

# МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ВІТРОВОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ В СЕРЕДОВИЩІ GPSS

УДК [519.87 : 004.45] : 620

## ГОРШЕНЬОВА Катерина Юрїївна

аспірант, викладач кафедри інтелектуальних інформаційних систем  
Чорноморського державного університету ім. Петра Могили, м. Миколаїв.

**Наукові інтереси:** інтелектуальні інформаційні системи, формальні граматики, нечітка логіка, сценарний аналіз.  
**email:** katerina.yablonskaya@gmail.com

## ФІСУН Микола Тихонович

д. т. н, проф., завідувач кафедри інтелектуальних інформаційних систем  
Чорноморського державного університету ім. Петра Могили, м. Миколаїв.

**Наукові інтереси:** інтелектуальні інформаційні системи та CASE-засоби, OLAP-технології, Textmining, формальні граматики.  
**email:** ntfis@kma.mk.ua

### ВСТУП

Вітрова електрична станція (ВЕС), що налічує у своєму складі кілька вітрових електричних установок (ВЕУ), є складною системою [1], тому для її моделювання використовують різноманітні математичні моделі як по окремо, так і в сполученні. Одним із потужних підходів для такого класу задач є мережі Петрі – математичний апарат для моделювання систем та процесів різної природи. З їх допомогою можна моделювати практично всі види процесів: технологічні, виробничі, обчислювальні. Вони є базою для моделювання роботи вітрових електростанцій [2]. В роботах [3-4] представлено варіант такої моделі, однак для її реалізації було обрано «індивідуальний» підхід, тобто її було запрограмовано для конкретного складу ВЕС з використанням універсальної мови програмування. Тому пошук інших, більш універсальних методів реалізації моделей ВЕС на базі мереж Петрі залишається *актуальною* задачею.

**Ціллю роботи** є підвищення рівня універсальності моделі ВЕС на базі мереж Петрі шляхом її реалізації в системі моделювання GPSS.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Побудувати модель енергодинамічних режимів ВЕС, що складається із низки ВЕУ, які мають певні характерис-

тики, при цьому склад та сполучення ВЕУ можуть динамічно змінюватися в залежності від зовнішніх факторів (замовлення на обсяги вироблюваної електроенергії, швидкості вітру, тощо) на основі мережі Петрі, реалізованої мовою моделювання GPSS для прогнозування режимів ВЕС та сценарного аналізу критичних режимів.

### ПОБУДОВА МЕРЕЖА ПЕТРІ ДЛЯ ВЕС

Мережі Петрі є математичним апаратом для моделювання динамічних дискретних систем. Формально мережа Петрі (N-схема) задається четвіркою у вигляді

$$N = \langle B, D, I, O \rangle, \quad (1)$$

де  $B$  – кінцева множина символів, які називаються позиціями,  $B \neq \emptyset$ ;  $D$  – кінцева множина символів, що називається переходами,  $D \neq \emptyset$ ,  $B \cap D \neq \emptyset$ ;  $I$  – вхідна функція (пряма функція інцидентності),  $I : B \times D \rightarrow \{0,1\}$ ;  $O$  – вихідна функція (зворотна функція інцидентності),  $O : D \times B \rightarrow \{0,1\}$ . Таким чином, вхідна функція  $I$  відображає перехід  $d_j$  в множину вхідних позицій  $b_i \in I(d_j)$ , а вихідна функція  $O$  відображає перехід  $d_j$  в множину вихідних позицій  $b_i \in D(d_j)$  [1]. Для кожного переходу

$d_j \in D$  можна визначити множину вхідних позицій переходу  $I(d_j)$  і вихідних позицій переходу  $O(d_j)$  як

$$I(d_j) = \{b_i \in B \mid I(b_i, d_j) = 1\} \quad (2)$$

$$O(d_j) = \{b_i \in B \mid O(d_j, b_i) = 1\}, \quad (3)$$

де  $i = \overline{1, n}$ ;  $j = \overline{1, m}$ ;  $n = |B|$ ;  $m = |D|$ .

Для кожного переходу  $b_i \in B$  вводяться визначення множини вхідних переходів позиції  $I(b_i)$  і множини вихідних переходів позиції  $O(b_i)$ :

$$I(b_i) = \{d_j \in D \mid I(d_j, b_i) = 1\} \quad (4)$$

$$O(b_i) = \{d_j \in D \mid O(b_i, d_j) = 1\} \quad (5)$$

Графічно N-схема зображується у вигляді двочасткового орієнтованого мультиграфа, що представляє собою сукупність позицій і переходів (Рис.1).

