
Методологічний підхід до інформаційно-функціональної інтеграції автоматизованих систем складових об'єктів критичної інфраструктури

Володимир Юзефович

Інститут проблем реєстрації інформації Національної академії наук України, м. Київ, Україна
ORCID 0000-0002-6336-9548

Євгеній Додонов

Інститут проблем реєстрації інформації Національної академії наук України, м. Київ, Україна
ORCID 0009-0008-3400-6570

Євгенія Цибульська

Інститут проблем реєстрації інформації Національної академії наук України, м. Київ, Україна
ORCID 0000-0003-3342-4507

Анотація: В статті розглядається методологічний підхід до вирішення задачі інформаційної та функціональної інтеграції наявних та перспективних автоматизованих систем до єдиної автоматизованої системи на основі модельного представлення великих складних організаційних систем, до яких відносяться об'єкти критичної інфраструктури, та їх складових. Модель дозволяє аналізувати інформаційну сумісність наявних автоматизованих систем та функціональну повноту вирішення завдань організаційної системи, визначати доцільні зв'язки між автоматизованими системами її складових. В умовах зростаючої складності технологічних процесів та зростання кіберфізичних загроз, виникає нагальна потреба у розробленні методологічного підходу до інформаційно-функціональної інтеграції автоматизованих систем різного призначення та ієрархічного рівня до єдиної автоматизованої системи. Запропонований підхід ґрунтується на принципах модульності, функціональної декомпозиції та адаптивної взаємодії між компонентами, що забезпечують цілісне управління складними об'єктами за рахунок єдиного інформаційного середовища та синхронізованих функціональних процесів. Авторами сформульовано методологічні засади інтеграції, які включають: класифікацію типових інформаційних обмінів, встановлення структурно-функціональних залежностей між підсистемами, визначення сумісності та узгодженості. Особливу увагу приділено розробці узагальненої архітектури інтеграційного середовища, яка дозволяє забезпечити масштабованість, підвищити надійність та захищеність інформаційної взаємодії за рахунок можливості використання єдиних загальносистемних рішень. Запропоновано концептуальну модель координації функцій автоматизованих систем в умовах динамічної зміни зовнішнього середовища, що особливо актуально для ОКИ, які мають стратегічне значення для національної безпеки та безперервного функціонування державних і соціальних процесів. Практична реалізація описаного підходу дозволяє суттєво підвищити ефективність управління, зменшити ризики функціональних збоїв та забезпечити стійкість систем до деструктивних впливів.

Ключові слова: організаційна система, об'єкт критичної інфраструктури, автоматизована система, модель, моделювання.

1. Вступ

Основною відмінністю організаційних систем (ОС), до яких відносяться об'єкти критичної інфраструктури, є помітний вплив людського фактору на результативність їх діяльності, незважаючи на широке використання технічних засобів для досягнення цілей організації. Тобто такі системи відносяться до соціотехнічних систем, які в процесі функціонування передбачають взаємодію технічних засобів та людини. З точки зору системного аналізу

об'єкти критичної інфраструктури (ОКІ) держави очевидно відносяться до класу великих складних систем. Не намагаючись дати повне визначення великим складним системам, зазначимо, що великою можна вважати таку систему, кількість станів якої та/чи кількість взаємозв'язків між її елементами, комбінаторно великі або незліченні. Під складною системою розуміють систему, яка характеризується неоднорідністю (різноманітністю) її елементів та зв'язків між ними і структурною різноманітністю (спеціалізацією) своїх складових. Ще однією важливою ознакою організаційних систем є їх відношення до класу інформаційних систем, де добувається (отримується), перетворюється, розповсюджується існуюча та спродукована нова інформація.

Особливістю великих складних ОС (ОКІ) є те, що вони фактично ніколи не створюються «з нуля», а є результатом тривалого еволюційного розвитку як технічного забезпечення, так і організаційної структури системи. Еволюційний розвиток таких систем призводить до отримання у кінцевому підсумку «життєздатних» їх варіантів (з урахуванням існуючих (створених) в процесі еволюції умов існування). Об'єктивним результатом цього ж процесу є те, що особливістю створення автоматизованої системи (АС), яка б охоплювала автоматизацією усі основні процеси ОС (ОКІ), є наявність та використання в рамках їх структурних складових окремих, автономних автоматизованих систем, які необхідно (бажано, доцільно) інтегрувати у єдину автоматизовану систему для досягнення максимального загальносистемного ефекту від автоматизації (іноді вживана назва – System-of-Systems, SoS [1-3]). Таку задачу, з точки зору теорії систем, можна розглядати як задачу об'єднання елементів системи доцільними зв'язками, фактично утворюючи структуру, яка разом із цими елементами буде складати нову систему.

Іншою важливою особливістю таких ОС є те, що вони завжди є ієрархічними (як організаційно, так і функціонально). Це не означає відсутності мережових зв'язків, однак підкреслює «життєву» необхідність спеціалізації складових систем (підсистем), ієрархічного розподілу завдань між ними та визначення локальних цілей. Як наслідок, при інтеграції автономних АС у єдину автоматизовану систему розрізняють потреби у вертикальній та горизонтальній інтеграції. Вертикальна - здійснюється шляхом об'єднання АС різних ієрархічних рівнів. Горизонтальна – об'єднанням спеціалізованих під конкретні потреби АС одного ієрархічного рівня.

