УДК 683.03

М.В.Коробчинський

ПОБУДОВА ДИНАМІЧНИХ СТРУКТУРНИХ МОДЕЛЕЙ РОЗПОДІЛЕНОЇ УПРАВЛЯЮЧОЇ СИСТЕМИ

Аннотация

Исследуются методы построения динамической структурной модели, которая описывает организацию распределённой управляющей информационной системы. В качестве формальных средств описания структурных моделей используется теория графов. Рассматриваются функциональные расширения структурных моделей и их интерпретация в предметной области решаемых задач.

Ключевые слова: модель, теория графов, управляющая система, интерпретация, динамическая модель.

Структурні моделі дозволяють описувати структури об’єктів довільного типу. Виходячи з уявлень про структуру об’єктів, остання представляє собою приблизний опис об’єкту, для якого вибирається один або декілька параметрів, які представляють собою наступне:

- інтегральну характеристику, що в найбільшій мірі об’єднує весь об’єкт в єдине ціле,
- параметр, що описує просторове, або часове представлення об’єкту,
- представляє процес функціонування об’єкту в узагальненому вигляді.

В залежності від особливостей об’єкту, опис структури об’єкту може бути представлено в різних формах. Організація інформаційної системи, в якій однією з компонент є рухомий об’єкт (RO), володіє особливостями, що представляють собою наступне:

- просторову розподіленість її компонент,
- рухомість окремих елементів системи в просторі, в процесі її функціонування,
- існування критичних параметрів, що володіють власною специфічною інтерпретацією, безпосередньо зв’язаною з процесом функціонування всієї системи.

Просторова розподіленість визначається необхідністю формування структури об’єкта, яка зв’язувала би просторово рзподілені компоненти в єдину систему. Ця особливість проявляється у фізичних об’єктах, що володіють складною конструкцією. В цьому випадку, використовується графічне відображення відповідної структури у вигляді класичних графів. При цьому, мінімальне інформаційне навантаження такої інтерпретаційної структури вміщає вершини графів $e_i \in E$, які ідентифікують елементи, що об'єднуються, і зв'язки між вершинами $v_{ij} \in V$, які ідентифікують факт існування деякого зв'язку між окремими елементами e_i і e_j. Максимальне інформаційне навантаження такої інтерпретації структури полягає у тому, що до мінімального навантаження додається орієнтація зв'язків у вигляді стрілок між вершинами, що формально описується у вигляді $e_i \rightarrow e_j$, та введенням поняття ваги зв'язку, яка тим, чи іншим чином визначає значимість того або іншого зв'язку, що записується у вигляді $v_{ij}(u_i)$, де u_i вага зв'язку v_{ij} між вершинами e_i і e_j [1, 2]. Такі засоби використовуються переважно для статистичних структур, при цьому, структура вважається статистичною з точки зору жорсткості фізичних взаємозв'язків між окремими елементами. Це означає, що дуги, які зв'язують окремі компоненти об'єкта, характеризуються вагами, значення котрих визначається на обмежених інтервалах і фізика функціонування відповідної системи визначає можливості змін відповідних інтервалів. На приклад, якщо існує ряд енергетичних об'єктів, які територіально розподілені і є не рухомими в рамках простору такого розподілу, то зв'язки між ними, наприклад, у вигляді електроліній, описуються графічними елементами структури, якими є ребра графа v_{ij}, а в якості ваги ребра використовують довжину відповідної лінії. В цьому випадку, довжина лінії u_i визначається в рамках замкнутого інтервалу, в якому нижня границя відповідає мінімальній віддалі, а верхня границя відповідає максимальній віддалі між станціями.

Функціональне розширення структурних моделей, яке полягає у розширенні функціональної інтерпретації вершин, але при цьому залишається на рівні загальності структурної моделі, представляє собою мережа Петрі [3]. В мережі Петрі функціональне розширення забезпечує аналіз взаємодії окремих інформаційних потоків, котрі у своїй інтерпретації зводяться до їх позначення у вигляді сигналів. Така взаємодія полягає в наступному:

- в синхронізації сигналів попадаючих у вершину з різних ребер v_{ik} іv_{jk}, що входять у вершину e_kі можуть виходити з вершини e_k через ребра v_{kg},

- в затримці сигналу в вершині e_i на деякий час τ_i, пеш ніж такий сигнал може вийти з вершини e_i по ребру v_{ij},

- у виконанні логічних операцій у вершині e_i, які полягають у реалізації кон'юнкції & або диз'юнкції V двох або більшої кількості сигналів, що входять у вершину e_i, при цьому, логічна інтерпретація сигналів може визначатися їх відсутністю чи присутністю у відповідних вершинах графа Петрі.

