

Створення складних технічних систем з урахуванням фактору невизначеності

С. Г. Кривова¹

Received: 19 January 2025 / Revised: 7 February 2025 / Accepted: 3 March 2025

Анотація. Характерною особливістю проєктів створення складних технічних систем (СТС) є високий рівень невизначеності. Не врахування невизначеності, особливо на ранніх етапах розвитку проєктів, коли невизначеність є найвищою, збільшує ризики та підвищує витрати на подолання непередбачених проблем на подальших етапах проєкту і може суттєво вплинути на досягнення кінцевого результату проєкту. Отже, проблема комплексного розгляду прояву невизначеності при реалізації процесів управління проєктами і системної інженерії при створенні СТС є надзвичайно актуальною і потребує дослідження. Основною метою даного дослідження є аналіз найбільш значущих підходів і оцінка стану проблеми врахування фактору невизначеності властивого основним видам діяльності, спрямованих на створення СТС – управління проєктами і системної інженерії. Це дозволить формувати більш ефективну стратегію управління невизначеністю при створенні СТС.

Методика дослідження передбачала організацію і реалізацію процедур експертних оцінок щодо виявлення найбільш значущих факторів невизначеності при створенні СТС. Також був проведений якісно-кількісний аналіз складу факторів невизначеності для різних типів діяльності – з управління проєктом і системної інженерії – і оцінена динаміка зростання невизначеності в залежності від зростання ступеня унікальності СТС для різних типів проєктів.

У результаті проведених досліджень були виявлені найбільш значущі фактори невизначеності, характерні для проєктної і системно-інженерної діяльності створення СТС. Був визначений характер динаміки росту невизначеності відносно унікальності для різних типів проєктів.

За проведеними дослідженнями отримані нові уявлення і визначені певні тенденції, спрямовані на вдосконалення процесів управління проєктами і системної інженерії створення СТС.

Ключові слова: системна інженерія, управління проєктами, складна технічна система, невизначеність, процеси управління проєктами і системної інженерії, наукоємний продукт.

Вступ

Проблема підвищення ефективності процесів створення складних технічних систем (СТС) – одна з першочергових, що стоять перед світовими лідерами високотехнологічного виробництва.

Основним гносеологічним методологічним підходом, яким користуються лідери світового наукоєм-

ного машинобудування при створенні СТС є методологія управління проєктами і системної інженерії (НДіДКР).

Проєкти створення СТС – в силу своєї унікальності – завжди містять в собі значну долю невизначеності. Не врахована невизначеність завжди призводить до великих втрат, які для найбільш складних систем, наприклад в авіабудуванні, можуть обчислюватись мільярдами доларів США.

Тому дослідження, спрямовані на вдосконалення процесів управління проєктами і системної інженерії створення СТС, у тому числі аналіз факторів прояву невизначеності, пошук методів вироблення стратегії реагування на них і управління ними, є надзвичайно актуальною науковою і прикладною задачею.

✉ С.Г. Кривова
skrivova@ukr.net

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

Аналіз літературних даних та постановка проблеми

У відповідності з найбільш загальноприйнятою класифікацією [1] до категорій СТС прийнято відносити продукти авіабудування, ракетобудування, систем озброєнь, безпілотні літальні апарати. Їх виробництво характеризується надзвичайно високими питомими показниками трудомісткості і, відповідно, виробітки на одного працюючого, а сам продукт відрізняється високою питомою вартістю [2].

Найважливішою рисою, що характеризує СТС, є необхідність проведення при їх створенні великого комплексу науково-дослідних і дослідно-конструкторських робіт (НДіДКР), у тому числі, фундаментального характеру [1], [3], [4]. Така необхідність в НДіДКР пояснюється таким поняттям, як унікальність, яка є властивістю притаманній СТС. Полягає вона у наступному:

- подібних СТС до цього часу не було;
- вони повинні мати такі властивості і характеристики, яких не було у попередніх СТС;
- вони повинні бути здатними вирішувати задачі і досягати цілей, які не доступні попереднім СТС.

З основних закономірностей системології випливає, що система, яка створює СТС є по собі ще більш складною і унікальною, так як виступає надсистемою [5], [6].

Методологічно процеси створення СТС сьогодні групуються переважно у двох областях діяльності: процеси управління проектами і процеси системної інженерії.

