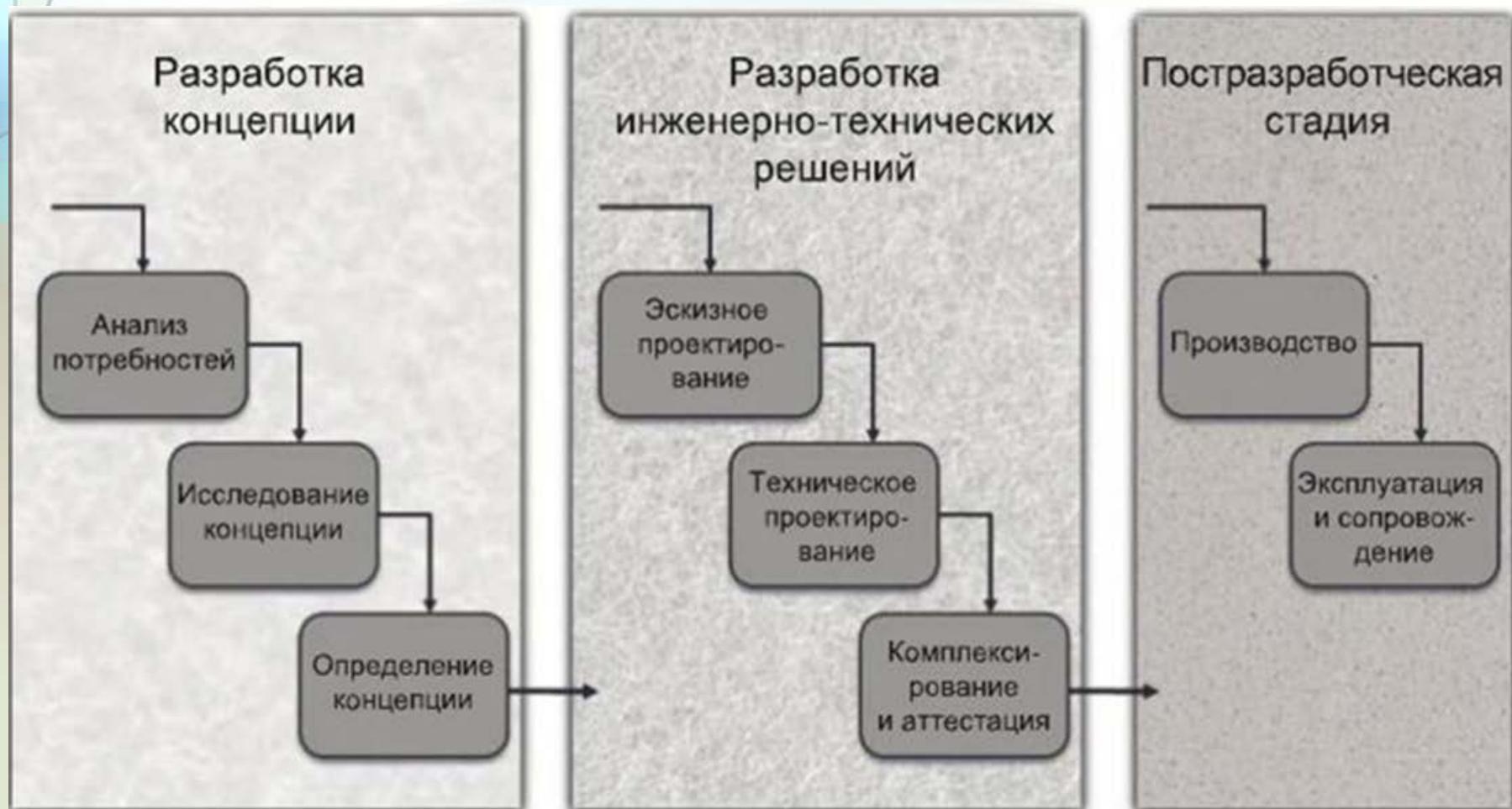


Стадія розробки інженерно-технічних рішень відповідає процесу розробки системи з метою здійснення функцій, які специфіковані в концепції системи, у фізичній конструкції, виробництво якої економічно доцільно, а успішна експлуатація і технічне обслуговування та ремонт в передбачуваних умовах можливі. Основне завдання системної інженерії тут - керівництво розробкою інженерно-технічних рішень і проектуванням, визначення інтерфейсів і контроль над ними, розробка програм і методик випробувань і прийняття рішень про найбільш підходящих способи усунення невідповідностей в роботі системи, виявлених в процесі випробувань і атестації. Саме на цій стадії на частку системного інженера випадає найбільше навантаження. Стадія розробки інженерно-технічних рішень співвідноситься зі стадією розробки інженерних і виробничих рішень в моделі МО США і частково зі стадією виробництва і розгортання.



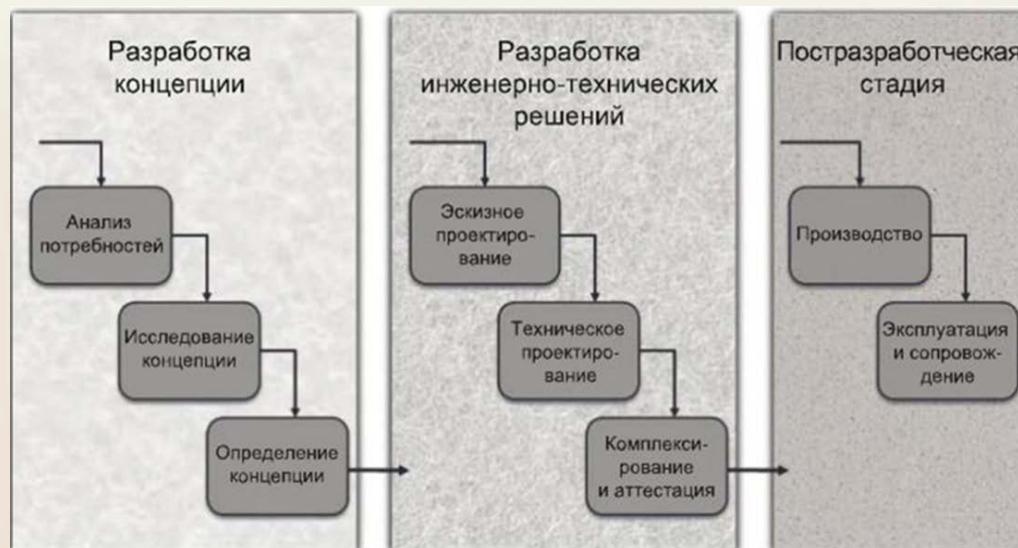
Основні цілі стадії розробки інженерно-технічних рішень такі:

1. Здійснити інженерно-технічну розробку системи-прототипу, яка задовольняє функціональним вимогам, а також вимогам по надійності, ремонтопридатності і безпеки.
2. Створити систему, економічну в виробництві та використанні і продемонструвати її придатність до експлуатації.



Построздробницька стадія включає види діяльності, які не належать власне до розробки, але тим не менш потребують суттєвої підтримки з боку системного інженера, особливо в ситуації, коли виникають непередбачені проблеми, що вимагають термінового вирішення. Крім того, безперервний технічний прогрес нерідко викликає необхідність в модернізації системи без виведення з експлуатації, а для вирішення цього завдання системна інженерія може знадобитися не в меншій мірі, ніж на стадіях розробки концепції та інженерно-технічних рішень. Дано стадія частково співвідноситься зі стадією виробництва і розгортання і повністю - зі стадією експлуатації та супроводу в моделі МО США.

Построздробницька стадія для нової системи починається після того, як система успішно пройде процес випробувань та атестації, який іноді називають приймальними випробуваннями, і буде схвалена для виробництва і подальшої експлуатації. Хоча основна розробка вже завершена, системна інженерія продовжує відігравати важливу забезпечуючу роль в цій роботі.



Співвідношення між основними стадіями ЖЦ системи показані в графічній формі на рисунку. Тут ми бачимо принципово важливі входи і виходи для кожної стадії. Написи над блоками відносяться до потоку інформації у вигляді вимог, специфікацій та документації, починаючи з практичних потреб. Входи і виходи під блоками відповідають крокам еволюції формальних уявлень (описів, креслень, документації) інженерно наасиченою системи від концепції до введення в експлуатацію. Видно, що з просуванням по ЖЦ документація і конструкторські рішення стають все більш складними і конкретними. Далі будуть обговорюватися різні фактори, що зачіпають цей процес.



Приклад: стадія розробки нового пасажирського літака. Для ілюстрації застосування цієї моделі ЖЦ розглянемо еволюцію нового пасажирського літака. На стадії розробки концепції відбувається усвідомлення факту існування ринку для нового літака, досліджуються різні конфігурації, зокрема кількість, розмір і розташування двигунів, розміри фюзеляжу, форма крила в плані і т.д., що дозволяє вибрати варіант конфігурації, оптимальний з точки зору виробничих витрат; оцінюється загальний ККД, комфорт пасажирів та інші робочі характеристики. В основі прийнятих рішень лежать аналіз, моделювання і функціональне проектування, а результатом має стати техніко-економічне обґрунтування обраного підходу.



Стадія розробки інженерно-технічних рішень в ЖЦ літака починається зі схвалення запропонованої концепції і рішення компанії приступити до розробки. Зусилля в процесі розробки повинні бути спрямовані на обґрунтування використання нових технологій, втілення функціонального проекту системи в апаратні і програмні компоненти та підтвердження того, що сконструйована система задовольняє потребам користувача. Для цього створюються прототипи компонентів, з них збирається діючий зразок, який випробовується в реальних умовах. Построзробницька стадія включає закупівлю виробничого і випробувального устаткування, виробництво нового літака, адаптацію його до вимог різних замовників, забезпечення планової експлуатації, усунення виявлених дефектів, періодичний ремонт і заміну двигунів, шасі та інших компонентів, що піддаються високим навантаженням. На цій стадії системна інженерія грає обмежену, але важливу роль, яка полягає в забезпеченні експлуатації та вирішенні проблем.

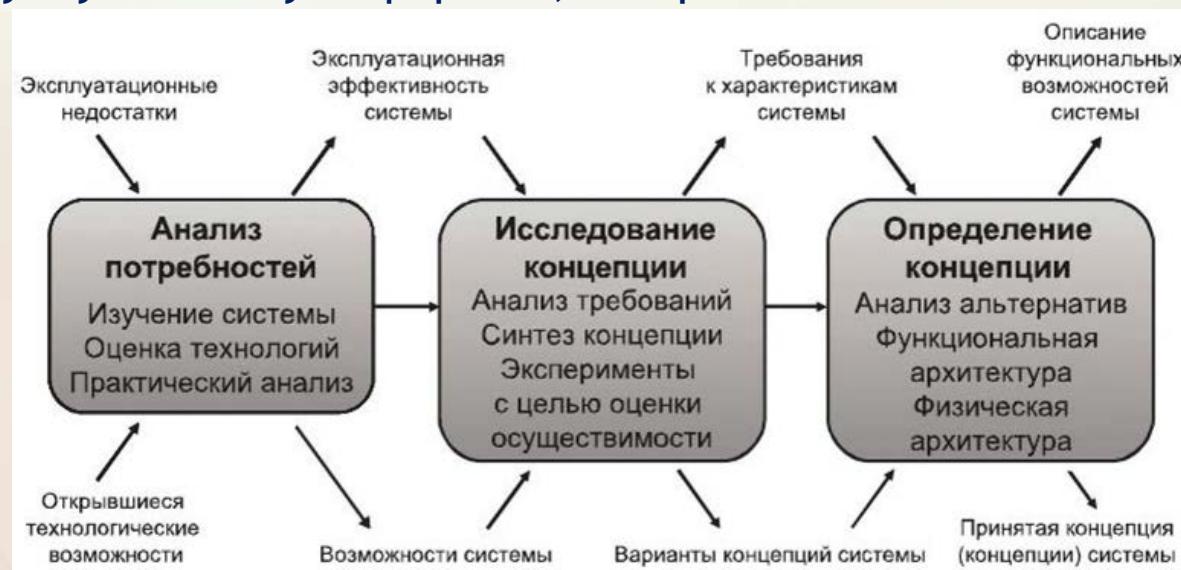


Етапи розробки концепції

В ЖЦ системи виділяються 3 основні стадії, які були описані вище. Всередині кожної стадії можна виділити окремі етапи, які характеризуються чітко визначеними цілями і діяльністю. Стосовно до великих програм ці етапи відокремлюються один від одного крапками прийняття рішень - такими ж, які відокремлюють переходи між стадіями. Ролі системної інженерії на різних етапах ЖЦ суттєво відрізняються. Тому, щоб зрозуміти, як еволюція системи в рамках її ЖЦ співвідноситься з процесом системної інженерії, корисно розробити деталізовану модель структури цього процесу, де будуть відображені елементи другого ієрархічного рівня.

Концепція – система поглядів, те або інше розуміння явищ і процесів; єдиний, визначальний задум.

У нашій моделі ЖЦ для системного інженера стадія розробки концепції ЖЦ включає 3 етапи: **аналіз потреб, дослідження концепції та визначення концепції**. Ці етапи, основні види діяльності на кожному з них, входи і виходи показані на рисунку в такому ж форматі, як і раніше.

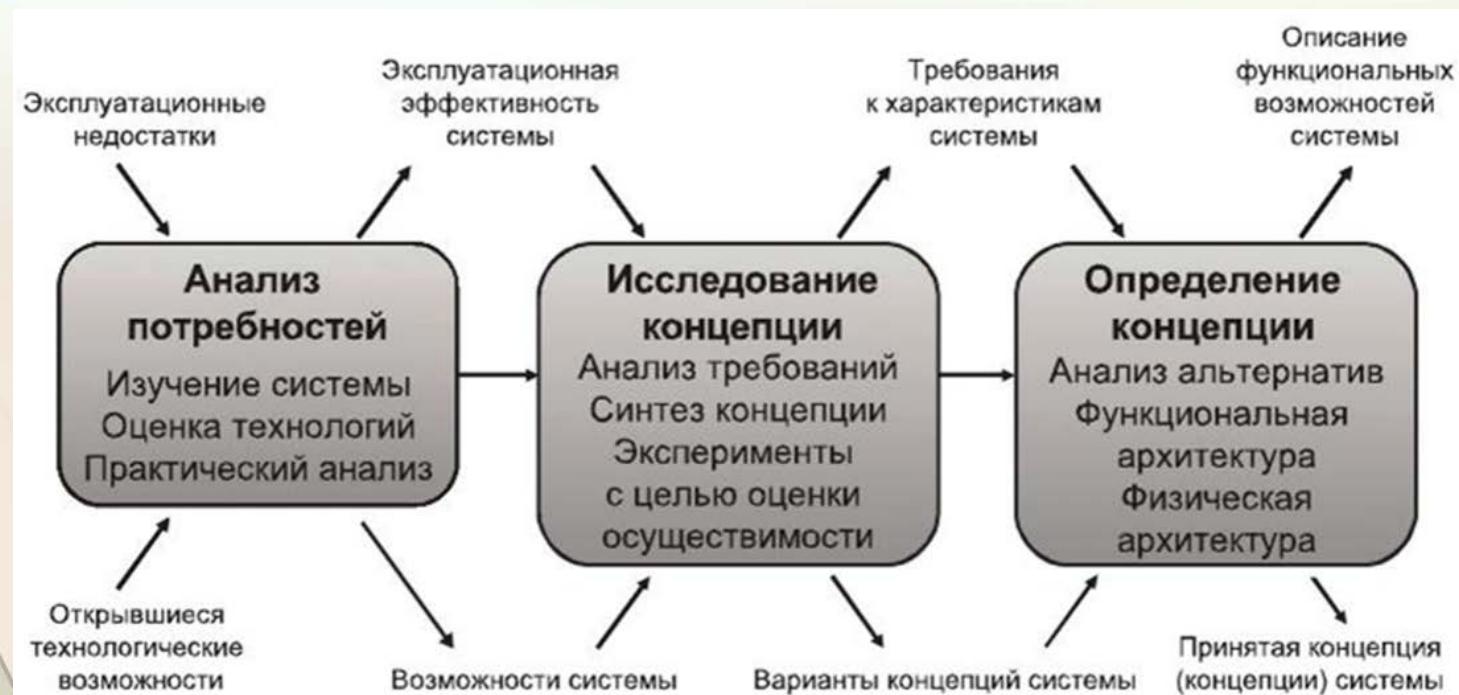


Етап аналізу потреб. На цьому етапі виявляється потреба в новій системі. Тут ставлять запитання типу «Чи дійсно потрібна нова система?» і «Чи існує практично здійснений спосіб задовільнити цю потребу?». Для відповіді на такі питання необхідно критично проаналізувати, якою мірою поточні і очікувані в подальшому потреби можуть бути задоволені шляхом фізичної або функціональної модернізації наявних коштів, а також зрозуміти, чи здатні існуючі технології забезпечити бажане нарощування можливостей. У багатьох випадках стимулом до створення нової системи може послужити результат аналізу практичних потреб або появі інноваційного продукту, але чітко зафіксувати момент народження нової системи зазвичай не вдається.



На виході цього етапу створюється опис можливостей і експлуатаційної ефективності, якими повинна володіти нова система. Багато в чому це перша ітерація самої системи, правда, на дуже загальному концептуальному рівні. Рекомендується звернути увагу на те, як «система» еволюціонує по ходу ЖЦ, почавши з цього, самого раннього, етапу. Хоча ми б не стали називати такий опис вимогами, воно, безумовно, є попередником офіційних вимог до системи. Деякі фахівці називають цей опис, отриманий на самій ранній стадії, «описом вихідних можливостей».

Існує кілька видів інструментів і практичних методів, що підтримують процес розробки опису вихідних можливостей системи. Більшість з них відноситься до 2 областей математики: аналіз операцій і дослідження операцій. Однак на цьому етапі, крім математичного вивчення проблеми, проводиться також аналіз технологій і ставляться експерименти.

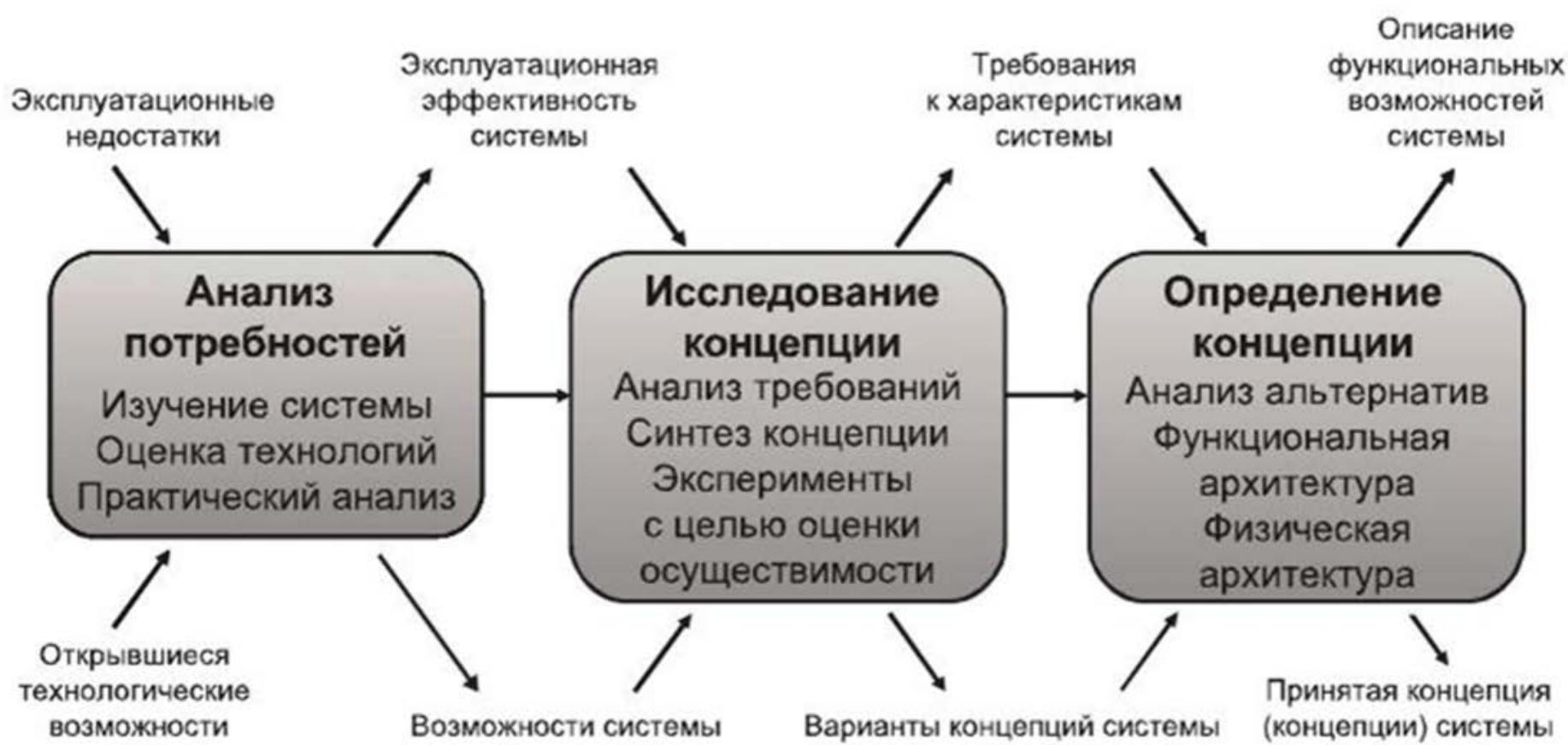


Етап дослідження концепції. На цьому етапі досліджуються можливі варіанти концепцій системи і ставлять запитання типу «Якими повинні бути характеристики нової системи, щоб задовольнити виявлені потреби?» і «Чи існує хоча б один спосіб досягнення таких характеристик з прийнятними витратами?». Якщо відповідь на ці питання позитивна, то ще до витрат значних сил і засобів на розробку проекту нової системи відомо, що у нього є чітко визначена і досяжна мета.

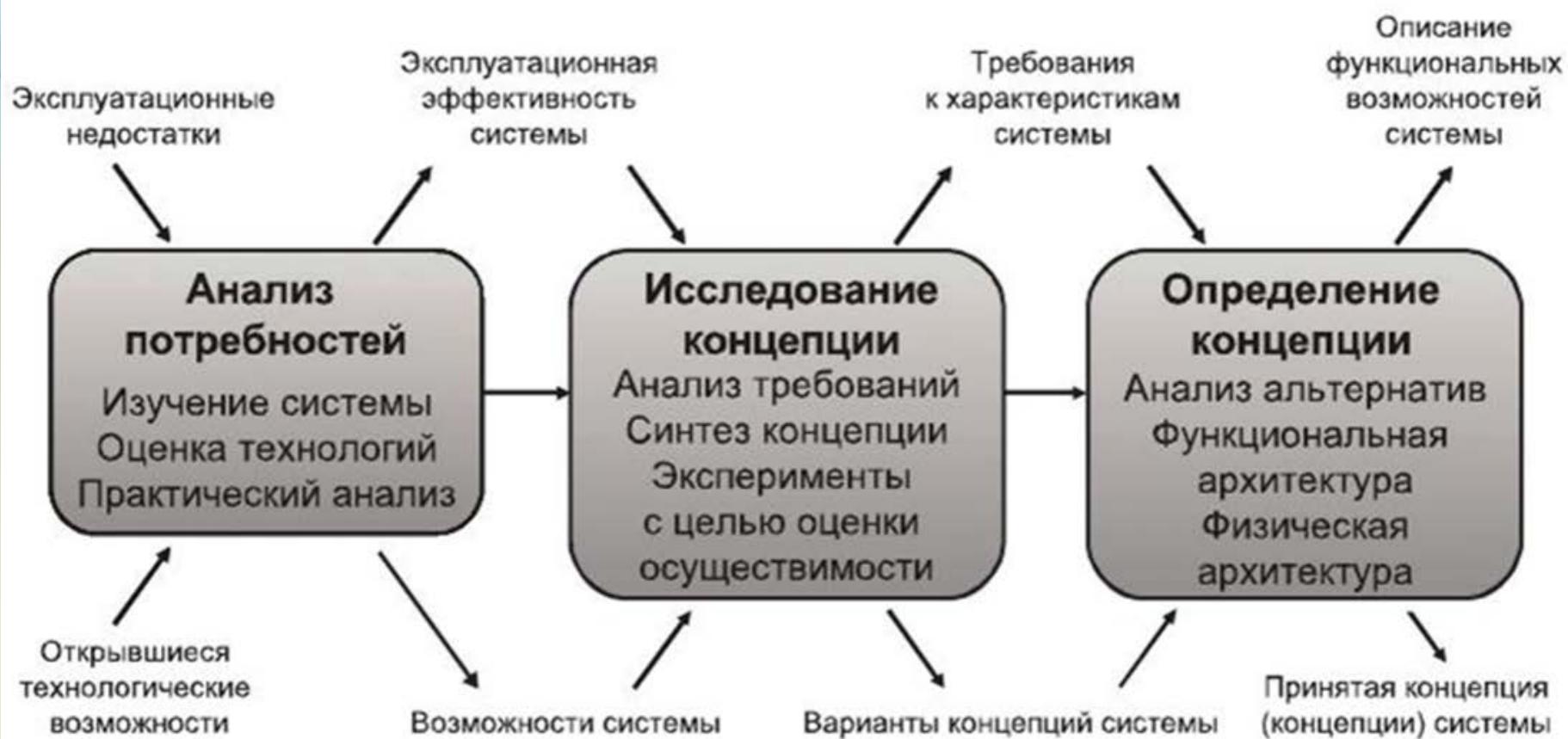
Аналіз вимог (Requirements Analysis) - процес вивчення потреб користувача в цілях визначення вимог до системи, до апаратних або програмних засобів (ISO/IEC 24765).



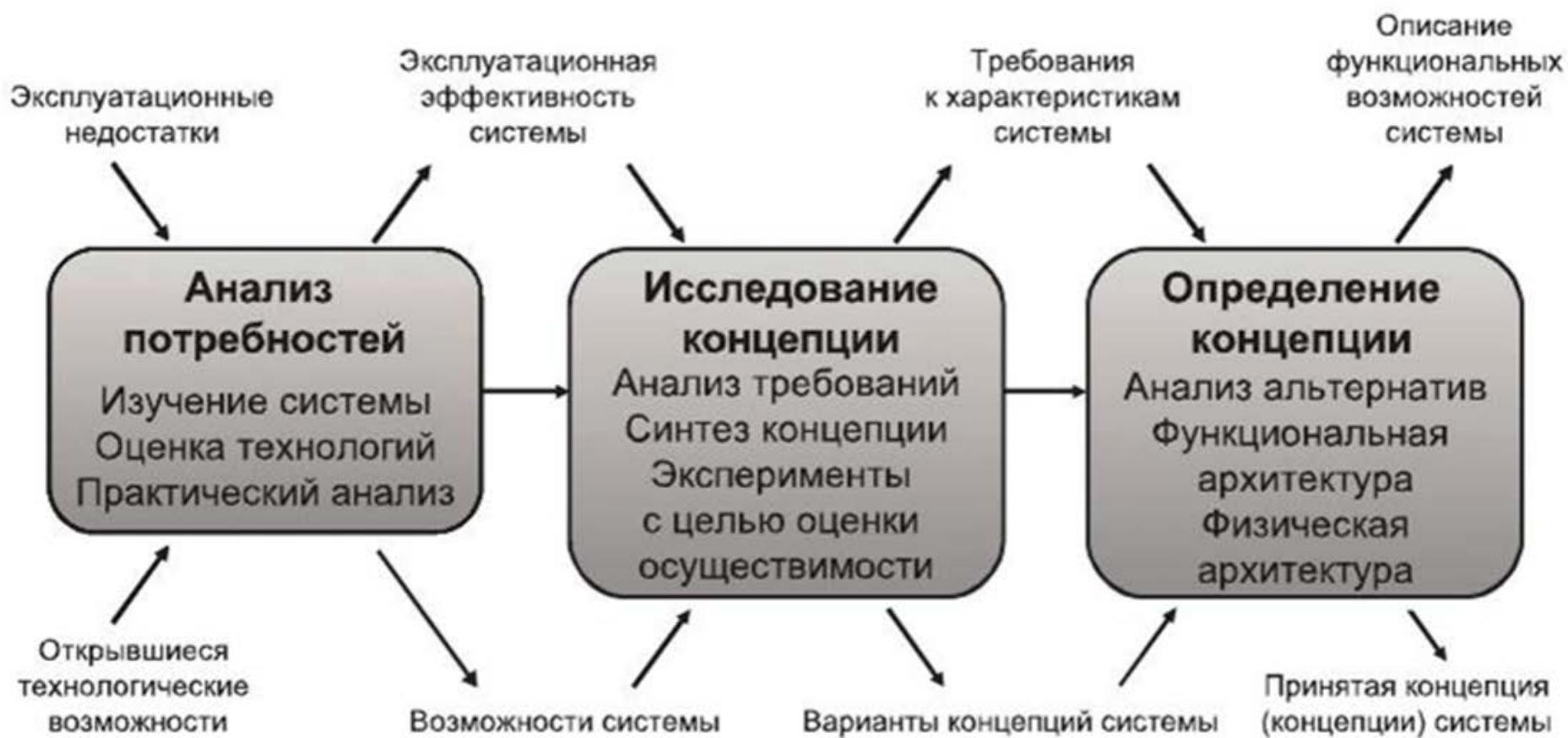
На виході даного етапу формується перший «офіційний» набір вимог, які зазвичай називають вимогами до функціональних можливостей системи. Говорячи «офіційний», ми маємо на увазі, що підрядник або агентство може оцінити на відповідність встановлені в вимогах можливості і характеристики. Крім початкового набору вимог на цьому етапі розробляється кілька можливих концепцій системи. Зверніть увагу на множину - важливо вивчити кілька альтернативних варіантів концепції і усвідомити, який діапазон потенційних рішень.