2. Об'єкт і предмет дослідження

Об'єктом дослідження є автоматизація великих складних організаційних систем до яких відносяться об'єкти критичної інфраструктури. Предметом дослідження є процес інтеграції автоматизованих систем складових об'єктів критичної інфраструктури у єдину автоматизовану систему.

3. Мета дослідження

Метою дослідження є розробка підходу до обґрунтування можливості, доцільності та напрямків інформаційної та функціональної інтеграції автоматизованих систем складових організаційних систем, до яких відносяться ОКІ, для отримання обґрунтованої структури інтегрованої системи.

4. Аналіз літератури

Як вже зазначалось вище, на сьогодні не існує єдиного точного визначення великих складних інтегрованих систем, однак у літературі пропонується багатий набір описів їх характеристик і властивостей, які дозволяють проводити точні відмінності між екземплярами таких систем, що, в свою чергу, визначають підходи до аналізу і шаблони моделювання при

розробці архітектури. У [1] автори формулюють 8 вимірів, за якими можна характеризувати системи даного типу:

- *Автономність складових.* Це ступінь, до якої поведінка складової системи регулюється її власними правилами (не загальносистемними). Враховуючи гетерогенність інтегрованих систем, можуть існувати значні відмінності у автономності складових в межах однієї системи. Методи моделювання та аналізу мають дозволяти представляти функції, які може виконувати автономна складова, але які не можуть точно передбачатись на рівні системи (необхідність нечіткої специфікації поведінки складових системи);

- *Незалежність.* Це здатність складової функціонувати відокремлено від системи. Незалежність означає, що дана складова може пропонувати ряд моделей поведінки, з яких деякі пов'язані з її функціями у загальній системі, а інші незалежні від неї. Зв'язок між цими класами поведінки і залежності між ними можуть бути прихованими, але архітектурні методи, засновані на моделях, повинні мати можливість їх підтримувати;

- *Розподіленість.* Ця властивість стосується ступеня, до якого складові системи розміщені окремо одна від одної, а засоби зв'язку забезпечують комунікацію та обмін даними. Розподіленість характерна для систем військового призначення, де збір, зберігання і обробка даних можуть забезпечуватись мобільними платформами і датчиками. Моделювальні фреймворки таких систем мають підтримувати призначення системних процесів обчислювальній інфраструктурі, зв'язаній засобами комунікації, тобто описи топології системи, паралельності процесів, засобів зв'язку та ін.;

- *Еволюційний розвиток.* Організаційні системи в ході функціонування підлягають змінам у наданій функціональності або у її якості, у складі та структурі системи, що обумовлено необхідністю реагувати на зміни у середовищі функціонування, тобто еволюція систем відбувається безперервно. Засоби інженерії таких систем вимагають підтримки для збереження заданих властивостей на етапах еволюції, яка включає перевірку відповідності інтерфейсів кожної складової системи при її оновленні інтерфейсам інших складових, з якими вона взаємодіє;

- *Динамічна реконфігурація.* Це здатність системи вносити зміни до своєї структури та складу без зовнішнього втручання, що дуже важливо для забезпечення стійкості до збоїв та інших загроз. На відміну від еволюції, цей вимір стосується технічних можливостей динамічного визначення зв'язності та перепідключення інтерфейсів складових системи. Для підтримки даної властивості моделі системи повинні мати абстракції для динамічної модифікації архітектур та інтерфейсів, а також механізми прийняття рішень щодо таких змін;

- *Емерджентність поведінки.* Ця властивість характеризує поведінку, яка виникає в результаті синергетичної співпраці складових системи і може забезпечити вищу функціональність системи ніж та, що виконується її складовими окремо. Це висуває вимогу до методів моделювання і аналізу, які мають дозволяти формулювати і перевіряти емерджентну поведінку системи, а також ідентифікувати поведінку, яку слід уникнути;

- *Взаємозалежність.* Ця властивість виникає внаслідок того, що складові організаційної системи взаємодіють для досягнення спільної мети, при цьому, сама складова, можливо буде змушена зменшити або змінити свою власну функціональність для приєднання до організаційної системи. Методи моделювання і аналізу повинні дозволяти чітку ідентифікацію та відстеження взаємозалежностей і можливість використовувати їх для оцінки впливу змін складових системи;

- *Інтероперабельність.* Ця властивість визначає здатність інтегрувати гетерогенні системи, що включає інтеграцію та адаптацію інтерфейсів, протоколів та стандартів для забезпечення зв'язку між застарілими та новоствореними системами. Необхідність інтероперабельності висуває кілька вимог до методів моделювання та аналізу – включення гетерогенних моделей складових системи, методи перевірки відповідностей інтерфейсів, механізми забезпечення семантичної узгодженості різних типів моделей.

Необхідно відмітити, що наявність АС структурних складових ОКІ надає ряд початкових переваг та недоліків [4,5]. До переваг відносять:

- покращення поточного стану автоматизації;
- досягнення більш зрозумілої локальної цілі (засоби, що використовуються для автоматизації кожного процесу, як правило, відповідають вимогам простоти, зручності і налаштовані на ефективне вирішення конкретної задачі);
- потенційно більш дешево (менш ресурсозатратну) подальшу автоматизацію процесів функціонування системи;
- такі складові більш легко та швидко впроваджуються у діяльність ОС (приймаються в експлуатацію);
- АС складових ОКІ є відносно нескладні (більш прості) для освоєння персоналом (особовим складом).