Як відомо, управління проектом створення СТС включає управління десятима функціональними групами процесів: “інтеграцією”, “змістом”, “термінами”, “якістю”, “ресурсами”, “комунікаціями”, “ризиками”, “закупівлями” і “зацікавленими сторонами” [7], [8].

Процеси системної інженерії включають процеси стадії “передрозробки” (передконцепт), що містять у т.ч. “технологічну концепцію проекту”; процеси стадії “розробки”, у тому числі “формування технологічного обліку СТС”, тестування, натурні випробування. Спрощуючи системну інженерію позначають як вид діяльності – НДіДКР [6], [9]–[12]. Звернемо увагу на високу витратність цих видів діяльності. Так, наприклад, витрати на НДіДКР літака Boeing 737 оцінюються в межах декількох мільярдів доларів США. Для оригінальної моделі 737 ці витрати (у цінах 1960-х років) сягали близько 150 мільйонів доларів. При створенні літака Boeing 787 витрати на системну інженерію – НДіДКР оцінюються в межах 15–20 мільярдів доларів США [13]–[15].

Розглядаючи процеси створення СТС, можна констатувати, що як і процеси управління проектом, так і процеси системної інженерії мають високий рівень невизначеності.

У процесах управління проектом, в залежності від його стадій – “ініціації”, “планування”, “виконання”,

“контроля”, “завершення” [7] – все обов’язково буде змінюватись і не завжди можна передбачити “як?”. Тому що кожен проект є унікальним за визначенням.

Звернемо увагу лише на одну з показових груп процесів – “управління закупівлями”. У проектах створення СТС як правило задіяна велика кількість постачальників, кооперантів. Наприклад, для виробництва таких літаків, як Boeing 787 Dreamliner, залучено понад 300 основних постачальників, розташованих у більш ніж 25 країнах. Загальна кількість субпідрядників і постачальників для літаків цього класу може досягати кількох тисяч. Група процесів “управління закупівлями” серед іншого буде включати: планування закупівель (по всьому світу, на різних континентах), оцінку і вибір постачальників, включаючи їх тестування, заключення з ними контрактів, контроль виконання контрактів. Невизначеність цього виду діяльності без сумніву є високою.

Звернемо увагу на процеси системної інженерії, які апіорі передбачають використання у системі інновацій, новітніх технічних і інженерних рішень, використання нових матеріалів, методів управління і методів проектування. Окрім цього, новий виріб включає в себе новорозроблені компоненти: агрегати, системи, вузли тощо. Закономірно очікувати, що цей комплекс факторів також стане джерелом невизначеності, як у процесі створення СТС так і під час випробувань і наступній експлуатації системи.

Те, що проекти створення СТС в силу своєї унікальності завжди містять в собі значну долю невизначеності підтверджується й фактами з недавньої історії авіабудування. Так, проекти літаків Boeing 787 Dreamliner і Airbus A380 були багато в чому унікальними, але особливо, перший з них – в силу використання в його конструкції великої кількості нових матеріалів (в т.ч. композиційних), інноваційних технологій їх формотворення, а другий – в силу великих габаритів, складності інтеграції, логістики, що призвело через високий ступень невизначеності до великих затримок термінів і перевищенню бюджету програми. Витрати за думкою ряду дослідників перевищили мільярди доларів США [14], [17]–[20].

Останні дослідження в галузі управління проектами і системної інженерії, пов’язані зі створенням СТС, висвітлюють важливість розуміння та управління невизначеністю, причому невизначеність часто розглядається як неминуча складова будь-якого проекту. Вона пов’язана з відсутністю повної інформації, що ускладнює передбачення результатів та визначення оптимальних шляхів досягнення цілей. Невизначеність може стосуватися як внутрішніх аспектів, наприклад, ресурсних обмежень та технічних проблем, так і зовнішніх, наприклад, змін у законодавстві або ринкових умовах [21], [22]. Інше важливе дослідження [23] підкреслює, що невизначеність може бути як джерелом ризику, так і можливостей для проекту. Автори наголошують, що за своєю природою невизначеності можуть

бути двох категорій: ті які спричинені впливом зовнішнього середовища і на які ми не можемо впливати, а можемо їх виявляти і враховувати в планах. Друга категорія невизначеностей пов'язана з незнанням або неповним знанням прояву окремих факторів і закономірностей поведінки об'єктів. Ці невизначеності можна зменшувати і навіть їх уникати [21], [24].