На цьому етапі застосовуються різні інструменти і технічні прийоми - від методик, заснованих на процесах (наприклад, аналіз вимог), до математичних методів (наприклад, методи підтримки прийняття рішень) і експертних оцінок (наприклад, мозковий штурм). Деякі методики можуть спочатку давати дуже багато варіантів, але їх число швидко зменшується і в кінці кінців виходить прийнятний набір альтернатив. Важливо підтвердити (на доказовій основі!), що можливо практичне втілення остаточної сукупності концепцій, які стають входом для наступного етапу.



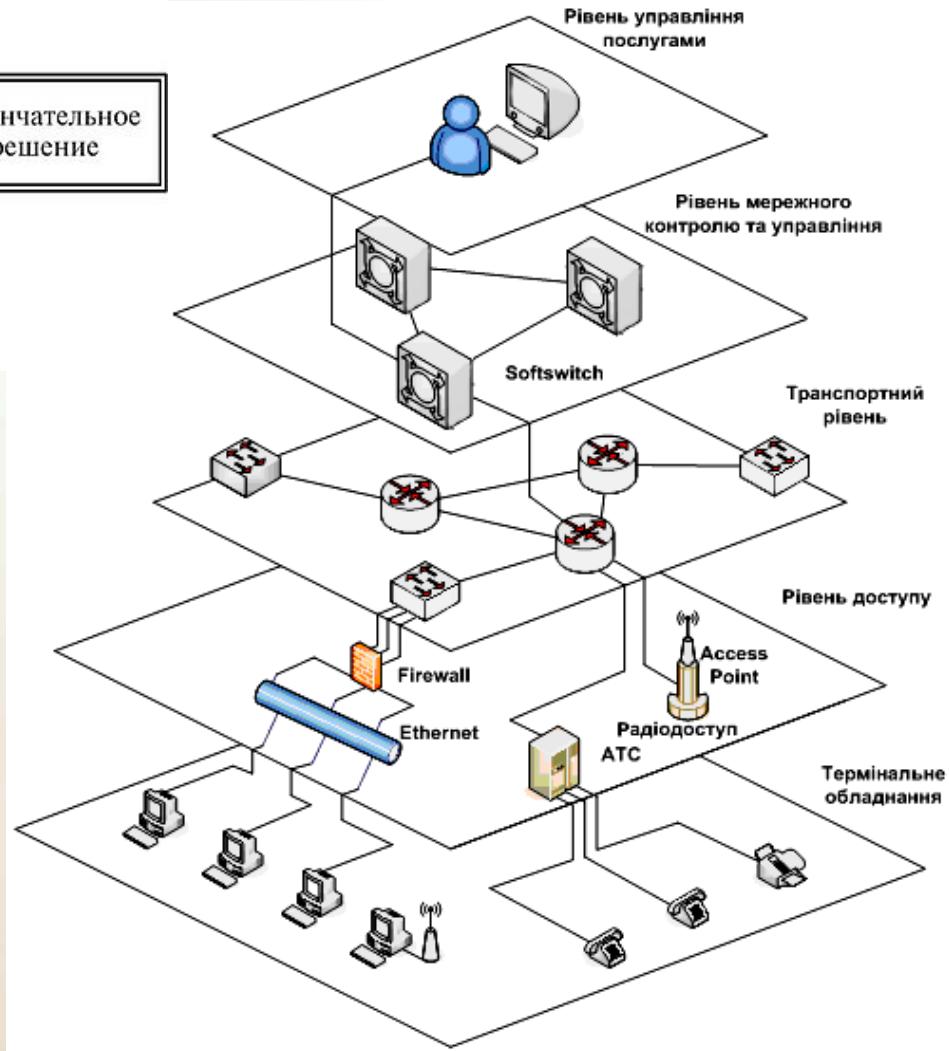
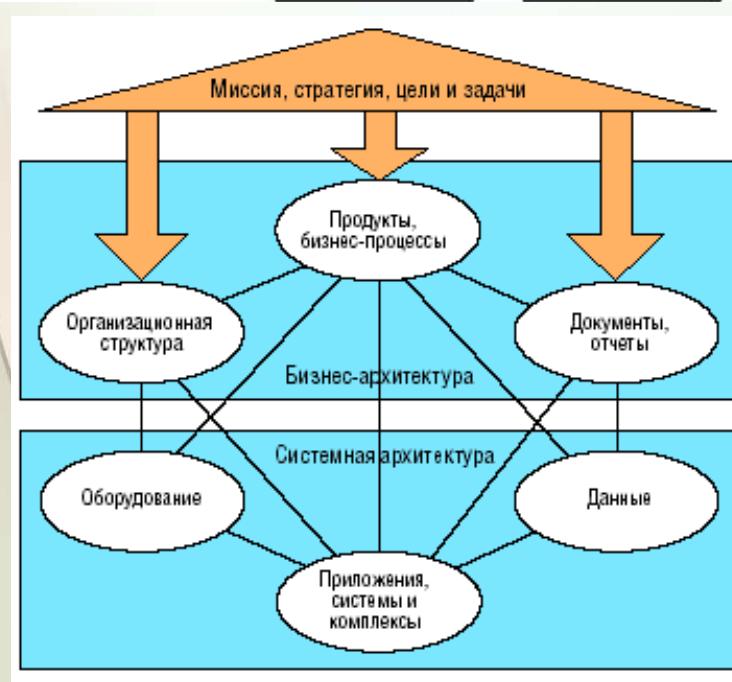
Етап визначення концепції. На цьому етапі визначається краща концепція. Слід відповісти на питання: «Які ключові характеристики концепції системи, при яких досягається сприятливий баланс між функціональними можливостями, терміном служби і вартістю?» Для цього потрібно розглянути кілька альтернативних концепцій і порівняти їх характеристики, практичну корисність, ризики розробки і вартість. Отримавши задовільну відповідь, можна приймати рішення про виділення серйозних ресурсів на розробку нової системи.



На виході виходять 2 подання однієї і тієї ж системи: набір функціональних специфікацій, що описують, що і наскільки добре повинна робити система, і прийнята концепція. Остання може бути представлена в одному з двох видів. Якщо складність системи відносно мала, то для формування загальної стратегії проектування досить простого опису концепції. Якщо ж система по-справжньому складна, то такого опису недостатньо і необхідно представити всебічну системну архітектуру, яка відображатиме різні погляди на систему. Незалежно від ступеня деталізації концепцію слід описати в кількох ракурсах - головним чином функціональному і фізичному. Якщо складність особливо велика, то цілком можуть знадобитися і інші ракурси.



Доступні інструменти і методики можна розбити на 2 категорії: аналіз альтернатив (цей метод вперше був запропонований Міністерством оборони США, але взагалі є різновидом дослідження операцій) і побудова архітектури системи (запропонований Е. Рехтіним (Ebbert Rechtin) в 1990-х роках).



Вище вже зазначалося, що в комерційних проектах (модель NSPE) перші два етапи часто розглядаються як одна передпроектна стадія, яку іноді називають «оцінкою здійсненості». Її результати лягають в основу рішення про те, чи варто витрачати кошти на визначення концепції. В ЖЦ закупівель військово-технічного обладнання другий і третій етапи об'єднані, але частина робіт, відповідна другого етапу, виконується державою (в результаті формується набір вимог до характеристик системи), а частина робіт, яка відповідає третьому етапу, може бути виконана або спільною групою, що включає представників держави і підрядника, або декількома конкуруючими підрядниками, які прагнуть довести, що їх пропозиція відповідає вимогам.

Як би там не було, до переходу до стадії розробки інженерно-технічних рішень на створення системи зазвичай витрачаються порівняно невеликі кошти, хоча на те, щоб чітко зрозуміти, в яких умовах буде працювати система, і досліджувати технології, що відносяться до справи на рівні підсистем, можуть бути витрачені роки і чималі зусилля. Основні витрати виникають на подальших стадіях ЖЦ.



Етапи розробки інженерно-технічних рішень

На рисунку в тому ж форматі, що і раніше, показані дії, а також входи і виходи, характерні для різних етапів стадії розробки інженерно-технічних рішень. Вони називаються ескізне проектування, технічне проектування, комплексування і атестація.



Етап ескізного проектування. Успішне завершення стадії розробки інженерно-технічних рішень істотно залежить від міцності фундаменту, закладеного на стадії розробки концепції. Але оскільки концептуальне проектування - головним чином аналітична робота, на яку виділяються обмежені ресурси, то неминуче залишаються невідомі, які ще належить визначити і прояснити. Важливо виявити ці «невідомі невідомі» і прийняти по ним рішення на ранніх етапах стадії розробки. Зокрема, слід вжити всіх можливих заходів, щоб мінімізувати число невиявлених проблем ще перед тим, як від функціонального проекту і пов'язаних з ним вимог до системи буде здійснено перехід до технічних специфікацій (проектним, конструкторським, виробничо-технологічним) на окремі апаратні і програмні елементи системи.



На етапі ескізного проектування стоять два основні завдання: 1) ідентифікація і зниження ризиків розробки і 2) розробка проектної документації на систему. Цей етап особливо важливий, коли концепція системи передбачає використання передової технології, яка раніше не застосовувалася в подібних розробках, або коли для досягнення необхідних характеристик доводиться піддавати компоненти більшого навантаження, ніж було прийнято раніше. Мета ескізного проектування полягає в тому, щоб отримати уявлення про конструкцію складових частин системи, рішення по яких не опрацьовані, і продемонструвати практичну можливість виконання вимог до цих частин, а також закласти основу для перетворення функціональних вимог до системи в документацію на систему і в технічні вимоги до компонентів. Системна інженерія займає центральне місце в рішеннях про те, що потребує затвердження та як її провести, а також в інтерпретації результатів.



Етап відповідає стадії «Розробка інженерного забезпечення та виробництво» (колишня назва - «демонстрація та валідація») в моделі МО США. Якщо ризики використання неперевіреної технології високі, часто полягає окремий контракт на виконання робіт, що відносяться до цього етапу, а укладання контрактів на решту етапів розробки залежить від отриманих результатів.

У повній відповідності з призначенням даного етапу його основним результатом є проектна документація і модель (макет, зразок), що пройшла валідацію. У документації уточнюються і розвиваються рішення, що містяться в функціональних специфікаціях, розроблених на попередній стадії. Модель (макет, зразок) системи - це остаточний результат дуже детального аналізу ризиків, в ході якого вдається виявити невідомі, про які згадувалося вище, і прийняти по ним рішення. Саме це мається на увазі, коли йдеться про те, що модель пройшла валідацію. Перед тим як перейти до наступного етапу, системний інженер повинен переконатися, що систему можна буде спроектувати і виготовити. Тому на цьому етапі всі ризики повинні бути визнані контролюваними.



Для зниження неминучих ризиків і особливо для зменшення їх наслідків необхідно застосовувати сучасні інструменти і методики управління ризиками. У міру ідентифікації, аналізу, обробки і моніторингу ризиків рівень розгляду переміщається з системи на підсистеми. Крім того, створюється набір специфікацій для наступного рівня декомпозиції - рівня компонентів. У всіх випадках на цій стадії часто застосовуються експериментальні моделі і імітаційне моделювання, мета яких - знізити витрати на валідацію концепцій, рекомендованих в якості основи при проектуванні компонентів і підсистем.



Етап технічного проектування. На даному етапі виконується детальне технічне проектування системи. Через масштабність завдання по ходу процесу зазвичай кілька разів проводиться формальний аналіз стану проекту. У цього заходу є важлива функція - дати замовнику або користувачу можливість ознайомитися з проектом на ранніх етапах, проконтролювати виконання бюджету і графіка і висловити розробнику корисні критичні зауваження.

Питання надійності, можливості виготовлення, ремонтопридатності і т.п. розглядаються і на попередніх етапах, але на етапі технічного проектування набувають особливої важливості. У сукупності рішення цих питань часто називають «спеціальним проектуванням» (specialty engineering). Оскільки готовий виріб складається з компонентів, які передбачається об'єднати і відчувати в складі системи, системний інженер відповідає за те, щоб технічні проекти окремих компонентів точно відповідали вимогам до функціональності і сумісності, а також за управління процесом внесення змін до проекту, щоб при цьому не порушувалися інтерфейси і конфігурація.



Завдання цього етапу полягає в перетворенні специфікацій на компоненти в набір проектних рішень щодо компонентів. Зрозуміло, відразу після проектування, а іноді і одночасно з ним необхідно провести випробування компонентів. Є і ще одна задача, рішення якої виконується на даному етапі - уточнення програми випробувань і атестації. Ми використовуємо термін «уточнення», щоб відрізнисти початок від продовження. Початковий варіант програми випробувань і атестації складається на набагато більш ранньому етапі ЖЦ, а зараз, при наявності інформації, отриманої в ході виконання попередніх етапів, її можна привести по суті до остаточного вигляду.



Два результату першорядної важливості на цьому етапі - програма випробувань і атестації та розробка прототипу. Прототип може приймати різні форми, і зовсім необов'язково розглядати його за аналогією з прототипом програми. Залежно від різновиду системи прототип, створюваний на цьому етапі, може бути віртуальним, фізичним або гібридним. Наприклад, якщо проєктується океанське вантажне судно, то в якості прототипу може виступати гібрид віртуального і фізичного макетів. Створювати на цьому етапі вантажне судно в масштабі 1:1 не завжди можливо або доцільно. З іншого боку, якщо система - це пральна машина, то цілком можна виготовити прототип і в натуральну величину.

У розпорядженні конструкторів є сучасні засоби автоматизованого проєктування. Моделі системи і імітаційні моделі повинні відповісти поточному стану проєкту і результатами випробувань.



Етап комплексування і атестації. Процес комплексування компонентів складної системи в працююче ціле і оцінки функціонування системи в реальних умовах номінально є частиною процесу розробки інженерно-технічних рішень, оскільки в цій точці програми розробки немає ніякого формального розриву. Однак ролі і обов'язки системного інженера під час технічного проектування елементів системи і в процесі комплексування і атестації системи істотно розрізняються. Ми розглядаємо процес комплексування і атестації системи як окремий етап ЖЦ.

Комплексування (Integration) - 1. Процес об'єднання компонентів ПЗ і апаратних компонентів або того й іншого в загальну систему (ISO/IEC 24765). 2. Процес складання системи згідно з проектом архітектури (ISO/IEC 15288).



Важливо розуміти, що нову систему можна зібрати і оцінити як функціонує виріб тільки після того, як всі її компоненти сконструйовані і виготовлені. Саме на цій стадії перевіряється, що інтерфейси компонентів узгоджені і компоненти взаємодіють відповідно до функціональних вимог. Можливо, на більш ранніх етапах вже проводилися випробування на рівні підсистеми або прототипу, але цілісність проектних рішень щодо всієї системи до цього моменту не могла бути піддана валідації.

Атестація - визначення технічних характеристик, споживчих якостей товарів споживання та продукції виробничого призначення.



Слід зазначити, що в процесі комплексування і атестації часто потрібні розробка і конструктування складних допоміжних комплексів, що роблять можливими імітацію експлуатаційних впливів і обмежень, а також вимір реакції системи з досить високою точністю. Іноді комплекси такого роду можуть бути побудовані на основі обладнання, що застосовувався при розробці, однак масштаб цього завдання не варто недооцінювати.

Результатами цього етапу є: 1) специфікації, що служать керівництвом при виготовленні системи, які зазвичай називаються «технічні умови на виробництво системи» (або вихідною виробничу документацією) і 2) власне готова система. Остання має на увазі, що є все необхідне для виробництва та збирання системи і, можливо, прототип системи.



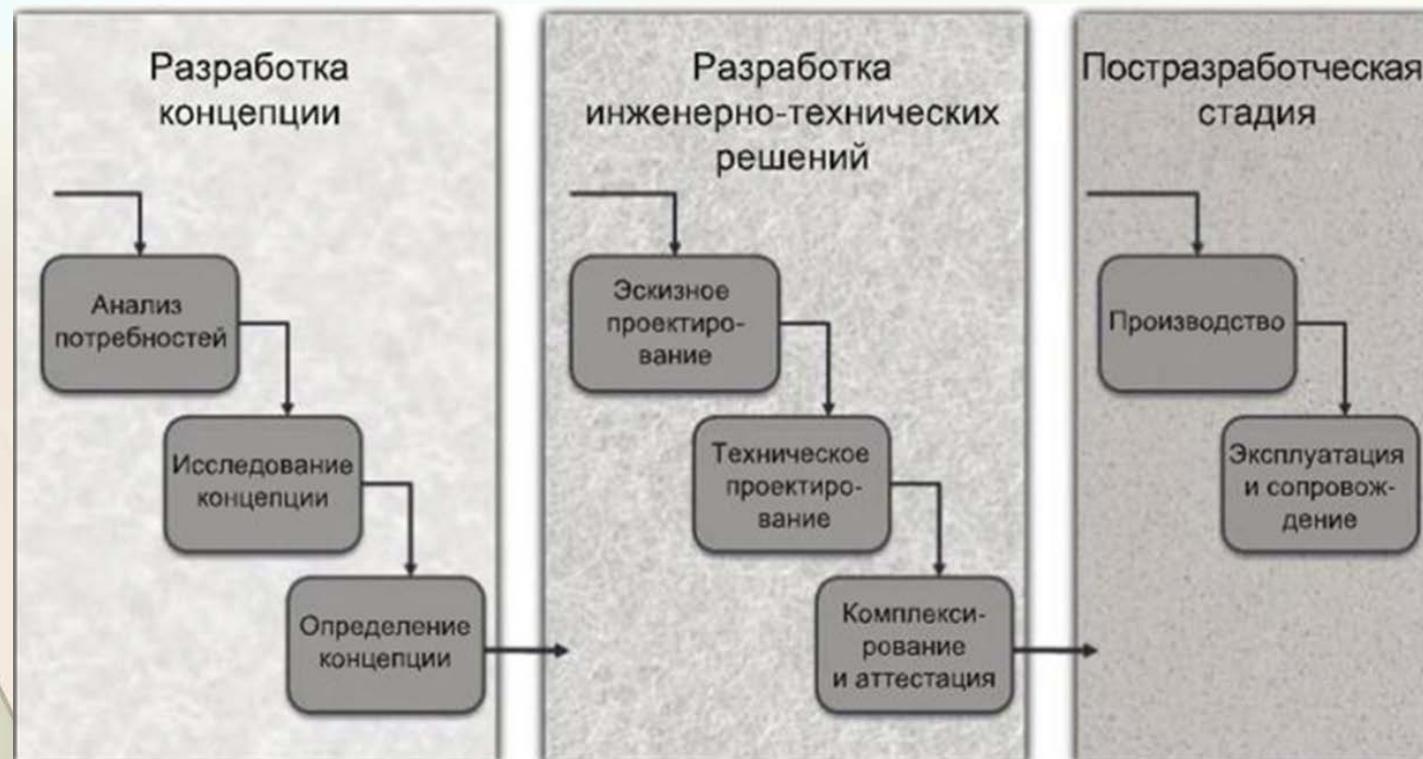
У вирішенні цих завдань інженерам можуть допомогти сучасні методики комплексування, а також інструменти, методи, засоби та принципи випробувань і атестації. Зрозуміло, до початку серійного виробництва слід виконати перевірки та затвердження виготовленої системи, оцінивши її функціонування в реальних (або максимально наблизених до таких) умовах експлуатації.



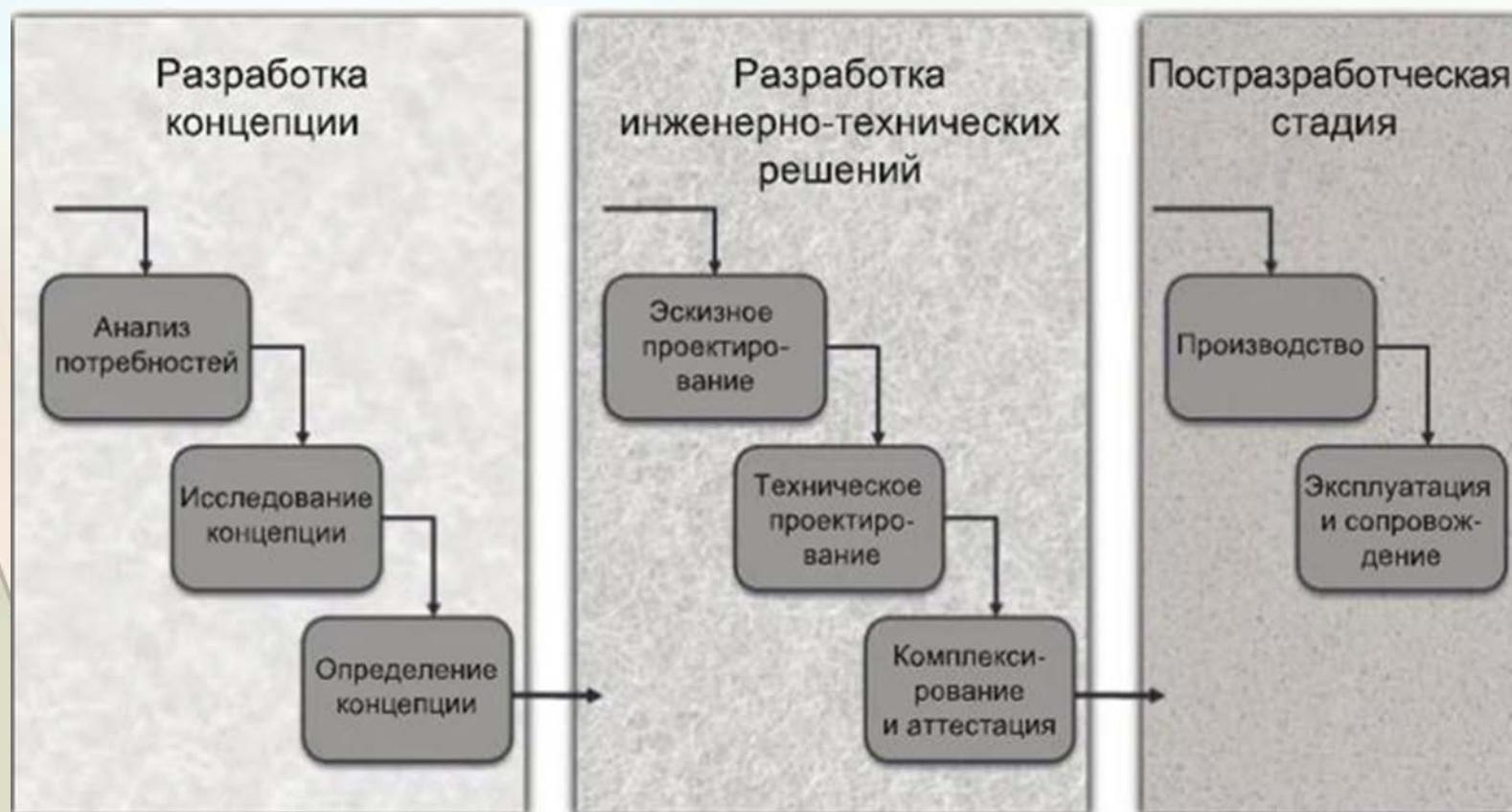
Етапи построзробницької стадії

Етап виробництва. Це перший з двох етапів, складових построзробницької стадії, які є точними аналогами стадій «виробництво і розгортання» і «експлуатація та супровід» в моделі МО США.

Як би ретельно не був пристосований до потреб виробництва проект системи, в процесі виробництва неминуче виникають проблеми. Завжди існують несподівані перешкоди, які керівник проекту не в змозі контролювати, наприклад страйк на заводі постачальника, непередбачені труднощі з забезпеченням інструментами, помилки в критично важливих програмах або несподіваний збій в ході заводських комплексних випробувань. Такі ситуації загрожують дорогим зливом виробничого графіка і, отже, вимагають швидкого і рішучого виправлення.

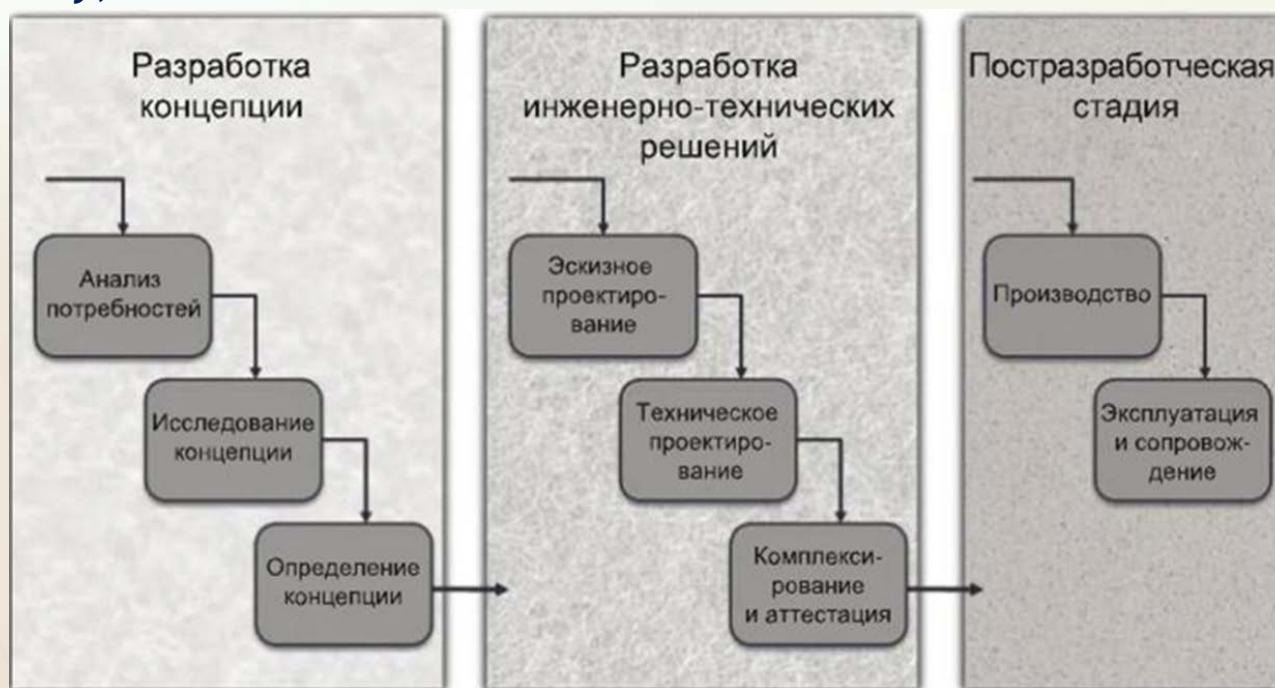


Системний інженер часто виявляється єдиною достатньо кваліфікованою людиною для того, щоб діагностувати джерело проблеми і знайти ефективне рішення. Нерідко йому вдається відшукати «обхідний шлях» вирішення проблеми з мінімальними витратами. Це означає, що для забезпечення виробництва в штат необхідно включити системних інженерів, добре знайомих з проектом, особливостями конструкції та експлуатації системи. У тих випадках, коли потрібна консультація фахівця по спеціальному проектування, системний інженер - нерідко єдиний, хто може кваліфіковано вирішити, кого і коли запросити.



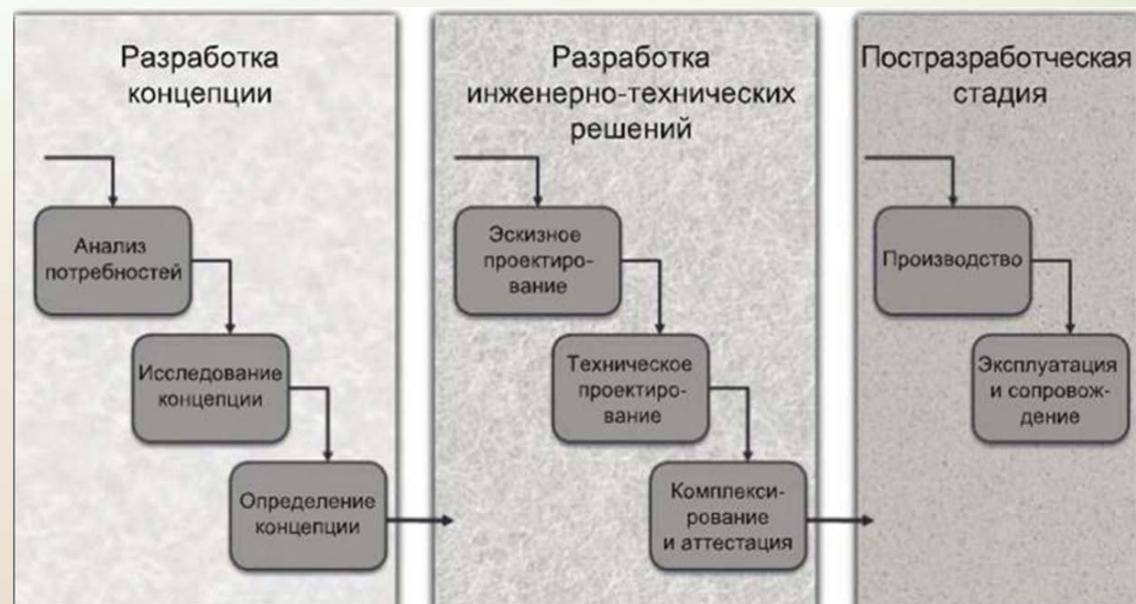
Етап експлуатації та супроводу. На даному етапі потреба в підтримці з боку системного інженера відчувається ще гостріше. Оператори системи і фахівці з ТО і ремонту, швидше за все, недостатньо обізнані в тонких деталях функціонування та обслуговування системи. Хоча спеціально навчені інженери з експлуатації в загальній ситуації знають, що робити, на випадок, якщо проблема вийде за рамки їх кваліфікації, повинна бути передбачена можливість запросити досвідченого системного інженера.

Належне планування етапу експлуатації має на увазі підготовку логістичної системи і програм навчання операторів і ремонтного персоналу. У цьому плануванні важлива роль повинна бути відведена системної інженерії. Неминуче виникають непередбачені проблеми вже після введення системи в експлуатацію, і це необхідно врахувати в логістичній системі і в системі навчання персоналу. Дуже часто інструментарій, застосовуваний для навчання і ТО та ремонту, сам по собі є важливим компонентом системи, що поставляється.