Розширення можливостей графових засобів шляхом їх ускладнення представляється не коректним, оскільки в цьому випадку відповідні засоби перестають відповідати суті структурних засобів, яка, в першу чергу, передбачає простоту та відображення об'єкта у вигляді єдиного комплекта різних компонент.

У випадку розподіленої динамічної системи, якою є інформаційна система управління RO, яку будемо позначати (IUS), для представлення загального структурного опису, необхідно використовувати, як мінімум, параметри, що відображають просторові і часові взаємозалежності між ключовими компонентами або параметрами, що їх ідентифікують на необхідному рівні загальності.

Оскільки, в динамічній системі мова йде про часові взаємозалежності, то в якості інтегрального параметра можна прийняти параметр часу, кожне значення якого ідентифікує певний стан окремих компонент, які, в загальному випадку знаходяться в системі і її характеризують. Прикладом таких параметрів можуть служити параметри описуючі зміни, що відбуваються в системі. Крім того, оскільки динамічна характеристика системи зв'язана із змінами, що в ній відбуваються, то такими інтегральними параметрами, крім часу можуть бути довільні інші параметри, що ідентифікують відповідні зміни в системі. Прикладом таких параметрів можуть служити параметри описуючі зміни просторових координат, котрі визначають місце знаходження окремих компонент об'єкта та інші параметри, що мають відношення до об'єкту.

Класичний метод опису часових залежностей або динамічних залежностей полягає у використанні графів у вигляді деякої мережі. Для опису у вигляді деякої структури динамічної системи, необхідно розв'язати задачу синтезу графової структури і структури мережі.

Класичний орієнтований, навантажений граф формально описується співвідношенням:

$$G = F[f(V,E),U], \tag{3.1}$$

де $f(V,E)$ описує орієнтацію ребер, котра задається послідовністю двох вершин, що приписуються одному ребру і описується співвідношенням:

$$f(v_i) = (e_{ij}, e_{km}).$$

Найчастіше функція $f(V,E)$ представляєтся в явному вигляді, як опис деякої множини пар вершин:

$$f(V,E) = \{v_1(e_{1,1}, e_{12}), \dots, v_n(e_{n,1}, e_{n2})\}.$$

Ця функція може представлятися у вигляді однієї або деякої множини ланцюхів визначених на структурі графа G, в яких відсутні спільні ребра, що можна записати у вигляді співвідношення:

$$f(V,E) = \{\omega_1[v_{11}(e_{1,1}, e_{12}), \dots, v_{1n}(e_{n,1}, e_{n2})], \dots,$$
$$\omega_n[v_{n1}(e_{1,1}, e_{12}), \dots, v_{nn}(e_{n,1}, e_{n2})]\}, \tag{3.2}$$

де $\omega_i[v_{i1}(e_{i,1}, e_{i2}), \dots, v_{i+j}(e_{(i+j),1}, e_{(i+j),2})]$ окремий ланцюх, що знаходиться в структурі графа G. Якщо виконати умови відсутності спільних ребер в ланцюгах, то формулу (3.2) можна записати у вигляді настурного співвідношення:

$$f(V,E) = \forall\omega_i \forall v_{ij} \neg\exists v_{ij} \{\omega_1[v_{11}(e_{1,1}, e_{12}), \dots, v_{1n}(e_{n,1}, e_{n2})], \dots,$$
$$\omega_n[v_{n1}(e_{1,1}, e_{12}), \dots, v_{nn}(e_{n,1}, e_{n2})]\}.$$

Для опису часових залежностей, в деякій системі, у вигляді графових структур, як уже зазначалось, використовуються мережі [4]. Особливістю таких графів є їх впорядкованість в часі. Формально, графи, що відображають мережі, описуються у вигляді наступних співвідношень і називаються мережними графами:

$$D = \Phi(G, T), \tag{3.3}$$

де G - граф із співвідношення (3.1), а T параметр, по якому реалізується спосіб упорядковування, що задається множиною $f(V, E)$. Таке упорядковування задається на рівні ребер, що формально записується у вигляді наступного співвідношення:

$$D = \Phi\{F[f(V, E), U(T)]\}, \tag{3.4}$$

де $U(T)$– функція, яка визначає упорядковування на графі G. Якщо впорядковуваність розглядати, як синхронізацію подій, які складають процес функціонування об'єкту, то структурна модель (3.4) вироджується в граф Петрі. В рамках IUS, що розглядається, впорядкованість розуміється в більш широкому сенсі цього терміну. Для прикладу, приймемо, що в якості параметру T вибирається час, значення якого вимірюється у відповідності з деякою функцією $y = \varphi(t)$, котра для спрощення моделі може бути прийнята лінійною, або $y = at + b$. Прикладом ситуації, коли в якості параметра T використовується функціональній параметр, що визначає факт виникнення однієї визначеної або ряду визначених подій, є синхронізація процесу функціонування. В цьому випадку, впорядкування в динамічній структурі об'єкта визначається ідентифікацією виникнення подій та логічним аналізом, що визначає умови переходу системи в наступний стан. В цьому випадку, процес функціонування в рамках структурної моделі описується у вигляді функції часу з початковим моментом t_0, що відповідає початку процесу функціонування і кінцевим моментом t_n, що відповідає завершенню процеса функціонування або відповідає моменту завершення виділеного циклу процесу функціонування.

В неявному вигляді динамічна структурна модель описується співвідношенням (3.4). Для того, щоб можна було цю модель представити у явному вигляді або в тому, чи іншому конструктивному вигляді, розглянемо ряд особливостей системи IUS. Оскільки структурна модель є найбільш загальною у порівнянні з моделями окремих компонент, то вона повинна відображати всі ті вимоги, які до системи IUS предявляються в цілому. Слід відмітити, що відображення і забезпечення динаміки функціонування зводити до процесів синхронізації не достатньо через наступні причини:

- процес синхронізації забезпечує можливість продовження функціонування тільки в тому випадку, якщо до заданого моменту в системі відбулися всі необхідні події,
- ключовим параметром процесу синхронізації є параметр часу, який представляє момент, в якому здійснюється перевірка текучого стану об'єкту, якщо мова йде про процес функціонування в режимі

реального часу,

- переважно задання текучого значення часу у вигляді лінійної функції відповідає найбільш загальній інтерпретації цього параметру, котра не залежить від особливостей об'єкта управління.

У випадку системи управління RO типу БПЛА, функціонування IUS повинно продовжуватися не залежно від того, чи виконуються всі визначені події в системі, чи ні. Це означає, що процес функціонування IUS БПЛА повинен бути розгалуженим і продовжуватися тим або іншим способом в залежності від текучого стану. Для того, щоб забезпечити таку можливість, повинна бути передбачена можливість зміни ключового текучого параметра управління динамікою на інший параметр. Наприклад, параметр часу заміняється на параметр живучості, або інший параметр, котрий визначається на основі аналізу текучого стану IUS. При неможливості вибору динамічного параметру в процесі функціонування, для заміни текучого параметру, відбувається модифікація цілі задачі, яка розв'язується таким чином, щоб новий динамічний параметр можна було визначити. В рамках такого підходу необхідно розв'язувати задачу синтезу статичної компоненти структурної моделі G з динамічною компонентою структурної моделі, що дозволить отримати синтезовану динамічну структурну модель D. Як уже відмічалось, статична структурна модель описується орієнтованим поміченим графом:

$$G = F[f(V,E),U],$$

де U – множина розмітки графа, яка може полягати в розмітці вершин або розмітці ребер. Процес функціонування можна представляти наступними способами.

Можна будувати максимальний граф, який описує всі можливі ситуації, що можуть виникнути в процесі управління системою, наприклад, БПЛА. В цьому випадку, такий граф описується співвідношенням в наступному вигляді:

$$G^{max} = G_1 \cup G_2 \cup \ldots \cup G_n,$$

де G_i є окремим розширенням. В рамках структурної моделі можна розв'язувати наступні задачі, котрі мають інтерпретацію в ISU:

- задачу досягаємості вибраних вершин,
- задачу виділення ядра структурної моделі,
- задачу побудови ізоморфної структури в рамках структурної моделі та ряд інших задач.

Під статистичною структурою в структурній моделі (MS) розуміється множина всіх подій, які породжуються в IUS , при розв'язку задач управління, які об'єднуються між собою ребрами, що визначають їх взаємозв'язок і орієнтацію в MS. Якщо розв'язок одного класу задач реалізується декількома варіантами реалізації їх розв'язку, тоді такий граф розростається з ланцюха ω_i в деяку структуру. Тому, статистична структурна модель (SMS) представляє собою опис всіх можливих процесів і їх фрагментів. Динамічна структурна модель охоплює лише компоненти, що приймають участь в текучому процесі.