Однак, така «клаптева» автоматизація створює ряд серйозних базових проблем. А саме:

- виникає неузгодженість функціональних характеристик, форматів даних, інтерфейсів програмного забезпечення різних АС;
- існує часткове дублювання функціональності та значне дублювання даних;
- використовується багато точок введення одних і тих самих даних та відбувається їх незалежне «існування» (збереження, накопичення) і використання;
- відсутнє цілісне уявлення про стан системи в цілому та її зовнішнього середовища (середовища функціонування) та відбувається розпорошення власних ресурсів системи для реагування на їх зміни;
- спостерігається використання менш інтелектуальних систем, що пояснюється більш обмеженими можливостями структурних підрозділів щодо автоматизації власної діяльності та бажанням отримання швидкого результату;
- наявний різномірний склад програмних та апаратних засобів, що ускладнює задачу їх налагодження, адміністрування, підтримку у працездатному стані тощо;
- здійснення загальної оцінки поточного стану автоматизації ОКІ та оцінки системного ефекту від впровадження таких засобів автоматизації є більш проблематичними.

Однак розуміння наявності проблем «клаптевої» автоматизації не означає розуміння шляхів їх вирішення [6]. Відомі публікації на тему інтеграції АС у єдину автоматизовану систему або розглядають окремі, суто технічні, чи організаційні аспекти цього питання [7-12], або присвячені питанням розробки АС складових таким чином, щоб полегшити з технологічної точки зору процес їх інтеграції у майбутньому [13-17].

В останні десятиліття були розроблені фреймворки корпоративної архітектури, які використовуються для представлень організаційних систем великих підприємств, створення методологій відображення їх структури і динаміки. До них належать DoDAF (Department of Defence Architecture Framework, USA), MoDAF (Ministry of Defence Architecture Framework, GB), SoSAT (System of Systems Application Toolkit) для військових місій [1-3], фреймворк на основі Специфікації дискретної системи подій (DEVS) [18,19]. Ці продукти надають формальні інструменти для опису і моделювання ієрархічних систем через компоненти та їх взаємозв'язок, включаючи додавання/видалення компонентів під час виконання. Однак вони не вирішують усі проблеми при розробці архітектури інтегрованої системи, зокрема, не підтримують моделювання динамічної еволюції стану або поведінки системи.

Очевидно, що задачам пошуку «технічних» рішень щодо інтеграції існуючих автоматизованих систем складових ОКІ у єдину АС має передувати вирішення задачі аналізу наявності інформаційного та функціонального підґрунтя для інтеграції в єдину систему кожної з таких складових, виходячи, звичайно, із загальносистемних позицій, а також отримання відповіді на питання: які саме АС і з якими іншими системами поєднувати зв'язками для отримання системного ефекту та яким має бути змістовне наповнення цих зв'язків [11-17, 20]. Одним із ефективних шляхів вирішення останнього завдання може бути формування деякого модельного представлення системи в цілому і АС її складових та застосування моделювання у якості інструменту дослідження.

5. Методи дослідження

Задачу може бути вирішено, якщо при інтеграції АС складових ОКІ, по-перше, виходити із функціональності (множини функцій) кожного з ієрархічних рівнів системи, яка де-факто є результатом декомпозиції цільової функції ОКІ в цілому, та, по-друге, встановлювати інформаційні потреби для вирішення кожної з множини функцій на кожному ієрархічному рівні. При цьому, при вирішенні задачі визначення функціональності складових ОКІ корисним може бути використання існуючої організаційної структури системи (яка є ще одним достатньо стійким «корисним» результатом еволюційного розвитку ОКІ, як системи).

Отже, для подальшого ґрунтовного аналізу можливості та напрямків інтеграції в єдину АС автоматизованих систем складових ОКІ необхідне деяке формалізоване представлення ОКІ в цілому, її складових та наявних АС. Для цього пропонується сформувати вичерпний перелік множин параметрів, які і будуть представляти їх формалізований опис:

- множина функцій, що виконуються (мають виконуватися) складовими ОКІ на кожному з ієрархічних рівнів системи (опис необхідної функціональності складових ОКІ та ОКІ в цілому);
- множина інформаційних потреб (інформаційних об'єктів) для реалізації функціональності системи на кожному ієрархічному рівні (опис необхідного інформаційного забезпечення функціональності складових ОКІ);
- множини функціональних та інформаційних можливостей існуючих (можна додати і перспективних) АС структурних складових системи (опис реалізованої та такої, що може бути реалізовано у перспективі функціональності і, відповідно, інформаційних потреб таких АС);
- множини функціональних та інформаційних можливостей персоналу структурних (організаційних) складових системи (опис функціональності та інформаційних потреб персоналу системи, які реалізуються поза автоматизованими системами – є результатом суто аналітичної діяльності людини).

Остання складова формалізованого опису призначена для врахування людського фактору, притаманного, як вже зазначалося, усім ОС.