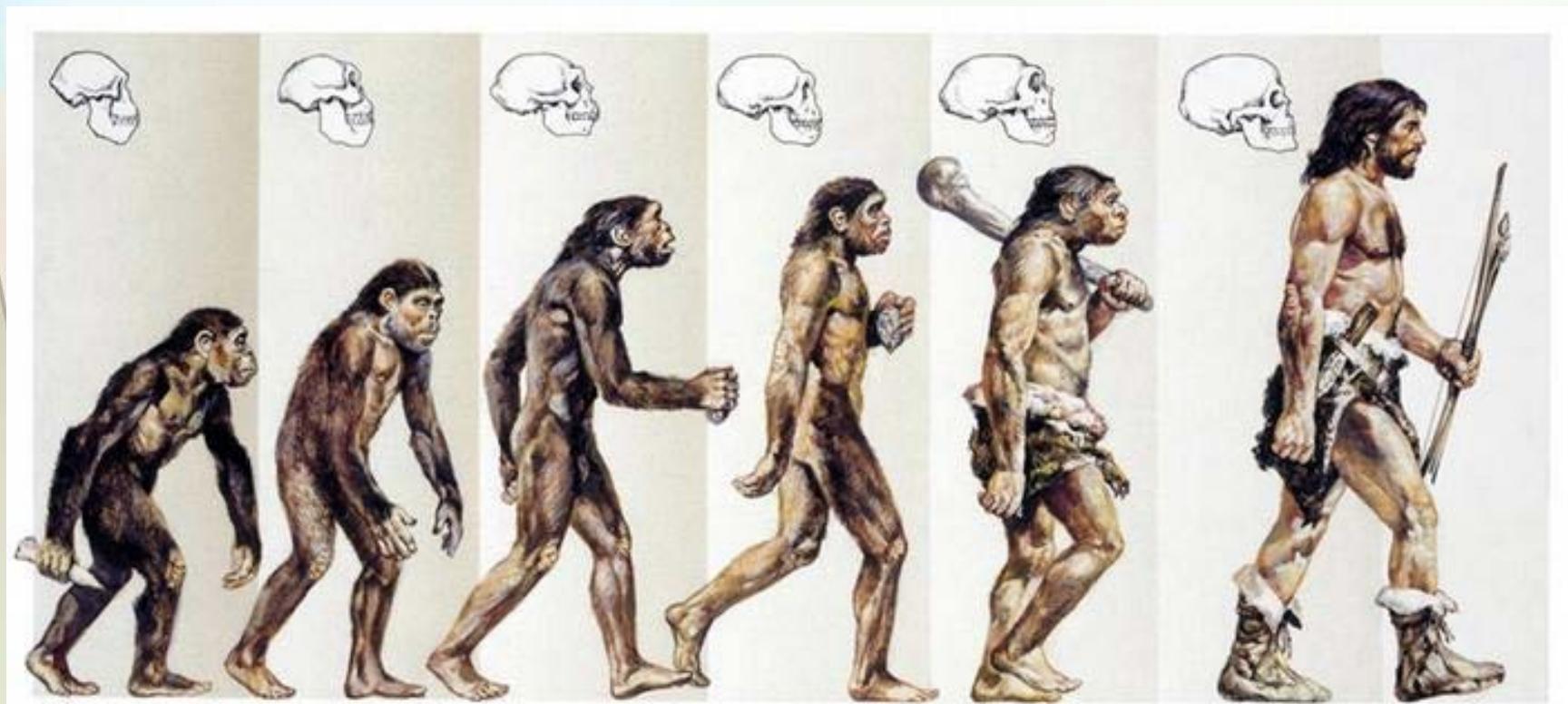
У більшості складних систем термін служби обчислюється роками, і на його протязі система піддається дрібним і великим оновленням, обумовленим еволюцією цілей і завдань системи, а також технічним прогресом, досягнення якого дозволяють поліпшувати функціональні можливості, підвищувати надійність або економічність системи. Найбільшою мірою періодичні оновлення притаманні системам, в яких інтенсивно використовуються комп'ютери, причому сукупні зусилля, витрачені на вдосконалення, можуть набагато перевищувати зусилля, витрачені на первісну розробку системи. І хоча масштаб окремої модернізації непорівнянний з масштабом робіт, необхідних для створення нової системи, зазвичай в ході оновлення системи доводиться приймати багато складних рішень, що вимагають застосування системної інженерії. Цей процес може виявитися надзвичайно нелегким, особливо на стадії розробки концепції модернізації.

Кожен, хто хоч раз займався переплануванням свого будинку, наприклад додавав ще одну спальню і ванну, оцінить, з якими складнощами доводиться стикатися, щоб зберегти основу вихідного системного рішення і разом з тим в повній мірі реалізувати переваги додавання нової частини - та ще з прийнятними витратами.



3. Еволюційні характеристики процесу розробки.

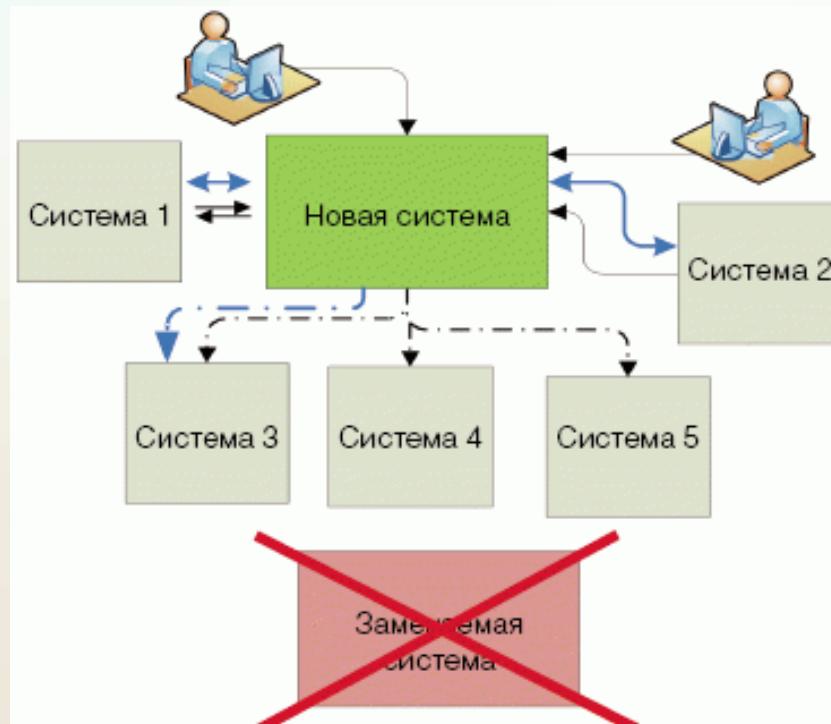
Природу процесу розробки системи простіше зрозуміти, розглянувши деякі характеристики, що еволюціонують протягом ЖЦ. Чотири з них описані далі. У темі «Попередня система» обговорюється внесок існуючої системи в розробку нової, покликаної її замінити. У темі «Втілення системи» описується модель еволюції системи від концепції до готового виробу. У темі «Учасники» розглядаються склад групи розробки системи і його зміна протягом ЖЦ. У темі «Вимоги до системи та документація» йдеться про те, як по ходу розробки змінюється опис системи, виражений в термінах вимог і специфікацій.



Попередня система

Процес створення нової системи можна описати, не посилаючись на її схожість з існуючими системами, призначеними для задоволення таких же або схожих потреб. Концепцію системи в цілому і всіх її елементів часто представляють так, ніби все починається з чистого аркуша, чого насправді практично ніколи не буває.

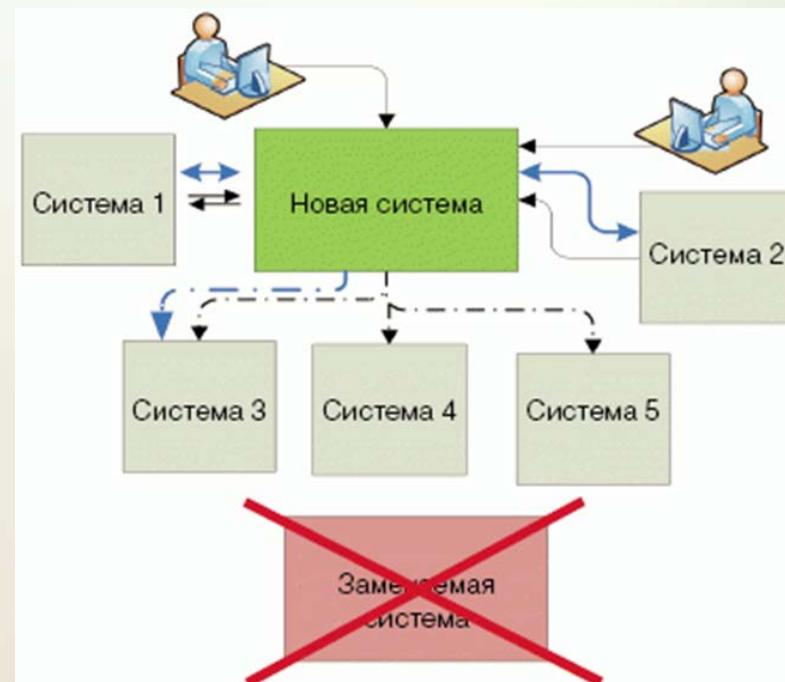
У більшості випадків, коли нова технологія використовується для досягнення радикальних змін в таких галузях, як транспорт, банківська справа або системи бойового застосування, якась система вже існує. У новостворюваній системі зміни зазвичай зосереджені в декількох підсистемах, тоді як архітектура системи в цілому і інші підсистеми модифікуються не сильно. Навіть впровадження автоматизації зазвичай змінює лише технічну сторону, але не істота процесу. Отже, якщо не брати до уваги таких проривів, як поява ядерних реакторів або космічних кораблів, при розробці нової системи майже напевно існує якась попередня система, яка може послужити відправною точкою.



Попередня система впливає на розробку нової системи 3 способами:

1. Виявлені недоліки старої системи часто стають рушійною силою нової розробки. При цьому в центрі уваги знаходяться найбільш важливі характеристики і функції, які повинна забезпечити нова система.
2. Якщо недоліки не настільки серйозні, щоб повністю відмовитися від існуючої системи, то її концепція і функціональна архітектура можуть розглядатися як найкраща вихідна точка при дослідженні альтернатив.
3. Якщо значні частини існуючої системи справляються зі своїми функціями задовільно і не застаріли у зв'язку з появою нових технологій, то їх використання з мінімальними змінами може помітно скоротити витрати і знизити ризики.

З урахуванням сказаного розробка системи зазвичай є гібридною, тобто в процесі розробки перевірені на практиці компоненти і підсистеми поєднуються з новими, ще не випробуваними в справі. У функції системної інженерії входить прийняття зважених рішень про те, які елементи попередньої системи використовувати, які перепроектувати, які слід замінювати на нові і як повинні бути влаштовані інтерфейси. При цьому слід враховувати робочі характеристики, вартість, тривалість робіт і інші важливі чинники.



Матеріалізація системи

Кроки розробки нової системи можна розглядати як поступову **«матеріалізацію»** системи - поступовий перехід від абстрактної потреби до складання і монтажу придатних до роботи компонентів, що спільно виконують складні функції заради задоволення цієї потреби. Для ілюстрації цього процесу в таблиці простежується, як система матеріалізується на різних етапах ЖЦ проекту. Рядки таблиці відповідають різним рівням деталізації - від системи в цілому в верхньому рядку до деталей в нижній. У стовпчиках представлені послідовні етапи ЖЦ. На перетині рядків і стовпців показані основні дії і внесок, який вони вносять в втілення системи.

Уровень	Этап					
	Разработка концепции			Разработка инженерно-технических решений		
Анализ потребностей	Исследование концепции	Определение концепции	Эскизное проектирование	Техническое проектирование	Комплексирование и аттестация	
Система	Определение возможностей и эффективности системы	Идентификация, исследование и синтез концепции	Определение и документирование выбранной концепции	Валидация концепции		Испытание и аттестация
Подсистема		Определение требований и проверка их осуществимости	Определение функциональной и физической архитектуры	Валидация подсистем		Комплексирование и испытание
Компонент			Привязка функций к компонентам	Составление документации	Проектирование и испытание	Комплексирование и испытание
Субкомпонент	Визуализация			Привязка функций к субкомпонентам	Проектирование	
Деталь					Изготовление или закупка	

Видно, що при успішному виконанні робіт на кожному наступному етапі визначається (матеріалізується) наступний рівень декомпозиції системи - до тих пір, поки кожна деталь не буде повністю визначена. Якщо дивитися на будь-який рядок, скажімо на рівень компонентів, зліва направо, то видно також, що процес визначення починається з візуалізації (вибору загального типу елемента системи); далі визначаються функції елемента (функціональне проектування - що елемент повинен робити), а потім йде реалізація (детальне проектування - як він повинен це робити).

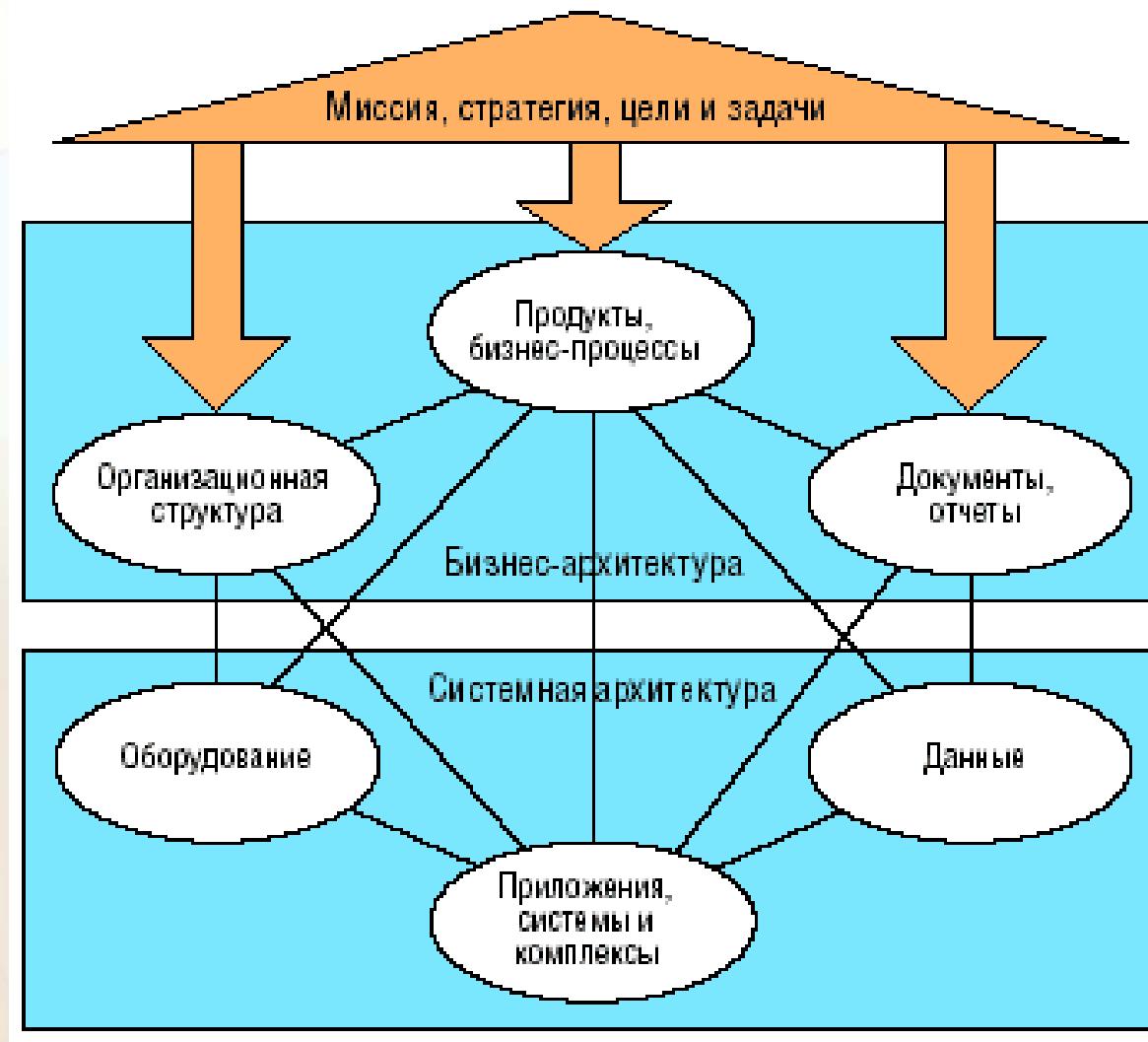
Описана послідовність зберігається і на етапі технічного проектування, коли компоненти системи повністю «матеріалізуються» у вигляді готових складових частин системи. На етапі комплексування і атестації процес втілення протікає абсолютно по-іншому, а саме в формі матеріалізації готової до використання і пройшла валідацію системи, зібраної з окремих структурних елементів. Ці відмінності більш детально обговорюються далі.

Уровень	Этап					
	Разработка концепции			Разработка инженерно-технических решений		
	Анализ потребностей	Исследование концепции	Определение концепции	Эскизное проектирование	Техническое проектирование	Комплексирование и аттестация
Система	Определение возможностей и эффективности системы	Идентификация, исследование и синтез концепции	Определение и документирование выбранной концепции	Валидация концепции		Испытание и аттестация
Подсистема		Определение требований и проверка их осуществимости	Определение функциональной и физической архитектуры	Валидация подсистем		Комплексирование и испытание
Компонент			Привязка функций к компонентам	Составление документации	Проектирование и испытание	Комплексирование и испытание
Субкомпонент	Визуализация			Привязка функций к субкомпонентам	Проектирование	
Деталь					Изготовление или закупка	

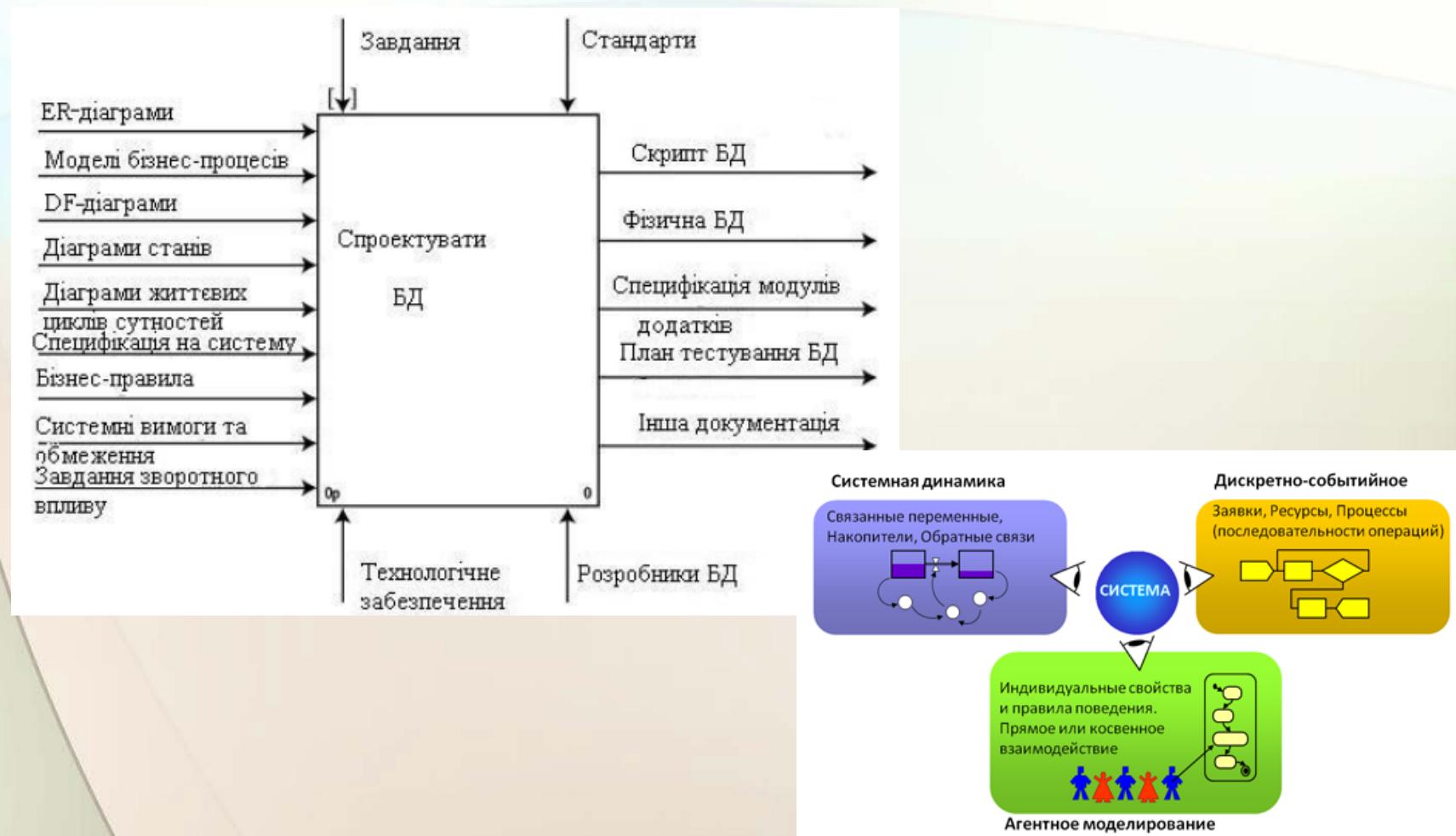
Дивлячись на таблицю, важливо відзначити, що хоча детальний проект системи не можна вважати завершеним до кінця розробки, його загальні характеристики повинні бути наочно представлені на дуже ранніх етапах. Це можна пояснити тим, що для вибору конкретної концепції системи необхідно мати реалістичну оцінку витрат на її розробку і виробництво, що в свою чергу вимагає хоча б загального уявлення про фізичну реалізації і функціональні можливості. Насправді таке спільне бачення фізичного здійснення функцій системи необхідно вже на самих ранніх етапах аналізу технічної здійсненості. Зрозуміло, ці ранні візуальні уявлення будуть багато в чому відрізнятися від остаточної матеріалізації, але не настільки сильно, щоб знецінити висновки про її практичності.

Уровень	Этап					
	Разработка концепции			Разработка инженерно-технических решений		
	Анализ потребностей	Исследование концепции	Определение концепции	Эскизное проектирование	Техническое проектирование	Комплексирование и аттестация
Система	Определение возможностей и эффективности системы	Идентификация, исследование и синтез концепции	Определение и документирование выбранной концепции	Валидация концепции		Испытание и аттестация
Подсистема		Определение требований и проверка их осуществимости	Определение функциональной и физической архитектуры	Валидация подсистем		Комплексирование и испытание
Компонент			Привязка функций к компонентам	Составление документации	Проектирование и испытание	Комплексирование и испытание
Субкомпонент	Визуализация			Привязка функций к субкомпонентам	Проектирование	
Деталь					Изготовление или закупка	

Роль системної архітектури полягає в тому, щоб задоволити цю вимогу візуалізації шляхом створення на можливо ранніх етапах ЖЦ візуальних уявлень системи, що відповідають її концепції. По мірі просування проекту системи по ЖЦ відбувається декомпозиція архітектурних описів до все більш детального рівня.

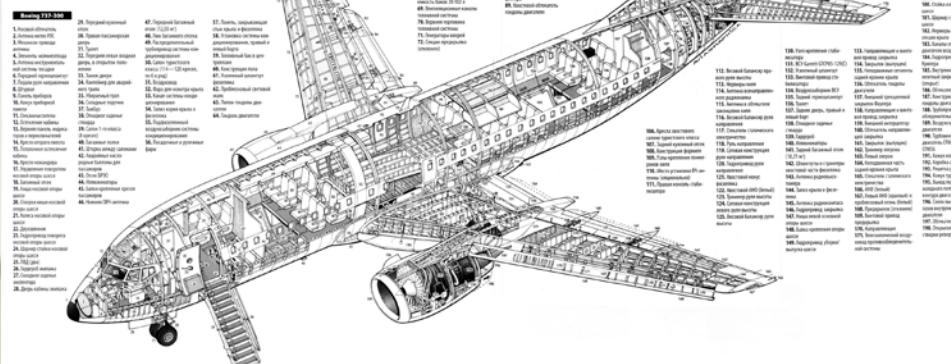


У будь-якій точці ЖЦ поточний опис системи можна прийняти за її поточну модель. Так, на стадії розробки концепції модель системи включає тільки функціональну модель, для побудови якої використовується лише описовий матеріал - діаграми, таблиці параметрів і т.д. - в поєднанні з імітаційними моделями, на яких досліджуються взаємозв'язки між характеристиками системи в цілому і специфічними функціями і можливостями окремих елементів.



Потім, на стадії розробки інженерно-технічних рішень, в цю модель поступово додаються проектні рішення, що стосуються апаратного та ПЗ окремих підсистем і компонентів, так що в підсумку виходить завершена інженерно-технічна модель. Вона в свою чергу перетворюється в модель виробництва, яка відображає процес трансформації інженерно-технічних рішень в конструкцію придатних для виготовлення апаратних засобів, в детальний опис ПЗ, в інструментальну оснастку і т.д. На кожній стадії процесу поточна модель системи обов'язково включає моделі всіх зовнішніх і внутрішніх інтерфейсів.

737 Classic Компоновочная схема



Материальные
ресурссы



Капитал

Трудовые
ресурссы

Продукция
(услуги)

Информация

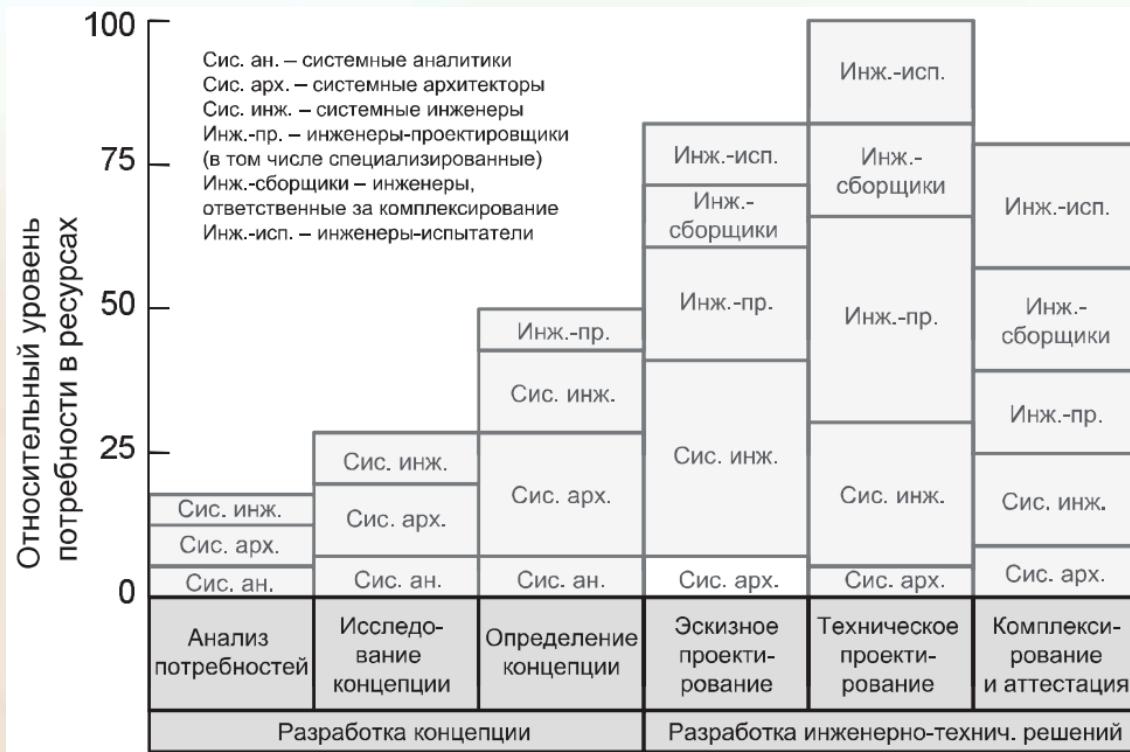
Учасники

У великому проекті беруть участь не тільки десятки або сотні людей, а й різні організації. Кінцевий користувач може бути чи не бути активним учасником проекту, але в будь-якому випадку відіграє важливу роль в появі системи, а в подальшому - в її житті в міру експлуатації. Найбільш поширені дві ситуації: 1) набувачем і користувачем системи є держава, а головний підрядник наймає субпідрядників в якості розробників і виробників; 2) за придбання системи відповідає комерційна компанія, вона ж є розробником і виробником. У ролі користувачів можуть виступати інші комерційні компанії або суспільство. Склад учасників може різнятися і залежить від етапу проекту. Тому одна з основних функцій системного інженера полягає в забезпеченні наступності між сторонами, що знаходяться на сусідніх рівнях ієархії і зайнятими на суміжних етапах розробки. Подібна спадкоємність може досягатися як за допомогою формальної документації, так і шляхом неформального спілкування.



