

Коротков С.С.

Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ

АРХІТЕКТУРНО-МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМ МЕРЕЖНОЇ СТРУКТУРИ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕОРІЇ S-ГІПЕРМЕРЕЖ

Анотація: Розглядаються основні поняття теорії S-гіпермереж. Показано, що мовою цієї теорії можна описати багато систем мережевої структури з точністю достатньою для вирішення поставленого завдання. Фактично аналітична постановка завдань аналізу та синтезу структур зазначених систем є майже імітаційною моделлю, яка може використовуватися для вирішення поставлених завдань.

Відповідно S-гіпермережі можна називати згідно з відображенням елементів. Очевидно, що в одній і тій же S-гіпермережі різні елементи можуть відображатися одночасно різними способами. Таким чином, словник теорії гіпермереж можна збільшити за рахунок особливості відображення елементів гіпермережі на поверхні та різних взаємозв'язків інцидентним гілкам ребер вторинних мереж.

Запропонована класифікація відображень дозволить ставити всілякі завдання, пов'язані з описом, аналізом та синтезом мереж різного призначення. Взагалі кажучи, як це здається з першого погляду, найбільше додатків теорії гіпермереж та S-гіпермереж ймовірно падає на електрозв'язок та транспорт. Проте вже зараз видно, що теорія S-гіпермереж застосовна для аналізу та синтезу багатьох інших систем мережевої структури. Особливий інтерес викликають завдання аналізу міжмережесих структурних взаємодій складних систем різної природи.

Для екто-гіпермереж практичне значення має дослідження топологічних властивостей, зокрема їх плоска реалізація. Завдання, які виникають, тісно перетинаються із завданнями укладання графів на орієнтовані поверхні. Однак специфіка гіпермереж і, зокрема, S - гіпермереж тягне за собою нові топологічні завдання в теорії S – гіпермереж.

Для розуміння топологічних завдань необхідно розглянути різні типи вкладень вторинних мереж у первинні. Наведено приклади відображень графів вторинних мереж у первинну мережу маючи на увазі практичне використання теорії при описі та аналізі реальних систем мережевої структури. Також для практичних цілей було розглянуто енто-гіпермережу замість екто-гіпермережи.

Ключові слова: *граф, гіпермережа, S-гіпермережа, структурний аналіз, синтез, математичне та імітаційне моделювання.*

Korotkov S.S.

State University of Information and Communication Technologies, Kyiv

ARCHITECTURAL AND MATHEMATICAL MODELING OF NETWORK STRUCTURE SYSTEMS USING S-HYPERNETWORK THEORY

The main concepts of the theory of S-hypernetworks are considered. It is shown that the language of this theory can be used to describe many systems of the network structure with sufficient accuracy to solve the given task. In fact, the analytical formulation of the tasks of analysis and synthesis of the structures of the specified systems is almost a simulation model that can be used to solve the tasks.

Accordingly, S-hypernetworks can be named according to the mapping of elements. Obviously, in the same S-hypernetwork, different elements can be displayed simultaneously in different ways. Thus, the dictionary of the theory of hypernetworks can be increased due to the features of the display of hypernetwork elements on the surface and various relationships of the incident branches of the edges of secondary networks.

The proposed classification of images will allow to set all kinds of tasks related to the description, analysis and synthesis of networks of various purposes. Generally speaking, as it seems at first glance, the most applications of the theory of hypernetworks and S-hypernetworks probably fall on telecommunications and transport. However, it is already clear that the theory of S-hypernetworks is applicable to the analysis and

synthesis of many other network structure systems. Of particular interest are the tasks of analyzing inter-network structural interactions of complex systems of various nature.

For ecto-hypernetworks, the study of topological properties, in particular, their flat implementation, is of practical importance. The tasks that arise closely overlap with the tasks of stacking graphs on oriented surfaces. However, the specificity of hypernetworks and, in particular, S - hypernetworks entails new topological tasks in the theory of S - hypernetworks.

To understand topological tasks, it is necessary to consider different types of embeddings of secondary networks into primary ones. Examples of mapping graphs of secondary networks into the primary network are given, bearing in mind the practical use of the theory in the description and analysis of real systems of the network structure. Also, for practical purposes, an endo-hypernetwork was considered instead of an ecto-hypernetwork.

Keywords: graph, hypernetwork, S-hypernetwork, structural analysis, synthesis, mathematical and simulation modeling.

