

Г. В. Кирик, д.т.н., доцент, президент, Лауреат Державної премії (Концерн «NICMAS», м. Суми, Україна), Є. В. Коноплянченко, к.т.н., доцент, В. М. Колодненко, П. М. Бало (Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна)

## Генерація раціональної послідовності оццадного розбирання на етапі ремонту та модернізації енергетичного обладнання

*В статье рассмотрены вопросы сбережения ресурса ответственных изделий энергетического машиностроения на этапе их ремонта и модернизации. Предложена концепция сохранной разборки элементной базы оборудования, которая учитывает условия его эксплуатации и остаточное влияние на окружающую среду.*

**Ключевые слова:** ремонт, модернизация, генерация последовательности разборки, направленный выбор, оптимизация.

*У статті розглянуті питання збереження ресурсу відповідальних виробів енергетичного машинобудування на етапі їх ремонту та модернізації. Запропонована концепція оццадного розбирання елементної бази обладнання, що враховує умови його експлуатації та залишковий вплив на навколишнє середовище.*

**Ключові слова:** ремонт, модернізація, генерація послідовності розбирання, спрямований вибір, оптимізація.

*The article discusses the issues of the power engineering critical products resource saving at the stage of their repair and modernization. Proposed the equipment component base safe disassembly concept, which takes into account the conditions of its operation and the residual influence on the environment.*

**Keywords:** repair, modernization, sequence generation, directional selection, optimization.

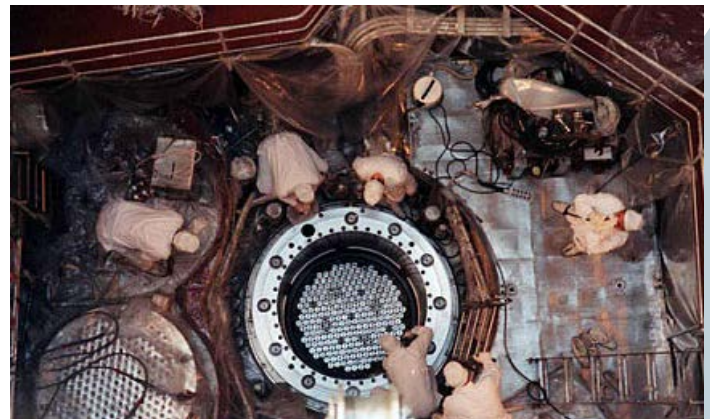
### Постановка проблеми

Енергетика є однією з провідних і найбільш високоорганізованих галузей промисловості. У процесі розвитку енергетики безперервно підвищується економічність енергетичних підприємств, що виражається в зниженні витрат на виробництво і передавання теплової та електричної енергії. Виробництво і доставка споживачам електричної енергії характеризуються деякими особливостями, що відрізняють цей технологічний процес від виробництва та розподілу інших видів продукції. По-перше, це безперервність і висока швидкість виробництва й транспортування енергії і, по-друге, неможливість її зберігання. У цих умовах пильну увагу приділяють питанням забезпечення надійності експлуатації енергетичного обладнання та його ресурсозбереження.

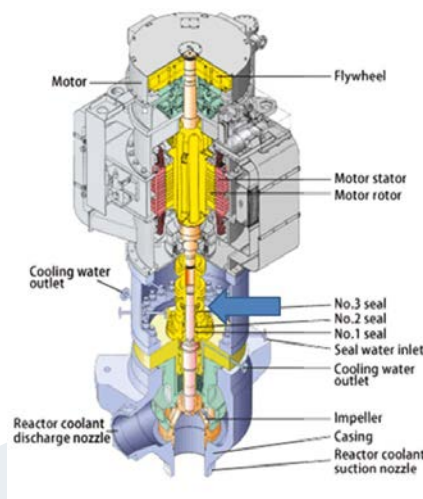
Серед усієї різноманітності видів теплоенергетичного обладнання як окрему групу можна виділити такі елементи енергетичних систем, до яких ставляться підвищені вимоги з безпеки експлуатації, технічного обслуговування і ремонту внаслідок специфічних особливостей їх конструкції та функціонального призначення. Представником таких елементів енергосистем є атомні силові установки, зокрема транспортних засобів спеціального призначення (рис.1,а), насоси атомних електростанцій (рис. 1,б), газотурбінні установки великої потужності (рис. 1, в) і т. п.