Гарним підґрунтям для такого формалізованого опису конкретної ОКІ, її складових та наявних АС, може бути створення загальносистемного класифікатору інформаційних об'єктів (інформаційних образів (описів) реальних об'єктів, якими оперує система для вирішення власних задач) та класифікатор функцій різних рівнів системи [12,21]. Виконання такої роботи буде корисним не лише для задачі, яка розглядається, а і для багатостороннього аналізу ефективності побудованого ОКІ (пошук функцій в системі, що дублюються, функцій, що залишилися «поза увагою», визначення загального переліку інформаційних потреб системи, виділення інформаційних потреб, що задовольняються внутрішніми зусиллями та потребують отримання ззовні для фокусування на їх задоволенні при виділенні ресурсів для добування (отримання) необхідних даних).

З урахуванням зазначеного, сформуємо математичний опис конкретного ОКІ, у якості якого розглянемо систему управління збройними силами держави, як однієї із найбільш важливих на сьогодні організаційних структур.

Математичний опис ОКІ та АС його складових

Збройні сили держави є важливим ОКІ, що відносяться до таких критичних сфер, як національна безпека та оборона. У збройних силах зазвичай виділяється три рівні управління: стратегічний, оперативний та тактичний. Кожну АС (зокрема і АСУ) складової ОКІ, що вирішує задачі будь-якого рівня (тактичного, оперативного чи стратегічного), може бути описано множиною параметрів:

$$C = \{I^{in}, I^{out}, F, E, V, L\}, \quad (1)$$

де $I^{in} = \{I^{in}_1, I^{in}_2, \dots, I^{in}_N\}$ – множина вхідних параметрів кількістю N , необхідних для вирішення функціональних задач АС складової ОС, де кожен інформаційний елемент, окрім назви, містить вимоги з боку АС до якості інформації (потрібна точність та достовірність даних, які забезпечують необхідну якість вирішення задач АС);

$I^{out} = \{I^{out}_1, I^{out}_2, \dots, I^{out}_M\}$ – множина вихідних параметрів кількістю M , які продукує АС з показниками якості кожної інформаційної складової;

$F = \{f_1, f_2, \dots, f_K\}$ – множина функцій (задач) кількістю K , які реалізуються (вирішуються) за допомогою даної АС;

$E = \{\text{«повітряна»} = [0; 1], \text{«наземна»} = [0; 1], \text{«надводна»} = [0; 1], \text{«підводна»} = [0; 1]\}$ – частина навколишнього простору (середовище), де АС реалізує свої функції;

V – «робоча область», обсяги території, або прикладна область у межах якої АС здатен вирішувати свої задачі (реалізовувати свої функції) у середовищі E та перелік інших обмежень, в рамках яких виконуються функції F із заданою якістю ;

$L = \{\text{«t»}, \text{«o»}, \text{«s»}\}$ – рівень (управління), до якого відноситься АС.

Зазначимо, що персонал даної системи описується повністю аналогічно АС складових ОС, однак із дещо іншим трактуванням деяких складових множини:

$$P = \{I^{in}, I^{out}, F, E, V, L\}, \quad (2)$$

де $I^{in} = \{I^{in}_1, I^{in}_2, \dots, I^{in}_N\}$ – множина вхідних даних, необхідних для вирішення функціональних задач персоналом (особовим складом) відповідної організаційної складової (ПОС) збройних сил;

$I^{out} = \{I^{out}_1, I^{out}_2, \dots, I^{out}_M\}$ – множина вихідних параметрів, які продукує особовий склад (керівник організаційної складової);

$F = \{f_1, f_2, \dots, f_K\}$ – множина функцій (задач), які вирішуються особовим складом.

Кожен ОКІ має джерела інформації (даних) щодо параметрів зовнішнього середовища та власного стану і засоби впливу на зовнішнє середовище та стан ОКІ.

Джерела інформації ОКІ можуть бути описані наступною множиною параметрів:

$$D = \{I^{out}, F, E, V, L\}. \quad (3)$$

Засоби впливу на зовнішнє середовище описуються наступним чином:

$$U = \{I^{in}, F, E, V, L\}. \quad (4)$$

Переважає більшість джерел інформації відноситься до найнижчого (у даному випадку тактичного) рівня будь-якої ОС, оскільки базовими для ОС є дані про фізичні об'єкти, явища, процеси, які можуть підлягати безпосередньому спостереженню різними, у тому числі і технічними, засобами. Інші дані в системі продукуються на основі отриманих базових даних [16].

З урахуванням зазначеного, на Рис. 1 схематично показано множину АС складових збройних сил різних рівнів без урахування наявного зв'язку між ними та виходячи із запропонованого формалізованого опису АС складових ОС, персоналу організаційних структур («людського фактору»), формалізованого опису джерел інформації та засобів впливу на зовнішнє середовище.

Додатково відмітимо, що множини вхідних інформаційних даних - I^{in} кожного з елементів АС, які відносяться до автоматизованих систем управління (АСУ), - окрім інформаційних одиниць, які необхідні для забезпечення вирішення власних задач F , містять сигнали управління для активації процесу їх вирішення. Аналогічно множини I^{out} також містять сигнали управління, які виробляються відповідною складовою.

Таким чином, через можливе «зв'язування» множин Γ^{in} , Γ^{out} різних елементів за відповідністю їх складових, модель ОКІ допускає утворення як горизонтальних (мережевих) інформаційних зв'язків, так і зв'язків «знизу вгору» та «згори вниз» за ієрархією. При цьому необхідно враховувати територіальні можливості (обмеження) складових ОКІ - V (буде розглянуто окремо) та перевіряти відповідність множин E .