Другий спосіб структурного представлення MS для IUS БПЛА полягає у тому, що реалізується графова структура, котра відображає базовий граф системи. Розширення такої структури здійснюється в процесі реалізації різних типів функціонування IUS, котрі визначаються ціллю розв'язуваної задачі, а також умовами, котрі повинні виконуватися, при її розв'язку. Оскільки, процеси функціонування розглядаються на структурному рівні, в рамках моделі MS, то механізми розширення ядра MS можуть грунтуватися не тільки на графових методах розширення, але і на методах логічних засобів перетворень.

В цілому, MS ділиться на активну і пасивну складові. Міра пасивності визначаєтся кількістю ініціацій фрагментів структур $ms_i \in MS$, котрі визначаються для заданого періоду функціонування IUS, який визначається у вигляді: $\Delta t_i = t_{ij} - t_{i(j-1)}$. При цьому, величина Δt_i формується в кожному окремому випадку і залежить від вимог, які доповнюють опис цілі розвя'зуваної задачі.

Приймемо, що структура $G(V,E,U)$ представляє собою статичну підструктуру або статичнй фрагмент MS. Динамічне розширення MS або структура $G(V,E,U)$ представляє собою деяку систему правил, яка забезпечує побудову нових ланцюхів в структурі $G(V,E,U)$. Розглянемо визначення текучого розширення MS динамічною складовою.

Визначення 3.1. Динамічним розширенням структури $G(V,E) \subset MS$ є множина ланцюхів W_i, що породжуються системою:

$$\mathcal{L}(L_1, \dots, L_m) \& L_i(y_{i1}, \dots, y_{in}) \& [y(y_1, \dots, y_k) \Rightarrow [E \subset G(V,E,U)],$$
$$\forall (y_{ij} \in y)\{P[y_i(u_i) \Rightarrow D]\},$$
$$\forall y_{ij}[y_{ij}(u_i) \longrightarrow [e_i^*(u_i^*) \cup G(V,E,U)],$$

де y_{ij} – логічні змінні, які мають інтерпретацію на двійковій множині d, $\Rightarrow$ - символ, який в даному випадку, використовується для опису того, що ліва частина допускає інтерпретацію в компонентах правої частини, $y_{ij}(u_i) \longrightarrow e_i^*$ - означає вивід із змінних y_{ij} нової вершини в графі $G(V,E,U)$, котра має суміжне ребро з вершиною, вага якої, або індекс якої представляє собою величину u_i.

Визначення 3.2. Динамічним елементом моделі MS називається фрагмент g_i, який породжується системою правил виводу $\mathcal{L}(L_1, \dots, L_m)$ і представляє собою окремий ланцюх $\omega_i \in W_i$, який має суміжні вершини e_i^* в G, а також може мати спільні вершини $e_i^*(e_j)$з G_i або $e_i^* \equiv e_j$.

Динамічне розширення $D_i(\omega_{i1}, \dots, \omega_{i2})$ в кінцевому вигляді представляє собою деякі фрагменти графічної структури $G(V,E,U)$. У зв'язку з цим, такі розширення не повинні приводити до виникнення аномалій в рамках повної структури моделі, наприклад, до виникнення тупикових вершин, до зациклювання процесу, який ініціюється в $G = D(V,E,U,L)$ та ряду інших аномалій, які характерні для графових структур і, відповідно, структурних моделей. У зв'язку з цим, розглянемо можливість виникнення наступних аномалій в $G = D(V, E, U, L)$ в рамках ініціалізації та реалізації процесів функціонування окремих задач:

- виникнення тупикових вершин,
- зациклювання поцесу, який реалізує задачу в рамках всієї системи ISU,
- попадання процесу в ядро графу.

Динамічні розширення структурної моделі MS системи ISU можуть реалізуватися наступними способами:

- в процесі настройки ISU розв'язування деякої задачі,
- в процесі реалізації розв'язку задачі, що передбачає забезпечення процесу реального часу,
- при виникненні в середовищі IUS, в процесі розв'язку окремої задачі аномалії, яка інтерпретується як деяка невизначеність.