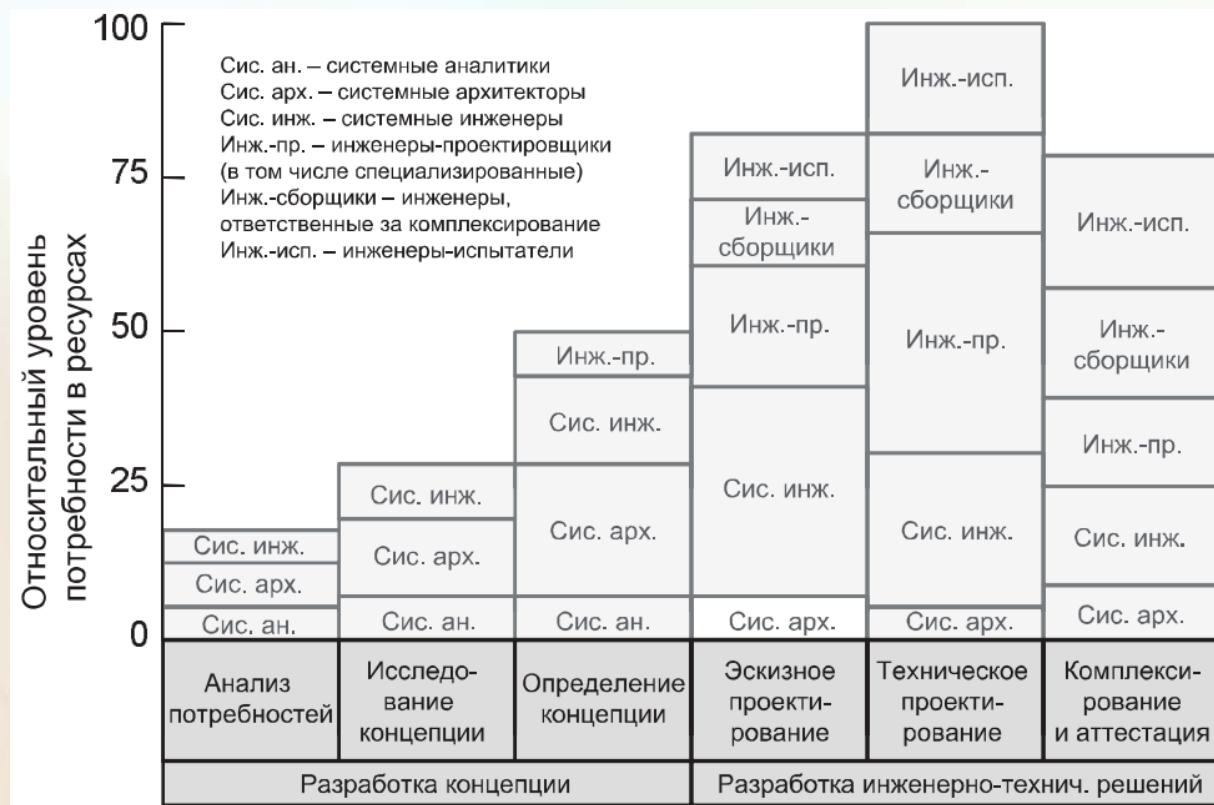
На рисунку показано типовий розподіл учасників розробки аерокосмічної системи. Висота колонок відображає відносне число залучених інженерних працівників. В осередках представлені типи працівників, що переважають на кожному етапі. За малюнком видно, що склад учасників змінюється від одного етапу до іншого, а системні інженери забезпечують спадкоємність.

На ранніх етапах основними учасниками є аналітики та архітектори (система і її функціонування/ринок). Робота на етапі визначення концепції виконується, як правило, силами спільної групи, в якій представлені всі фахівці, необхідні для виявлення і документування найбільш економічно ефективної концепції системи, що відповідає встановленим вимогам.

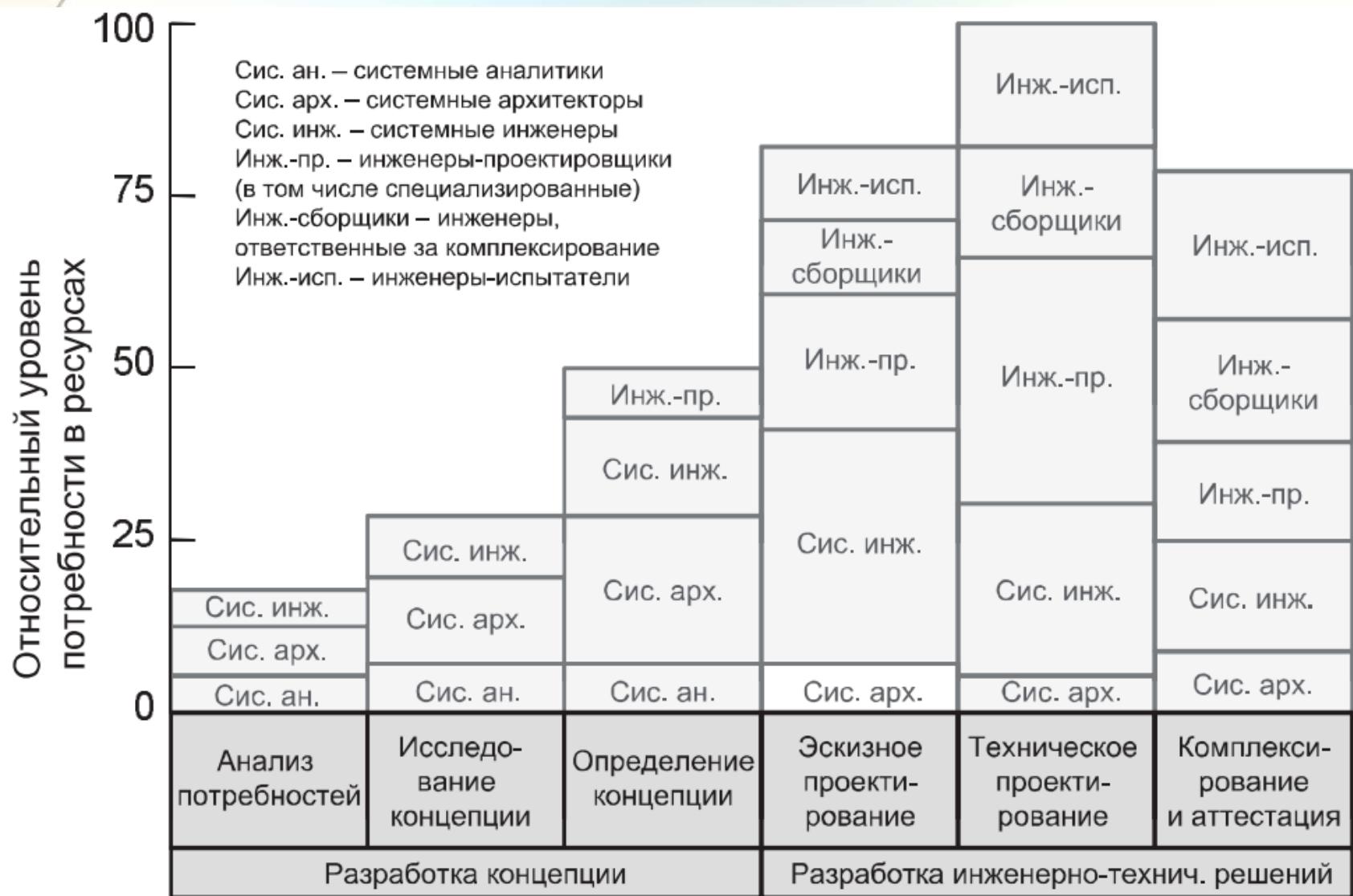


На етапі ескізного проектування зазвичай підключається група проектувальників, яка буде вести проект від стадії розробки інженерно-технічних рішень аж до початку виробництва. Її очолюють системні інженери, яких підтримують інженери, зайняті проектуванням і випробуваннями. Їх залучають до розробки необхідних компонентів і підсистем.

На стадії технічного проектування важливий внесок вносять співробітники, відповідальні за спеціальне проектування (надійність, ремонтопридатність і т.д.), А також фахівці з проведення випробувань і організації виробництва. У випадку з розробкою ПЗ на даному етапі залучаються розробники ПЗ і, можливо, кодувальники (в тій мірі, в якій необхідно, якщо потрібно створити прототип).



Стадія інтеграції та атестації в значній мірі відведена інженерам-випробувачам, які керуються системними інженерами, а також отримують підтримку з боку інженерів-проектувальників і професіоналів в області спеціального проектування.



Вимоги до системи та документація

У міру того як система матеріалізується в ході успішних кроків по її розробці, вимоги до системи і документація знаходять все більш конкретну і детальну форму. Все починається з вимог до функціонування, а закінчується повним комплектом виробничої та технологічної документації, інструкцій з експлуатації, технічного обслуговування і ремонту, навчальних матеріалів та інших документів. Таким чином, можна вважати, що в ході кожного етапу створюється все більше і більше детальний опис системи, прояснює, що вона виконує, як вона функціонує і як виготовляється.

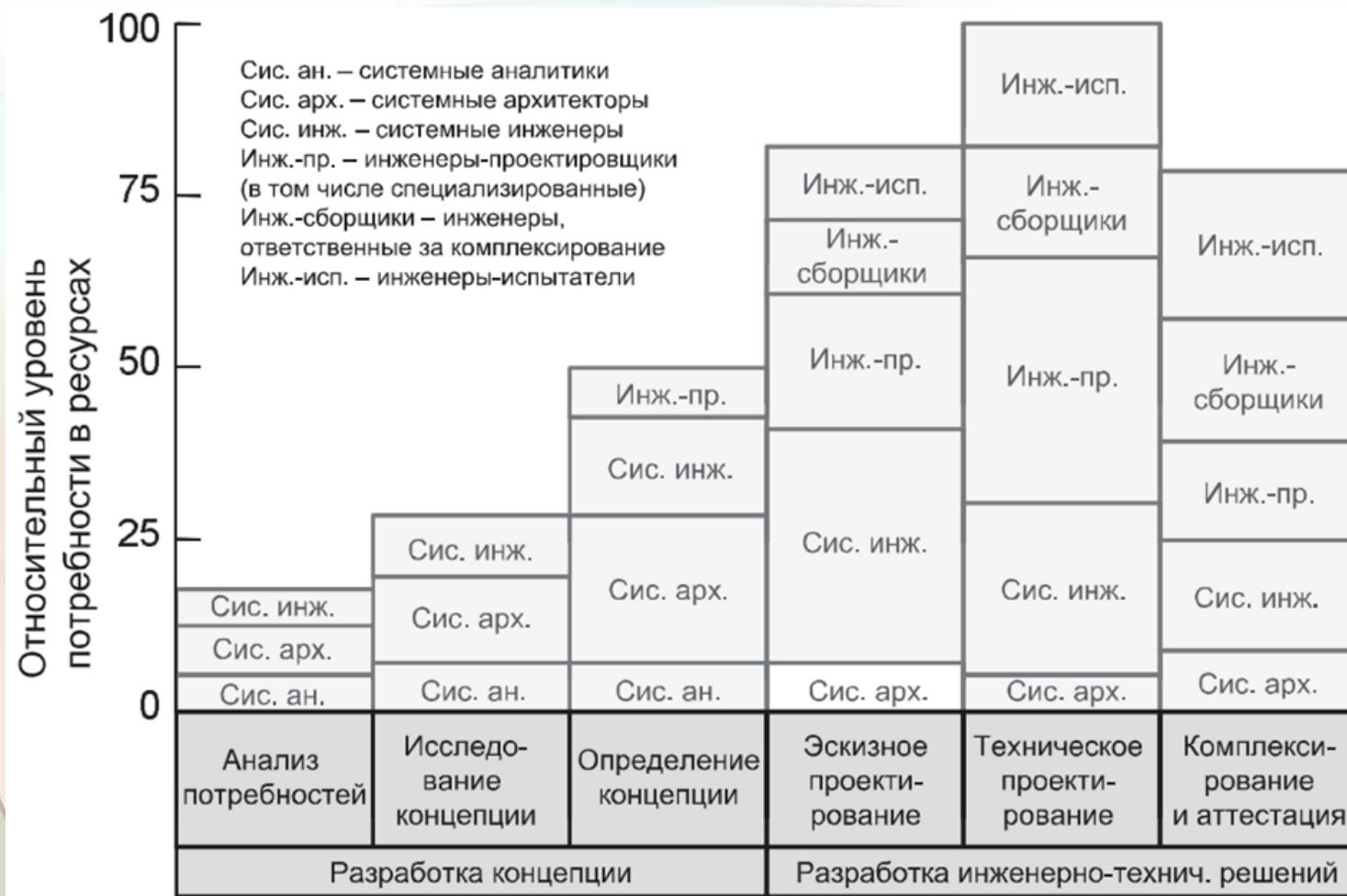
Оскільки всі вищезазначені документи в сукупності визначають хід розробки, а також зовнішній вигляд і можливості готової системи, вивчення змісту цих матеріалів і спостереження за їх підготовкою - важливий обов'язок системного інженера. Однак виконувати її він повинен в тісній співпраці з фахівцями з проектування та іншими зацікавленими організаціями.

Разработка концепции			Разработка инженерно-технических решений			
	Анализ потребностей	Исследование концепции	Определение концепции	Эскизное проектирование	Техническое проектирование	Комплексирование и аттестация
Документы	Возможности и эффективность системы	Требования к показателям функционирования	Функциональные требования к системе	Эскизная документация на систему	Проектно-конструкторская документация	Программы и методики испытаний и отчеты о результатах испытаний
Модели системы	Функциональные схемы, имитационные модели	Схемы, графики и диаграммы, характеризующие систему в целом, имитационные модели высокого уровня	Архитектурные продукты и представления, имитационные модели, макеты	Архитектурные продукты и представления, детальные имитационные модели, макетные платы	Архитектурные чертежи и схемы, сконструированные компоненты, продукция систем автоматизированного проектирования (САПР)	Испытательные стенды, симуляторы, испытательное оборудование, объекты испытаний

Еволюція вимог до системи і документації на неї показана в першому рядку таблиці в прив'язці до етапів ЖЦ. Підкреслимо, що кожен наступний комплект документів не замінює, а доповнює документи, складені раніше. Таким чином, вимоги та документація поступово обростають плоттою, а не змінюють один одного. Це «живі» матеріали, які періодично переглядаються і коригуються.

	Разработка концепции			Разработка инженерно-технических решений		
	Анализ потребностей	Исследование концепции	Определение концепции	Эскизное проектирование	Техническое проектирование	Комплексирование и аттестация
Документы	Возможности и эффективность системы	Требования к показателям функционирования	Функциональные требования к системе	Эскизная документация на систему	Проектно-конструкторская документация	Программы и методики испытаний и отчеты о результатах испытаний
Модели системы	Функциональные схемы, имитационные модели	Схемы, графики и диаграммы, характеризующие систему в целом, имитационные модели высокого уровня	Архитектурные продукты и представления, имитационные модели, макеты	Архитектурные продукты и представления, детальные имитационные модели, макетные платы	Архитектурные чертежи и схемы, сконструированные компоненты, продукция систем автоматизированного проектирования (САПР)	Испытательные стенды, симуляторы, испытательное оборудование, объекты испытаний

Необхідність агрегування формальних вимог і документації, створених в процесі успішної розробки системи, простіше зрозуміти, якщо згадати, про що говорилося в розділі «Учасники», і звернутися до рисунку. В процесі розробки бере участь безліч різних груп, причому склад учасників змінюється при переході від одного етапу до іншого. Тому необхідно мати у своєму розпорядженні повним і актуальним описом, проясняє, що повинна робити система і - в тій мірі, в якій це вже відомо, - як вона повинна це робити.



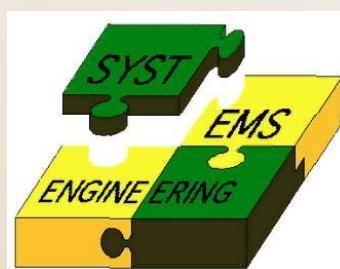
Документи з описом системи не тільки закладають основу для наступного етапу розробки системи, але вони також визначають, яким чином слід перевіряти результати виконаної роботи на відповідність вимогам. Ці документи становлять інформаційну базу, яка стане в нагоді при розробці, з одного боку, оснащення та інструментів, необхідних для виробництва, а з іншого боку - приладів і обладнання для контролю і діагностики продукції, виготовленої на наступному етапі.

Уявлення про характеристики системи також еволюціонує в міру проектування, як показано у другому рядку таблиці. Воно головним чином відбувається в архітектурних уявленнях, технічної та програмної документації, а також моделях. Їх призначення - доповнити текстові описи етапів реалізації наукними матеріалами, більш простими для сприйняття. Це особливо важливо при описі інтерфейсів і взаємодії елементів, які проектуються різними організаціями.

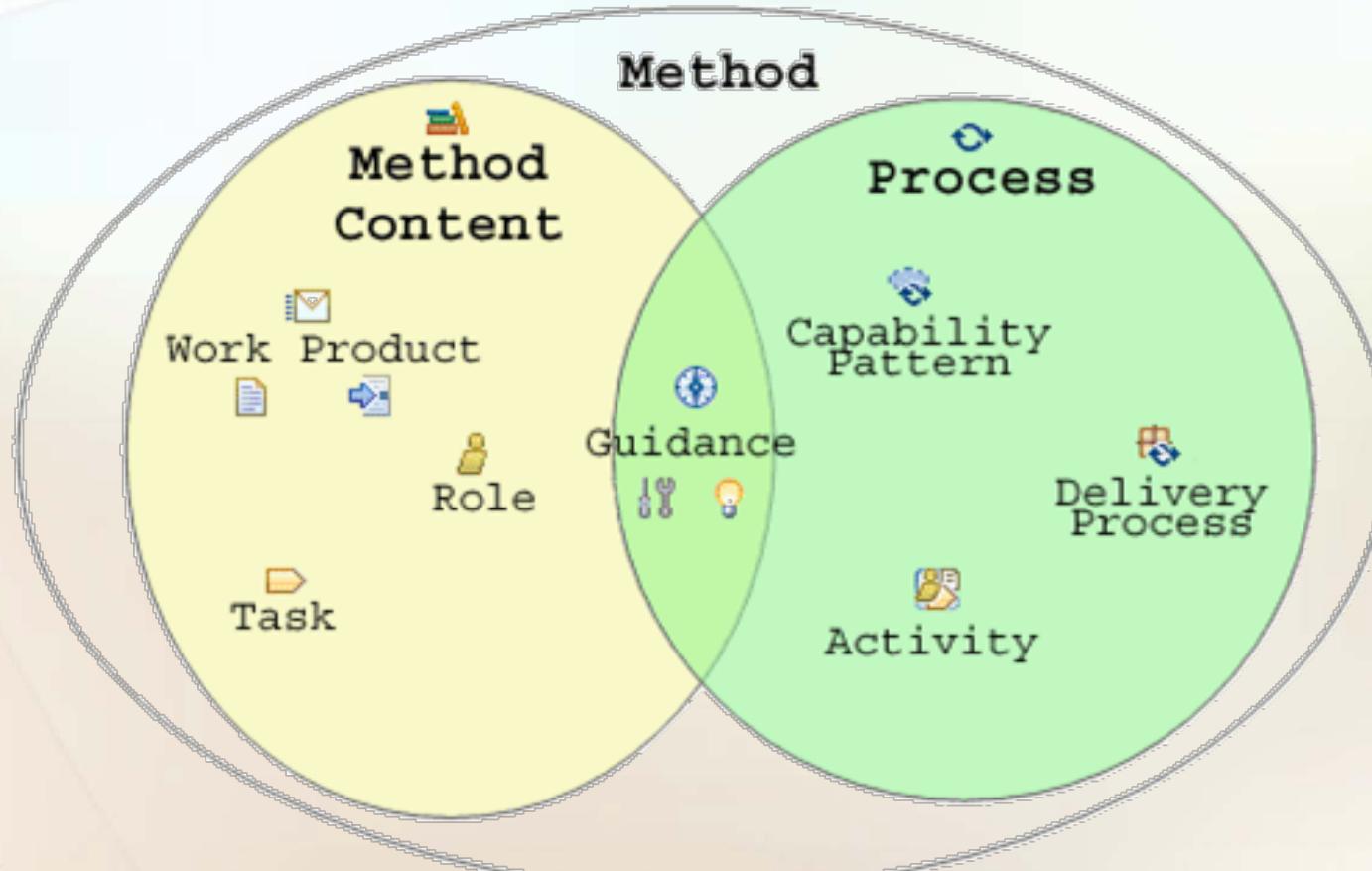
Разработка концепции			Разработка инженерно-технических решений			
	Анализ потребностей	Исследование концепции	Определение концепции	Эскизное проектирование	Техническое проектирование	Комплексирование и аттестация
Документы	Возможности и эффективность системы	Требования к показателям функционирования	Функциональные требования к системе	Эскизная документация на систему	Проектно-конструкторская документация	Программы и методики испытаний и отчеты о результатах испытаний
Модели системы	Функциональные схемы, имитационные модели	Схемы, графики и диаграммы, характеризующие систему в целом, имитационные модели высокого уровня	Архитектурные продукты и представления, имитационные модели, макеты	Архитектурные продукты и представления, детальные имитационные модели, макетные платы	Архитектурные чертежи и схемы, сконструированные компоненты, продукция систем автоматизированного проектирования (САПР)	Испытательные стенды, симуляторы, испытательное оборудование, объекты испытаний

4. Метод системної інженерії.

Вище розробка складної системи була представлена у вигляді послідовності кроків або етапів. Все починається з усвідомлення можливості істотного розширення важливою для системи функціональної здатності за допомогою відповідного технологічного рішення; потім на кожному наступному етапі до подання про систему додаються чергові деталі (втілення, або матеріалізація), до тих пір поки не буде побудована комплексна модель, покликана довести, що всі істотні експлуатаційні вимоги можуть бути з великою ймовірністю задоволені при прийнятних витратах. Хоча специфічні особливості багатьох завдань, що виникають на кожному конкретному етапі, визначаються тим, як на даному етапі описується система, принципи системної інженерії та зв'язку між ними в своїй основі не змінюються при переході від одного етапу до іншого. Важливість цього факту для розуміння процесу розробки системи була в повній мірі усвідомлена, і сукупність дій, що повторюються від етапу до етапу, отримала особливу назву - в різних публікаціях вона називається процесом інженерії систем (systems engineering process) або підходом системної інженерії (systems engineering approach). Подібну сукупність ітеративних дій ми будемо називати методом системної інженерії (systems engineering method); до його вивчення ми звернемося далі.



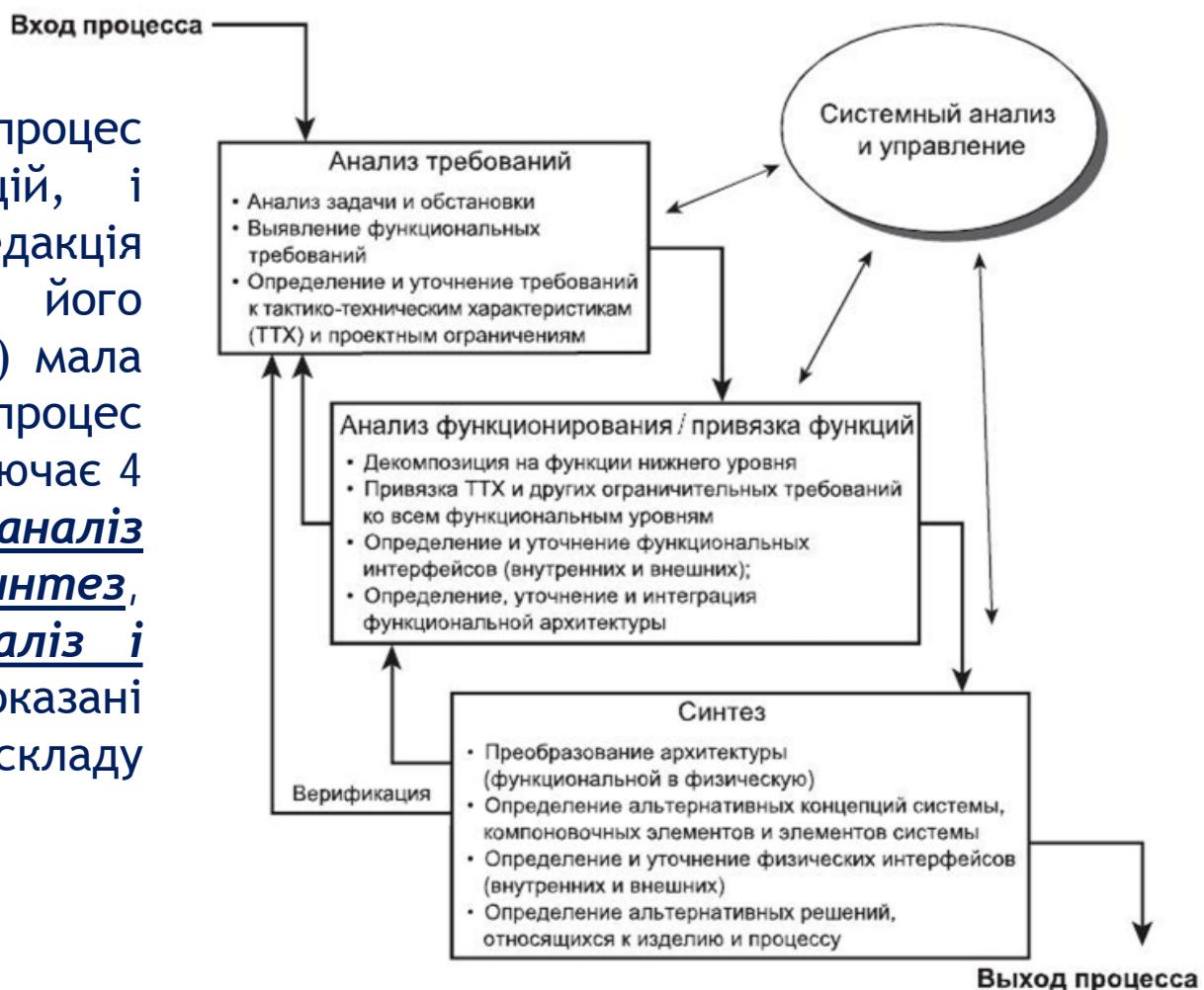
Ми вважали за краще термін «метод» більш поширеним «процес» або «підхід», тому що він краще визначає поняття і залишає менше простору для тлумачень. «Метод» точніше, ніж «процес», який асоціюється з чимось логічним і організованим. До того ж, під процесом системної інженерії іноді розуміють розробку системи в цілому. З іншого боку, термін «метод» краще, ніж «підхід», так як останній характеризує скоріше ставлення, ніж процес. Втім, використання більш широко відомої термінології також цілком прийнятно.



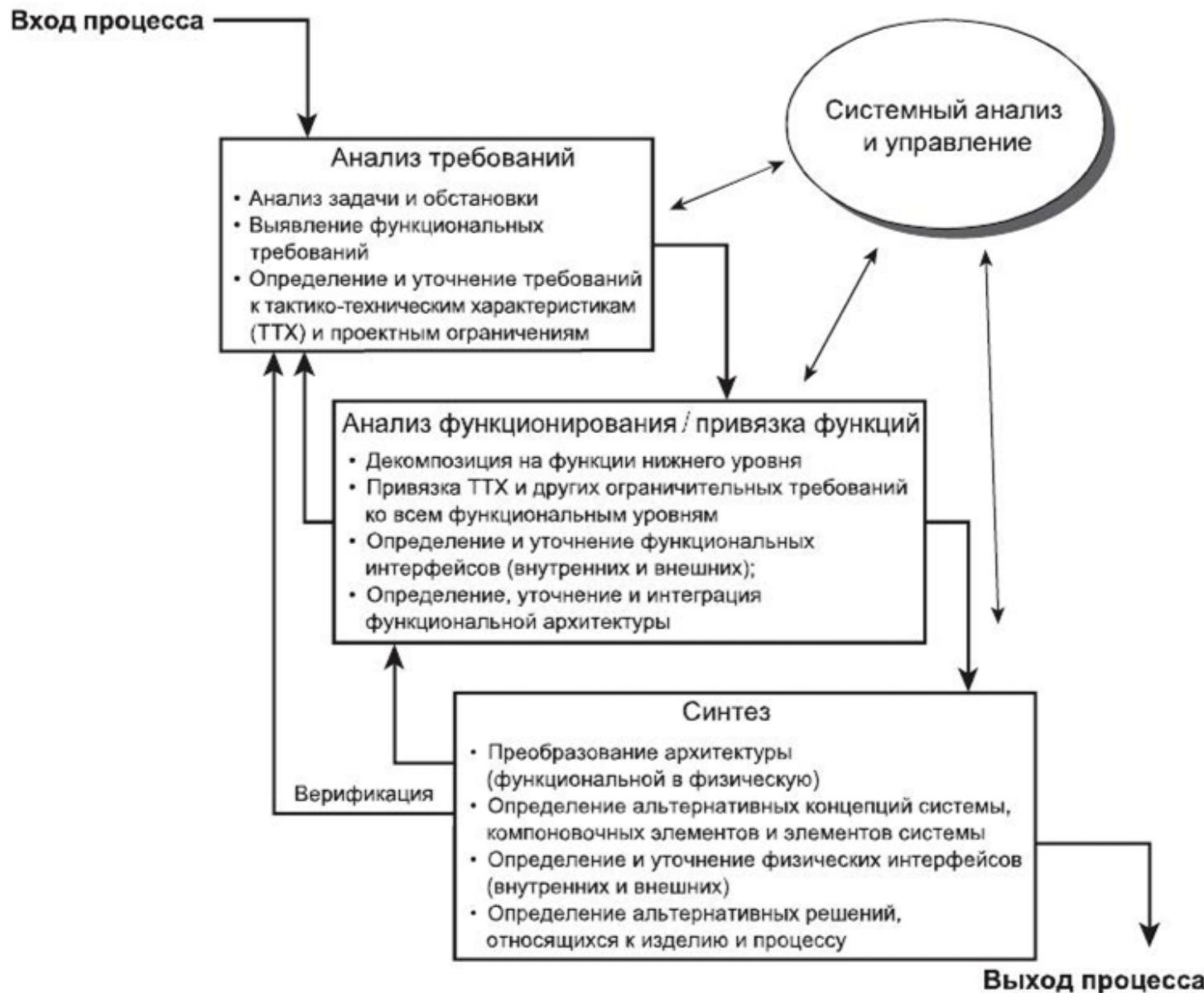
Огляд існуючих методів і процесів системної інженерії

Першою організацією, що запропонувала формальний опис процесу системної інженерії, було Міністерство оборони США. Відповідний документ отримав назву військового стандарту MIL-STD-498.

З тих пір цей процес зазнав декількох ітерацій, і остання офіційна редакція стандарту (перш ніж його підтримка була припинена) мала номер MIL-STD-499B. Це процес показаний на рисунку і включає 4 основні дії: аналіз вимог, аналіз функцій і їх прив'язка, синтез, а також системний аналіз і управління. На малюнку показані завдання, що входять до складу кожної дії.