1. Вступ

Для вирішення завдання аналізу міжмережових структурних взаємодій складних систем різної природи розглядаються основні поняття теорії S-гіпермереж. Показано, що мовою цієї теорії можна описати багато систем мережевої структури з точністю достатньою для вирішення поставленого завдання. Фактично аналітична постановка завдань аналізу та синтезу структур зазначених систем є майже імітаційною моделлю, яка може використовуватися для вирішення поставлених завдань.

2. Основні результати

Для дослідження реальних проблем аналізу та синтезу мережної структури наведемо визначення простої гіпермережі, у якій елементи як вузла, однотипні. А лінійні елементи (гілки, ребра) мають різну природу.

Шістька складається з трьох множин і трьох відображень $S = (X, V, R; P, F, W)$ називається гіпермережею, якщо

$$\forall v \in V \mid P(v) \mid = 2,$$

$$\forall r \in R \mid W(r) \mid = 2,$$

$$\forall r \in R \text{ множина } F(r) \subseteq V \text{ складає маршрут у графі } PS=(X,V).$$

Таким чином, первинна PS та вторинна мережі WS гіпермережі S є графами, а F відображає ребра WS=(X,R) маршрутів графа PS=(X,V).

Так як множина [5] $F(r)$ є маршрутом, то відображення F єдиним чином визначає відображення W. Справді, кінцеві вершини маршруту $F(r)$ є одночасно кінцями ребра r, тобто гіпермережу S можна задати п'ятіркою $(X, V, R; P, F)$.

У гіпермережі виду $S=(Y, V, R)$ вузол $u \in Y$ замінюється на граф виду $u = \{x_j^i E_j\}$ - граф вузла у структурованій гіпермережі, де x_j^i - j-я вершина вторинної мережі WS_i , відображена у вузол структурованої гіпермережі $SA=(Y, V, G(X_i, R_i))$. Отже, на відміну від гіпермереж, вершини вторинних мереж поміщаються у вузли первинної мережі незалежно друг від друга, без обмеження на характер відображення, тобто, можливі варіанти відображення кількох вершин однієї вторинної мережі на один вузол первинної мережі.

Дамо формальне визначення S – гіпермережі. Нехай задано множина графів (гіперграфів) $G_0=(X^0, V)$, $G_1=(X^1, U^1), \dots, G_L=(X^L, U^L)$ та кореневе дерево $T_0=(Z, R)$, де $Z=z_0, z_1, \dots, z_k$, $R=r_1, \dots, r_k$ визначальне вкладення графів G_j в G_i ($i < j$) аналогічно до вкладень, що визначаються в гіпермережах за тим лише винятком, що вершини x_k^i x_k^j графів G_i і G_j не тотожні, а інцидентні. Очевидно, що в одній і тій же вершині x_k^i можуть бути інцидентними кілька вершин $X_k^j = \{x_{k1}^{j1}, x_{k1}^{j1}, \dots, x_{ki}^{ji}\}$ з $L \{G_{j_s}\}, s=1, \dots, L$. На множині вершин X_k^j визначається $L^j=(X_k^j, E)$. Вершини x_k^j і x_{ks}^{js} суміжні в L^j , якщо відповідні графи G_{j_i} та G_{j_i} в вершині x_k^i мають деяку системоутворюючий зв'язок $L(x^{j^i}, x^{j^s})$. В інакшому випадку ці вершини не пов'язані. Також як у гіпермережах ребру $u_i^j \in G_j$ у графі G_i зіставляється ланцюг або деяка зв'язкова частина

між відповідними вершинами G_i . На рис. 1 наведено приклад такої гіпермережі. Тут слід зазначити, що системоутворюючі зв'язки типу $\{1(x,y)\}$, взагалі кажучи, можуть мати різну природу і, як правило, суттєво залежать від часу. У деяких випадках, наприклад, у системі транспортних мереж різного типу (метро, автобус, трамвай) такими зв'язками в транспортних мультивузлах будуть тротуарні лінії (піші переходи). У цьому випадку має сенс розглядати об'єднання всіх вторинних мереж. Проте задля деяких завдань має сенс розглядати суму всіх графів гіпермережі M , включаючи і первинну мережу PS , тобто, $\underline{G} = G_0 + G_1 + \dots + G_n + \{L^j\}$.