Перед формуванням (в процесі формування) множин Γ^{in} , Γ^{out} для кожної складової ОКІ, представленої в моделі, необхідно сформулювати їх загальний перелік для усіх складових. Такі дії необхідні для вирішення задачі уніфікації в рамках моделі представлення інформаційних одиниць для виключення можливості різного представлення одних і тих самих інформаційних складових. Також доцільно встановити деяку міру близькості різних інформаційних одиниць для аналізу (очевидно із залученням аналітика), в процесі моделювання, варіантів можливого задоволення інформаційних потреб елементів, для яких не знайдене (відсутнє) повне співпадіння необхідних інформаційних одиниць.

Кожна складова ОКІ, представлена у моделі, у загальному випадку може вирішувати задачі у декількох складових середовища E . Тоді для кожного середовища (складової E) необхідно передбачити окремі множини Γ^{in} , Γ^{out} , F , V .

Додатковими вхідними даними моделі (окрім даних для опису названих складових) є дані, що є зовнішніми відносно системи, яка моделюється, а саме:

- $FL(E,V)$ – вимоги до переліку функціональних задач, які мають вирішуватися сукупністю складових ОКІ відповідного рівня з урахуванням (прив'язкою до) вимог щодо E та V ;

- $IL(E,V)$ – перелік вхідної інформації, що надходить від інших (зовнішніх) систем та використовується (може використовуватися) складовими ОКІ відповідного рівня у якості вхідної інформації - Γ^{in} .

Можливі складові множин F також мають бути уніфікованими, аналогічно складовим векторів Γ^{in} , Γ^{out} .

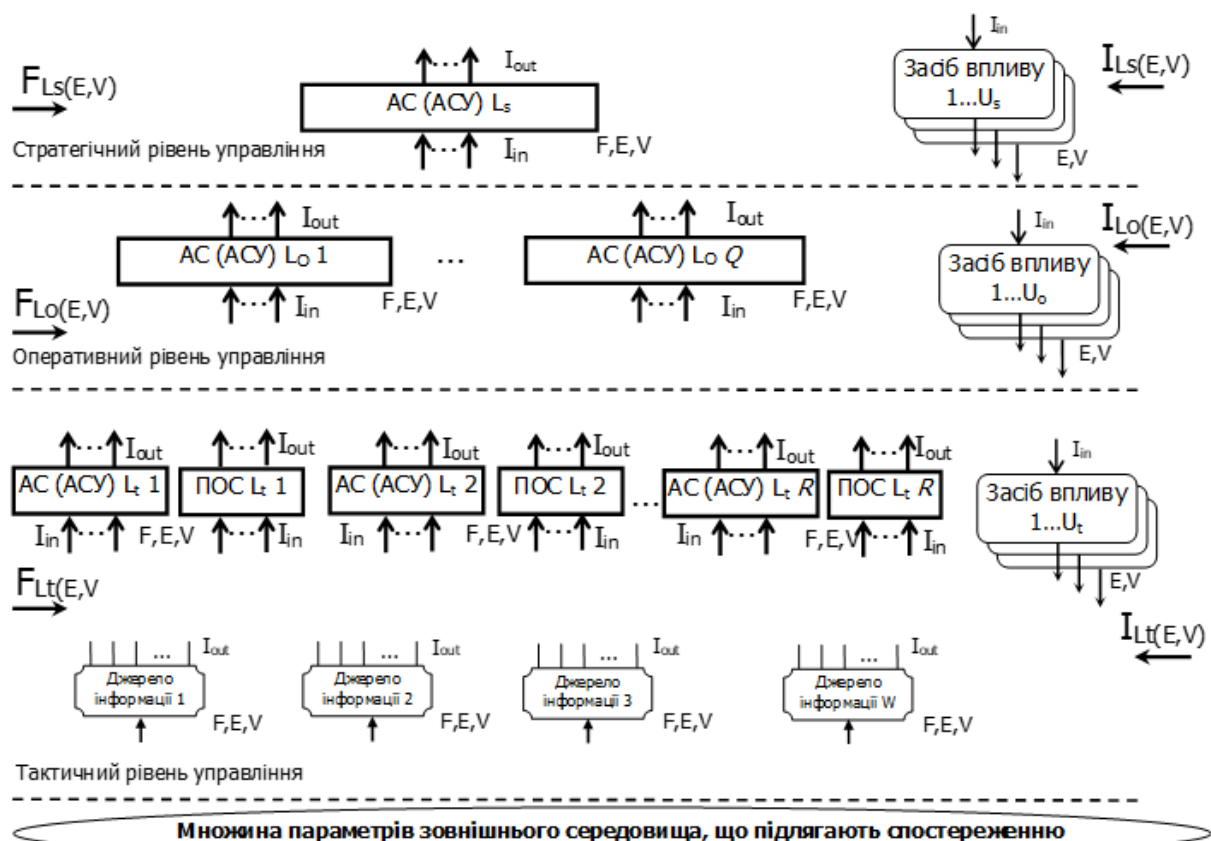


Рис. 1. Модельне представлення АС (АСУ) різних рівнів управління (складових СОУ).

Зміст процесу моделювання

Представлена модель враховує наявність у складі об'єкта моделювання елементів трьох ієрархічних рівнів – тактичного, оперативного та стратегічного. Нижче представлений один з варіантів процесу моделювання визначення інформаційної сумісності та взаємодії складових на моделі.