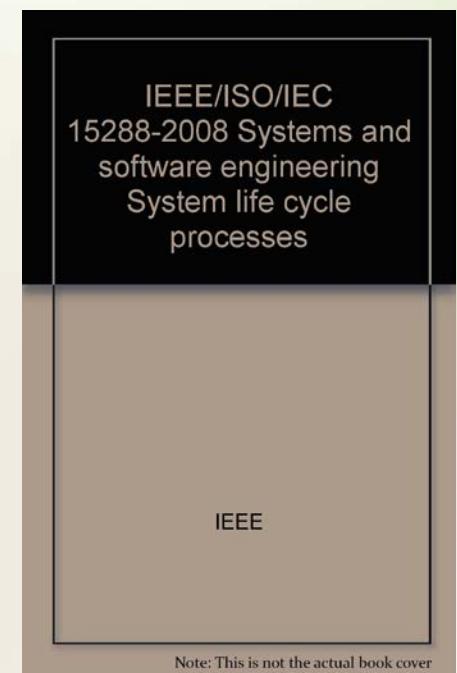
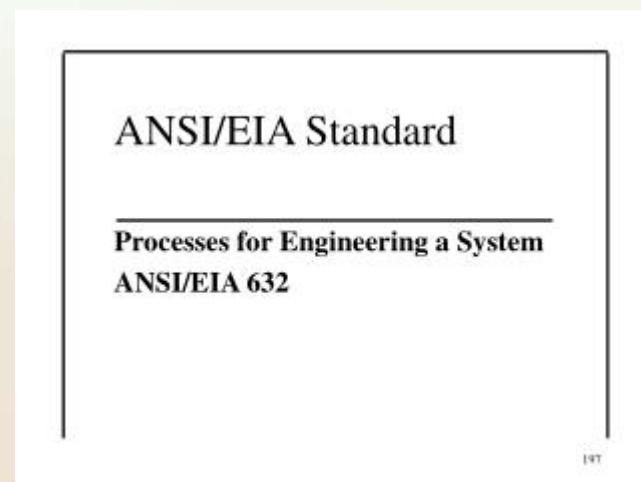
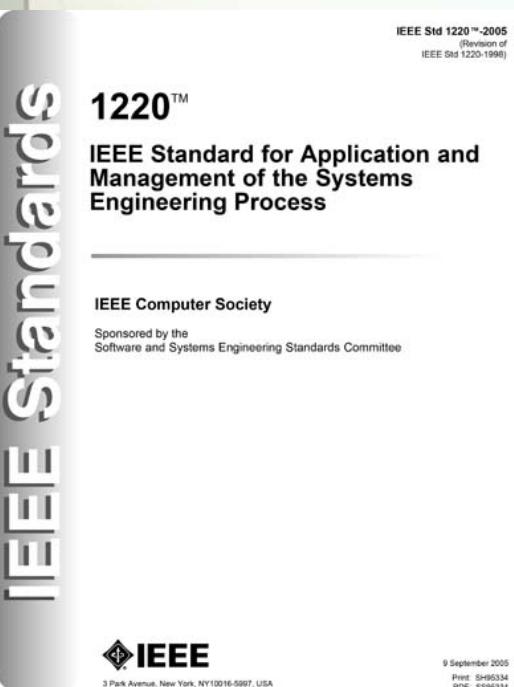


Хоча цей військовий стандарт вважається застарілим, він як і раніше використовується в якості керівництва багатьма організаціями і є основою для розуміння сучасних процесів системної інженерії.



Відомі три промислових стандарта, що містять опис процесу системної інженерії: IEEE-1220, EIA-632 і ISO/IEC 15288. Знайомлячись з цими описами, зверніть увагу, що в кожному з цих документів аспекти, що мають відношення до процесу інженерії систем, так або інакше поєднуються з описаної вище моделлю ЖЦ. Послідовність, в якій ми представимо ці 3 методи, обрана не випадково: вони розглядаються в порядку наближення до моделі життєвого циклу створення системи. Взагалі-то на перше місце в цьому ланцюжку можна було б помістити вищезгаданий військовий стандарт. Іншими словами, положення стандарту MIL-STD-499B в найменшій мірі прив'язані до моделі життєвого циклу.

І навпаки, те, що сказано в стандарті ISO/IEC 15288, цілком можна розглядати як модель ЖЦ для створення системи.



На рисунку представлений процес, описаний в IEEE-1220. Основна управлінська діяльність показана в центрі діаграми. Її (за годинниковою стрілкою, починаючи з лівого нижнього кута) оточує потік дій, який починається з «входів процесу» і закінчується «виходами процесу». Цей процес можна вважати узагальненням військового стандарту: є чотири основних дії, а між ними - кроки по верифікації або валідації.



На рисунку показаний процес, описаний в ЕІА-632. Фактично в стандарті ЕІА-632 описана сукупність 13 взаємопов'язаних процесів. На малюнку чітко видно ітеративна і циклічна природа цих зв'язків. Хоча в цілому потік рухається зверху вниз, процеси можуть багаторазово повторюватися протягом ЖЦ системи.



13 процесів розбиті на 5 категорій: **технічне керівництво, придбання і постачання, проектування системи, реалізація продукції і технічна атестація**. Процеси з першої і останньої категорії майже безперервно присутні протягом усього ЖЦ розробки системи. Планування, оцінка та управління не припиняються після завершення початкових етапів розробки, а аналіз системи, валідація вимог, верифікація системи та валідація кінцевої продукції починаються задовго до появи продукції в фізичному вигляді. Процеси, що входять в одну з 3 проміжних категорій, протікають лінійно, але зі зворотним зв'язком і ітераціями.



На рисунку представлений процес, описаний в ISO/IEC 15288. У цьому стандарті задані процеси, пов'язані як до дій, що вживаються в міру розвитку ЖЦ системи, так і до дій, що вживаються в ході інженерної діяльності по створенню системи.

Крім того, в стандарт закладена ідея про те, що системний інженер і керівник програми здатні перетворювати процеси, представлені в стандарті, в послідовність дій, яка застосовується до конкретної програми або проекту. Тому в стандарті немає рекомендацій щодо будь-якого або спеціального методу, за допомогою якого необхідно було б упорядкувати підмножину процесів.



Наш метод системної інженерії

Метод системної інженерії можна уявити собі як систематичне застосування наукового методу до інженерної діяльності по створенню складної системи. Можна вважати, що він включає чотири основних види діяльності, які застосовуються послідовно, як показано на рисунку:

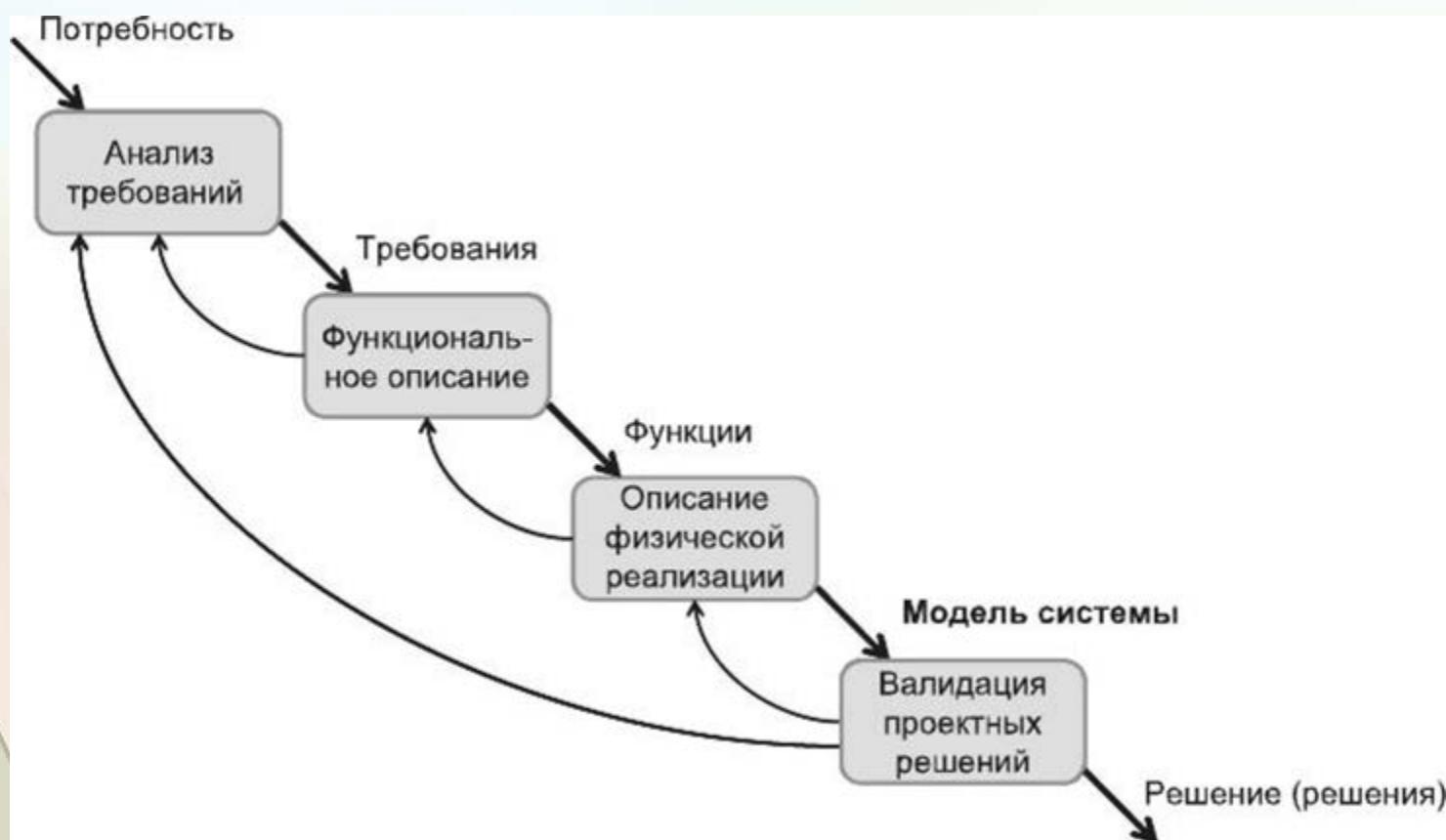
1. Аналіз вимог.
2. Функціональний опис.
3. Опис фізичної реалізації.
4. Валідація проектних рішень.



Характерні особливості кроків можуть відрізнятися в залежності від типу системи і стадії її розробки. Але основні принципи застосування досить схожі, щоб визначити типові дії, характерні для кожного кроку, рекомендованого методом.

1. Аналіз вимог (постановка завдання). Типові дії включають:

- збір та систематизацію всіх вхідних умов, в тому числі вимог, планів, точок прийняття рішень і моделей, отриманих на попередньому етапі;
- відповідь на питання «навіщо» стосовно до всіх вимог - в термінах практичних потреб, обмежень, оточення та інших високорівневих цілей;
- прояснення вимог до того, що, наскільки добре і в рамках яких обмежень повинна робити система;
- виправлення невідповідностей і вираз вимог у вимірних показниках там, де це можливо.

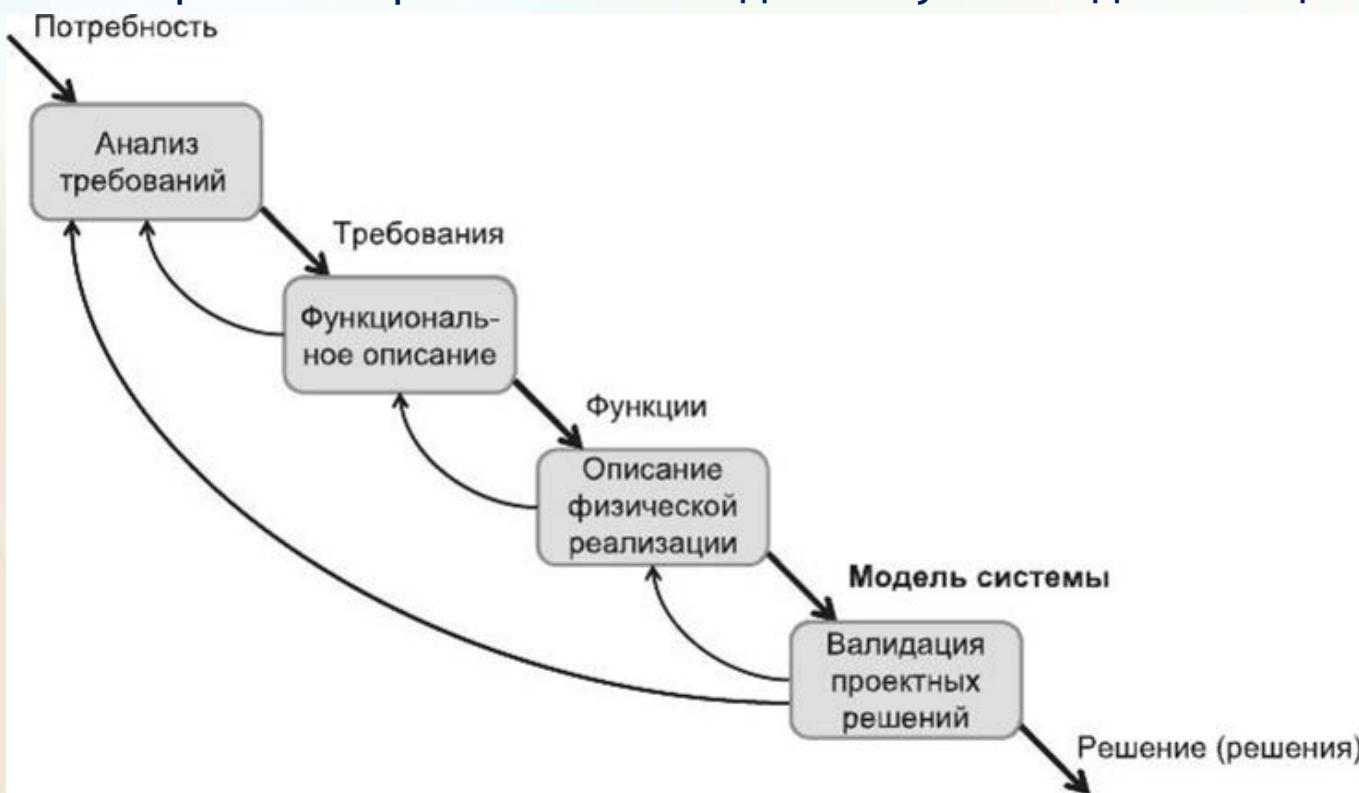


2. **Опис функцій (аналіз функціонування і прив'язка функцій)**. Типові дії:
- переклад вимог (навіщо, чому) на мову функцій (дій та робіт), які повинна виконувати система (що);
 - декомпозиція вимог з прив'язкою до функціональних складових частин;
 - опис взаємодій між функціональними елементами, що дозволяє закласти основу для побудови модульної конфігурації.



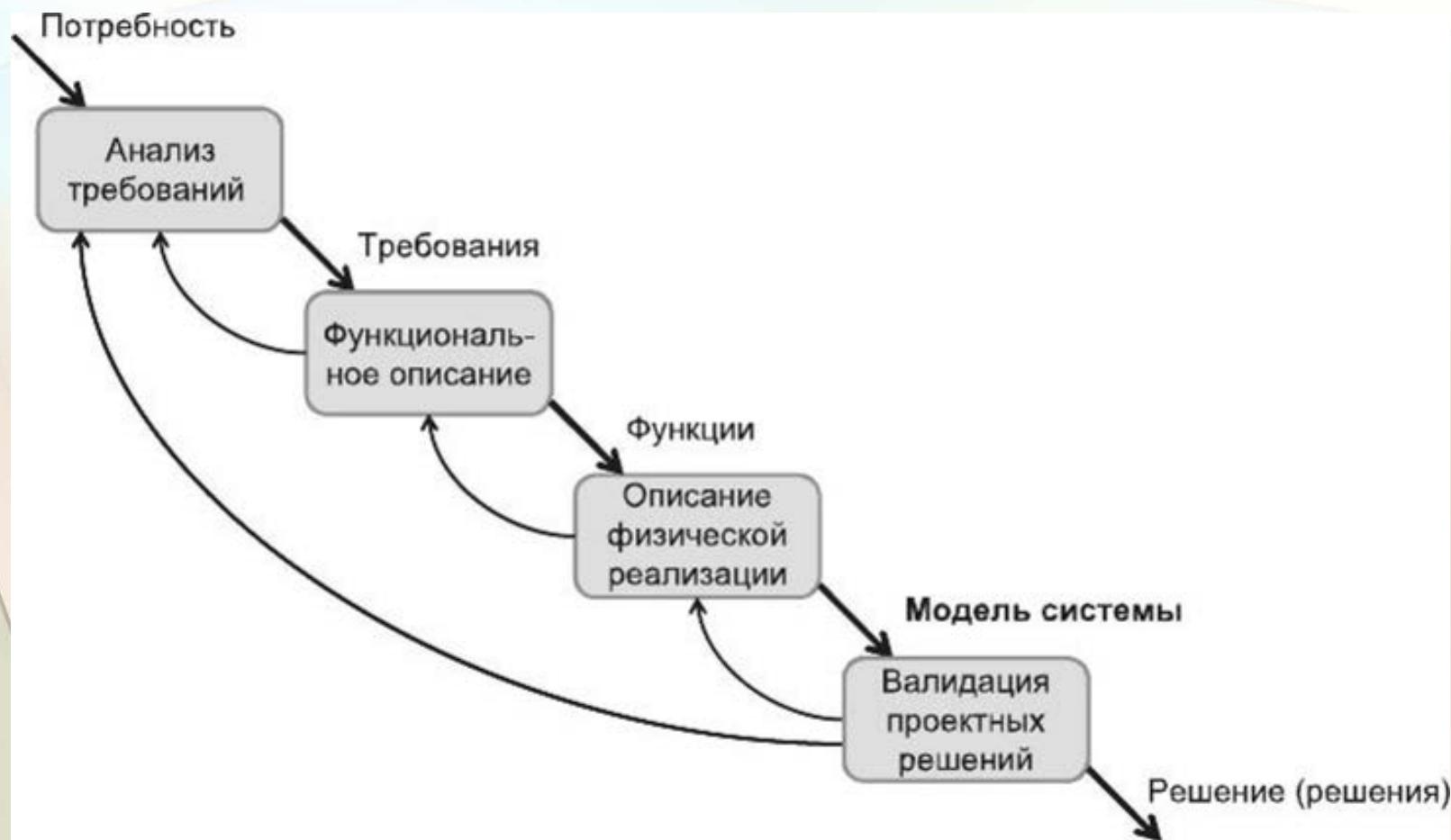
3. Опис фізичної реалізації (синтез, аналіз фізичної реалізації та розміщення елементів). Типові дії:

- синтез кількох альтернативних компонентів системи, що представляють різноманіття проектних підходів до реалізації необхідних функцій і дозволяють найбільш простим чином здійснити взаємодії і реалізувати інтерфейси між елементами структури;
- вибір найкращого підходу, де в основі прийняття рішення лежить досягнення компромісу на основі аналізу сукупності заздалегідь визначених критеріїв із заданими пріоритетами (показниками ефективності) в інтересах отримання найкращого «балансу» між показниками функціонування, ризиками, витратами і термінами;
- опрацювання проектних рішень з необхідним ступенем деталізації.



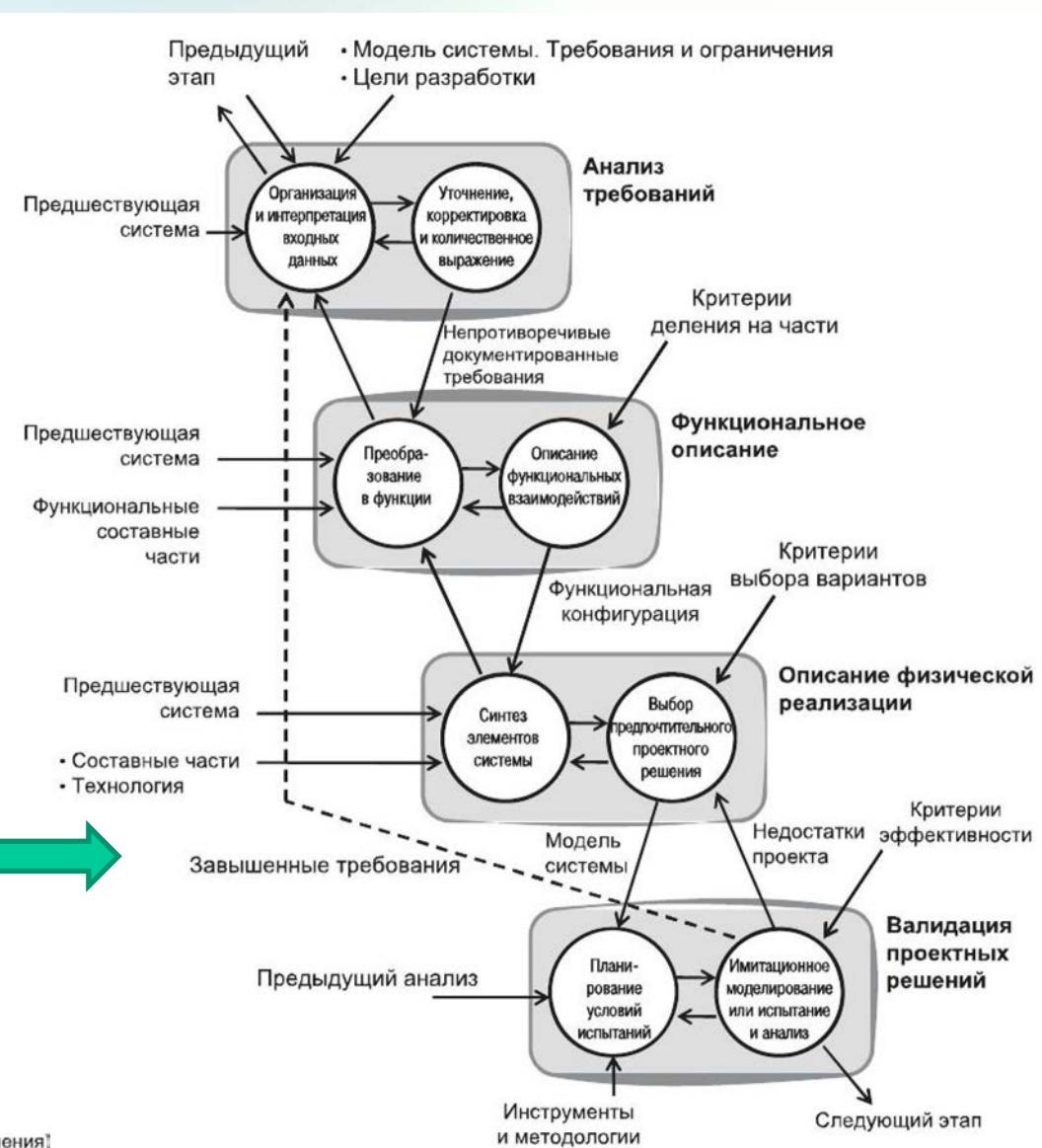
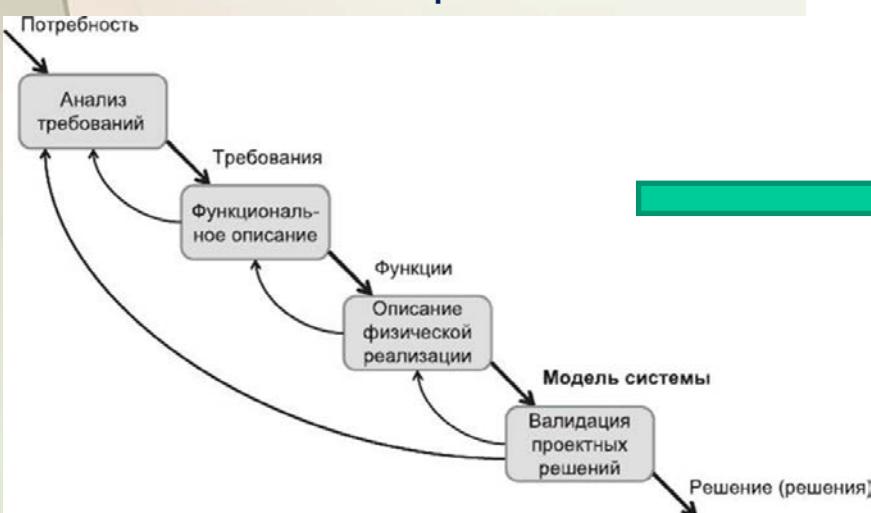
4. Валідація проектних рішень (верифікація та оцінка). Типові дії:

- проектування моделей оточення системи (логічної, математичної, імітаційної і фізичної), що відображають всі істотні аспекти вимог і обмежень;
- імітація або випробування і аналіз системного рішення (рішень) на моделях оточення;
- при необхідності - виконання ітерацій для коригування моделі системи або моделей оточення або для ослаблення занадто жорстких вимог, до тих пір, поки проектні рішення і вимоги не будуть повністю узгоджені.

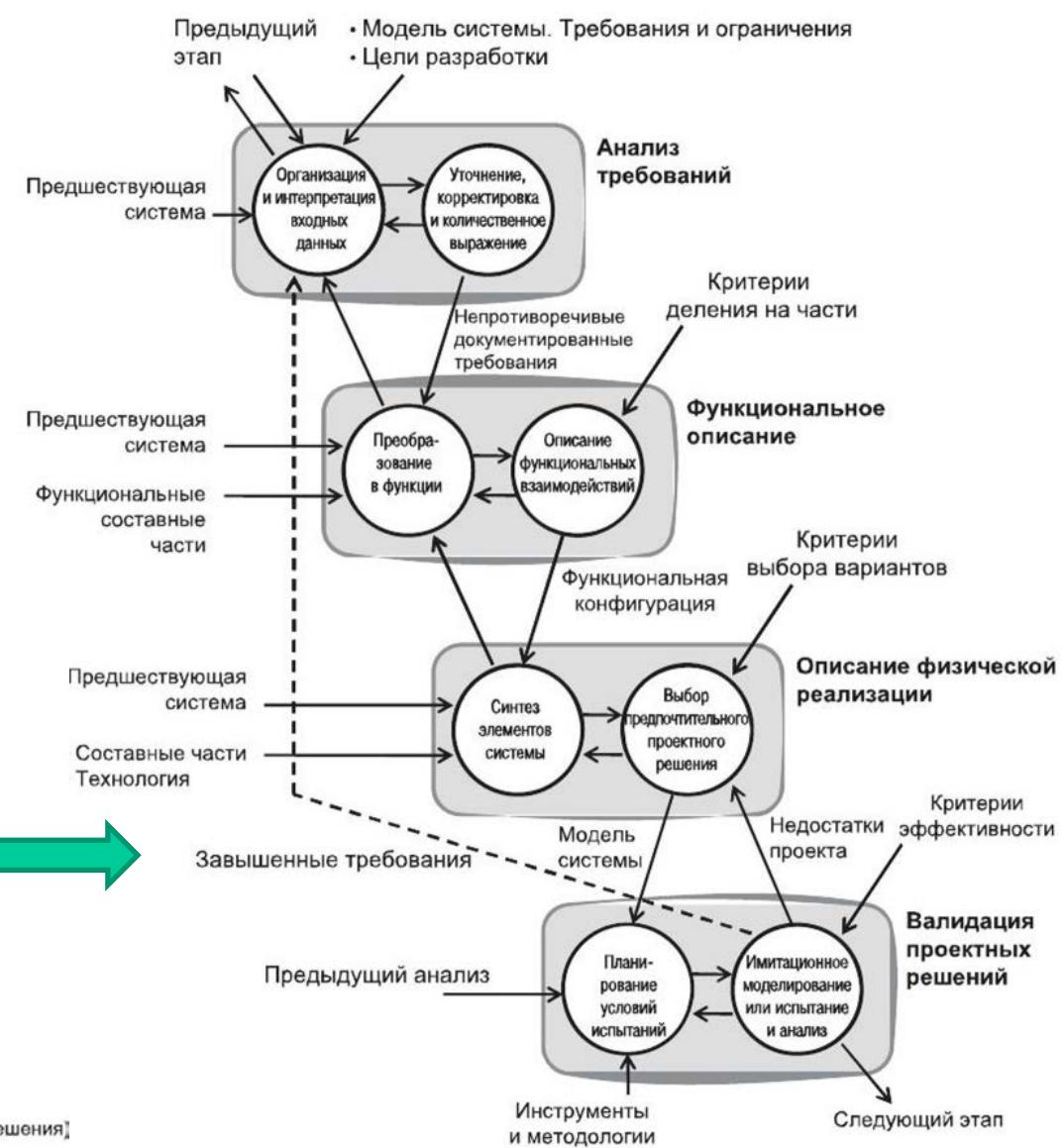
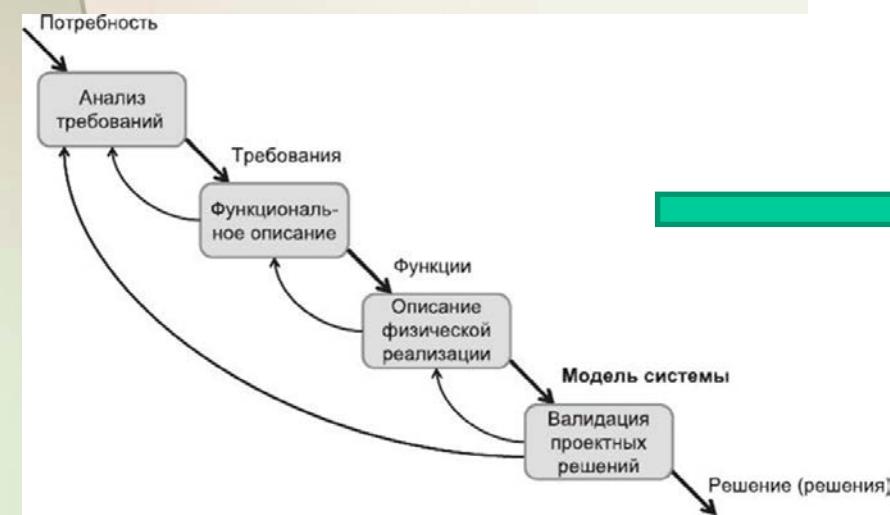


Елементи методу системної інженерії, описані вище, представлені у вигляді блок-схеми, яка деталізує попереднє уявлення. Прямоугольні блоки відповідають 4 основним крокам методу: аналіз вимог, функціональний опис, опис фізичної реалізації та валідація проектних рішень.