Джерела підтверджують, що проекти пов'язані зі створенням СТС через свою унікальність і складність, часто стикаються з вищим рівнем невизначеності, ніж більш рутинні завдання й операційна діяльність [25], а системна інженерія практично завжди має справу з високим рівнем невизначеності, оскільки великі інженерні проекти часто включають складні взаємозв'язки між різними компонентами та підсистемами [26]–[28]. Невизначеність у проектах створення СТС визнається як ключовий фактор, що впливає на успіх проекту, оскільки вона визначає здатність команди приймати ефективні рішення в умовах змінних і непередбачуваних обставин [21], [25].

У виданнях підкреслюється важливість ранньої ідентифікації можливих джерел невизначеності та необхідність активного системного моніторингу невизначеності протягом усього проекту [21], [26], [28].

Стратегії управління невизначеністю у проектах можуть базуватись на гнучкому плануванні, адаптивному управлінні та використанні резервів часу і ресурсів для пом'якшення впливу непередбачених обставин [21]. Інші автори серед запропонованого інструментарію управління невизначеністю особливо виділяють якісні та кількісні методи, зокрема сценарний аналіз, дерево рішень та аналіз чутливості, які допомагають проектним менеджерам краще підготуватися до непередбачених обставин [13], [25].

Ще одним з запропонованих інструментів для управління невизначеністю у проектах зі створення СТС є використання методу матриці структури дизайну (Design Structure Matrix, DSM). DSM допомагає візуалізувати та аналізувати взаємозв'язки між компонентами системи або проекту, що дозволяє ідентифікувати та керувати невизначеностями, пов'язаними з їх інтеграцією. Такий підхід дозволяє виявити критичні взаємозв'язки, які можуть створювати ризики або невизначеності, і дає можливість розробити стратегії для їх оптимізації та контролю [27].

Джерела підкреслюють важливу думку, що неврахування невизначеності і невірно вибудована стратегія управління невизначеністю при створенні СТС може призводити до зниження ефективності проекту і навіть до його зупинки, що підтверджується численними практичними прикладами в авіабудуванні та інших високотехнологічних галузях.

Підсумовуючи проведений аналіз літературних і ряду інших джерел можна зробити висновок про актуальність проблематики аналізу і оцінки невизначеності, як найважливішого фактору, що визначає ефективність діяльності зі створення СТС.

Також можна відмітити, що у цілому ряді робіт, у тому числі [13], [21], [24], [25] прояв факторів невизначеності розглядався окремо – відносно діяльності з управління проектом. У ряді робіт [26]–[28] та інших невизначеність аналізувалась як фактор притаманний системно-інженерній діяльності, у роботі [29] – як фактор вирішення виключно інженерних задач.

Однак, розгляду різних проявів факторів невизначеності у комплексі і взаємозв'язку двох різних по функціональному призначенню видів діяльності: управління проектами і системної інженерії, до цього часу, уваги приділено не було. Пояснити це можна очевидно різнопрофільністю й різновизначеністю проблем, для вирішення якої повинні залучатись провідні профільні спеціалісти, як першої, так і другої області діяльності. Організаційно забезпечити це доволі складно.

Нестача цих уявлень і даних може мати суттєвий вплив на ефективність прийняття рішень, особливо на ранніх етапах розвитку проектів, коли невизначеність є найвищою. Це, в свою чергу, знижує загальну ефективність управління проектами, збільшує ризики та підвищує витрати на подолання непередбачених проблем на подальших етапах проекту. Враховуючи високу складність та унікальність СТС, така ситуація може суттєво вплинути на кінцевий результат, зокрема на вартість, терміни та якість виконання проекту.

Таким чином, проблема комплексного розгляду прояву невизначеності при реалізації процесів управління проектами і системної інженерії при створенні СТС є надзвичайно актуальною і потребує дослідження.

Мета та задачі дослідження

Метою даного дослідження є аналіз найбільш значущих підходів і оцінка стану проблеми врахування фактору невизначеності об'єктивно властивого основним видам діяльності, спрямованих на створення СТС – управління проектами і системної інженерії, – що дозволить формувати більш ефективну стратегію управління невизначеністю при створенні СТС.