Задачею моделювання є автоматичний пошук варіантів інформаційного поєднання представлених в моделі складових ОКІ, на основі відповідності (співпадіння) складових множин I^{in} та I^{out} , тобто – інформаційних та керуючих потреб одних елементів та інформаційних і керуючих можливостей інших елементів. При цьому, окремо оцінюється повнота реалізації функціональних задач FL, сукупністю елементів кожного рівня ОКІ у просторах E та V. Очевидно, що у загальному випадку один інформаційний елемент деякої множини I^{out} може отримати зв'язок із декількома інформаційними елементами множин I^{out} інших складових моделі ОКІ.

Після запуску модель автоматично визначає та відображає можливі інформаційні зв'язки між виходами одних і входами інших елементів, якщо між ними існує інформаційна сумісність. Якщо можливих варіантів зв'язків між елементами є декілька - один з варіантів зв'язку вважається основним, інші альтернативними. Це необхідно для визначення мінімальної кількості обов'язкових зв'язків для забезпечення інформаційно-функціональної сумісності складових.

Спосіб відображення інформаційних зв'язків може характеризувати повну інформаційну сумісність, часткову сумісність тощо. Для цього необхідно враховувати особливості представлення (як синтаксичні, так і семантичні) кожної складової множин I^{in} та I^{out} у різних складових ОКІ, зазначені вище.

Окремо досліджуються питання часткової інформаційної сумісності складових ОКІ та ступеню сумісності (до повної несумісності). Для підтримки зв'язності загальної моделі системи необхідно передбачити можливості побудови перетворень множин $\{I^{in}\} \rightarrow \{I^{in'}\}$ та $\{I^{out}\} \rightarrow \{I^{out'}\}$, де множини $\{I^{in'}\}$ і $\{I^{out'}\}$ мають повну інформаційну сумісність. Це потребуватиме розробок додаткових програмних засобів при реалізації системи.

Можливі альтернативні зв'язки, якщо варіантів зв'язків декілька, можуть також відображатися іншим чином від основних. Оператор моделі може змінити статус альтернативних зв'язків на основні. Тоді відповідні основні зв'язки автоматично стають альтернативними. Сама наявність альтернативних зв'язків надає додаткового потенціалу системи щодо підвищення її надійності та здатності до адаптивних змін структури, як реакції, зокрема, на можливі деструктивні впливи.

Спосіб відображення елемента моделі має характеризувати повноту забезпечення його інформаційних потреб.

При встановленні інформаційних зв'язків та функціональної повноти (повноти вирішення функціональних задач за кількістю) обов'язково враховуються параметри E та V елементів.

В моделі можна додавати нові неіснуючі в системі складові (які, наприклад, пропонуються для введення у систему або розробки). Ці складові описуються аналогічно існуючим елементам та відображаються іншим чином. Після їх додавання автоматично мають розраховуватися нові можливі зв'язки між елементами для утворення модельного варіанту системи.

6. Результати дослідження

Використання результатів моделювання

Отримані результати моделювання дозволять оцінити наступні системні показники:

1. Інформаційну сумісність АС, як структурних складових ОКІ (відповідь на питання, які складові мають зайві елементи I^{out}).

2. Повноту інформаційного забезпечення вирішення функціональних задач елементів (якої інформації (зі складу наявних I^{in}) недостає і якій складовій).

3. Структуру інтегрованої АС, де автоматично визначено мінімально необхідну (з точки зору забезпечення її функціональності) кількість зв'язків та наявності альтернативних шляхів отримання інформації.

4. Повноту (за кількістю, а за умови створення класифікатора функціональних задач і за якістю) вирішення функціональних задач АС на різних її рівнях з урахуванням просторових можливостей (V) її елементів для кожного середовища (E), або інших обмежень.

5. Інформаційну та функціональну корисність кожної складової АС для системи в цілому (з системних позицій).

6. Перелік функцій системи на різних рівнях, що не вирішуються наявними складовими АС системи.

В свою чергу це дозволяє:

1. Висувати вимоги до нових елементів АС щодо їх функціонального навантаження та інформаційного входу і виходу.

2. Визначати необхідність процедур (модулів) перетворення інформації для забезпечення інформаційних потреб елементів АС (на основі аналізу «незатребуваних» елементів множини I^{out} та «незабезпечених» елементів множин I^{in} різних складових АС ОКІ).

3. Визначати необхідність кількісного нарощування існуючих складових для забезпечення повного виконання завдань АС на відповідному ієрархічному рівні ОКІ, виходячи із співвідношення (E, V) елементів та вимог $FL(E, V)$.

4. Оцінювати можливості вирішення нових задач на основі наявної в системі інформації та нових комплексних задач, враховуючи наявну функціональність складових АС.

Вимоги до середовища моделювання

Проведені дослідження також дозволили сформулювати деякі вимоги до засобів (мов) моделювання, які можуть застосовуватись для архітектурного опису і підтримки складних інтегрованих АС. В першу чергу, вони повинні мати можливість створювати адаптивні інфраструктурні моделі компонентів АС, виконувати оркестрування діяльності розподілених компонентів, враховувати дані моніторингу системи в режимі реального часу. Оскільки АС ОКІ, як правило, мають високий ступінь розподіленості, засоби моделювання повинні враховувати проблеми сумісності як частину моделювання окремих складових та їх взаємозв'язків. Необхідно мати способи визначення обґрунтованих інтерфейсів для кожної зі складових безпосередньо в моделях. Також потрібно мати засоби забезпечення спільної семантики гетерогенних складових, що мають взаємодіяти.