На етапі реінжинірингу таких виробів, тобто відновлення їх працездатності, ремонту і модернізації, виникає необхідність розбирання деталі, що вийшла з ладу [1,2]. Відомо, що повне розбирання обладнання під час ремонту або модернізації – одна з небажаних операцій, оскільки на-

віть при найкваліфікованішому оццадному розбиранні порушуються з'єднання припрацьованих деталей і нормальний натяг у пазах із нерухомими посадками [3]. Ча-



а



б



в

**Рис. 1. Елементи енергетичних систем із підвищеними вимогами щодо безпеки експлуатації, технічного обслуговування та ремонту**

стина деталей під час розбирання пошкоджується (ламаються приливи, лапки, фланці, збиваються грані болтів, гайок, руйнуються шпінти, заклепки і т. п.). Агрегати і деталі, що не потребують ремонту, взагалі не рекомендується знімати з обладнання через можливе зниження працездатності машин у цілому. Тому актуальним є питання оптимізації шляху доступу до вузла, що вийшов із ладу, або зношеної деталі, а також обґрунтування об'єктивної потреби у виконанні робіт із відновлення їх працездатності [2].

### Аналіз основних досягнень та публікацій

При формалізації вирішення завдання визначення послідовності розбирання виробу необхідно розробити його математичну модель, вибрати критерій оптимізації, розробити систему показників, що обмежують перебирання безлічі варіантів, розробити метод розв'язання задачі, подати його математично, алгоритмічно і програмно.

Іноді в практиці виробництва при визначенні послідовності розбирання використовують технологічну схему складання виробу. Здебільшого роботу виконують на основі досвіду та інтуїції технолога.

Технологічна схема складання виробу багатоваріантна, залежить від ряду факторів і використовуваних критеріїв оптимізації [4]. Тоді й процес розбирання буде спрямований тим самим шляхом. Однак умови розбирання, а потім і складання на ремонтному підприємстві та підприємстві-виготовлювачі виробу можуть значно відрізнятись. Проблема не лише в наявності необхідних засобів технологічного оснащення, а й у вартості окремих деталей і складальних одиниць, ймовірності бездефектного розбирання складальних з'єднань, кваліфікації ремонтного персоналу, вартості складальних операцій із забезпечення заданої точності, герметичності

і т. п. Тому правильний вибір підходу до складального елемента або деталі, що вийшла з ладу, значно впливатиме на працездатність відремонтованого обладнання і відповідно – на вартість технологічного процесу ремонту.

У зарубіжній літературі при формалізації процесу часткового розбирання виробів використовують метод півсфер Гауса [5]. Сфера Гауса відображає допустимі напрями векторів переміщення деталі виробу у вільному просторі. Оскільки в складальних одиницях поверхні деталей спряжені, то в дійсності застосовують не сферу а півсферу Гауса (рис. 2,а), що відображає можливі напрями переміщення деталі при розбиранні вздовж спряжуваної поверхні. Застосовуючи прийоми булевої алгебри та математичної логіки, за допомогою півсфер Гауса формалізують задачу знаходження напрямків векторів розбирання виробу (рис. 2,б).

На рисунку 2,в наведена процедура перевірки на розділення стійки переднього підшипника компресора, де  $p_1$ – $p_9$  – нормальні вектори з'єднаних поверхонь для передньої опори підшипника, а точки В, Е, F, С, D, G та А – точки перетину між цими нормальними векторами і сферою з одиничним радіусом. Так як немає півсфери, яка може вмщувати всі точки, то опорний підшипник передньої стійки не можна розібрати в такому стані.

На сьогодні відомий ряд моделей та алгоритмів, використовуваних для генерації послідовностей складання та розбирання виробу [6]. Широке використання для формалізації генерації послідовностей розбирання та складання привело до їх подання у вигляді І-АБО-графів, графів зв'язків і мереж Петрі (NP) [7]. На рис. 3 зображено моделювання послідовності розбирання парової турбіни в системі обслуговування з елементами віртуальної реальності [8].