Для досягнення цієї мети, були поставлені наступні задачі дослідження:

- проаналізувати найбільш репрезентативну інформацію з літературних джерел в області управління проектами і системної інженерії, виявити тенденції і особливості прояву і врахування фактору невизначеності при створенні СТС;
- методично забезпечити, організувати і репрезентативно та коректно реалізувати задачі експертних оцінок, що висунуті у рамках дослідження, що проводиться;
- виявити найбільш значущі фактори невизначеності, характерні для діяльності з управління проектами і системної інженерії при створенні СТС;
- провести якісно-кількісний аналіз складу цих факторів для різних видів діяльності, типових для про-

цесів створення СТС, порівнюючи їх з відомими з літератури факторами, характерними для загально-економічної – операційної діяльності;

– провести загальну оцінку в динаміці їх зростання для різних видів діяльності – з управління проектом і системної інженерії – в залежності від зростання ступеня унікальності системи, врахувавши при цьому найбільш типові види проектів світового авіабудування.

Методи досліджень

Об'єктом аналізу було проявлення факторів невизначеності при створенні СТС, у процесах управління проектами і системної інженерії. Як вже зазначалось вище, у розділі 2, вважається, що однією з основних причин невирішеності актуальної проблеми, що стоїть, була організаційно-методична складність залучення провідних вітчизняних спеціалістів, які мають відповідні компетенції в управлінні проектами і системної інженерії створення СТС, до процедур експертних оцінок та отримання від них експертно-значущих результатів. Пов'язано це, дещо, з об'єктивною відповідною конкурентністю й боротьбою за пріоритетність у питаннях реалізації життєвих циклів процесів управління проектом між двома цими групами спеціалістів, які практикують у двох різних видах діяльності.

Окрім цього, такого роду спеціалісти практично завжди зайняті прямою професійною діяльністю і відволікти їх від неї для залучення до експертиз є складною задачею. Для її вирішення була підготовлена й організована наступна організаційно-методична робота. На протязі двох років модераторами задачі проведення експертної оцінки, були організовані тренінги з проблем управління проектами і системної інженерії СТС на підприємствах авіабудування і ряді підприємств наукоємного виробництва. Загалом, до участі в тренінгах було залучено понад 60 провідних вітчизняних спеціалістів, які мають найвищі компетенції в питаннях створення СТС. З цього репрезентативного складу, з урахуванням роботи у ході занять, проявлених професійних знань, а також особливостей характеру, були відібрані дві групи експертів.

У ході реалізації процедур Експертних оцінок використовувались різні методики, найчастіше у формі метода Дельфі.

Як відзначалось вище, перша група експертів спеціалізувалась відповідно на аналізі факторів невизначеності управління проектами, друга група експертів – на аналізі прояву факторів невизначеності у процесах НДІДКР створення нових зразків техніки.

Методика досліджень складалася з трьох етапів, кожен з яких був спрямований на глибоке вивчення проблематики невизначеності в управлінні проектами та системної інженерії СТС.

Перший етап включав комплексний аналіз і визначення репрезентативного складу інформаційних

джерел у відповідних галузях. Були розглянуті основні підходи до визначення невизначеності при створенні СТС, що стало основою для подальшого аналізу.

На **другому етапі** розглядався репрезентативний перелік факторів невизначеності, типових для двох основних видів діяльності зі створення СТС. Спочатку групи працювали відокремлено. Першій групі було запропоновано сформулювати не більше 2–3 найбільш значущих факторів невизначеності, які найбільшою мірою впливають на невизначеність управління проектом і його результати. Друга група експертів, відповідно, формувала своє бачення найважливіших факторів невизначеності при управлінні процесами системної інженерії (НДІДКР).

Після здійснення процедур розгляду і погодження, були сформовані відповідні переліки факторів невизначеності. Далі ці переліки за перехресною процедурою розглядались і оцінювались експертами з їх точки зору. Далі методом консенсусу були відібрані найбільш значущі з запропонованих факторів невизначеності (табл. 1).

На **третьому етапі** для наочності представлення була зроблена спроба якісно-кількісно оцінити співвідношення основних факторів невизначеності, властивим цим двом видам діяльності: управління проектом і системної інженерії.

Відмінність у якості невизначеності між двома видами діяльності визначали умовно за кількістю виявлених значущих факторів (позначені “+” та “++” у табл. 1).

Далі, дві групи експертів оцінювали відносну динаміку росту невизначеності відносно унікальності проекту, оцінка проводилась за кутом росту кривої невизначеності в міру зростання ступеня унікальності проектів, за вихідну базу оцінки була обрана еквідистанта відносно цих показників.