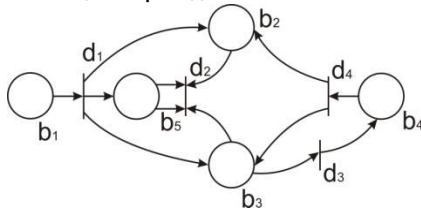


Рис. 1. Графічне зображення N-схеми

На даному рисунку граф N-схеми має два типи вузлів: позиції і переходи, що зображуються 0 і 1 відповідно. Орієнтовані дуги поєднують позиції і переходи, причому кожна дуга направлена від елемента однієї множини (позиції чи переходу) до елемента іншої множини (переходу чи позиції). Граф N-схеми є мультиграфом, бо він допускає існування кратних дуг від однієї вершини до іншої. N-схему зображену на Рис. 1 можна представити формально [5-6]:

$$N = \langle B, D, I, O \rangle,$$

$$B = \langle b_1, b_2, b_3, b_4, b_5 \rangle,$$

$$D = \langle d_1, d_2, d_3, d_4 \rangle,$$

$$I(d_1) = \{b_1\}, \quad O(d_1) = \{b_2, b_3, b_5\}, \quad (6)$$

$$I(d_2) = \{b_2, b_3, b_5\}, \quad O(d_2) = \{b_5\},$$

$$I(d_3) = \{b_3\}, \quad O(d_3) = \{b_4\},$$

$$I(d_4) = \{b_4\}, \quad O(d_4) = \{b_2, b_3\}.$$

В [3-4] приведено моделювання роботи ВЕС за допомогою мереж Петрі (Рис. 2).

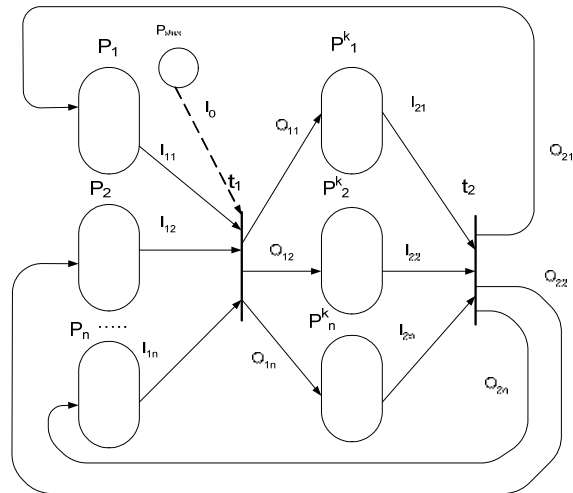


Рис. 2. Структура мережі Петрі для вітрової електростанції

Моделювання ВЕС за допомогою такої мережі має, на наш погляд, певні обмеження щодо адекватності відображення динамічних процесів. Наприклад, якщо потрібно врахувати послідовну та паралельну роботи цілого ряду ВЕУ, а також ситуації при відмові, відновленні, резервуванні окремих ВЕУ та різні режими їх роботи, то моделі в мережі Петрі будуть дуже громіздкими. Тому в даній статті пропонується використовувати систему GPSS, що більш розвинута та пристосована для моделювання систем масового обслуговування (СМО).

В мережах Петрі вершини можуть відображати в різних контекстах (різні за призначенням) пристрої. Для того, щоб сформулювати фрагмент в мережі Петрі потрібно обов'язково повторювати вставки, які моделюють вхідні вершини, сам перехід, вихідні вершини. Модель в кінцевому підсумку виходить більш громіздкою та незручною. В системі GPSS кожен оператор моделює роботу окремого пристрою (накопичувач, черга, канал обслуговування та ін.) або логіку переходів, тому модель мовою GPSS виходить більш гнучкою, лаконічною в реалізації та дозволяє моделювати більш складні системи.

### МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ВЕС ЗА ДОПОМОГОЮ МОВИ GPSS

Мова моделювання GPSS описує рух динамічних змінних – ТРАНЗАКТИВ, які є замовленнями, ініціаторами подій у системі. Програма на мові GPSS починається з оператора (блока) **SIMULATE** (або **SIMULATE N**, де N – число секунд машинного часу), далі йдуть блоки опису

руху транзактів у системі, ще далі іде блок **START N**, де N –число прогонів моделювання роботи системи для набору статистичних даних, закінчується програма картою **JOB** – кінець задачі, або **END** – вихід з GPSS. Блоки опису руху транзактів у системі починаються з блоку **GENERATE** (генерація транзактів – вхід транзакту у систему), таких блоків може бути декілька та закінчуються блоком **TERMINATE** (знищення – вихід транзакту з системи) [7].