Аналіз цих праць засвідчив, що задача належить до

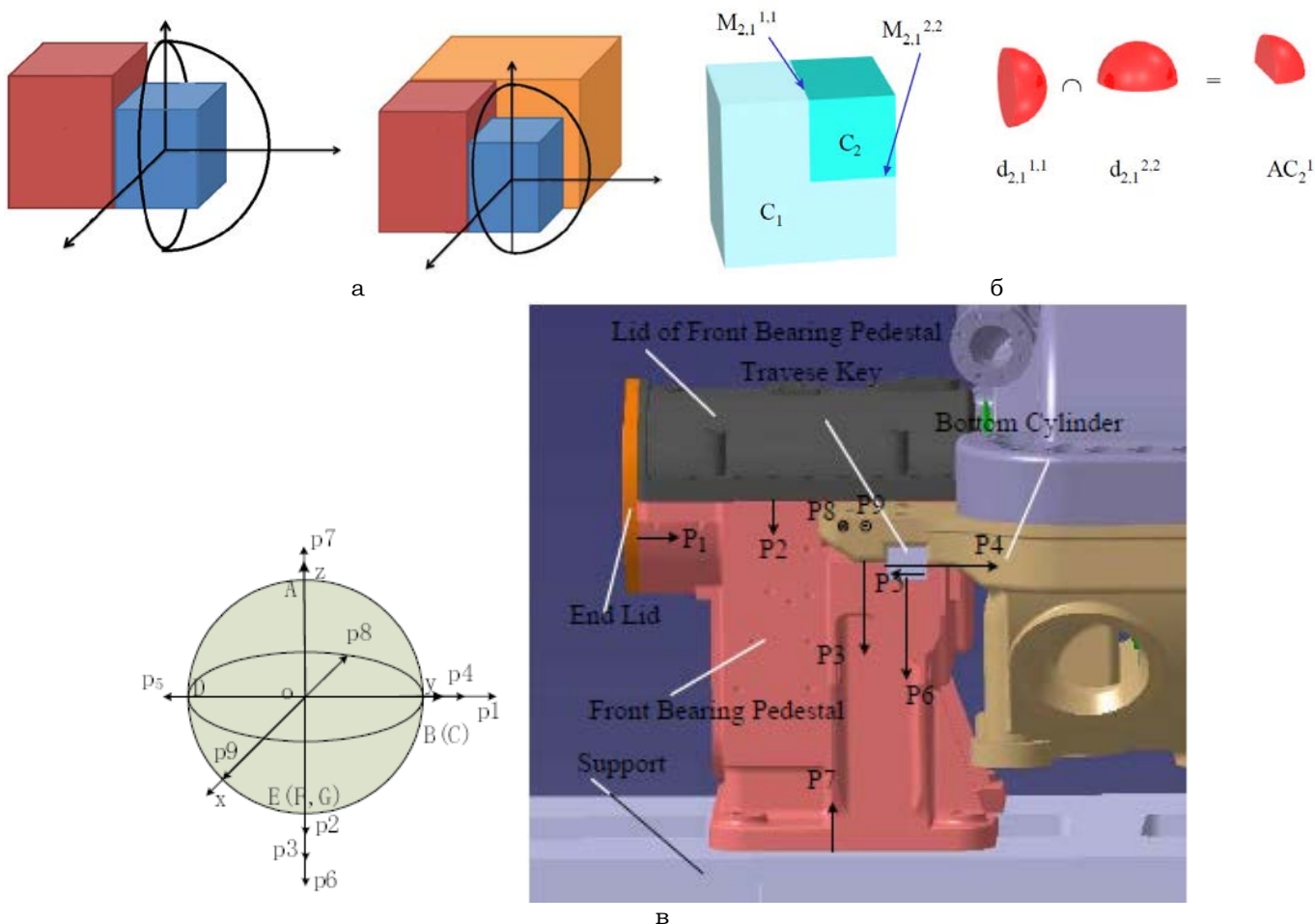
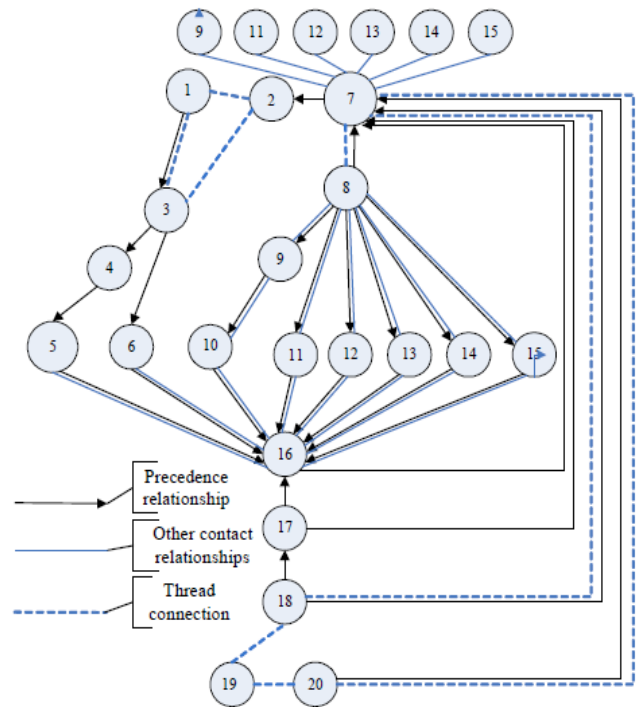
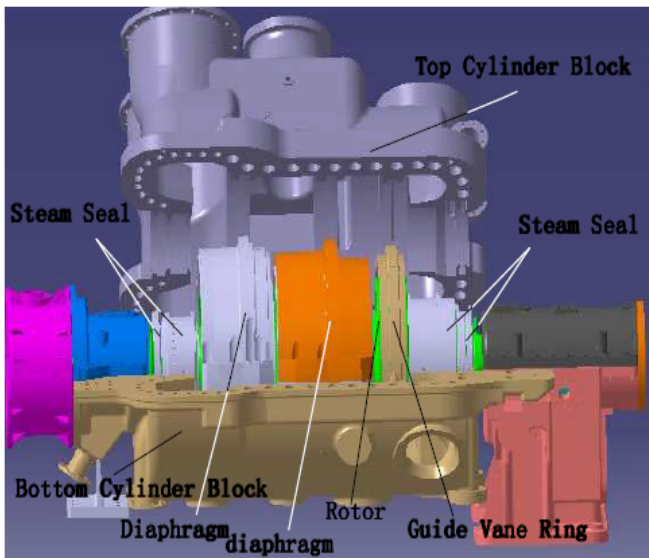