Зверху розташовані входи, є результатом попередньої стадії: вимоги, обмеження і цілі. Зліва від кожного блоку знаходяться зовнішні входи, наприклад попередня система, складові частини системи і результати аналізу, виконаного на попередніх кроках. Праворуч і зверху від блоків і в самому низу показані вклади методології системної інженерії.



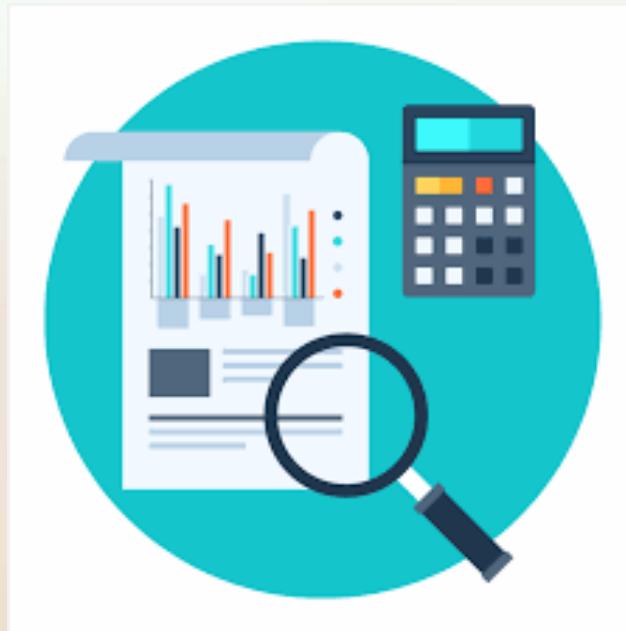
Колами всередині блоків позначені спрощені уялення основних процесів на даному етапі методу. Стрілки вказують напрямок потоку інформації. Видно, що існують зворотні зв'язки між різними кроками процесу, а також ітерації як всередині елементів, так і з поверненням до попередніх елементів, в тому числі до вимог.



Аналіз вимог (постановка завдання)

Для вирішення будь-якої задачі необхідно зрозуміти, що дано і наскільки вихідні умови є неповними, суперечливими або нереалістичними, після чого поповнити дані або внести корективи. Це особливо важливо, коли мова йде про процес розробки системи, оскільки в системній інженерії здається не обов'язково є істинним, і суттєві припущення не слід вважати достовірними без попередньої перевірки.

Таким чином, в проекті розробки системи на системну інженерію покладається обов'язок уважно проаналізувати всі вимоги і специфікації - спочатку для того, щоб зіставити їх з основними потребами, які покликана задоволити система, а потім - щоб виявити і усунути будь-які неоднозначності і суперечності при визначенні можливостей системи або окремого її елемента.

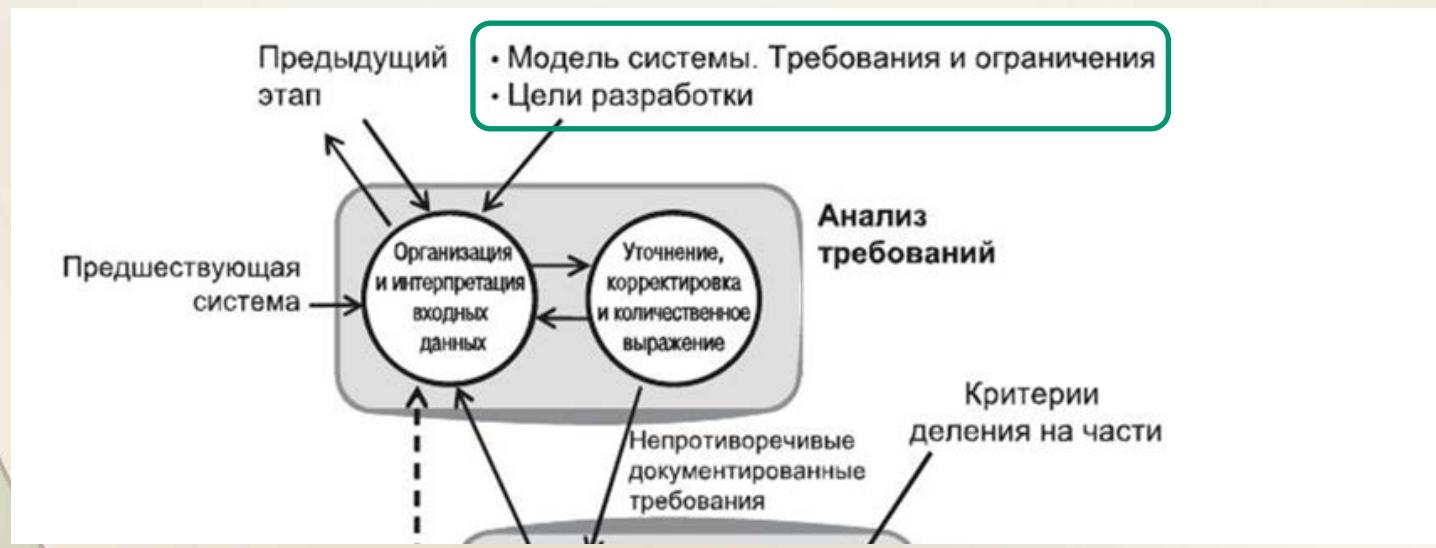


Конкретні дії, що виконуються в рамках аналізу вимог, змінюються в ході розробки системи, у міру того як вхідні дані, отримані з попереднього етапу, еволюціонують від практичних потреб і технологічних можливостей в сторону все більш детальних уявлень про вимоги та проектних рішеннях. Роль системної інженерії значима протягом усього процесу, але, мабуть, найбільш істотна на ранніх стадіях, коли особливо важливо виробити розуміння умов експлуатації, а також отримати уявлення про наявність і ступінь зрілості технологій, які передбачається використовувати. На більш пізніх етапах в компетенцію системної інженерії входить розробка вимог до оточення, інтерфейсів і інших межелементних вимог.

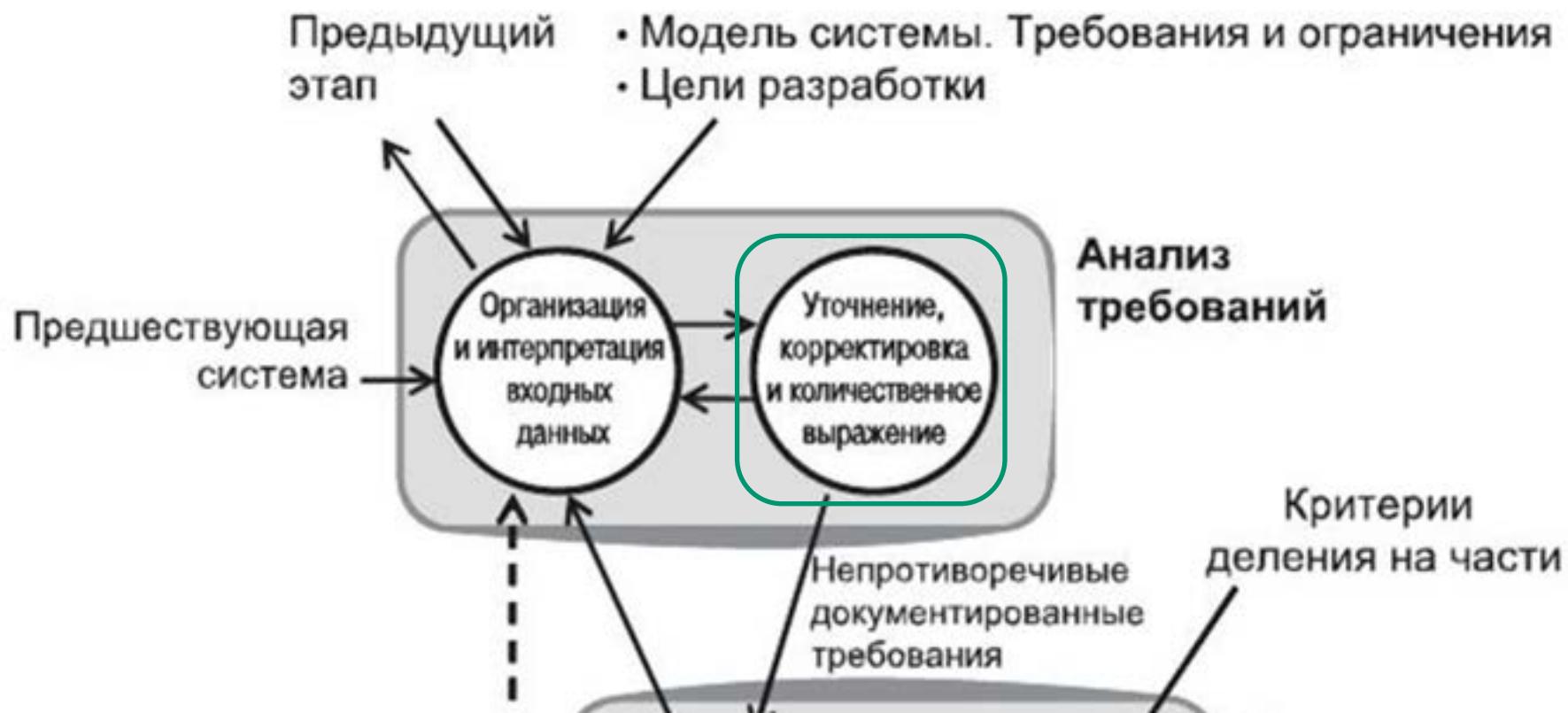


Організація і інтерпретація. При добре налагодженному процесі на вході нового етапу ЖЦ системи виділяються 3 основних складових, які були визначені на попередньому етапі (або в результаті його виконання):

1. Модель системи, в якій відображені і зафіксовані всі проектні рішення, прийняті і схвалені на попередніх етапах.
2. Вимоги (або специфікації), які відносяться до проекту, показниками функціонування і сумісності інтерфейсів системи або її елементів, що підлягають розробці на наступному етапі. Ці вимоги виводяться з раніше розроблених високорівневих вимог з урахуванням уточнень і / або коригувань, що мали місце на більш пізньому етапі.
3. Конкретні результати, які повинні бути досягнуті кожним із підрозділів організації в ході наступного етапу, в тому числі ідентифікація всіх технічних проектних даних, апаратних / програмних продуктів і пов'язаних з цим результатів випробувань. Ця інформація зазвичай наводиться у вигляді послідовності звітів про взаємозалежних завданнях.



Уточнення, коригування та кількісне вираження. Завжди важко висловити цілі однозначно і, крім того, в вимірних показниках; тому сформульовані вимоги часто виявляються неповними, суперечливими і нечіткими. Особливо це характерно для випадків, коли вимоги готуються людьми, незнайомими з процесом їх перетворення в набір можливостей системи, або коли вимоги спочатку виражаються в термінах практичних потреб. На практиці можна очікувати, що повнота і точність вимог будуть варіюватися в залежності від природи системи, ступеня її відмінності від попередньої системи, особливостей процесу придбання, прийнятого до використання, а також від етапу.

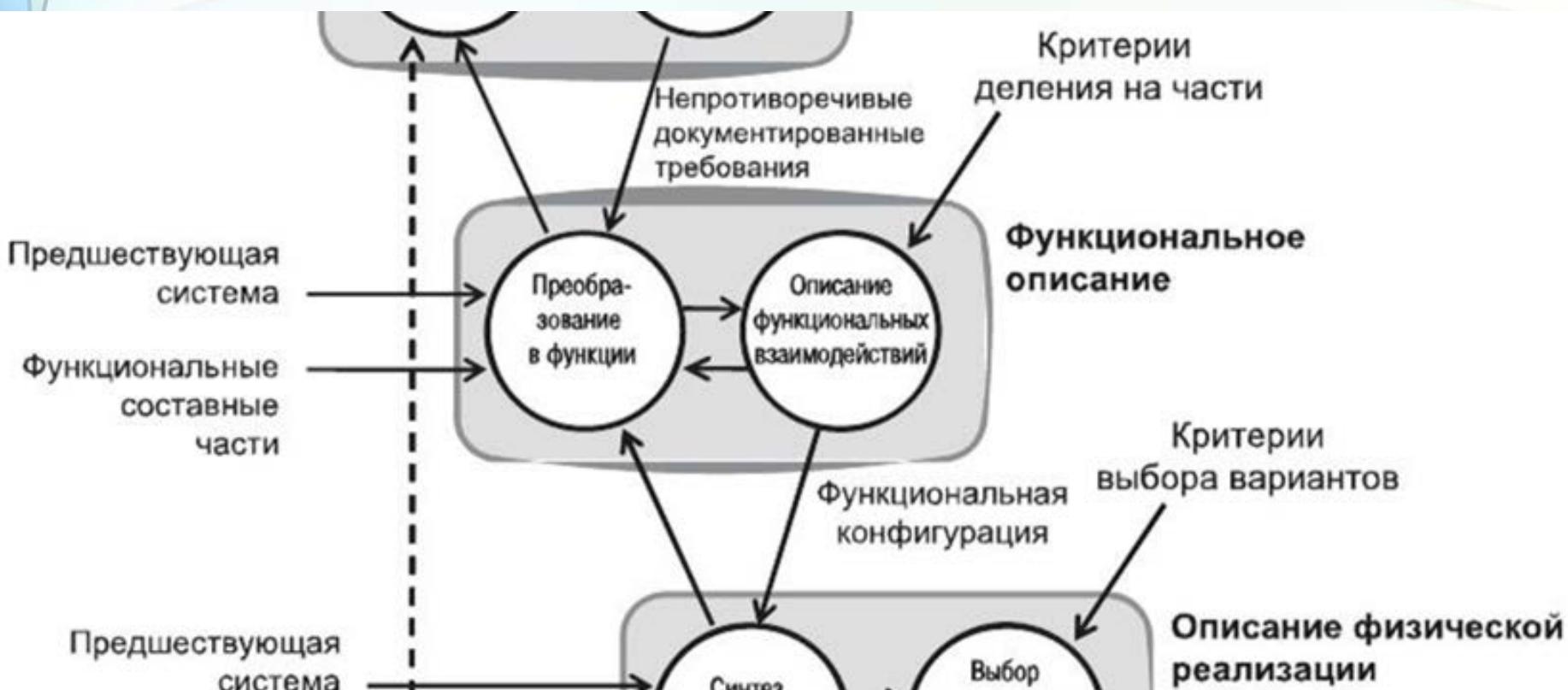


Аналіз повинен передбачати взаємодію з можливими користувачами системи, від яких можна безпосередньо отримати інформацію про їхні потреби і обмеження, а також думку з того чи іншого питання. В результаті аналізу документ з вимогами може бути доповнений або змінений, так що він буде краще відображати цілі програми або показувати, наскільки здійсненні пропоновані технічні удосконалення. Кінцева мета - закласти міцний фундамент, на який можна спертися, визначаючи, що потрібно змінити в проектних рішеннях і в якій частині, щоб задоволити вимогам.

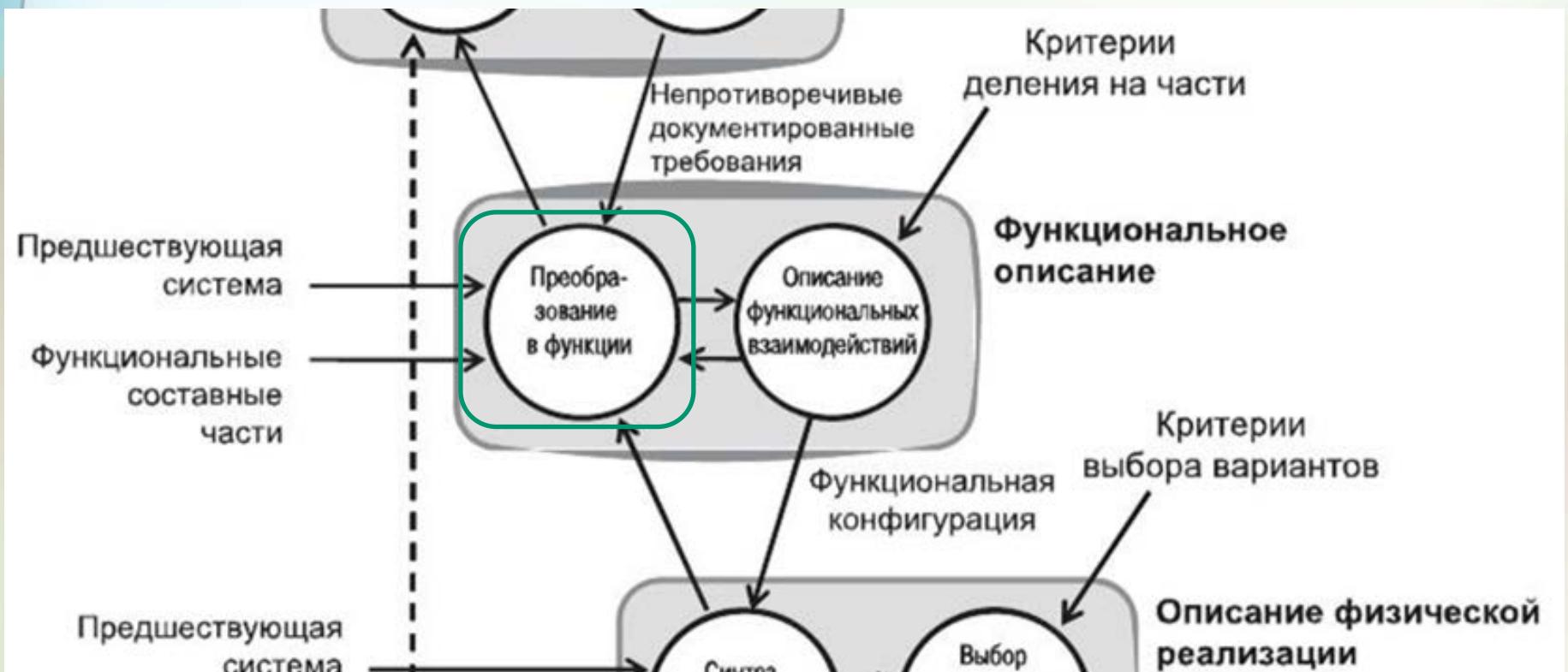


Функціональний опис (аналіз функціонування і прив'язка функцій)

У методі системної інженерії функціональне проектування передує фізичному, що забезпечує дисциплінований підхід до ефективної організації (компонуванні) функцій і вибору способу реалізації, при яких досягається найкращий баланс бажаних властивостей системи (наприклад, показників функціонування і вартості).

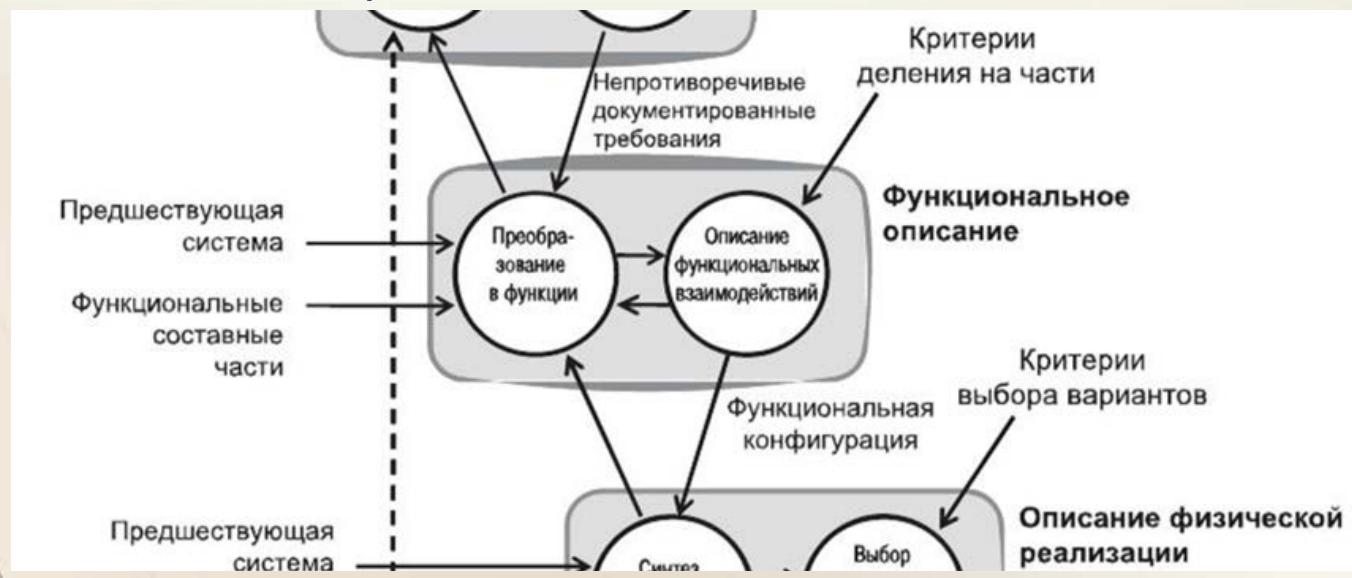


Перетворення в функції. Елементи системи, які можуть служити функціональними складовими частинами, коротко обговорювалися вище. Базові складові частини знаходяться на рівні компонентів і представляють елементи, що виконують деяку значущу функцію і взаємодіючі тільки з однієї середовищем: сигналами, даними, матеріалами або енергією. Вони в свою чергу складаються з піделементів, що виконують низькорівневі функції, і агрегуються в функціональні підсистеми. Таким чином, під функціональним проектуванням можна розуміти вибір, розподіл на частини або агрегування функціональних елементів, що відповідають необхідним завданням і рівню матеріалізації системи.



Декомпозіція і прив'язка кожного з отриманих в результаті чергової ітерації наборів вимог і функцій, які планується реалізувати на наступному по порядку рівні опису системи, - одна з основних обов'язків системного інженера. Вперше це відбувається на стадії розробки концепції слідом за визначенням архітектури системи. Завдання полягає в ідентифікації та описі всіх функцій, які передбачається реалізувати згідно з відповідними кількісними вимогам до кожної підсистеми, з тим щоб були досягнуті повноваження, встановлені для даного системного рівня. Потім ця інформація відбивається в функціональних специфікаціях на систему, які беруться за основу на наступній стадії розробки інженерно-технічних рішень.

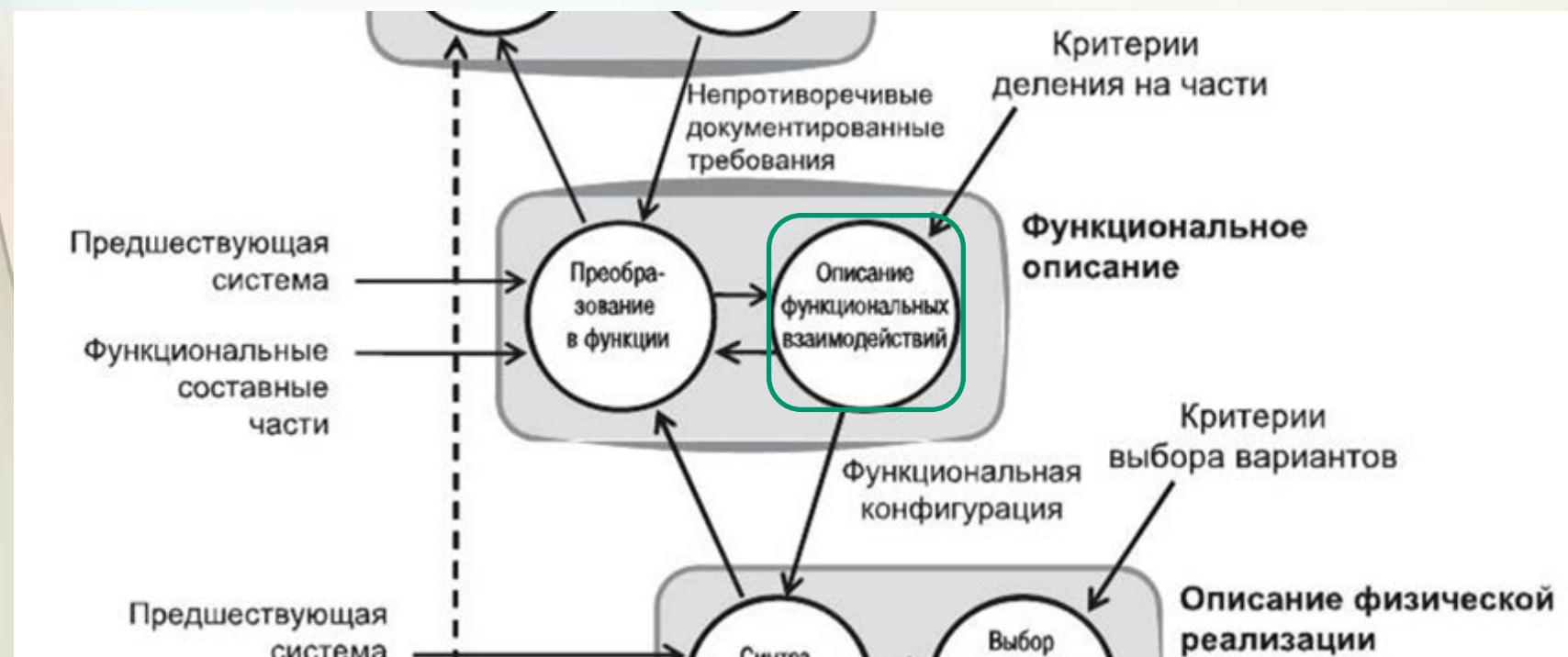
Надалі на етапі ескізного проектування ці функції підсистем верхнього рівня і вимоги до них прив'язуються до окремих компонентів системи в складіожної підсистеми. Як зазначалося вище, це найнижчий рівень ієархії проектних рішень, що має пряме відношення до системної інженерії; виняток становлять лише особливі випадки, коли низькорівневі елементи виявляються критично важливими для роботи системи.



Аналіз компромісів. Вибір відповідних функціональних елементів, як і всі інші аспекти проектування, являє собою індуктивний процес, в рамках якого вивчається набір постулюваних альтернатив і вибирається одна з них, визнана найкращою з урахуванням поставленої мети. Метод системної інженерії для прийняття проектних рішень використовує **аналіз компромісів**. Цей підхід широко використовується при прийнятті рішень в різних областях, але в системній інженерії він застосовується в добре формалізованої формі і, перш за все, - при прийнятті рішень щодо фізичної реалізації. Як випливає з назви, аналіз компромісів має на увазі порівняння альтернатив, кожна з яких краще інших по одному або декільком параметрам. Щоб не пропустити найкращого або близького до нього рішення, необхідно досліджувати достатню кількість альтернативних варіантів, кожен з яких повинен бути опрацьований з таким ступенем деталізації, яка забезпечить адекватне порівняння характеристик. Також необхідно, щоб порівняльні оцінки могли бути виконані по відношенню до ретельно певним набором критеріїв, або показників ефективності. Далі аналіз компромісів буде розглянуто більш докладно.



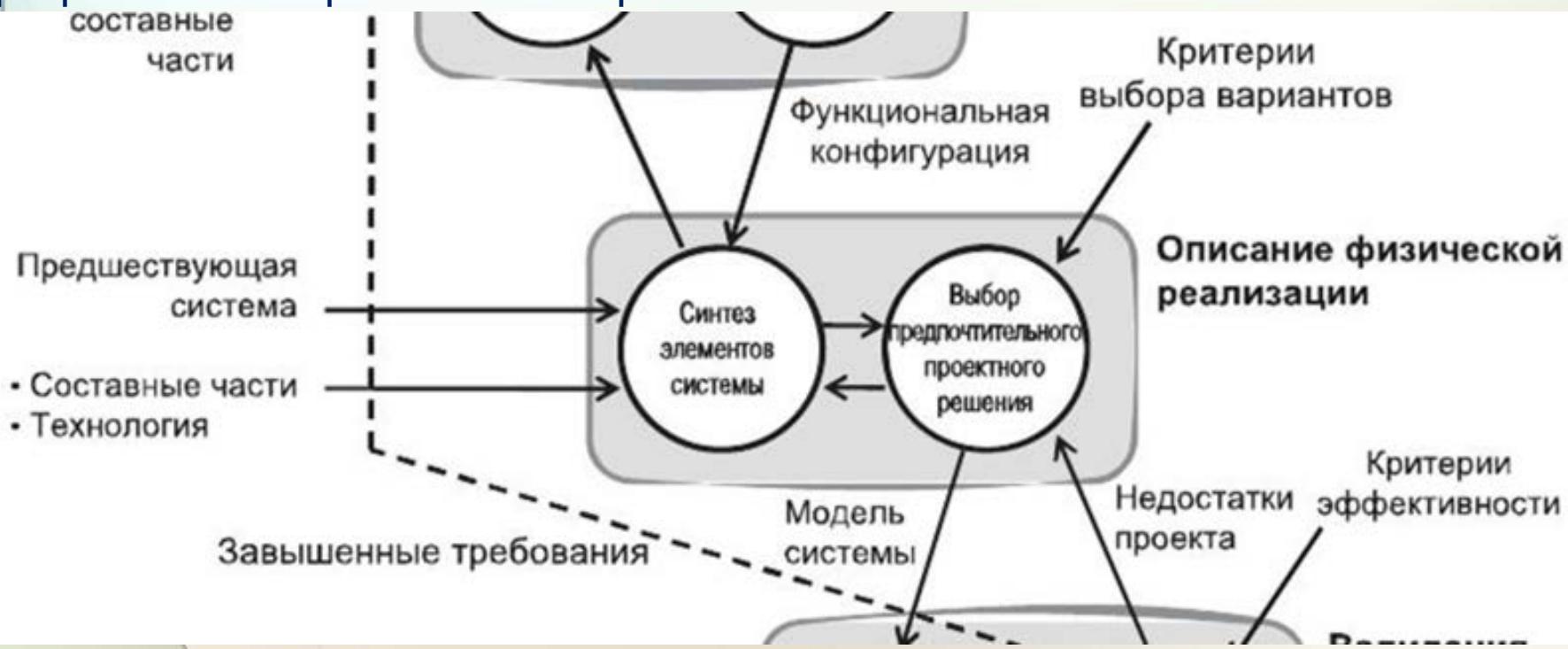
Функціональні взаємодії. Один з найважливіших кроків при проектуванні системи - опис функціональних і фізичних взаємозв'язків її елементів, а також їх взаємодії. Необхідна складова частина цієї діяльності - рання ідентифікація всіх значущих функціональних взаємодій і способів, за допомогою яких можуть бути агреговані функціональні елементи з тим розрахунком, щоб інтенсивно взаємодіють елементи виявилися включені в одну групу, а взаємодії між групами були якомога простішими. Така організація (архітектура) називається «модульною»; саме вона дозволяє забезпечити зручність технічного обслуговування і модернізації системи з метою продовження терміну її служби. Не менш важлива сторона - ідентифікація всіх взаємодій з оточенням, а також інтерфейсів, за допомогою яких оточення впливає на систему.