*Уточнення постановка задачі.* Необхідно розробити модель ВЕС, що включає в себе паралельно ввімкнені ВЕУ, а також визначити оптимальну кількість ВЕУ для задоволення потреби в певній порції енергії. При моделюванні роботи ВЕС системою GPSS для умови завантаження каналу обслуговування потрібно перевірити умова: чи вільний канал обслуговування. У даному випадку ці функції виконує один умовний оператор переходу **TRANSFER**.

Нижче наведено *програму мовою GPSS*, яка демонструє модель роботи ВЕС, що складається з трьох паралельних ВЕУ.

; потужність ВЕУ, т. б. число кВт, яке може виробити одна ВЕУ (1 канал), залежить від погодних

;умов (вітер, сонце та ін.)

rvey                    variable 50

; прихід заявки в систему (ВЕС)

GENERATE            14,1

; в параметр 1 заносимо число кВт, яке необхідне для забезпечення цієї заявки

Assign                1,500

; облік вхідних заявок

enter1                SAVEVALUE            2+,1

; перевірка: не перевищує чи довжина черги встановлений ліміт - 100

TEST LE              Q1,100,otk

; встановлення в загальну чергу

ochered                queue 1

; перевіряємо який з каналів вільний та відсилаємо у відповідний канал

work                    TRANSFER              all,can1,can3,7

can1 SEIZE            1            ; захват 1-м каналом (ВЕУ)

DEPART                1            ; вихід з черги

ADVANCE              10,1        ; обслуговування в каналі

RELEASE               1            ; вихід заявки з каналу

Assign                 1-,v\$prvey ; зменшення потреби в електроенергії

TEST GE                p1,0,end1 ; перевірка: чи повністю задоволена потреба в енергії

TRANSFER             ,ochered ;

can2 SEIZE            2            ; захват 2-м каналом (ВЕУ)

DEPART                1            ; вихід з черги

ADVANCE              10,1        ; обслуговування в 2-му каналі

RELEASE               2            ; вихід заявки з 2-го каналу

Assign                 1-,v\$prvey ; зменшення потреби в електроенергії

TEST GE                p1,0,end1 ; перевірка: чи повністю задоволена потреба в енергії

TRANSFER             ,ochered

can3 SEIZE            3            ; захват 3-м каналом (ВЕУ)

DEPART                1            ; вихід з черги

ADVANCE              10,1        ; обслуговування в 3-му каналі

RELEASE               3            ; вихід заявки з 3-го каналу

Assign                 1-,v\$prvey ; зменшення потреби в електроенергії

TEST GE                p1,0,end1 ; перевірка: чи повністю задоволена потреба в енергії

TRANSFER             ,ochered

;облік заявок, які не були обслужені через те, що довжина черги перевищила ліміт (100)

otk                    SAVEVALUE            1+,1

;підрахунок ймовірність не обслуговування заявок

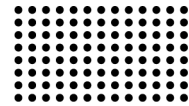
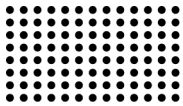
proc                   SAVEVALUE 3,(x1/x2)

;знищення заявки

end1                   TERMINATE            1

### Результати роботи програми для трьох ВЕУ

| START TIME | END TIME | BLOCKS | FACILITIES | STORAGE |
|------------|----------|--------|------------|---------|
| 0.000      | 2858.718 | 30     | 3          | 0       |
| NAME       | VALUE    |        |            |         |
| CAN1       | 7.000    |        |            |         |
| CAN2       | 14.000   |        |            |         |
| CAN3       | 21.000   |        |            |         |