Рис.2. Моделювання процесу розбирання виробу



**Рис. 3. Граф планованої послідовності розбирання парової турбіни для віртуальної системи обслуговування**

класу NP-важких, і, по суті, її розв'язання зводиться до повного перебору або використання методу гілок і меж. Таким чином, можна зробити висновок, що існуючі аналітичні методи генерації послідовностей складання та розбирання мають невисоку ефективність.

Широкого використання для формалізації генерації послідовностей розбирання набув метод, що одержав назву «Wave Propagation» (Поширення хвилі), суть якого полягає у визначенні послідовності часткового розбирання, мінімізованого за кількістю відокремлюваних від виробу елементів, для специфічних умов експлуатації обладнання [9, 10]. За допомогою цього підходу розв'язуються дві задачі: – побудова хвилі розбирання для визначення топології доступу до деталі, до якої необхідно виконати розбирання; – визначення точок перетину хвилі розбирання для формування безлічі варіантів послідовності розбирання виробу. Ця формалізована методика реалізована в автоматизованих системах пошуку раціональної послідовності розбирання, таких як A3D System (рис. 4) [11].

**Методика досліджень**

Основна проблема вищезазначених підходів полягає в тому, що вони орієнтовані лише на геометричні об'єкти без урахування технологічної специфіки їх роботи. В реальних умовах експлуатації обладнання може змінюватися не лише тип з'єднання деталей, що входять до нього, а й ступінь їх впливу на довкілля (хімічна, ра-

діологічна, бактеріологічна небезпека і т. д.), що неодмінно приводить до зміни набору задіяних під час розбирання методів.

Подальше дослідження в цьому напрямку виявило те, що важливий вплив на оптимальний варіант послідовності розбирання здійснюють: наявність необхідного технологічного оснащення та його вартість; вартість виконання операцій розбирання і складання, налагодження і контролю окремих вузлів машин; вартість окремих деталей, які входять до виробу; екологічна безпека доступу до деталей, що працюють в умовах, небезпечних для людини.