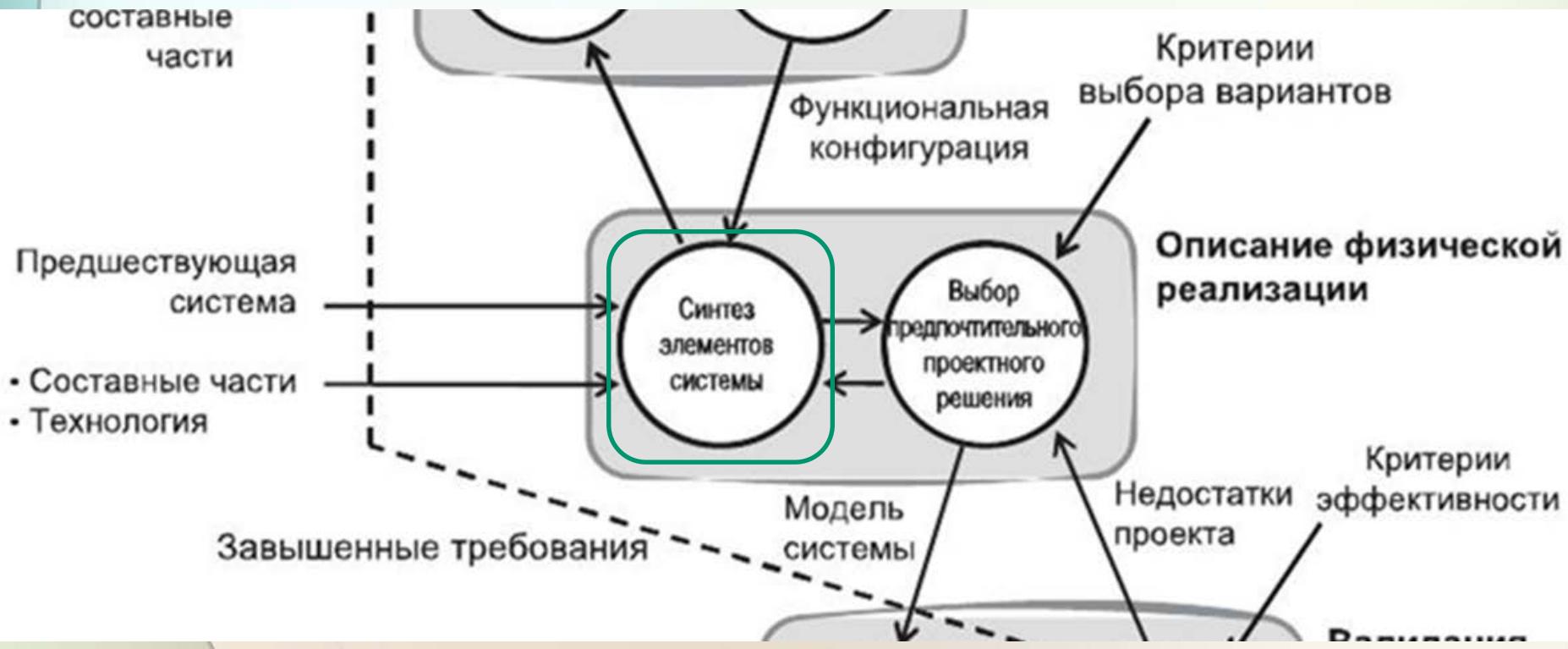
Опис фізичної реалізації

(синтез, аналіз фізичної реалізації та розміщення елементів)

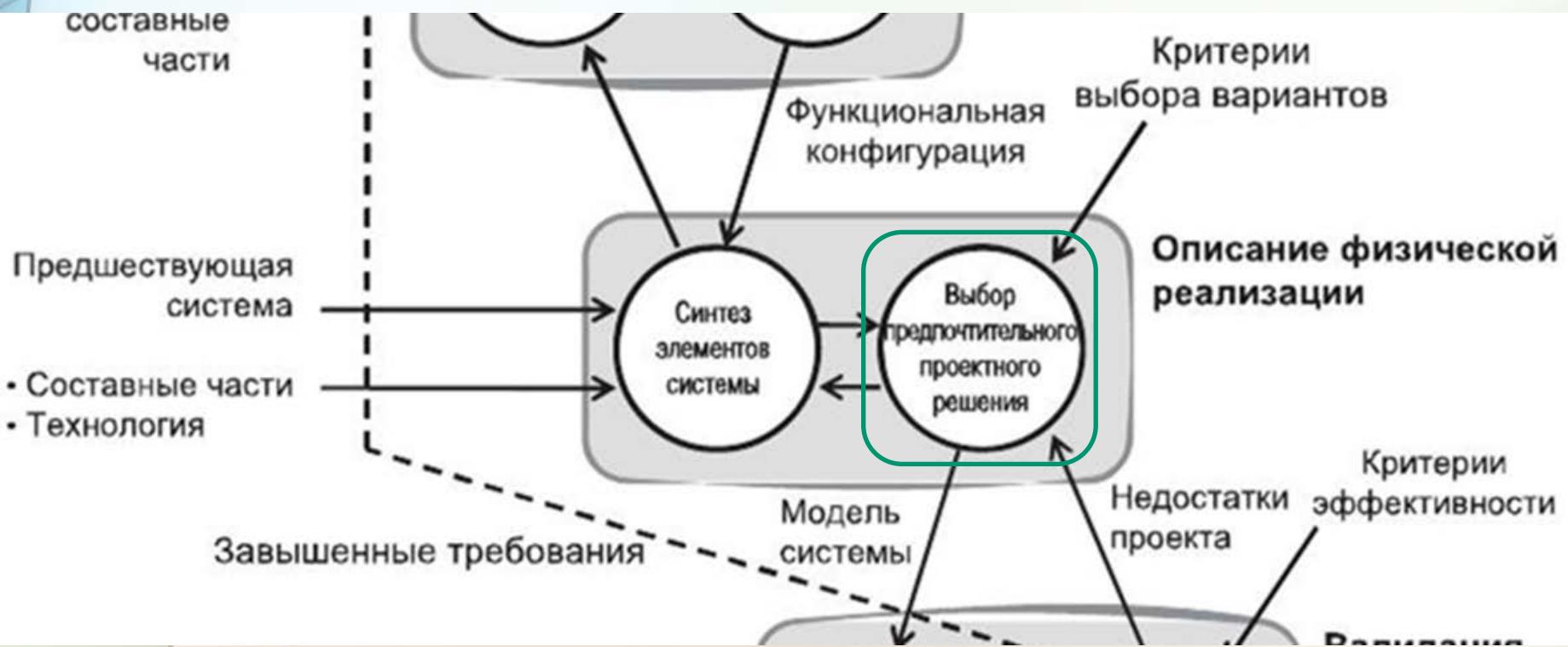
Опис фізичної реалізації являє собою переклад проектних рішень, що стосуються функціонування системи, на мову програмних і апаратних компонентів з подальшою інтеграцією цих компонентів в єдину систему. На стадії розробки концепції, коли весь проект ще перебуває на функціональному рівні, все ж необхідно наочно уявити, як буде виглядати фізичне втілення системи, і переконатися, що рішення практично здійснено. Процес вибору візуалізуемого конструктивного втілення також визначається обговорюваними нижче загальними принципами, тільки їх застосування в цьому випадку носить скоріше якісний, а не кількісний характер, як на стадії розробки інженерно-технічних рішень.



Синтез альтернативних елементів системи. Для реалізації елементів функціональної архітектури потрібно визначити конкретний спосіб фізичного втілення. Йдеться про вибір матеріалів, форми елемента, компонування, а також конструкції з'єднувачів. У багатьох випадках вибирається також технологічний підхід - від застосування новітніх досягнень до використання перевірених способів. Як і у випадку з функціональним проектуванням, для прийняття подібних рішень необхідний аналіз компромісів. Зазвичай можливих варіантів фізичної реалізації більше, ніж типів функціональної конфігурації, тому використання хорошою системно-інженерної практики в процесі опису фізичного втілення системи є навіть більш важливим, ніж на попередніх етапах.



Вибір кращого підходу. Протягом ЖЦ системи в різних точках прийняття рішень доводиться вибирати найкращий підхід (або підходи). Важливо зрозуміти, що особливості подібного вибору змінюються в залежності від етапу ЖЦ. На ранніх етапах, можливо, знадобиться дослідити кілька підходів, тоді як пізніше безліч варіантів поступиться місцем одному. Крім того, змінюється і рівень рішень. Спочатку приймаються рішення щодо системи в цілому, пізніше - щодо підсистем і компонентів.



Як вже було сказано, щоб зробити осмислений вибір з альтернативних проектних рішень, необхідно визначити критерії оцінки і встановити їх відносні пріоритети. Серед найбільш важливих змінних, які необхідно розглянути на кроці фізичного втілення, назовемо відносну вартість альтернативних рішень і відносний ризик зазнати невдачі. Не слід передчасно віддавати перевагу якісь конкретній концепції реалізації.

Ризик як складова частина аналізу компромісів по суті являє собою оцінку ймовірності того, що даний підхід до проектування зазнає невдачі через брак функціональних можливостей, низької надійності, надмірної вартості або неприйнятних термінів. Якщо ризик реалізації окремого компонента великий, то ризик для проекту в цілому може бути зменшений (пом'якшення ризику) завдяки більш інтенсивній роботі над компонентом, заміні зазначеного компонента на резервне рішення на основі перевіреного, хоча і менш функціонального компонента, повної зміни технічного підходу, так щоб відпала необхідність в сумнівному компоненті, або, якщо все це не дає результату, часткового ослаблення вимог до показників функціонування системи. Виявлення елементів системи, найбільш схильних до ризику і рішення про те, як з ними вчинити, - важлива сторона системної інженерії. Процес управління ризиками та його складові частини розглянемо пізніше.



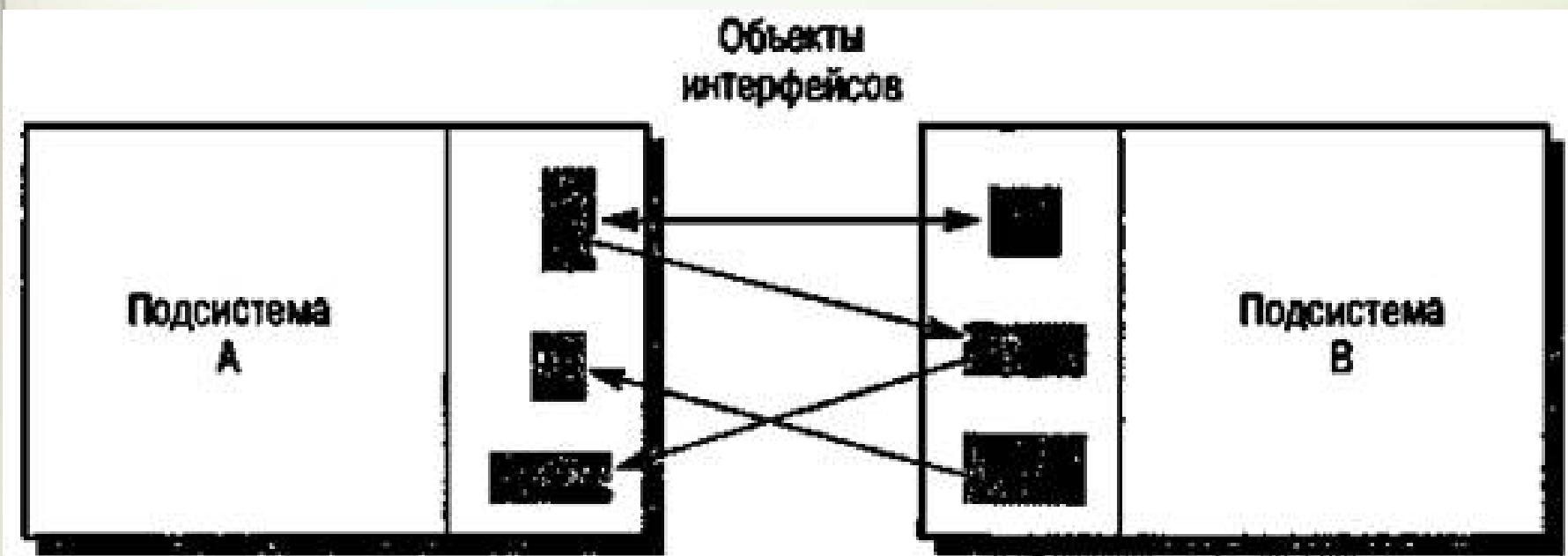
Таким чином, правильне використання методу системної інженерії гарантує, що:

1. Всі скільки-небудь придатні альтернативи прийняті до розгляду.
2. Сукупність критеріїв оцінки встановлена.
3. Критеріям призначені пріоритети і, при можливості, даний кількісний вираз.

Незалежно від того, чи припустимо кількісне порівняння, при прийнятті остаточного рішення слід залишати місце експертну грошову оцінку, заснованої на досвіді.

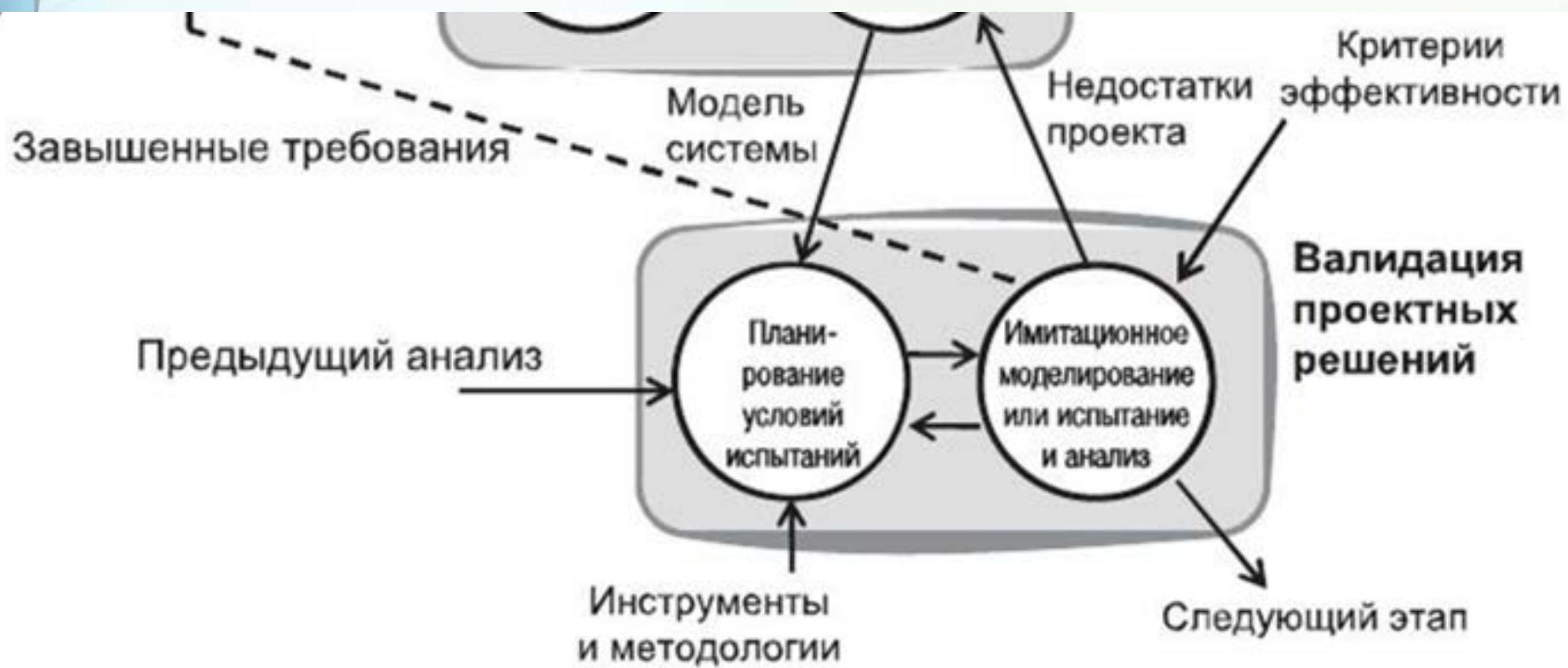


Опис інтерфейсу. На кроці опису фізичної реалізації неявно присутній опис як внутрішніх, так і зовнішніх інтерфейсів і управління ними. Будь-який елемент, доданий або перероблений в процесі проектування, повинен бути з'єднаний з сусідніми елементами або з зовнішніми входами або виходами. Більш того, в ході визначення проектних рішень на наступному, більш низькому рівні системної ієархії неминуче буде потрібно уточнити рішення щодо батьківських елементів, що в свою чергу може спричинити перегляд рішень, що стосуються раніше описаних інтерфейсів. Всі такі описи і зміни повинні бути включені в опис моделі і специфікації інтерфейсів для того, щоб закласти міцну основу прийняття рішень на наступному рівні проектування.



Валідація проектних рішень (верифікація та оцінка)

При розробці складної системи - навіть при томусловії, що всі попередні кроки по визначеню проектних рішень були виконані в повній відповідності з вимогами, - перш ніж переходити до наступного етапу, необхідно виконати остаточну валідацію проектних рішень. Досвід показує, що непомічені помилки можуть украстися куди завгодно. Форма валідації залежить від етапу і від ступеня матеріалізації системи, але загальний підхід залишається незмінним.



Моделювання оточення системи. Щоб виконати валідацію моделі системи, необхідно створити модель оточення, з яким система зможе взаємодіяти, і переконатися, що досягаються необхідні робочі показники функціонування. Завдання моделювання оточення регулярно виникає в процесі розробки системи. На стадії розробки концепції в основному використовуються функціональні моделі, але деякі елементи цих моделей можуть бути втілені в фізичному вигляді, як, наприклад, в разі, коли випробовується експериментальний варіант критично важливого компонента в певному діапазоні навколишніх умов.



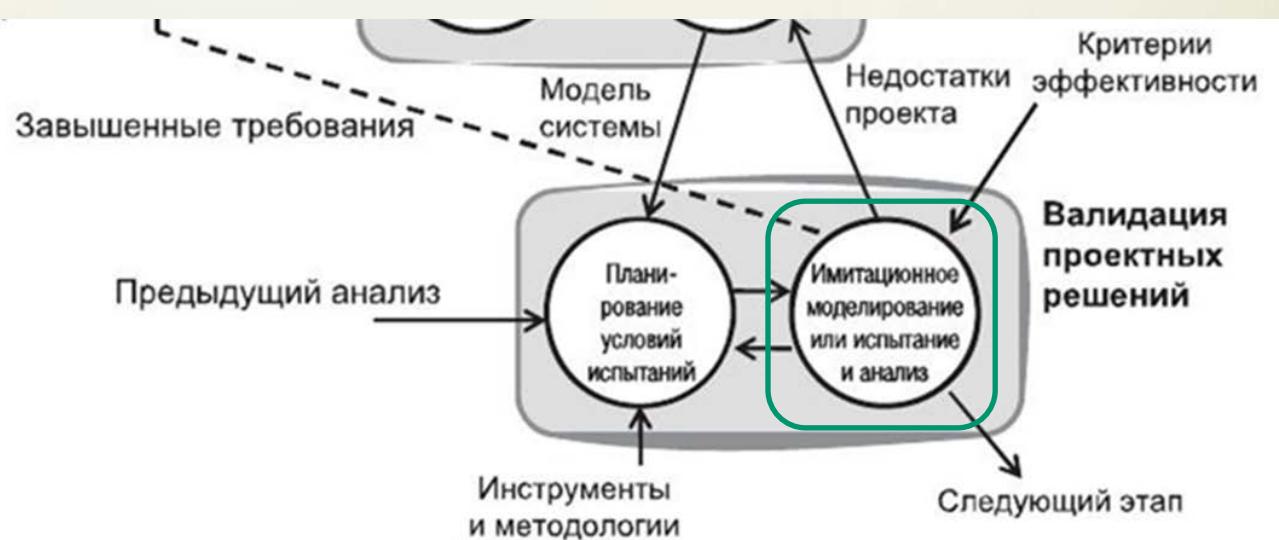
На більш пізніх стадіях розробки різні аспекти оточення можна відтворити в лабораторії або на випробувальній установці, наприклад в аеродинамічній трубі або на стенді для випробування інерційних систем навігації. Якщо модель динамічна, то її правильніше називати імітаційної моделлю, в цьому випадку системні проектні рішення піддаються змінюється в часі впливам, що викликають динамічний відгук.

У міру переходу до стадії розробки інженерно-технічних рішень моделювання оточення набуває все більш реалістичні форми, а навколошні умови втілюються в обладнанні для випробування системи і її компонентів, такому як кліматичні камери або установки для проведення ударних і вібраційних випробувань. Під час атестаційних випробувань оточення - в тій мірі, в якій цього можна досягти на практиці, - намагаються зробити ідентичним тому, в якому система буде експлуатуватися в кінцевому рахунку. Тут модель максимально наближається до реальності.



Деякі навколишні умови, принципово важливі для оцінки функціонування і надійності системи, можуть бути вивчені недостатньо добре і моделюються з великими труднощами, наприклад глибини океану або позаатмосферна область. У таких випадках визначення та імітаційне моделювання оточення можуть самі по собі стати важливим завданням. Навіть в тих випадках, коли навколишні умови вважаються добре вивченими, вони все одно можуть піднести сюрпризи, як, наприклад, рефракція сигналу РЛС над Аравійської пустелею.

На кожному етапі розробки системи потрібно все більш детальне визначення вимог, яким повинна відповісти система. Саме щодо цих вимог, які враховують навколишні умови, оцінюються і уточнюються такі одна за одною моделі системи. Таким чином, необхідно засвоїти, що робота з моделювання оточення системи для її випробування та атестації має такий же пріоритет, що і проектування самої системи; іноді для цього навіть доводиться організовувати окремий проект, за складністю не поступається проекту системи.



Випробування і аналіз результатів випробувань. Визначальний крок при валідації проектних рішень - проведення серії випробувань, в яких модель системи (або її значна частина) взаємодіє з моделлю оточення таким чином, щоб можна було виміряти результати і проаналізувати їх в світлі вимог до системи. Обсяг випробувань залежить від ступеня матеріалізації системи; спочатку це просто розрахунки на папері, а на завершальних стадіях - експлуатаційні випробування. У будь-якому випадку мета полягає в тому, щоб з'ясувати, чи відповідають результати вимогам, і якщо ні, то які зміни слід внести, щоб відправити ситуацію.



В ході цього процесу важливо дотримуватися ряду базових принципів:

1. Всі критичні характеристики системи слід перевіряти при навантаженні, що перевищує заявлені межі, щоб якомога раніше виявити слабкі місця.
2. Усі ключові елементи повинні бути оснащені контрольно-вимірювальними приладами, здатними встановити точне місце знаходження джерел відхилень у поведінці. За точністю і надійності кошти вимірювання значно перевищують відчuveвують зразки.
3. Необхідно заздалегідь підготувати план випробувань і план аналізу результатів випробувань, щоб забезпечити належний збір необхідних даних та їх подальший аналіз з метою точної оцінки відповідності системи вимогам.
4. Всі обмеження, властиві випробувань в зв'язку з неминучими відхиленнями від реальних умов, повинні бути явно і недвозначно визначені, а їх вплив на результати - компенсовано або скориговано настільки, наскільки це можливо.
5. Повинен бути підготовлений формальний звіт про результати випробувань, в якому слід документально підтвердити ступінь відповідності системи встановленим вимогам і відзначити джерела всіх недоліків.



У плані випробувань слід детально описати кожен крок процедури випробувань і точно вказати, яка інформація реєструється до, під час і після кожного кроку, а також як і ким вона реєструється. У плані аналізу результатів випробувань повинен бути визначений порядок попередньої обробки і аналізу даних; тут же наводиться форма звітності та критерії, за якими оцінюється відповідність системи вимогам.

Якщо під час проведення випробувань, які виконуються з метою валідації, виявилися відхилення від встановлених вимог, необхідно відповісти на наступні питання:

1. Чи могло відхилення бути викликано недоліками в моделюванні оточення (тобто в випробувальному обладнанні)? Причина може критися в тому, що побудувати реалістичну модель оточення було досить важко.

2. Чи викликано відхилення недоліками проекту? Якщо так, чи можна віправити ситуацію без серйозної модифікації інших елементів системи?

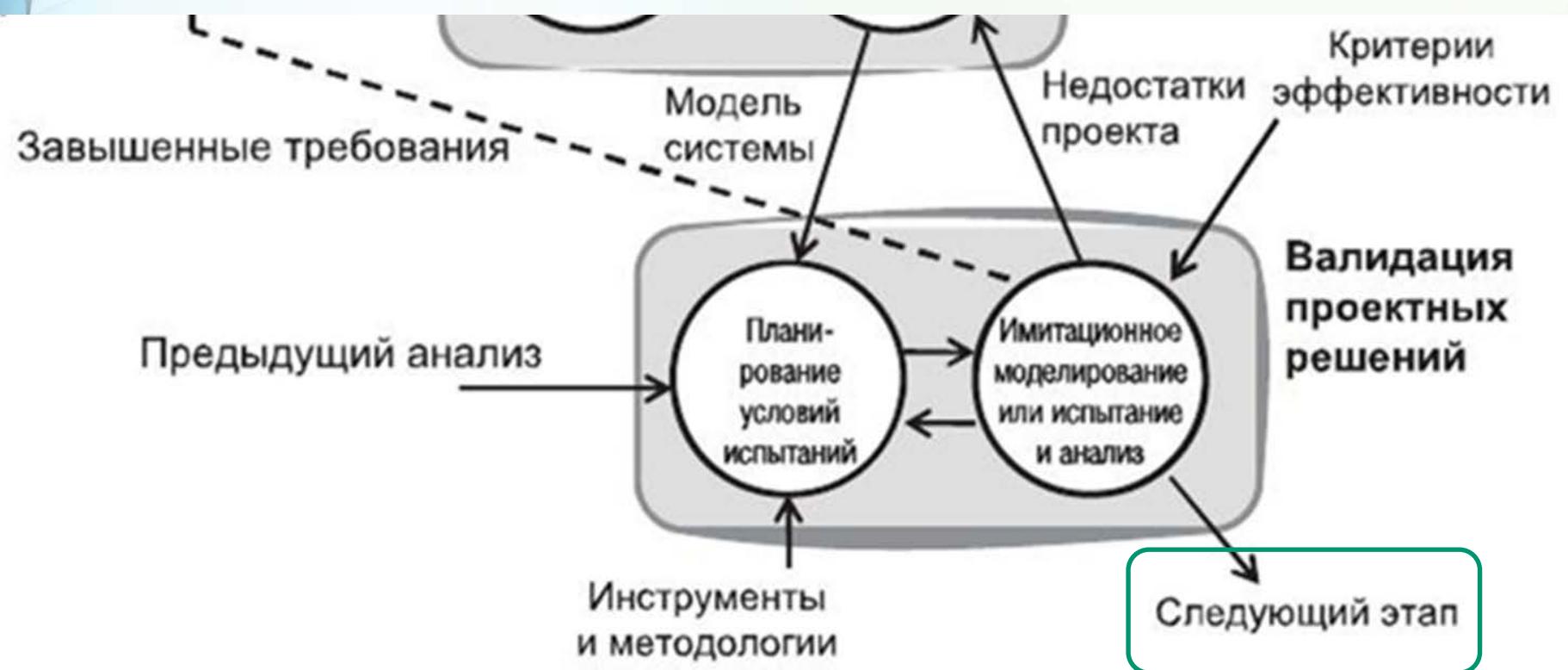
3. Чи не є вимога надмірно жорстким? Якщо так, варто подумати про подання запиту на його ослаблення. Такого роду зворотний зв'язок характерна для процесу розробки системи.