|         |           |           |      |           |       |         |   |
|---------|-----------|-----------|------|-----------|-------|---------|---|
| END1    | 30.000    | OTK       | 28   | SAVEVALUE | 24    | 0       | 0 |
| ENTER1  | 3.000     | PROC      | 29   | SAVEVALUE | 24    | 0       | 0 |
| OCHERED | 5.000     | END1      | 30   | TERMINATE | 100   | 0       | 0 |
| OTK     | 28.000    |           |      |           |       |         |   |
| PROC    | 29.000    |           |      |           |       |         |   |
| PVEY    | 10000.000 |           |      |           |       |         |   |
| WORK    | 6.000     |           |      |           |       |         |   |
| LABEL   | LOC       | BLOCK     | TYPE | ENTRY     | COUNT | CURRENT |   |
| COUNT   | RETRY     |           |      |           |       |         |   |
| 1       | GENERATE  | 203       |      | 0         | 0     |         |   |
| 2       | ASSIGN    | 203       |      | 0         | 0     |         |   |
| ENTER1  | 3         | SAVEVALUE | 203  | 0         | 0     |         |   |
| 4       | TEST      | 203       |      | 0         | 0     |         |   |
| OCHERED | 5         | QUEUE     | 953  | 0         | 0     |         |   |
| WORK    | 6         | TRANSFER  | 953  | 101       | 0     |         |   |
| CAN1    | 7         | SEIZE     | 286  | 0         | 0     |         |   |
| 8       | DEPART    | 286       |      | 0         | 0     |         |   |
| 9       | ADVANCE   | 286       |      | 0         | 0     |         |   |
| 10      | RELEASE   | 286       |      | 0         | 0     |         |   |
| 11      | ASSIGN    | 286       |      | 0         | 0     |         |   |
| 12      | TEST      | 286       |      | 0         | 0     |         |   |
| 13      | TRANSFER  | 260       |      | 0         | 0     |         |   |
| CAN2    | 14        | SEIZE     | 283  | 0         | 0     |         |   |
| 15      | DEPART    | 283       |      | 0         | 0     |         |   |
| 16      | ADVANCE   | 283       |      | 1         | 0     |         |   |
| 17      | RELEASE   | 282       |      | 0         | 0     |         |   |
| 18      | ASSIGN    | 282       |      | 0         | 0     |         |   |
| 19      | TEST      | 282       |      | 0         | 0     |         |   |
| 20      | TRANSFER  | 257       |      | 0         | 0     |         |   |
| CAN3    | 21        | SEIZE     | 283  | 0         | 0     |         |   |
| 22      | DEPART    | 283       |      | 0         | 0     |         |   |
| 23      | ADVANCE   | 283       |      | 1         | 0     |         |   |
| 24      | RELEASE   | 282       |      | 0         | 0     |         |   |
| 25      | ASSIGN    | 282       |      | 0         | 0     |         |   |
| 26      | TEST      | 282       |      | 0         | 0     |         |   |
| 27      | TRANSFER  | 257       |      | 0         | 0     |         |   |

|      |    |           |     |   |   |
|------|----|-----------|-----|---|---|
| OTK  | 28 | SAVEVALUE | 24  | 0 | 0 |
| PROC | 29 | SAVEVALUE | 24  | 0 | 0 |
| END1 | 30 | TERMINATE | 100 | 0 | 0 |

|          |         |       |           |        |       |      |
|----------|---------|-------|-----------|--------|-------|------|
| FACILITY | ENTRIES | UTIL. | AVE. TIME | AVAIL. | OWNER | PEND |
| INTER    | RETRY   | DELAY |           |        |       |      |
| 1        | 286     | 0.995 | 9.944     | 1      | 0     | 0    |
| 2        | 283     | 0.990 | 9.998     | 1      | 78    | 0    |
| 3        | 283     | 0.985 | 9.949     | 1      | 77    | 0    |

|          |       |       |       |          |        |         |         |      |
|----------|-------|-------|-------|----------|--------|---------|---------|------|
| QUEUE    | MAX   | CONT. | ENTRY | ENTRY(0) | AVE.   | CONT.   | AVE.    | TIME |
| AVE.(-0) | RETRY |       |       |          |        |         |         |      |
| 1        | 102   | 101   | 953   | 777      | 59.081 | 177.226 | 959.640 | 0    |

|           |       |         |
|-----------|-------|---------|
| SAVEVALUE | RETRY | VALUE   |
| 1         | 0     | 24.000  |
| 2         | 0     | 203.000 |
| 3         | 0     | 0.118   |

|       |    |          |     |       |         |      |           |
|-------|----|----------|-----|-------|---------|------|-----------|
| CEC   | XN | PRI      | M1  | ASSEM | CURRENT | NEXT | PARAMETER |
| VALUE |    |          |     |       |         |      |           |
| 79    | 0  | 1112.498 | 79  | 6     | 6       | 1    | 500.000   |
| 80    | 0  | 1127.434 | 80  | 6     | 6       | 1    | 500.000   |
| 81    | 0  | 1141.998 | 81  | 6     | 6       | 1    | 500.000   |
| ...   |    |          |     |       |         |      |           |
| 199   | 0  | 2802.157 | 199 | 6     | 6       | 1    | 500.000   |