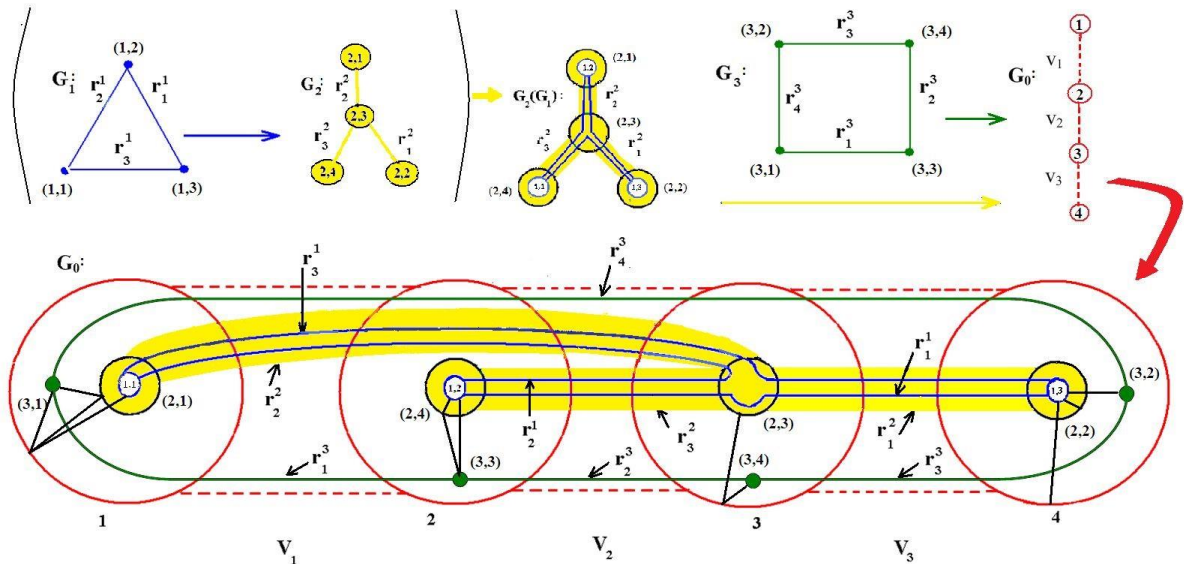


Рис. 1. Приклад гіпермережі

Визначену таким чином S - гіпермережу за допомогою наведених нижче матриць можна задати з точністю до ізоморфізму і навіть з точністю до нумерації вершин і ребер.

Графи [6] $G_i, i=1, \dots, k$ задаються своїми матрицями інцидентності $\{M^i = (c_n^k)\}$. Вкладення графів визначаються системою матриць інцидентів $\{M_i^j(a_t^l), N_j^i(b_p^d)\}$, де в матриці $M_i^j, a_t^l=1$, якщо вершина $x_l \in G^i$ інцидентна вершині $x_l \in G^j (i < j)$ і $a_t^l = 0$, в іншому випадку [1].

Для $N_j^i(b_p^d)$ - матриця інцидентів ребра [7], маємо $b_p^d=1$, якщо ребро $u_p \in G^j$ - вторинної мережі інцидентно гілці $u_p \in G^i$ - первинної мережі та $b_p^d=0$ в іншому випадку. Представлення S - гіпермережі закінчується системою матриць суміжності $\tilde{M}_z^i = (s_f^r)$

Нехай вершині $x_z^i \in G^i$ і інцидентні вершини $\{X_l^{jp} \in G^{jp}\}$, тоді матриці суміжності $\tilde{M}_z^i(s_f^r)$ визначають суміжність цих вершин у x_z^i .

Звідси випливає, що S - гіпермережа $SHN = (G_0, G_1, \dots, G_k)$ однозначно задається наступною системою матриць:

1. $M^i(c_{p_i}^{l_i})$ - матриця інцидентів графів $G^i, i=0, \dots, k; l_i=1, \dots, n^i; p_i=1, \dots, m^i$, де $k+1$ число графів у SHN, n^i - число вершин у графі G^i, m^i - число ребер у графі G^i .

2. $\{M_i^j(a_t^l), N_j^i(b_{p_i}^{d_i})\}$,

де $i, j=0, \dots, k; (i < j); l_i=1, \dots, n_i; t_j=1, \dots, n_j; d_i=1, \dots, m_i; p_j=1, \dots, m_j$.

Матриці інцидентів визначають вкладення графів G_j у граф G_i .

3. $\tilde{M}_{z_i}^i(s_{f_d}^{r_i})$ - матриці суміжностей вершин графів вторинних мереж у первинній мережі.

Матриці суміжностей вершин графів вторинних мереж у первинній мережі.

$i=0, \dots, k$; $z_i=1, \dots, n_i$; $f, d=1, \dots, n$; тобто $s_{fd}^{r_i}$, якщо вершини f і d з графів $\{G_j\}$ інцидентні вершині z_i , і вони суміжні в цій вершині, інакше $s_{fd}^{r_i} = 0$.