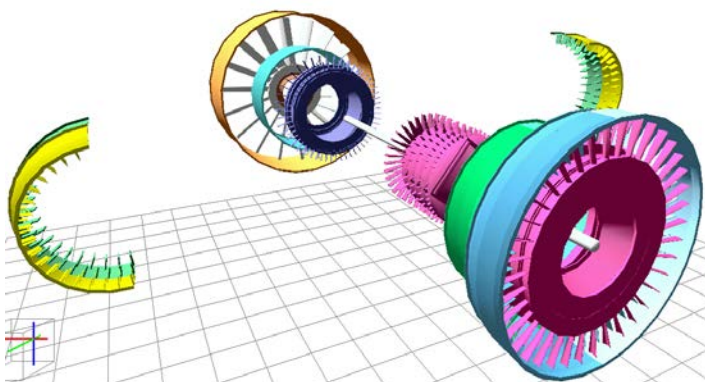
Адаптація вищезазначених методів полягає у формалізації процесу розбирання виробів з урахуванням впливу як умов експлуатації на виріб, так і врахування ступеня впливу залишкових негативних експлуатаційних факторів у виробі на довкілля [1].

Виріб із точки зору технології розбирання є сукупністю видів з'єднань деталей, що входять до нього:

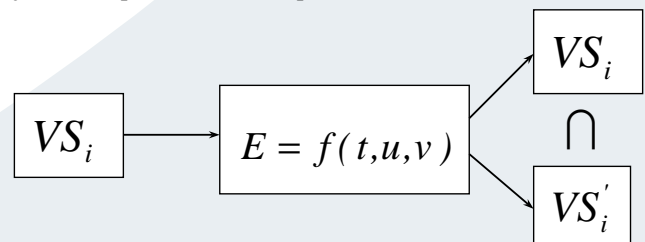
$$M = \{VS_i^j\},$$

де  $VS_i^j$  – j-та кількість i-х видів з'єднань деталей у виробі.

Процес трансформації виду з'єднання в період експлуатації приведений на рис. 5.



**Рис. 4. Приклад інтерфейсу програми A3D**



**Рис. 5. Схема трансформації виду з'єднання в процесі експлуатації виробу**

Тут  $VS_i$  – вид з'єднання деталей у виробі до експлуатації;  $VS'_i$  – вид з'єднання деталей у виробі після експлуатації.  $E = f(t, u, v)$  – період експлуатації виробу як

функція, що залежить від ряду факторів:  $t$  – часу експлуатації;  $u$  – умов експлуатації;  $v$  – ступеня залишкового впливу на довкілля. Фактор часу – за тривалий час експлуатації деталей навіть за нормальних умов відбуваються зміни виду з'єднання, пов'язана, наприклад, зі зношенням пар тертя; зміни фізичних властивостей деталей, що перебувають у контакті (пересихання гумових ущільнень, намагнічування поверхні контакту і т. д.). Фактор умов експлуатації – вплив агресивного середовища, запиленість робочої зони, термовплив, важкі навантаження, експлуатація в умовах жорсткого випромінювання (підвищена радіація), хімічне, бактеріологічне та інші види зараження. Фактор ступеня залишкового впливу на довкілля – визначає ступінь наслідків впливу несприятливих умов експлуатації на виріб у цілому і деталі, що входять до нього (зокрема, вибухонебезпечність, залишкове радіаційне випромінювання, біологічна небезпека і т. д.). Так реалізується концепція ресурсоощадного часткового розбирання виробу до деталі, що вийшла з ладу або потребує заміни.

Оскільки задача пошуку раціональної технології розбирання є інваріантною, тобто такою, що реалізується різними методами або їх комбінацією, на першому етапі спрямованого вибору формуємо матрицю досяжності розв'язання задачі  $R = [r_i]$ , яка визначається:

$$r_i = \begin{cases} 1, & \text{якщо вершина } P_0 \text{ досяжна із } P_i \\ 0, & \text{в протилежному випадку} \end{cases}$$

де  $P_0$  – розв'язок задачі;  $P_i$  – елемент розв'язку.