Оскільки складові АС ОКІ можуть бути розроблені окремо, в різний час і різними розробниками, має бути можливість працювати з розподіленими моделями таким чином, щоб кожна складова системи визначалась власною моделлю з власними інтерфейсами. Це не тільки дозволить моделювати складові незалежно, а й полегшить процес об'єднання їх у єдину систему. При цьому опис взаємозалежності між складовими може бути досягнуто шляхом визначення засобом моделювання політик очікування/гарантування безпосередньо в моделі.

Важливою вимогою до засобів моделювання є наявність інструментів для моделювання автономної поведінки інтегрованої системи. Ці інструменти повинні дозволяти описувати дії користувачів щодо системи, механізми поведінки та прийняття рішень системою на зовнішні впливи та дані моніторингу внутрішнього стану. Також необхідно мати засоби опису динамічних інфраструктур, що дозволяє складовим системи ініціювати та розривати взаємозв'язки згідно встановлених правил, а також моделювати переривання обміну даними, втрачені повідомлення, обробку помилок.

7. Перспективи подальшого розвитку досліджень

У якості розвитку функціональних можливостей запропонованої моделі ОКІ доцільно передбачити моделювання автоматизованого (автоматичного) перетворення (агрегування) інформації - для отримання на основі різної вхідної/вихідної інформації одних складових АС можливих варіантів вихідної/вхідної інформації для інших існуючих чи перспективних складових.

Ще одним напрямком розвитку даного дослідження може бути розширення можливостей еволюційного розвитку моделі в процесі виконання. Наприклад, деякі інформаційні одиниці, що розглядаються, можуть бути випадковими величинами або функціями, статистичні характеристики яких визначаються на основі минулого досвіду функціонування об'єкта досліджень, а це вимагає при формуванні моделі зберігати, аналізувати і використовувати історичні дані. Також існує невизначеність, пов'язана з впливом прийнятих рішень на проблемні ситуації, де доцільно було б використовувати інструменти прогнозування.

Загалом запропоноване модельне представлення складових інтегрованої АС на прикладі збройних сил держави та функціональності відповідної моделі може бути поширене на будь-яку велику складну організаційну систему, або ж масштабоване на представлення не усієї АС ОКІ, а якоїсь функціональної чи організаційної складової, що має (зберігає) усі риси великої складної системи. Останнє твердження є важливим з точки зору складності одночасного охоплення у моделі усіх особливостей та умов функціонування складових ОКІ в цілому [17,20,21].

8. Висновки

Викладено методологічний підхід до вирішення задачі інформаційної та функціональної інтеграції наявних та перспективних автоматизованих систем до єдиної автоматизованої системи на основі запропонованого модельного представлення великих складних організаційних систем та їх складових. Запропонована модель дозволяє автоматично визначати необхідні зв'язки між складовими організаційної системи та їх деталізований зміст, виявляти проблеми із інформаційним забезпеченням вирішення задач на різних ієрархічних рівнях та дублюванням або наявністю зайвої функціональності автоматизованих систем. До недоліків запропонованого модельного представлення можна віднести складність підготовки моделі для проведення моделювання. Разом із тим, запропонована формалізація складових організаційної системи дозволить отримати повне та цілісне уявлення про об'єкт дослідження та стан його автоматизації, що саме по собі є корисним результатом.

Список літератури:

- 1) Nielsen C.B., Larsen P.G., Fitzgerald J., Woodcock J., Peleska J. Systems of Systems Engineering: Basic Concepts, Model-based Techniques, and Research Directions. ACM Computing Surveys (CSUR) 2015, V. 48 (2), Article No.: 18, P. 1–41, DOI: <https://doi.org/10.1145/2794381>
- 2) Dr. Judith S. Dahmann and George Rebovich Jr. Systems Engineering for Capabilities. The Journal of Defense Software Engineering 2008/ <https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/ADA489896.pdf>
- 3) Judith Dahmann, Jo Ann Lane, George Rebovich Jr., Kristen J. Baldwin. A Model of Systems Engineering in a System of Systems Context // 2008. URL: https://www.researchgate.net/publication/228576609_A_model_of_systems_engineering_in_a_system_of_systems_context
- 4) Banks, J., Carson, J. S., Nelson, B. L., & Nicol, D. M. (2010). *Discrete-event system simulation* (5th ed.). Prentice Hall.
- 5) Bari, A., Jaekel, A., & Bakhshi, R. (2019). *Cyber resilience in critical infrastructures: A systems approach*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-20722-5>