Сума графів всіх мереж S-гіперсеті HS показано рис 2.

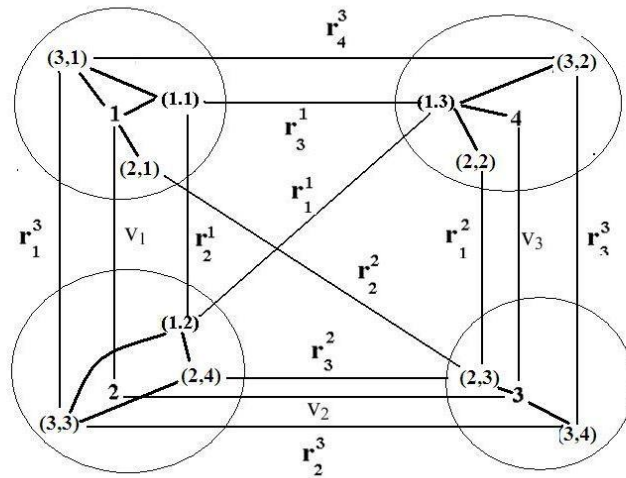


Рис. 2. Сума графів усіх мереж S-гіпермережі HS

Дамо визначення деяким локальним характеристикам S-гіпермереж.

Взагалі кажучи, як це здається з першого погляду, найбільше додатків теорії гіпермереж та S-гіпермереж ймовірно підпадає на електрозв'язок та транспорт. Тому, більшість завдань аналізована у цій статті присвячена саме цим напрямом. Проте вже зараз видно, що теорія S-гіпермереж застосовна для аналізу та синтезу багатьох інших систем мережевої структури. Особливий інтерес викликають завдання аналізу міжмережових структурних взаємодій складних систем різної природи.

Плоскі S-гіпермережі. Для екто-гіпермереж практичне значення має дослідження топологічних властивостей, зокрема їх плоска реалізація. Завдання, які виникають, тісно перетинаються із завданнями укладання графів на орієнтовані поверхні. Однак специфіка гіпермереж і, зокрема, S-гіпермереж тягне за собою нові топологічні завдання в теорії S-гіпермереж.

Нехай задана гіпермережа $H=(PS, WS)$.

Тоді говоритимемо, що гіпермережа H PS -планарна, якщо граф PS первинної мережі планарний [10], і гіпермережа H WS -планарна, якщо граф WS -планарний.

Дані характеристики цікаві, але досить вивчені в теорії графів. Набагато цікавішою є така характеристика.

Гіпермережа H -планарна, якщо граф WS може бути реалізований у PS без перетину ребер.

Якщо така реалізація має місце, то гіпермережа H плоска.

Теорема 1. Якщо WS -планарна, то гіпермережа $H = (PS, WS)$ планарна.

Доказ. (Якщо граф PS первинної мережі не планарний, його можна зробити планарним шляхом видалення деяких гілок. У частині PS можна зробити плоску реалізацію WS .) Для доказу досить показати, що первинна плоска мережа PS гомеоморфна деякому плоскому колу з отворами.

Дійсно зменшуючи фізичний розмір граней плоскої первинної мережі до точки (дірки), тоді очевидно, що WS реалізуємо на поверхні, оскільки WS -планарний.

Зворотне твердження неправильне, оскільки PS гомеоморфний.

Поверхня роду 1 допускає плоску реалізацію, як мінімум, повного 5-ти вершинного графа WS , який, як відомо, не планарний, рис. 3.

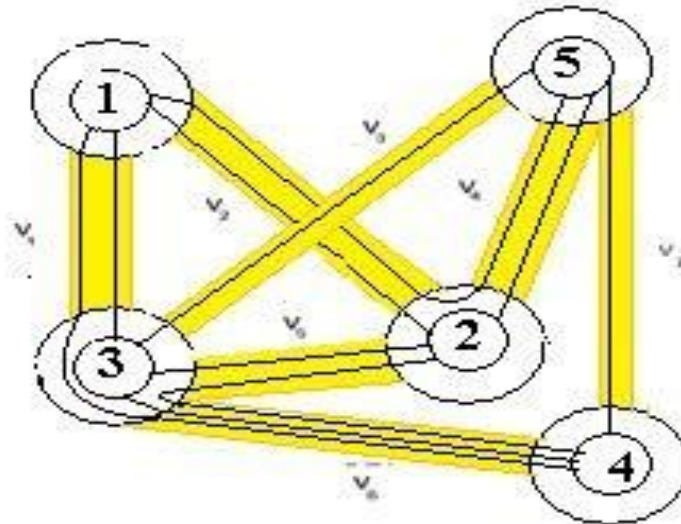


Рис. 3. Планарна гіпермережа

З рисунка видно, що PS не плоский (але планарний), а WS плоский в PS , тобто. усередині (на поверхні) ребра не перетинаються. Отже, з планарності гіпермережі не впливає планарність WS . Гіпермережа $H=(PS,WS)$ назвемо абсолютно плоскою, якщо WS та PS плоскі графи [2].