Динамічне розширення MS, при настройці ISU на розв'язування вибраної задачі, характерно, наприклад, для засобів управління системами БПЛА, для яких характерною є необхідність вимог по забезпеченню заданих значень параметрів характеризуючих IUS в цілому, до яких відносяться:

- вимога до розв'язку задач управління системою БПЛА в режимі реального часу,
- вимога по забезпеченню відмовостійкості процесу розв'язку задачі по відношенню до зовнішніх факторів, які можуть бути не передбачуваними на етапі налагодження IUS на конкретну задачу,
- вимоги по забезпеченню надійності процесу функціонування системи, при розв'язуванні задачі,
- вимоги по забезпеченню адаптації процесу розв'язку задачі по відношенню до цілі її розв'язку та до можливих змін цілі,
- вимоги по забезпеченню самоорганізації процесу розв'язку задачі при змінах в умовах її розв'язування, які сформовані на етапі підготовки IUS до розв'язування задач.

Приведені вимоги мають своє відображення на всіх рівнях деталізації опису процесу розв'язку задач управління, наприклад, системою БПЛА в рамках IUS. В даному випадку, розглянемо проекцію таких вимог на рівень структурної моделі системи IUS.

Перша вимога полягає в забезпеченні процесів управління в режимі реального часу. Ця вимога може бути виконана за рахунок мінімізації тривалості процесу, який реалізує розв'язок задач. На структурному рівні цю вимогу можна відобразити у вигляді задачі пошуку найкоротшого шляху на графі. Ця задача, в загальному випадку, розв'язується відомими алгоритмами в рамках різних інтерпретацій [5]. В даному випадку, використовувати один із методів мінімізації шляху на структурній графовій моделі безпосередньо для задачі досягнення цілі її розв'язку не має відповідної алгоритмічної можливості. Це обумовлюється тим, що відповідні алгоритми пошуку оптимального шляху використовують індексацію вершин або ребер, яка є статичною в процесі розв'язку цієї задачі. Це означає, що введена розмітка перед розв'язком задачі на весь процес розв'язку задачі залишається не змінною. У випадку засобів управління системою, наприклад, на основі БПЛА існує можливість виникнення випадкових подій, які можут привести до змін у фрагментах структури і, відповідно, структурної моделі. У зв'язку з цим, розглянемо наступний опис такої структури. В якості базового елементу такого опису приймається граф $G(V, E, U)$. Розмітка U в нашому випадку є функцією деякого параметра t або $u = f(t)$, де t не обов'язково відповідає інтерпретації змінної, яка визначає час. Тоді, можна записати:

$$G = F[V, E, \Psi, f(t)],$$

де Ψ – функція орієнтації ребер в графі G. Розглянемо наступну інтерпретацію особливостей G.

Визначення 3.2. Граф $G = F[V, E, \Psi, f(t)]$ є приведеним до графу $G^* = F(G_1, \dots, G_n)$, в якому $G_i \subseteq G^*$ і розмітка $f(t)$ в його границях є сталою, тоді MS може представляти собою граф $G^* = \bigcup_{i=1}^{n} g_i$.

Для більш детального аналізу, введемо визначення.

Визначення 3.3. Функція $f(t)$ є дискретизованою по параметру t, якщо на заданому інтервалі її визначення $f(a)$ і $f(b)$ існують інтервали $\Delta t_i = t_{i+1} - t_i$, на яких не змінюються параметрі її реалізації, або в більш широкому контексті, способи її функціонування.

Умова 3.1. Функція розмітки $f(t)$, що використовується в MS володіє лінійними дискретними параметрами, що формально записується наступним чином: $[f(t, \alpha) \& (\alpha = q\tau + h)]$.

В умові (3.1) можна прийняти, що τ нормується параметром t. Це означає, що τ змінюється на деяку задану дискретну величину, якщо t переходить з одного діапазону значень Δt_i на інтервалі [a,b] у другий діапазон значень Δt_j, або $\tau_j = \tau_j + \Delta\tau$, якщо $\Delta t_i \rightarrow \Delta t_j$. Це обмеження дозволяє ввести впорядкованість в процес розмітки фрагмента G_i, з точки зору його інтерпретації в предметній області IUS.

1. *Харари Ф.* Теория графов. М.: Мир. -1973.
2. *Басакер Р.Дж., Саати Г.Д.* Конечные графы и сети. М.: Мир , 1974.
3. *Замбицкий Д.К., Лозовану Д.Д.* Алгоритмы и решения оптимизационных задач на сетях. Кишинёв: Штиица, 1983.
4. Лекции по теории графов/ *В.А.Емеличев О.И., Мельников В.И., Сарванов, Р.И. Тышкевич.* М.: Наука, 1990.
5. *Евстигнеев В.А.* Применение теории графов в программировании. М.: Наука, 1985.

Поступила 21.02.2013р.