- 6) Barykin, S., Sergeev, S., Yadykin, V., & Erypalov, S. (2021). Integrated digital platforms for industry and logistics: Architecture and practical applications. *Procedia Computer Science*, 190, 302–307. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.06.043>
 - 7) Bondarenko, O., Djakov, V., & Nizhelska, O. (2020). Integrated management of complex organizational systems in a digital environment. *Cybernetics and Systems Analysis*, 56(3), 355–361. <https://doi.org/10.1007/s10559-020-00214-0>
 - 8) Choi, D., & Lambert, J. H. (2017). Modeling interdependent risks for critical infrastructure systems. *Risk Analysis*, 37(6), 1146–1163. <https://doi.org/10.1111/risa.12693>
 - 9) Dodonov, A. G., & Putiatin, V. G. (2016). Simulation process management for solving functional tasks on a computer modeling workstation of the ISOU AC. In *Proceedings of the 5th International Scientific Conference “Modeling–2016”* (pp. 225–228). IPME NAS of Ukraine.
 - 10) Fishman, G. S. (1996). *Monte Carlo: Concepts, algorithms, and applications*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-2553-7>
 - 11) Horbulin, V. P., & Dodonov, O. G. (2023). Modeling complex for creating an automated control system integrating strategic, operational, and tactical command levels. *Armament and Military Equipment*, 2(38), 57–64.
 - 12) Hossain, E., & Niyato, D. (2020). *Smart grid communications and networking*. Cambridge University Press.
 - 13) Huang, X., Sun, H., Zhang, M., & Song, J. (2022). A comprehensive review of cyber–physical systems: Security issues and challenges. *Future Generation Computer Systems*, 130, 141–157. <https://doi.org/10.1016/j.future.2022.01.002>
 - 14) Pang, Z., Guo, J., Dey, N., & Liu, Y. (2023). An integrated digital twin framework for cyber-physical systems. *Journal of Industrial Information Integration*, 32, 100403. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2023.100403>
 - 15) Yahya, B., Ahmad, S. A., & Omar, M. (2021). A systematic literature review of integration frameworks in complex information systems. *Journal of Systems and Software*, 172, 110883. <https://doi.org/10.1016/j.jss.2020.110883>
 - 16) Yuzefovych, V., Tsybulska, Y., & Andriichuk, O. (2021). One approach to formation of common information space information resource in organizational management systems. In *ITS 2021 – Information Technologies and Security* (pp. 215–224). <https://eur-ws.org/Vol-3241/paper20.pdf>
 - 17) Kologryvov, Y. (2023). Comprehensive vs. Patchwork Automation. *Medium*. <https://medium.com/@yaroslavkologryvov/comprehensive-vs-patchwork-automation-150e4864613f>
 - 18) Sahin F., Jamshidi M., Sridar P. A Discrete Event XML based Simulation Framework for System of Systems Architectures. In *IEEE Intl. Conf. on System of Systems Engineering 2007, SoSE '07*
 - 19) Berenji H., Jamshidi M. Fuzzy Reinforcement Learning for System of Systems (SoS). In *Fuzzy Systems (FUZZ)*, 2011 IEEE International Conference on. 1689 –1694.
 - 20) Vynnychuk, O. Y. (2011). System approach in enterprise management automation. *Naukovi visnyk Chernivets'kogo universytetu*, 557–558, 168–173.
 - 21) Liashenko, M. O., Paramonov, O. H., Popov, O. Y., & Petrenko, O. V. (n.d.). Integration of heterogeneous information systems for creation of electronic paperless production. *Avtomatyzatsiya ta prohramne zabezpechennia*. <http://a-ps.com.ua/statti/integraciya-raznorodnyx-informacionnyx-sistem-dlya-sozdaniya-elektronnogo-bezbumazhnogo-proizvodstva/>
-

Methodological approach to the information-functional integration of automated systems within components of critical infrastructure facilities

Volodymyr Yuzefovych

Institute of Information Registration Problems of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Kyiv, Ukraine

ORCID: 0000-0002-6336-9548

Ievgenii Dodonov

Institute of Information Registration Problems of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Kyiv, Ukraine

ORCID: 0009-0008-3400-6570

Yevheniia Tsybulska

Institute of Information Registration Problems of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Kyiv, Ukraine

ORCID 0000-0003-3342-4507

Abstract: This article presents a methodological approach to addressing the problem of information and functional integration of existing and prospective automated systems into a unified automated system, based on a model-driven representation of large-scale complex organizational systems, including critical infrastructure facilities (CIFs) and their components. The proposed model enables the analysis of information compatibility among existing automated systems and the functional completeness of tasks performed by the organizational system, as well as the identification of optimal interconnections among the systems' components. Given the increasing complexity of technological processes and the rise of cyber-physical threats, there is a growing need for the development of a robust methodology for information-functional integration across automated systems of varying purposes and hierarchical levels into the unified automated system. The proposed approach is founded on the principles of modularity, functional decomposition, and adaptive interaction between components. This ensures holistic control of complex objects via a unified information environment and synchronized functional processes. The authors outline key methodological principles of integration, including the classification of typical information exchanges, the establishment of structural-functional dependencies between subsystems, and the determination of their compatibility and coherence. Special attention is paid to the development of a generalized architecture for the integration environment, which supports scalability, increases the reliability and security of information interaction due to the possibility of using unified system-wide solutions. A conceptual model is proposed to coordinate the functions of automated systems under dynamic environmental conditions—an aspect particularly relevant for CIFs that play a strategic role in national security and the uninterrupted functioning of governmental and societal systems. The practical implementation of the described approach significantly enhances management efficiency, reduces the risk of functional disruptions, and ensures the resilience of systems to destructive influences.

Keywords: organizational system, critical infrastructure facility, automated system, model, modeling.