Строго кажучи, для гіпермереж поняття «планарний» не завжди коректне. Справді, якщо PS допускається зміна геометрії малюнка, тобто, з плоского зробити плоский граф PS при цьому H та H' залишаються ізоморфними.

До речі змінюючи конфігурацію PS з метою зробити її плоскою, змінюється просторова конфігурація WS , тобто, граф вторинної мережі стає плоским. Це легко видно з рис. 3, гілка V_3 переносимо за 4 вершину, де граф PS стає плоским, зате граф WS стає не плоским. Жодне перетрасування ребер не зробить його плоским, тому що на площині роду 0 граф WS не плоский.

Змінюючи трасування ребер WS в PS , ми взагалі кажучи, отримуємо іншу гіпермережу H' еквівалентну H . _ Таким чином змінюючи трасування ребер WS на гілках PS ми отримуємо не ізоморфне перетворення.

Для практичних цілей корисно розглянути замість екто-гіперсети ендо-гіперсеть. У цьому випадку нас не цікавить перетин ребер усередині гілок, а лише на вузлах первинної мережі.

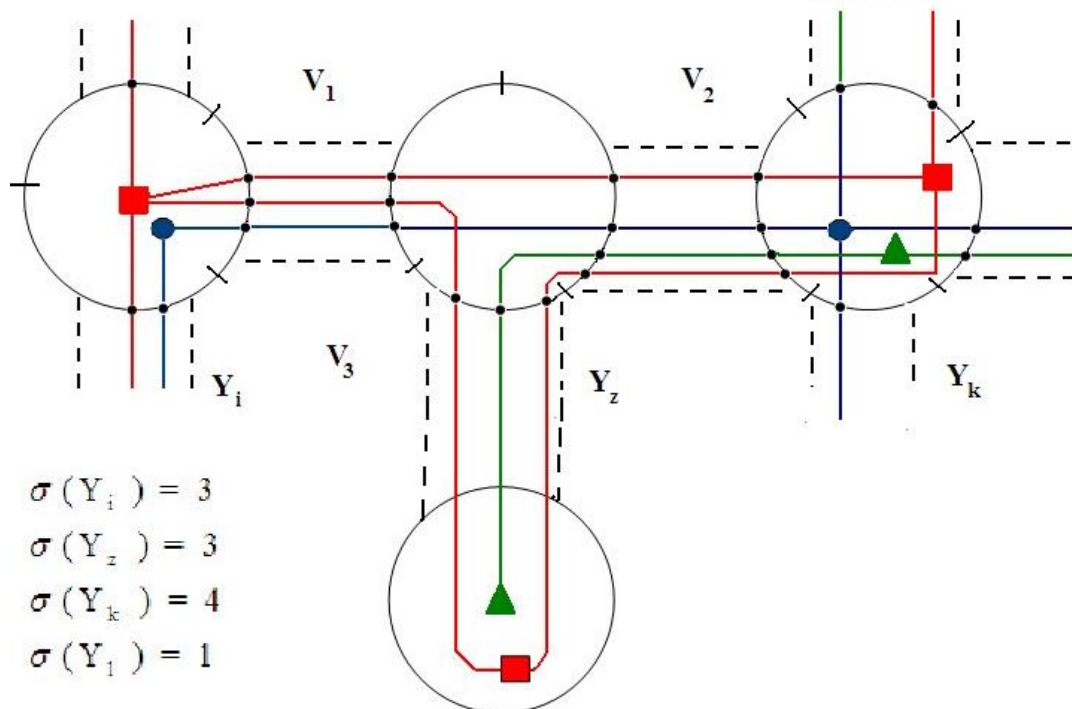
Ендо-гіпермережа $SH=(PS,WS)$ назвемо WS - квазіплоскою, якщо в кожному вузлі $PS=(X,V)$ маємо плоску реалізацію фрагментів вторинних гіпермереж $\{WS^i\}$ S - гіпермережі, $SH=(PS,WS_1,\dots,WS_k)$.

Гіпермережа SH називається квазіплоскою, якщо в плоскій мережі PS WS є квазіплоскою.