Таким чином, відбувається відсівання усіх варіантів, що не забезпечують необхідних вимог (тупикові варіанти). Ця модель дозволяє побудувати матрицю суміжності методів  $A = [a_{i,j}]$ , що визначається таким чином:

$a_{i,j} = 1$ , якщо існує зв'язок між методами  $(M_i, M_j)$ ;

$a_{i,j} = 0$ , якщо зв'язку немає.

Матриця має розмірність  $n \times m$  за числом аналізованих методів і складністю розв'язання задачі. Заповнення матриці відбувається порядково. Рядок матриці відповідає набору методів, а стовпець визначає складність розв'язання задачі (кількість етапів).

Матрицями суміжності дає змогу побудувати мережеву модель вибору комбінованих технологій (рис. 6). Вузли мережі є методами, відрізки шляху відповідають витратам на реалізацію кожного методу з урахуванням вартості матеріалів, витрат на застосування різних засобів технологічного оснащення.

Спрямований вибір комбінованої технології полягає у визначенні найкоротшого шляху в цій мережевій моделі.

Якщо за вагову функцію ( $\omega$ ) взяти технологічну собівартість, що відображатиме ваги на відрізках мережі, то весь шлях  $p = \langle v_0, v_1, \dots, v_k \rangle$  буде дорівнювати сумі ребер, що входять до нього:

$$\omega(p) = \sum_{i=1}^k \omega(v_{i-1}, v_i).$$

У даному разі вага найкоротшого шляху з витoku  $\Pi_u$  в стік  $\Pi_3$  буде визначатися співвідношенням

$$d(\Pi_u, \Pi_3) = \begin{cases} \min \{ \omega(p) : \Pi_u \xrightarrow{p} \Pi_3 \}, & \text{якщо є шлях } \Pi_u, \Pi_3 \\ \infty, & \text{в протилежному випадку} \end{cases}$$

Оптимізаційна задача розв'язується методом лінійного програмування. При цьому критерієм оптимізації буде

$$\omega = f(\alpha, \lambda),$$

де  $\alpha$  – керований параметр, що залежить від методу, що застосовується (енергія розряду, подача, частота обертання шпинделя і т. д.);

$\lambda$  – набір технологічних обмежень на застосування методу.