Були відібрані проекти двох характерних для світового авіабудування типів:

– перший тип – створення літака наступного покоління, плюс модернізація виробничої інфраструктури на попередній локації, у якому “літак” є первинним;

– другий тип – створення літака методом модифікації раніше існуючої моделі, плюс створення виробничої бази з нуля на новій локації, у якому “літак” є вторинним.

Питання було сформульоване у спрощено-формалізованій формі: “оцінити ступінь пропорційності або еквідистантності зростання невизначеності відносно ступеня унікальності цих проектів”.

Для першої групи експертів, спеціалістів з аналізу управління проектом, в якості критерію зростання унікальності проекту експертним шляхом було обране граничне значення зростання кількості постачальників-кооперантів проекту – на 25 % і вище від аналогічного попереднього або близького до нього проекту.

Для другої групи експертів, спеціалістів в області системної інженерії, експертним шляхом в якості критерію зростання унікальності було обране зростан-

ня кількості нових компонентів, підсистем, матеріалів, що раніше не використовувались в конструкції СТС – на 25 % і вище від аналогічної попередньої або близької до неї конструкції. Результати експертиз наведені у табл. 2 і на рис. 1.

Результати досліджень

Під час аналізу літературних даних було виявлено, що фактори невизначеності комплексно у взаємозв'язаності діяльності з управління проектами і системної інженерії не розглядались. Можливо, це пояснюється, зокрема, методологічною і організаційною складністю залучення експертів різних, часто конкуруючих між собою за пріоритетність прийняття рішень предметних груп. Запропонувати спосіб вирішення цієї задачі було також актуальною проблемою.

Запропонована, методично забезпечена й організаційно реалізована процедура залучення різних предметних груп спеціалістів – в області управління проектами і в області системної інженерії – дозволила презентативно й коректно вирішити експертні задачі, що були поставлені у рамках дослідження, яке проводилось.

У ході експертиз і досліджень були виявлені найбільш значущі фактори невизначеності, характерні для проєктної і системно-інженерної діяльності. Фактори типові для операційної діяльності для порівняння були взяті з літературних джерел (табл. 1). Стала очевидною природа факторів невизначеності, характерна для діяльності, типової і такої, що реалізується при створенні СТС.

У відповідності з приведеною у розділі 3 методикою експертних оцінок були виявлені відмінності у кількості значущих факторів невизначеності рекомендованих експертами і відібраних ними у результаті процедури, також описаної у розділі 3.

Кількісне порівняння їх наведене у табл. 1 і добре ілюструється якісними стрибками при переході від одного виду діяльності до іншого (рис. 1).

У відповідності з методологією, представленою у розділі 3, експерти оцінили ступінь еквідистантності прямих, що відображають залежність зростання невизначеності у міру зростання ступеня унікальності СТС. Було встановлене зростання невизначеності у міру зростання ступеня унікальності проєкту. Також була продемонстрована залежність показника еквідистантності кривих у рамках одного виду діяльності для двох різних типів проєктів.

Таблиця 1. Основні фактори, що визначають невизначеність операційної діяльності, діяльності з управління проектами і діяльності з системної інженерії

№	Фактори невизначеності		
	Операційної діяльності	Діяльності з управління проектами	Діяльності з системної інженерії
1	2	3	4

Невизначеність
1 середовища типова для операційної діяльності.

Невизначеність середовища типова для операційної діяльності.
+ Невизначеність зовнішнього середовища, що формується невизначеністю реакції споживачів (замовників) на унікальний продукт, послугу, результат.
+ Невизначеність внутрішнього середовища, що формується новим складом кооперантів-постачальників.
+ Невизначеність внутрішнього середовища, що формується новоствореною командою проєкту.

Невизначеність середовища типова для операційної діяльності.
+ Невизначеність зовнішнього середовища, що формується невизначеністю реакції споживачів (замовників) на унікальний продукт, послугу, результат.
+ Невизначеність внутрішнього середовища, що формується новим складом кооперантів-постачальників.
+ Невизначеність внутрішнього середовища, що формується новоствореною командою проєкту.
++ Невизначеність зовнішнього середовища, що формується необхідністю отримувати нові знання, компетенції з зовнішнього середовища, залучення унікальних спеціалістів, експертів, бази знань і науково-дослідного обладнання.
++ Невизначеність внутрішнього середовища, що формується необхідністю підбору нового складу системно-інженерних спеціалістів.