В ендо-гіпермережі модель вузла Y первинної мережі являє собою коло $O(Y)$, поділену на $S(Y)$ дуг, де $S(Y)$ - ступінь вузла Y . На кожній дузі виділяються вершини-полюси, що є закінченнями ребер, що входять в цей вузол. Усередині вузла-диска розташовуються вершини вторинних мереж, пов'язані з відповідними полюсами внутрішньо-вузловими ребрами. Деякі полюси зв'язуються між собою безпосередньо, оскільки вони належать транзитним ребрам мереж WS^i .

Через один (пару) полюс можуть проходити кілька ребер вторинних мереж.

Фрагмент S - гіпермережі для транспортних моделей показано рис. 4.

Рис. 4. Фрагмент S – гіпермережі для транспортних моделей

Вузли Y_i та Y_k відповідають транзитно-кінцевим вузлам, а Y_z повністю транзитний вузол, а вузол Y_l – кінцевий $\sigma(Y)$ - ступінь вершини Y у графі PS .

Нестаціонарна S – гіпермережа називається квазіпланарною, якщо у будь-який стаціонарний проміжок часу вона є квазіпланарною.

У зв'язку з вище сказаним та дослідженням реальних проблем аналізу та синтезу мережної структури виникають постановки вирішення наступних завдань[8]:

1. Нехай заданий граф первинної мережі PS і сімейство графів вторинних мереж $\{WS_i\}$ і відображення $X^i \rightarrow X^0$ треба так провести трасування ребер у графі PS , щоб S – гіпермережа була квазіплоскою.

2. Знайти критерій квазіплоскості S - гіпермережі $H = (PS, WS_1, \dots, WS_k)$.

3. Нехай задана S - гіпермережа H , потрібно так скласти розклад роботи внутрішньозонових ребер, щоб нестаціонарна S - гіпермережа була квазіпланарною.

4. Вирішується попередня задача, але середня кількість циклів H була б мінімально можлива.

5. Додати до H мінімальну кількість гілок так, щоб S - гіпермережа стала квазіпланарною з урахуванням перетрасування ребер вторинних мереж WS_i .

Вочевидь, що поняття планарності в S - гіпермережах породжує багато комбінаторних завдань.

Наприклад, розглянемо наступну операцію над орієнтованою гіпермережею $\vec{H} = (PS, WS_1, WS_2)$, в якій граф PS пов'язаний, оргграфом WS_1 має для кожної гілки з PS має по два протилежно спрямованих ребра, як на, рис. 5 та рис. 6.

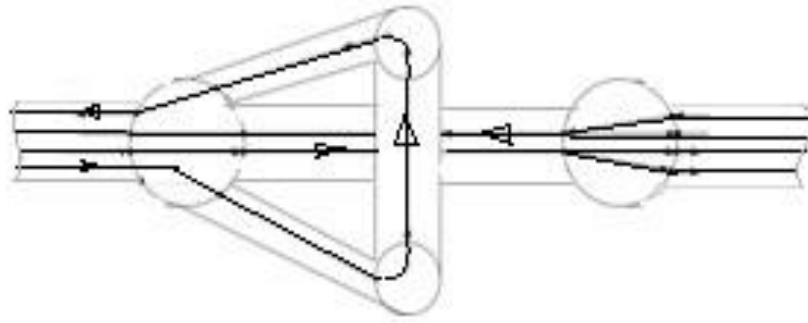


Рис. 5 Перетворення гілок без розширення проїжджої частини та пішохідним переходом на розв'язці типу підкова

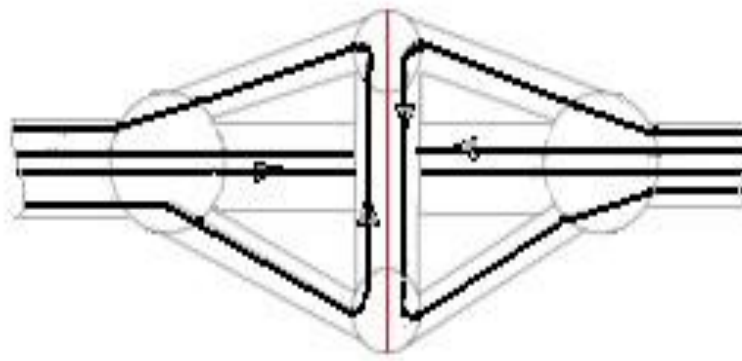


Рис. 6 Перетворення гілок без розширення проїжджої частини та пішохідним переходом розв'язці типу подвійна підкова

Розглянемо наступну операцію над гілками гіпермережі H . Для гілки V_i застосуємо операцію $\Pi_L(V_i)$, якщо ця гілка розрізається і в розріз вставляється конфігурація типу Π_L . На рис. 5, наведено приклад такого перетворення, яке вставляє в розріз наступний фрагмент (поворот ліворуч) в одному з двох варіантів (прямий і дзеркальний). Граф WS_2 є повним на деякій підмножині вершин X'' з X' графа WS_1 .