|       |    |          |     |       |         |      |           |
|-------|----|----------|-----|-------|---------|------|-----------|
| FEC   | XN | PRI      | BDT | ASSEM | CURRENT | NEXT | PARAMETER |
| VALUE |    |          |     |       |         |      |           |
| 77    | 0  | 2862.156 | 77  | 23    | 24      | 1    | 150.000   |
| 78    | 0  | 2863.352 | 78  | 16    | 17      | 1    | 150.000   |
| 204   | 0  | 2871.403 | 204 | 0     | 1       |      |           |

Таблиця 1

**Результати роботи ВЕС**

| Кількість відмовлених заявок | Загальна кількість заявок | Підрахунок ймовірність не обслуговування заявок | Кількість ВЕУ | Потужність однієї ВЕУ, кВт | Потреба в електроенергії, кВт |
|------------------------------|---------------------------|---|---------------|----------------------------|-------------------------------|
| 50                           | 203                       | 0,246   | 2             | 50                         | 500                           |
| 24                           | 203                       | 0,118   | 3             | 50                         | 500                           |
| —                            | 201                       | —   | 4             | 50                         | 500                           |

**ВИСНОВКИ**

Розроблена модель роботи ВЕС на основі мережі Петрі в середовищі програмної системи моделювання GPSS має більш універсальний характер у порівнянні з реалізацією в середовищі універсальної мови програмування. За своїми виразними засобами вона ближче до користувача,

але все одне вона ще не наближена до «природної» мови особи, що розробляє подібні моделі для прогнозування і подальшого сценарного аналізу. Така мова була запропонована в роботах [8]. Планами подальших досліджень передбачається розробка компілятора цієї мови в мову GPSS.

**ЛІТЕРАТУРА:**

1. Medykovskiy M. Optimal Choice of Wind Turbines Combination Based on Customer's Requirements [Tekst] / M. Medykovskiy, O. Shunevych // "Suchasni problemi radioelektroniky, telekomunikatsiyi ta kompyuternoyi inzheneriyi": 10-ta mizhnar. nauk.-tekh. konph, 23-27 lyut. 2010 r., Lviv-Slabsko: tezu dop. / Nats. un-t "Lvivska politehnika", 2010. – S. 319.
2. Sudachevskiy V. M. Proektuvannia system upravlinnia na osnobi merezh Petri [Tekst] / V. M. Sudachevskiy, V. V. Ababii, E. N. Gutsuliak, M. Podubnyi. – Informatsiini tekhnologii ta kompyuterna tekhnika. – Visnik Vinnutskogo politekhnichnogo instytutu. – 2011. – № 3. – S. 99-105.
3. Medykovskiy M. O. Metod vyznachennia struktury vitrovoi elektrostantsii z vrakhuvanniam dynamiky navantazhennia [Tekst] / M. O. Medykovskiy, O. B. Shunevich. – Kuiv : Modeliuvannia ta informatsiini tekhnologii : zb. nauk. prats. – IPME NANU, 2009. – № 53. – S. 175–181.
4. Medykovskiy M. O. Bagatokryterialnii metod otsiniuvannia efektyvnosti vitroenergetychnoi ustanovky [Tekst] / M. O. Medykovskiy, O. B. Shunevich. – Kyiv : Visnyk inzhenernoi akademii Ukrainy. – 2010. – № 3-4. – S. 240-245.
5. Piterson Dzh. Teoriia setei Petri i modelirovanie sistem. – M.: Mir, 1984. – 264 s.
6. Polliak Yu. G., Filimonov V. A. Statcheskoe mashinnoe modelirovanie sredstv cviazi. – M.: Radio i cviaz, 1998. – 176 s.
7. Sovetov B. Ya., Yakovlev S. A. Modelirovanie sistem: Ucheb. dlia vuzov po spets. "Avtomatizir. Sistemy obrabotki inform. i upr.". – 2-e izd., pererab. i dop. – M.: Vyssh. shk., 1998. – 319 s.
8. Phisun M. T. Generatsiia stsenariiv podii z vykorystanniam formalnykh gramatyk [Tekst] / M. T. Phisun, K. Yu. Yablonska, O. B. Sunevich. – Mykolaiv : Zbirnyk naukovykh prats. – NUK, 2013. – №3. – S. 86-91.