Таблиця 1. Продовження

1	2	3	4
2	Невизначеність прийняття рішень типова для операційної діяльності.	Невизначеність прийняття рішень типова для операційної діяльності. + Невизначеність прийняття рішень, що формується унікальними цілями проєкту.	Невизначеність прийняття рішень типова для операційної діяльності. + Невизначеність прийняття рішень, що формується унікальними цілями проєкту. ++ Невизначеність прийняття системно-інженерних рішень у зв'язку з їх унікальністю.
3	Невизначеність наслідків прийняття рішень типова для операційної діяльності.	Невизначеність наслідків прийняття рішень типова для операційної діяльності. + Невизначеність наслідків прийняття рішень, що формується унікальними цілями проєкту.	Невизначеність наслідків прийняття рішень типова для операційної діяльності. + Невизначеність наслідків прийняття рішень, що формується унікальними цілями проєкту. ++ Невизначеність наслідків прийняття системно-інженерних рішень у зв'язку з їх унікальністю.
4	Варіаційна невизначеність пов'язана зі зміною параметрів, умов функціонування системи у майбутньому типова для операційної діяльності.	Варіаційна невизначеність пов'язана зі зміною параметрів, умов функціонування системи у майбутньому типова для операційної діяльності. + Варіаційна невизначеність, що формується зміною параметрів, умов функціонування, вимог проєкту на наступних стадіях його життєвого циклу.	Варіаційна невизначеність пов'язана зі зміною параметрів, умов функціонування системи у майбутньому типова для операційної діяльності. + Варіаційна невизначеність, що формується зміною параметрів, умов функціонування, вимог проєкту на наступних стадіях його життєвого циклу. ++ Варіаційна невизначеність, що формується зміною параметрів, умов виробництва і функціонування складної технічної системи на наступних етапах її життєвого циклу. ++ Варіаційна невизначеність, що формується переоцінкою комерційної успішності проєктних рішень наперекір логіці системно-інженерних рішень.

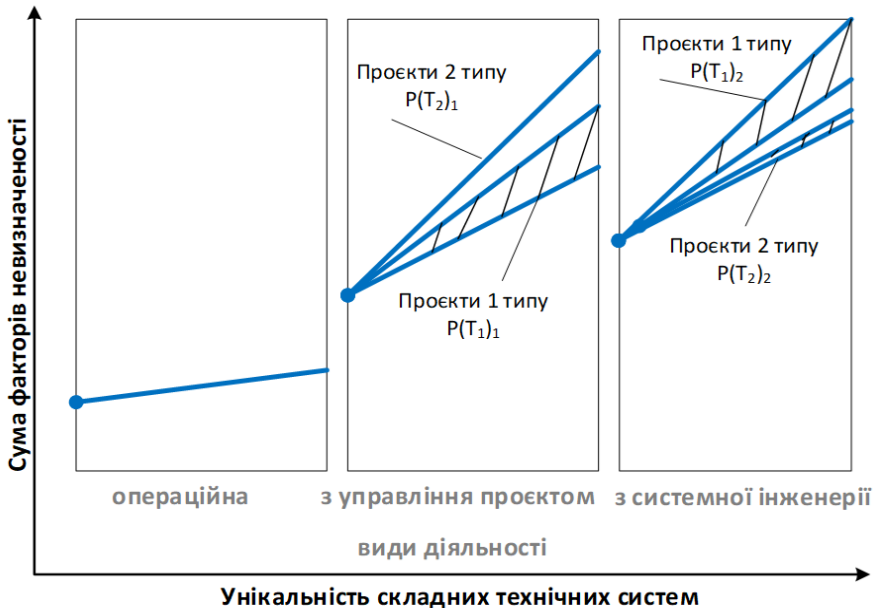


Рис. 1. Ілюстрація результатів експертних оцінок характеру і динаміки залежностей зростання невизначеності і зміни якості від унікальності СТС для різних видів діяльності з урахуванням типу проєкту

Таблиця 2. Результати експертного опитування ступеня еквідистантності зростання невизначеності і унікальності у проєктах типу Р (Т₁) і типу Р (Т₂) для різних видів діяльності