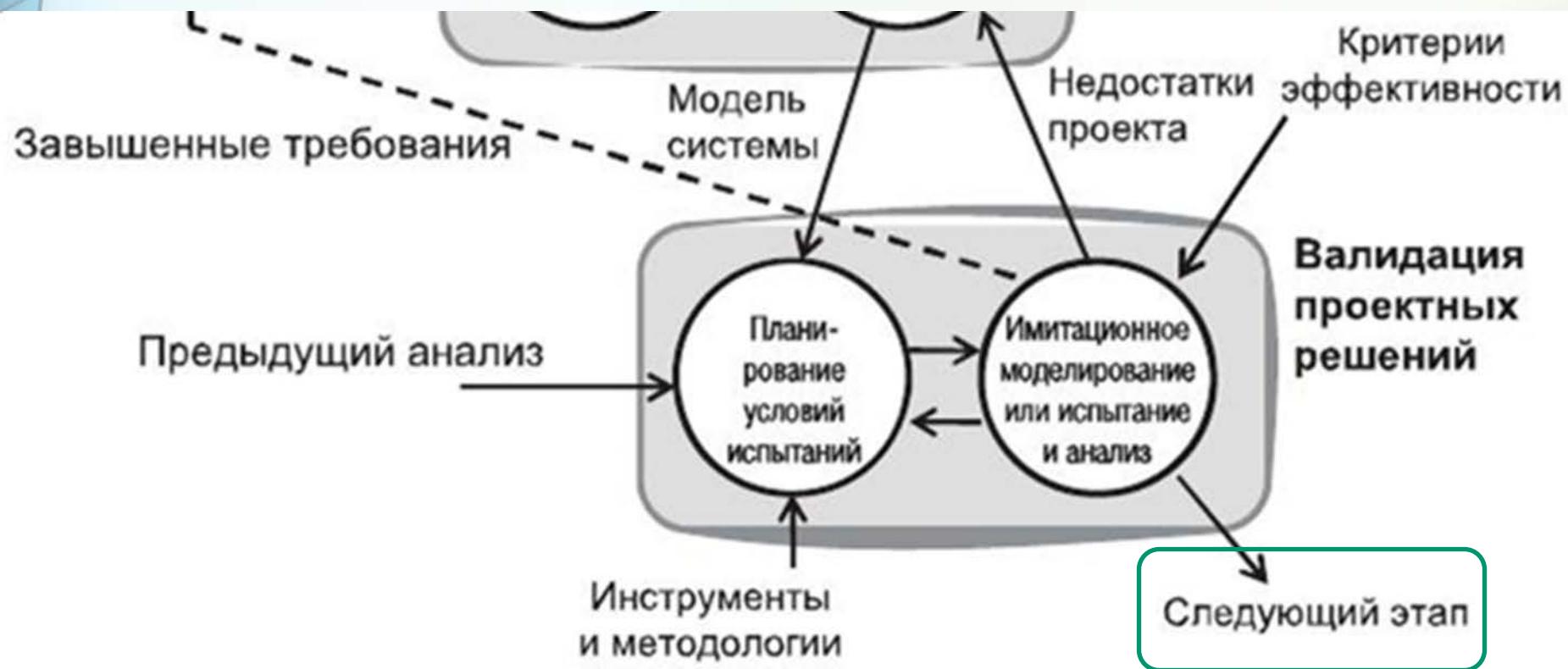
Підготовка до наступного етапу

На будь-якому етапі розробки системи породжується черговий, більш деталізований набір вимог і специфікацій, який використовується в якості основи на наступному етапі. Причому вимоги, отримані на колишніх рівнях деталізації, як правило, не замінюються, а уточнюються і доповнюються, що дозволяє:

1. Документувати проектні рішення, прийняті на поточному етапі.
2. Визначити цілі наступного етапу.



Приділяючи увагу аналізу вимог і прив'язці функцій, системний інженер укупі з менеджером проекту відповідає і за визначення спеціальних технічних умов, які повинні бути задоволені, і за продукцію (наприклад, програмні і апаратні компоненти, технічну документацію, необхідні дані випробувань), які повинні бути представлені у відповідь на вимоги до вихідних даних для наступного етапу. Подібним кінцевим продуктам, ідентифікованим для кожного етапу, часто супроводжує опис набору проміжних точок прийняття технічних рішень. Ці точки можна використовувати для оцінки технічних досягнень при виконанні кожної окремої дії в рамках проекту.

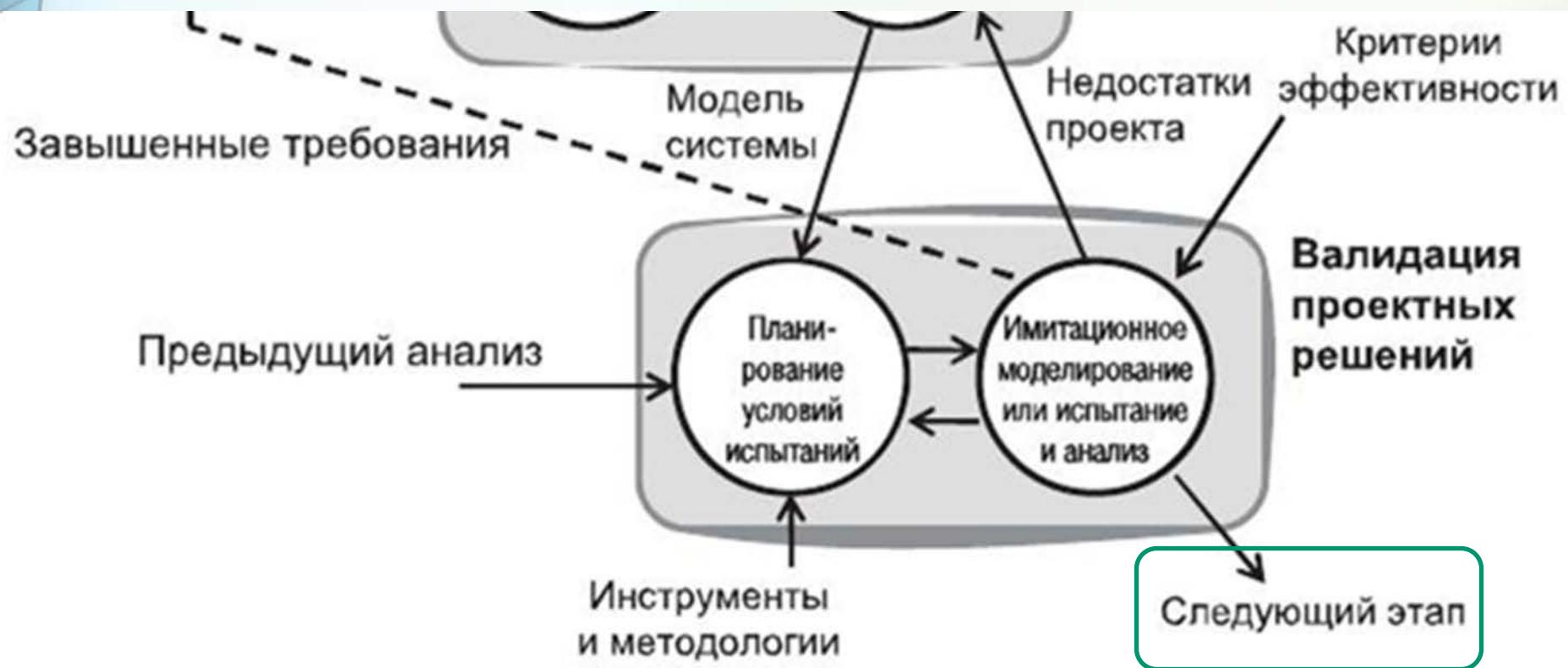


Завдання визначення цих вимог або специфікацій, а також зусилля, що вживаються для здійснення відповідних проектних дій, - важлива частина розробки системи. У сукупності вони складають офіційне керівництво з виконання робіт на кожному етапі створення системи.

Однак слід зазначити, що на практиці ефективність цих зусиль, настільки важливих для кінцевого успіху проекту, істотно залежить від того, наскільки добре налагоджені обмін інформацією та співробітництво між системним інженером і керівництвом проекту, з одного боку, і фахівцями з проєктування, які в кінцевому рахунку визначають, чого реально можна досягти при заданих вимогах, відведеніх ресурсах і термінах, - з іншого боку.



Оскільки характер підготовки до наступного етапу залежить від поточного етапу, ця операція зазвичай не розглядається як окремий крок у методі системної інженерії; найчастіше вона об'єднується з процесом валідації. Але це аж ніяк не зменшує її значущості, так як від ретельності її виконання прямо залежить аналіз вимог на початку наступного етапу. У будь-якому випадку визначення вимог і завдань, що підлягають виконанню на наступному етапі, є важливою сполучною ланкою між етапами.



Метод системної інженерії в застосуванні до життєвого циклу системи

Проілюструємо, як метод системної інженерії застосовується на різних етапах життєвого циклу системи. У таблиці показано, що знаходиться в центрі уваги на кожному з 4 кроків методу стосовно до того чи іншого етапу життєвого циклу системи.

Шаг	Этапы					
	Разработка концепции		Разработка инженерно-технических решений			
Анализ потребностей	Анализ потребностей	Исследование концепции	Описание концепции	Эскизное проектирование	Техническое проектирование	Комплексирование и аттестация
Анализ требований	Проанализировать потребности	Проанализировать требования к функциональным возможностям	Проанализировать требования к показателям функционирования	Проанализировать функциональные требования	Проанализировать технические требования	Проанализировать требования к испытаниям и оценке их результатов
Функциональное описание	Определить цели создания системы	Определить функции подсистем	Разработать функциональную архитектуру и определить функции компонентов	Уточнить функции субкомпонентов в функциональной архитектуре	Определить функции деталей	Спланировать функциональные испытания
Описание физической реализации	Определить возможности системы; визуализировать подсистемы, выбрать технологии	Описать концепции системы, визуализировать компоненты	Разработать компоненты физической архитектуры	Уточнить физическую архитектуру; специфицировать конструкцию субкомпонентов	Специфицировать конструкцию субкомпонентов	Спланировать испытания на физическом уровне; специфицировать испытательную аппаратуру и оборудование
Валидация проектных решений	Выполнить валидацию потребностей и осуществимости	Выполнить валидацию требований назначения	Оценить возможности системы	Испытать и аттестовать критические подсистемы	Выполнить валидацию конструкции компонентов	Испытать и аттестовать систему

Як і в таблиці, видно, що при переході від одного етапу до іншого фокус зміщується в бік більш спеціалізованих низькорівневих елементів системи, поки черга не дійде до комплексування і атестації.

		Етап					
Уровень	Аналіз потребностей	Розробка концепції		Розробка інженерно-техніческих рішений			
		Исследование концепции	Определение концепции	Эскизное проектирование	Техническое проектирование	Комплексирование и аттестация	
Система	Определение возможностей и эффективности системы	Идентификация, исследование и синтез концепции	Определение и документирование выбранной концепции	Валидация концепции			Испытание и аттестация
Подсистема		Определение требований и проверка их осуществимости	Определение функциональной и физической архитектуры	Валидация подсистем			Комплексирование и испытание
Компонент			Привязка функций к компонентам	Составление документации	Проектирование и испытание		Комплексирование и испытание
Субкомпонент	Визуализация			Привязка функций к субкомпонентам	Проектирование		
Деталь					Изготовление или закупка		

Крім того, в таблиці підкреслена різниця в характері дій при описі фізичної реалізації та схвалення проектних рішень у міру переходу від розробки концепції до розробки інженерно-технічних рішень. На стадії розробки концепції (3 лівих колонки) опис концепції дається в функціональній формі (крім випадків, коли елементи попередньої системи чи інших систем використовуються без істотних змін). Фізична реалізація ще не почалася, і валідація проектних рішень проводиться шляхом аналізу та імітаційного моделювання функціональних елементів. На стадії розробки інженерно-технічних рішень елементи ПЗ і АЗ реалізуються на все більш низьких рівнях системної ієрархії, так що валідація проектних рішень включає спочатку випробування експериментальних зразків, потім прототипу і, нарешті, промислову виготовлені елементи системи, а також самої системи.

При інтерпретації таблиць слід пам'ятати, що на даному етапі розробки системи для деяких її частин можуть бути створені прототипи, які стосуються подальшого етапу, - з метою валідації критично важливих особливостей проектних рішень. Це особливо актуально на етапі ескізного проектування, коли нові, потенційно ризиковані підходи перевіряються та випробовуються в реальних умовах. Як правило, на цьому етапі виконується і прототипування нових елементів ПЗ, щоб можна було провести валідацію закладених в них базових проектних рішень.

Шаг	Этапы					
	Разработка концепции		Разработка инженерно-технических решений			
	Анализ потребностей	Исследование концепции	Описание концепции	Эскизное проектирование	Техническое проектирование	Комплексирование и аттестация
Анализ требований	Проанализировать потребности	Проанализировать требования к функциональным возможностям	Проанализировать требования к показателям функционирования	Проанализировать функциональные требования	Проанализировать технические требования	Проанализировать требования к испытаниям и оценке их результатов
Функциональное описание	Определить цели создания системы	Определить функции подсистем	Разработать функциональную архитектуру и определить функции компонентов	Уточнить функции субкомпонентов в функциональной архитектуре	Определить функции деталей	Составлять функциональные испытания
Описание физической реализации	Определить возможности системы; визуализировать подсистемы, выбрать технологии	Описать концепции системы, визуализировать компоненты	Разработать компоненты физической архитектуры	Уточнить физическую архитектуру; специфицировать конструкцию компонентов	Специфицировать конструкцию субкомпонентов	Составлять испытания на физическом уровне; специфицировать испытательную аппаратуру и оборудование
Валидация проектных решений	Выполнить валидацию потребностей и осуществимости	Выполнить валидацию требований назначения	Оценить возможности системы	Испытать и аттестовать критические подсистемы	Выполнить валидацию конструкции компонентов	Испытать и аттестовать систему

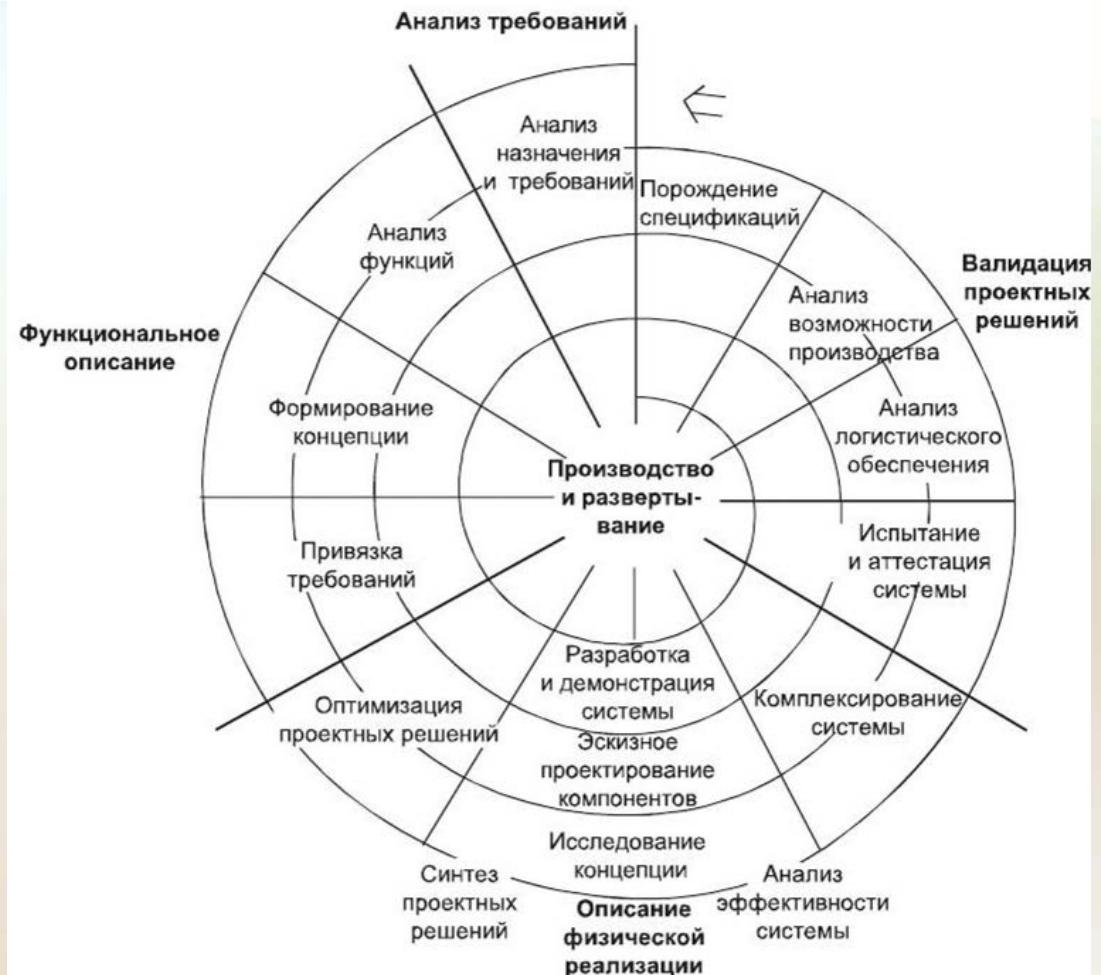
Хоча картина, представлена в таблицях, трохи ідеалізована, загальний принцип ітеративного застосування методу системної інженерії на все більш низьких ієрархічних рівнях дає корисне і в цілому вірне уявлення про процес розробки системи.

Уровень	Этап			Разработка инженерно-технических решений		
	Разработка концепции		Определение концепции	Эскизное проектирование	Техническое проектирование	Комплексирование и аттестация
	Анализ потребностей	Исследование концепции	Определение концепции	Эскизное проектирование	Техническое проектирование	Комплексирование и аттестация
Система	Определение возможностей и эффективности системы	Идентификация, исследование и синтез концепции	Определение и документирование выбранной концепции	Валидация концепции		Испытание и аттестация
Подсистема		Определение требований и проверка их осуществимости	Определение функциональной и физической архитектуры	Валидация подсистем		Комплексирование и испытание
Компонент			Привязка функций к компонентам	Составление документации	Проектирование и испытание	Комплексирование и испытание
Субкомпонент	Визуализация			Привязка функций к субкомпонентам	Проектирование	
Деталь						Изготовление или закупка

Спіральна модель життєвого циклу

Ітеративна природа процесу розробки системи, коли метод системної інженерії послідовно застосовується для покрокової матеріалізації системи, знайшла відображення в так званій спіральній моделі життєвого циклу. Варіант цієї моделі в застосуванні до етапів ЖЦ показаний на рисунку. Сектори, що представляють чотири кроки методу системної інженерії, описаного в попередньому розділі, поділених суцільними радіальними лініями.

У цій моделі особливе значення надається тому факту, що кожен етап розробки складної системи обов'язково включає ітеративне застосування методу системної інженерії, а також безперервний аналіз і уточнення результатів роботи, досягнутих на попередньому етапі.



5. Випробування протягом розробки системи

Випробування та атестація невіддільні від проектування і є невід'ємною частиною проекту. У простих випадках, наприклад при написанні картини, функція випробування і атестації реалізується художником як частина процесу перенесення художнього задуму на полотно. Якщо отримана картина не відповідає задуму, автор змінює її, накладаючи мазки пензлем, щоб зоровий ефект (показники функціонування) відповідав поставленої мети. Таким чином, проектування - це процес зі зворотним зв'язком, в якому випробування і атестація якраз і грають роль зворотного зв'язку, що дозволяє скорегувати результат, так щоб він задовольняв заданим вимогам.



Невідомі

У будь-якому проекті розробки нової системи існує безліч невідомих, проблеми з якими повинні бути дозволені в ході виробництва вироби. Всякий раз, коли в процесі створення системи відбувається помітний відхід від практики, що склалася, результат стає непередбачуваним. Вартість проекту залежить від різних чинників, жоден з яких в точності не відомий. Для усунення несумісності інтерфейсів часто доводиться вносити в проект коригування по обидві сторони інтерфейсу, а це нерідко тягне за собою несподівані і іноді складні технічні проблеми.

Важливе завдання системної інженерії - управляти розробкою системи, так щоб невідомі ставали відомими якомога раніше. Будь-які несподіванки на пізніх етапах програми або проекту можуть обйтися в багато разів дорожче, ніж при їх виявленні на початкових етапах.



Багато невідомі очевидні з самого початку, так що їх можна назвати «відомими невідомими». Вони відразу ж ідентифікуються як потенційні проблеми, які уважно розглядаються і вирішуються. Зазвичай цьому сприяє серія вирішальних експериментів з використанням моделювання та/або спеціального експериментального обладнання, а також ПЗ. Однак є ряд проблем, які виявляються пізніше, в ході розробки системи. Ці непередбачені проблеми часто називають «невідомими невідомими», щоб відрізнисти їх від невідомих, про існування яких все знали з самого початку, так що проблеми були вирішені ще до того, як вони встигли зробити негативний вплив на процес розробки.

KNOWN KNOWNS

analogies,
lateral thinking

KNOWN UNKNOWNS

build hypothesis,
measure, iterate

UNKNOWN KNOWNS

brainstorming,
group sketching

UNKNOWN UNKNOWNS

research,
exploration

Перетворення невідомого в відоме

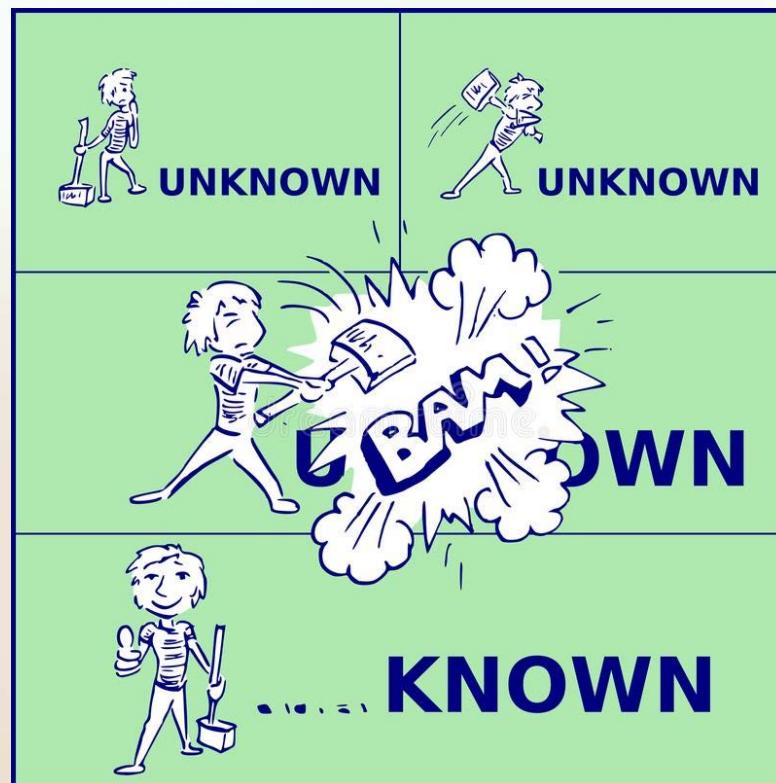
Існування невідомих невідомих значно ускладнює усунення всіх невідомих чинників. Доводиться активно шукати підводні камені в місцях, де вони часто зустрічаються. Системний інженер повинен очолити ці пошуки, ґрунтуючись на досвіді, накопиченому при розробці інших систем, покладаючись на свою технічну проникливість і ставлячи собі питання «Що якщо ..?».

Оскільки кожне невідоме підриває впевненість у кінцевому успіху, воно являє потенційний ризик. Скажемо більше: невідомі становлять основні ризики в будь-якій програмі розробки. Тому завдання оцінки і пом'якшення ризиків - це фактично і є виявлення і усунення невідомих.

Вирішити подібні проблеми дозволяють аналіз, імітаційне моделювання та випробування, оскільки з їх допомогою можна визначити і кількісно оцінити критично важливі характеристики системи. Ця робота починається на найбільш ранніх етапах формування концепції і триває протягом усього розробки; при цьому змінюються лише предмет і характер, але не мета і підхід.



При проектуванні нової системи або нового елемента системи з застосуванням підходу, який раніше ніколи не випробували в подібних умовах (наприклад, для виготовлення елементів конструкції, що зазнають підвищених навантаження, використовуються нові матеріали), фахівець з проектування стикається з цілою низкою невідомих, в тому що стосується поведінки готової конструкції (наприклад, елемент, виготовлений з нового матеріалу, не вдається відлити в потрібну форму традиційними способами). У таких випадках тільки випробування дозволяє дізнатися, ускладнюють чи невідомі чинники роботу настільки, що потрібно суттєво змінити проект або навіть повністю відмовитися від обраного підходу.



Якщо запропонований новий підхід до проектування, нерозумно чекати завершення проекту, щоб зрозуміти, чи було корисним таке нововведення. Для початку слід провести випробування на теоретичній або експериментальній моделі елемента конструкції, яку можна створити швидко і з мінімальними витратами. При цьому знадобиться з усією ретельністю оцінити оптимальне співвідношення вигоди, обумовленої більшою реалістичністю моделі, і тимчасових і фінансових витрат на досягнення такої реалістичності. Найчастіше рішення, прийняте за підсумками цієї оцінки, належить до розряду системи, а не компонента, особливо якщо робота елемента може вплинути на систему в цілому. Якщо невідомі в основному пов'язані з функціональною поведінкою елемента, то рекомендується обчислювальна або імітаційна модель. Якщо ж невідомі відносяться до властивостей матеріалів, потрібна експериментальна модель.



Підхід системної інженерії до випробувань

Підхід системної інженерії до випробувань можна проілюструвати, порівнявши точки зору інженера-конструктора, інженера-випробувача і системного інженера. Конструктор хоче бути впевнений, що компонент успішно пройшов випробування, тобто отримати стверду відповідь на питання «Чи все в порядку?». Інженер-випробувач хоче знати, наскільки ретельно було організовано випробування, щоб бути впевненим в тому, що компонент отримав достатнє навантаження. Системному інженеру цікаво знайти і ідентифікувати всі дефекти компонента. Якщо компонент не зміг успішно пройти випробування, то системний інженер хоче з'ясувати причини, щоб зрозуміти, як усунути дефект.

Зі сказаного ясно, що системний інженер приділяє увагу не тільки умовами проведення випробувань, а й збору даних, точно показують, як працювали або не працювали різні частини системи. Але одного лише збору даних недостатньо - необхідно ще мати процедури для їх аналізу. Найчастіше такі процедури складні і вимагають розвиненої аналітичної техніки, і це також необхідно передбачити.



Крім того, можна зробити висновок, що системний інженер повинен брати активну участь у розробці програми і методики випробувань і у виборі контрольно-вимірювальної апаратури. Насправді ініціатива підготовки плану випробувань повинна належати системному інженерові, тісно співпрацює з інженерами-випробувачами. Для системного інженера випробування - все одно що експеримент для вченого, тобто засіб збору важливих даних про поведінку системи в контролюваних умовах.

Протягом ЖЦ найбільш інтенсивні випробування проводяться на заключному етапі розробки системи - в процесі комплексування і атестації. Цей етап стане предметом розгляду пізніше. А в одному з розділів далі розповідається про випробування та атестації на етапі ескізного проектування.



Висновок

Програма розробки великої системи - складний комплекс робіт, спрямованих на задоволення важливої потреби користувача. Цей комплекс включає безліч дисциплін, передбачає застосування нових технологій, вимагає поступово нарastaючого виділення ресурсів і виконується крок за кроком відповідно до виділеного бюджету і затвердженим графіком.

Життєвий цикл системи можна розділити на три основні стадії.

Розробка концепції. До завдань системної інженерії входять виявлення потреби в системі, дослідження практично здійснених концепцій і визначення кращої концепції системи. стадію розробки концепції можна далі розбити на три етапи.

1. **Аналіз потреб:** визначення та валідація потреби в новій системі, демонстрація її технічної здійсненості та визначення вимог до функціональних можливостей системи.
2. **Дослідження концепції:** дослідження реалізується концепцій і визначення вимог до показників функціонування.
3. **Визначення концепції:** вивчення альтернативних варіантів, вибір кращої концепції виходячи з показників функціонування, вартості, термінів і ризиків, а також визначення функціональних специфікацій системи (А-специфікацій).

Розробка інженерно-технічних рішень. До завдань системної інженерії входять валідація нової технології, перетворення обраної концепції в проектні рішення щодо апаратного та програмного забезпечення, створення і випробування готових моделей. Стадію розробки інженерно-технічних рішень можна розбити на три етапи.

1. **Ескізне проектування:** ідентифікація зон ризику, зниження цих ризиків за допомогою аналізу, розробки і випробувань, а також визначення проектних специфікацій системи (В-специфікацій).
2. **Технічне проектування:** попереднє і остаточне проектування, створення і випробування апаратних і програмних компонентів, наприклад елементів конфігурації.
3. **Комплексування і атестація:** збірка компонентів в готовий дослідний зразок, атестація дослідного зразка і виправлення недоліків.

Построзробницька стадія. До завдань системної інженерії входять участь у виробництві і розгортанні системи, а також надання технічної підтримки в процесі її експлуатації, обслуговування та ремонту. Стадія ділиться на два етапи.

1. **Виробництво:** розробка інструментів і оснастки; виробництво системної продукції, поставка системи користувачам і введення її в експлуатацію.
2. **Експлуатація та супровід:** забезпечення експлуатації, технічного обслуговування і ремонту системи, а також підготовка та здійснення заходів з модернізації системи без її виведення з експлуатації.

Як правило, нові системи виростають з попередніх, оскільки функціональна архітектура і навіть деякі компоненти останніх можуть бути використані повторно. Нова система поступово «матеріалізується» в ході розробки. Описи системи і проектні рішення еволюціонують від концепції до реальності. Документи, графіки, діаграми, моделі і продукція також зазнають відповідних змін. Більш того, ключові учасники розробки змінюють один одного; проте системна інженерія грає ключову роль протягом усіх етапів.

Метод системної інженерії включає чотири основні кроки.

1. Аналіз вимог - визначається, чому необхідні ті чи інші вимоги.
2. Функціональне описание - вимоги переводяться на мову функцій.
3. Опис фізичної реалізації - синтезуються альтернативні варіанти фізичної реалізації.
4. Валідація проектних рішень - моделюється оточення системи.

Ці кроки застосовуються на кожному етапі розробки. Спосіб застосування методу залежить від етапу ЖЦ; у міру того як система матеріалізується, фокус зміщується в напрямку зверху вниз - з рівня системи (етап аналізу потреб) на рівень компонентів і деталей (етап технічного проектування).

Випробування - це процес виявлення невідомих дефектів проекту. В ході випробування перевіряється, що проблеми з усіма відомими невідомими розв'язані, і виявляються невідомі невідомі і їх причини. Якщо невідомі будуть виявлені із запізненням, це може обійтися надзвичайно дорого, тому планування випробувань і аналіз їх результатів - одна з найважливіших обов'язків системного інженера.

Дякую за увагу!