Завдання: На графі PS застосувати мінімальну кількість перетворень типу $\Pi_L(V_i)$, так, щоб при відповідній реалізації гіпермережа $\vec{H}=(PS, WS_1, WS_2)$ була квазіпланарною.

Легко показати, що є кілька таких перетворень, щоб перетворити вихідну гіпермережу на квазіплоску. Можливо застосувати перетворення типу $\Pi^2(V_i)$, рис.6.

На наступному рис. 7, наведено фрагмент дороги, що відповідає перетворенням.

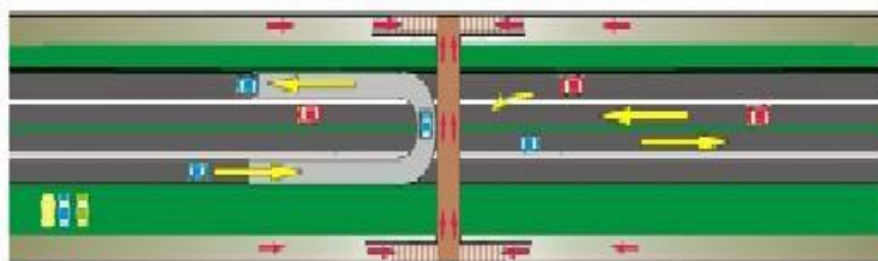


Рис. 7. Приклад лінійної розв'язки в обмежених умовах

Відображення, відносини, метрика, стійкість. Для розуміння топологічних завдань необхідно розглянути різні типи вкладень вторинних мереж у первинні[9].

Наведемо приклади відображень графів вторинних мереж у первинну мережу маючи на увазі практичне використання теорії при описі та аналізі реальних систем мережевої структури рис. 8.

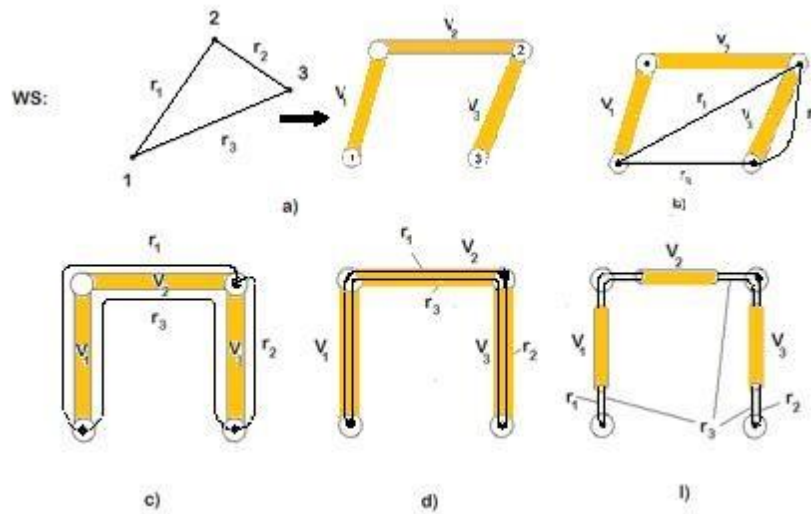


Рис. 8. Приклади топологічних взаємозв'язків ребер та вершин різних мереж S-гіпермережі $H = (WS, PS)$

При відображенні графа вторинної мережі WS первинну мережу PS виникають чотири класи вкладень ребер WS у гілки PS .

Для гіпермережі $H = (PS, WS)$ [2]:

1. Ребра вторинної мережі WS не відображаються у ребра первинної, тобто, відображаються лише вершини WS у вершини PS . Таким чином матриці $N_j^i(b_p^d)$ у представлені гіпермережі відсутні, рис.8.в. Тут має місце екс-відображення $WS \xrightarrow{екс} PS$ і відповідно екс-гіпермережа.

2. Якщо ребра вторинної мережі $WS=(X^1, R)$ йдуть поруч (паралельно) з гілками первинної мережі $PS=(X^0, V)$, то має місце пара-відображення $WS \xrightarrow{пара} PS$, рис.8.с, яке породжує пара-гіпермережа $H = (WS, PS)$.