Тип проєкту, вид діяльності	Зростання невизначеності		
	менше зростання унікальності	відповідає зростанню унікальності	більше зростання унікальності
Проєкт першого типу, діяльність з управління проєктом Р (Т ₁) ₁	+	+	0
	(85 %)	(15 %)	
Проєкт першого типу, діяльність з системної інженерії Р (Т ₁) ₂	0	+	+
		(30 %)	(70 %)
Проєкт другого типу, діяльність з управління проєктом Р (Т ₂) ₁	0	+	0
		(100 %)	
Проєкт другого типу, системно-інженерна діяльність Р (Т ₂) ₂	+	+	0
	(90 %)	(10 %)	

Так, проєкт (Тип 1), де “літак” розроблявся вперше, а виробництво лише зазнавало модернізації, характеризувався більш низькою динамікою зростання невизначеності управління проєктом і високим зростанням системної інженерії. І навпаки, для проєктів (Тип 2), де “літак” був вторинним і лише зазнавав модернізації, а виробництво було первинним – воно створювалось з нуля – спостерігалась зворотня картина динаміки залежностей.

Висновки

На основі проведеного аналізу літературних та інших джерел інформації була встановлена актуальність проблематики оцінки невизначеності, як важливого фактору, що визначає ефективність діяльності з управління проєктами і системної інженерії створення СТС.

Запропонований і реалізований оригінальний методологічний підхід, що дозволив отримати доступ до репрезентативної групи провідних спеціалістів, які практикують в галузі управління проєктами і системної інженерії створення СТС. Проведений відбір найбільш компетентних з них для виконання експертних

оцінок, що були проведені для даного дослідження.

Експертним шляхом виявлені найбільш значущі фактори невизначеності, типові для діяльності з управління проєктами і системної інженерії створення СТС.

Проведений порівняльний якісно-кількісний аналіз виявлених факторів невизначеності типових для діяльності з управління проєктами і системної інженерії створення СТС, які також зіставлені з відомими факторами невизначеності типовими для загально-економічної – операційної діяльності.

У відповідності з розробленою методикою була встановлена різниця у динаміці зростання невизначеності, в залежності від ступеня унікальності СТС, до того ж, як у рамках різноманітних видів діяльності зі створення СТС – управління проєктами і системної інженерії, так і для різноманітних типових проєктів зі створення СТС.

Таким чином, отримані нові уявлення і визначені певні тенденції, що дозволяють учасникам проєктної діяльності зі створення СТС більш ефективно і усвідомлено виробляти рішення у такій надзвичайно важливій, фінансовоємній, привабливій для науково-технічного прогресу діяльності.

References

- [1] INCOSE. (2023). INCOSE Systems Engineering Handbook v5. International Council on Systems Engineering. [Online]. Available: <https://www.incose.org/publications/se-handbook-v5>.
- [2] Н. О. Kryvov and C. O. Zvorykin, “Priority – science-intensive and high-tech products,” *Technological systems*, Vol. 3 (29), pp. 7–13, 2005.
- [3] A. Kosiakov, U. Svyt, *Systems Engineering. Principles and Practice*, V. K. Batovryna Ed., DMK Press, 2014.
- [4] Н. О. Kryvov and V. M. Shulepov, “How to make money to fund science and why society needs a science-intensive industry,” *Technological systems*, No. 68 (3), pp. 9–11, 2014. Available: <http://technological-systems.com/index.php/Home/article/view/228>.
- [5] A. E. Kononiuk, *Systemolohiya. Obshchaia teoriya system* [Systemology. General systems theory], Osvita Ukrainy, 2014.
- [6] ISO/IEC/IEEE 15288:2015, *Systems and software engineering – System life cycle processes*.