### Етапи рішення задачі

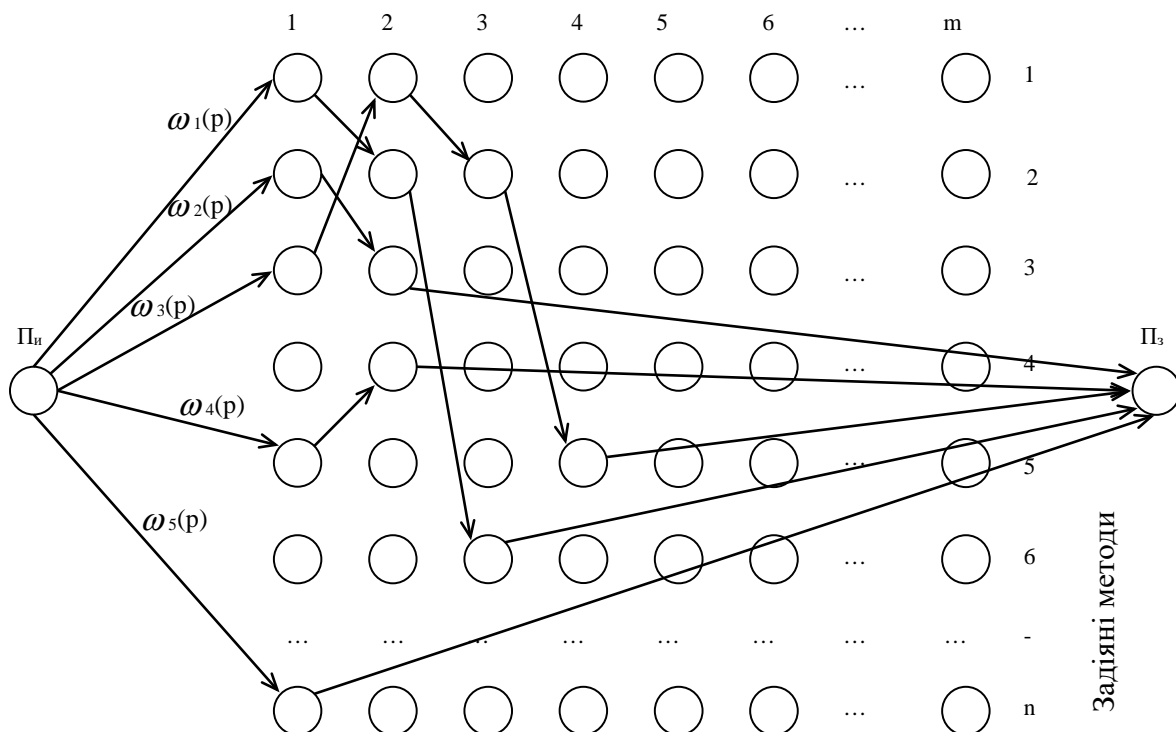


Рис. 6. Мережева модель вибору технологій

## Висновки

Застосування запропонованого підходу дозволить підвищити якість і безпеку процесу ремонту та модернізації такого складного обладнання, як енергетичні установки, а впровадження формалізованої методики в умовах реального виробництва дозволить підвищити рівень її ефективності використання наявних засобів технологічного оснащення.

Наведена система спрямованого вибору комбінованої технології часткового розбирання дозволяє забезпечити необхідну якість процесу реінжинірингу найбільш економічними методами.

## Література:

1. Konoplianchenko Ie. V. Feature of heavy-duty gas turbine compressor reengineering / Ie. V. Konoplianchenko, V. N. Kolodnenko, Ya. I. Chibiryak // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – №1(47). – 2017. – С.27-30.
2. Коноплянченко Є.В. Особливості застосування часового резервування при забезпеченні надійності складних систем/ Коноплянченко Є.В., Чибіряк Я.І., Колодненко В.М. // Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів. - 2017. - № 8. - С. 21-28.
3. Tarelnyk V. Improvement of fixed joints quality by integrated technologies of electroerosive alloying/ V. Tarelnyk, B. Antoszewski, Ie. Konoplianchenko, V. Martsynkovskiy // Mechanik, Agenda Wydawnicza SIMP, Warszawa (Poland). – 2015. – Vol. 4 (88). – P.178-183
4. Konoplyanchenko, E. Rational syntheses of technological processes of assembly [Text] / E. Konoplyanchenko, N. Zakharov, O. Radchuk, V. Yaremenko // Technical Papers of ISA: Integrated Manufacturing Solutions Real-Time

Manufacturing Strategies. – 2002. – Vol. 432. – P. 109–118.

5. Gupta S. M. Disassembly of Products/ Gupta S. M., McLean C. R. // Computers and Industrial Engineering. – 1996. – Vol.31(1)– P.225-228.

6. H.C. Yi, B. Yu, L. Du, C. Li, D. Hu, A study on the method of disassembly time evaluation of a product using work factor method. Proceedings of the 2003 IEEE International Conferences on Systems. Man. Cybernetics (2003), pp. 1753-1759.

7. C.A. Lakos, From Coloured Petri Nets to Object Petri Nets, Spring Veerlag, Vol. 935, 1995.

8. H. T. Zhu and L. Cong, "Disassembly Sequence Planning of Steam Turbines for Virtual Maintenance", Key Engineering Materials, Vol. 572, pp. 335-339, 2014 <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.572.335>.

9. Gadh, R. and Srinivasan, H., 2000, "Assembly and disassembly sequences of components in computerized multi-component assembly models," U.S. Software Utility Patent, P99152US.

10. Beasley, D., and Martin, R.R., 1993, "Disassembly sequences for objects built from unit cubes," Journal of Computer Aided Design, Vol. 25, no. 12, pp. 751-761.

11. Srinivasan, H., Figueroa, R., and Gadh, R., 1999, "Selective disassembly for virtual prototyping as applied to de-manufacturing," Journal of Robotics and Computer Integrated Manufacturing, Vol. 15, No. 3, pp. 231-245.

12. Енергоефективні, альтернативні і енергозберігаючі технології: монографія/ В. А. Марцінковський, В. Б. Тарельник, Б. Антошевський та ін.; під ред. проф. В. А. Марцінковського і проф. В. Б. Тарельника.- м. Суми: Видавництво «МакДен», 2016.- 320 с.- Російською мовою.