3. У тому випадку, коли ребра вторинної мережі WS розташовуються на «плоских» гілках первинної мережі PS , то має місце екто-відображення $WS \xrightarrow{ект} PS$, рис.8.д, і відповідно екто-гіпермережі.

4. В останньому випадку ребра вторинних мереж розташовуються всередині гілок первинної мережі.

На рис.8.е, наведено приклад ендо-відображення $WS \xrightarrow{енд} PS$, яке породжує ендо-гіперсеть.

Вершини також можуть по-різному відображатись один в одного. Тут також, як з ребрами маємо ті ж чотири способи відображення [3]:

1. Вершина вторинної мережі x абстрактно відображається у вершину у первинної мережі, якщо їхнє взаємне розташування байдуже, тобто, має місце *екс-відображення*.

2. Якщо ця вершина x відображається поряд з вузлом y , має місце *пара-відображення*.

3. При *екто-відображенні* вершин, одна вершина розташовується на іншій.

4. І нарешті, при відображенні однієї вершини усередину іншої, має місце *ендо-відображення* вершин.

Відповідно S-гіпермережі можна називати згідно з відображенням елементів. Очевидно, що в одній і тій же S-гіпермережі різні елементи можуть відображатися іншими одночасно різними способами [4].

3. Висновки

Таким чином, для дослідження реальних проблем аналізу та синтезу мережної структури було збільшено словник теорії гіпермереж за рахунок особливості відображення елементів гіпермережі на поверхні та з різних взаємозв'язків інцидентним гілкам ребер вторинних мереж. Запропонована класифікація відображень дозволить ставити всілякі завдання, пов'язані з описом, аналізом та синтезом мереж різного призначення.

Список літератури

1. Elsken T., Metzen J.H., Hutter F. Multi-objective Architecture Search for CNNs. 2018.
2. Domhan T., Springenberg J.T., Hutter F. Speeding up automatic hyperparameter optimization of deep neural networks by extrapolation of learning curves. International Joint Conferences on Artificial Intelligence. 2015.
3. Snoek J., Adams R. Practical bayesian optimization of machine learning algorithms. Advances in Neural Information Processing Systems. 2012.
4. Bergstra J., Bengio Y. Random search for hyper-parameter optimization. Journal of Machine Learning Research. 2012. No.13. P. 281–305. 5. <https://dist.ed.vn.ua/courses/learn/397>
6. Bergstra J. Algorithms for hyper-parameter optimization. Advances in Neural Information Processing Systems. 2011.
7. Ляцинський П. Б., Ляцинський П.Б. Автоматизований синтез структур згорткових нейронних мереж. Problèmes et perspectives d'introduction de la recherche scientifique innovante. 2019. Вип. 2. С. 104–105.
8. Кривець Т.О., Прудкой Ю.І., Городенська В.Я. Математична модель постійних інформаційно-обчислювальних мереж: Наукові праці УДУХТ, Київ, 2001.
9. Кривець Т.А., DYNAMICAL SYSTEM MODELLING AND STABILITY INVESTIGATION, Kyiv, 2003.
10. Li L., Talwalkar A. Random Search and Reproducibility for Neural Architecture Search. 2019.

References

1. Elsken T., Metzen J.H., Hutter F. Multi-objective Architecture Search for CNNs. 2018.
2. Domhan T., Springenberg J.T., Hutter F. Speeding up automatic hyperparameter optimization of deep neural networks by extrapolation of learning curves. International Joint Conferences on Artificial Intelligence. 2015.
3. Snoek J., Adams R. Practical bayesian optimization of machine learning algorithms. Advances in Neural Information Processing Systems. 2012.
4. Bergstra J., Bengio Y. Random search for hyper-parameter optimization. Journal of Machine Learning Research. 2012. No. 13. P. 281–305. 5. <https://dist.ed.vn.ua/courses/learn/397>
6. Bergstra J. Algorithms for hyper-parameter optimization. Advances in Neural Information Processing Systems. 2011.
7. Lyashchynskyi P.B., Lyashchynskyi P.B. Automated synthesis of structures of convolutional neural networks. Problèmes et perspectives d'introduction de la recherche scientifique innovante. 2019. Issue 2. P. 104–105.
8. Kryvets T.O., Prudkoy Y.I., Horodenska V.Ya. Mathematical model of permanent information and computing networks: Scientific works of UDUHT, Kyiv, 2001.
9. T.A. Kryvets, DYNAMICAL SYSTEM MODELING AND STABILITY INVESTIGATION, Kyiv, 2003.
10. Li L., Talwalkar A. Random Search and Reproducibility for Neural Architecture Search. 2019.