- [7] Guide to the Project Management Body of Knowledge (2017). Project Management Institute.
- [8] H. O. Kryvov, K. O. Zvorykin and S. H. Kryvova, *Project management in knowledge-intensive engineering*, Kyiv, 2019.
- [9] H. O. Kryvov, S. H. Kryvova, K. O. Zvorykin and O. E. Zubanov, *Fundamentals of system engineering*, Kyiv, 2022.
- [10] NATO STANDARD: AAP-20 – NATO Programme Management Framework (NATO Life Cycle Model), October 2015.
- [11] NATO STANDARD: AAP-48 – NATO System Life Cycle Processes, Mars 2013.
- [12] DSTU V-P 15.004:2019 System of development and delivery of weapons and military equipment for production. Stages of the life cycle of weapons and military equipment.
- [13] C. Chapman and S. Ward, *Project Risk Management: Processes, Techniques and Insights*. Wiley, 2003.
- [14] H. Kerzner, *Project Management: A Systems Approach to Planning, Scheduling, and Controlling*. Wiley, 2017.
- [15] D. A. Pritchard and A. J. MacPherson, *Industrial strategies of the world's leading aircraft manufacturers*. Taylor & Francis, 2004.
- [16] S. S. Kramer and M. J. Rogoff, *Waste-to-Energy Project Development*, William Andrew, 1999.
- [17] B. Flyvbjerg, *Megaprojects and Risk: An Anatomy of Ambition*. Cambridge University Press, 2014.
- [18] *NASA Systems Engineering Handbook*, NASA, 2007.
- [19] C. Tang, J. Zimmerman, "Managing New Product Development and Supply Chain Risks: The Boeing 787 Case," *Supply Chain Forum*, 2009, doi: <https://doi.org/10.1080/16258312.2009.11517219>.
- [20] N. Gil, S. Beckman, "Airbus A380: Turbulence Ahead," *Harvard Business Review*, 2007.
- [21] D. Cleden, (2017). *Managing Project Uncertainty*. Routledge, doi: <https://doi.org/10.4324/9781315249896>.
- [22] O. Perminova, M. Gustafsson and K. Wikström, "Defining uncertainty in projects: A new perspective," *International Journal of Project Management*, 26(1), pp. 73–79, 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2007.08.005>.
- [23] M. Pich, C. Loch and A. Meyer, "On uncertainty, ambiguity, and complexity in project management," *Management Science*, Vol. 48(8), pp. 1008–1023, 2002, doi: <https://doi.org/10.1287/mnsc.48.8.1008.163>.
- [24] A. De Meyer, C. H. Loch and M. T. Pich, "Managing project uncertainty: from variation to Chaos," *MIT Sloan Management Review*, 2002, doi: <https://doi.org/10.1109/EMR.2002.1032403>.
- [25] M. Loosemore, *Exploring Risk and Uncertainty in Projects*. Taylor & Francis, 2006.
- [26] B. S. Blanchard and W. J. Fabrycky, *Systems Engineering and Analysis* (5th ed.). Prentice Hall, 2010.
- [27] S. D. Eppinger and T. R. Browning, *Design Structure Matrix Methods and Applications*. MIT Press, 2012, doi: <https://doi.org/10.7551/mitpress/8896.001.0001>.
- [28] O. L. de Weck, D. Roos and C. L. Magee, "Engineering Systems: Meeting Human Needs in a Complex Technological World", *MIT Press*, 2011, doi: <https://doi.org/10.7551/mitpress/8799.001.0001>.
- [29] E. de Rocquigny, N. Devictor and S. Tarantola, *Uncertainty in Industrial Practice: A Guide to Quantitative Uncertainty Management*, Wiley, 2008, doi: <https://doi.org/10.1002/9780470770733>.

Designing complex technical systems considering uncertainty factors

S. Kryvova¹

¹ Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine

Abstract. A characteristic feature of projects aimed at creating complex technical systems (CTS) is a high level of uncertainty. Failure to account for uncertainty, especially in the early stages of project development, when uncertainty is at its peak, increases risks and raises costs for resolving unforeseen issues in later project phases. This can significantly impact the achievement of the project's final goals. Therefore, the problem of comprehensively addressing uncertainty in project management and systems engineering processes during CTS development is highly relevant and requires thorough investigation.

The primary objective of this research is to analyze the most significant approaches and assess the state of the issue regarding the consideration of uncertainty factors inherent in key activities aimed at creating CTS – namely, project management and systems engineering. This will enable the development of more effective strategies for managing uncertainty in CTS creation.

The research methodology included organizing and implementing expert evaluation procedures to identify the most significant uncertainty factors in CTS development. Additionally, a qualitative and quantitative analysis of the composition of uncertainty factors was conducted for various types of activities – project management and systems engineering – and the dynamics of uncertainty growth were evaluated depending on the degree of CTS uniqueness for different types of projects.

The research identified the most significant uncertainty factors characteristic of project management and systems engineering activities in CTS creation. The nature of the dynamics of uncertainty growth in relation to the uniqueness of various project types was also determined. The conducted research has provided new insights and identified certain trends aimed at improving the processes of project management and systems engineering in the development of CTS.

Keywords: Systems engineering, project management, complex technical system, uncertainty, project management and systems engineering processes, science-intensive product.