

**Івахнов Андрій Віталійович**, асистент кафедри Електричні станції, +38(066)029-34-22, andrii.ivakhnov@khpі.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-8280-0033

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»  
вул. Кирпичова, 2, Харків, Україна, 61002*

**Лазуренко Олександр Павлович**, доцент, професор кафедри Електричні станції, +38(050)938-03-48, oleksandr.lazurenko@khpі.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-4409-629X

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»  
вул. Кирпичова, 2, Харків, Україна, 61002*

## ПІДХОДИ ЩОДО ФОРМУВАННЯ СКЛАДУ І МЕЖ ЕНЕРГОВУЗЛІВ В ЕНЕРГОСИСТЕМІ ПРИ ДЕЦЕНТРАЛІЗАЦІЇ

***Анотація.** В сучасній парадигмі децентралізації енергосистем, важливим є питання визначення і формування енерговузлів, як складових розподіленої системи. У статті досліджується це питання як для вже існуючих енергосистем так і при проектуванні нових. В якості моделі дослідження була обрана 14-шинна система IEEE (IEEE 14-bus system) завдяки варіативності складових елементів та її широкому використанню як еталону в академічних та дослідницьких програмах, а в якості середовища для комп'ютерного моделювання pandapower. Для верифікації результатів дослідження порівнюються дані перетоків потужності і втрат в моделі, що досліджується, з еталонними і отримана точність відтворення 0,13 %. Розроблена модель з поділом на енерговузли демонструє, що такий підхід може суттєво розвантажити мережу енерговузла, що дає ряд переваг, таких як запас потужності для збільшення споживачів і розподіленої генерації, або менші капіталовкладення під час модернізації мережі. Також виявлено що такий підхід підвищує надійність роботи енергосистеми в цілому.*

***Ключові слова:** енерговузол, 14 шинна система IEEE, pandapower, децентралізація, баланс потужності.*

**Ivakhnov Andrii**, dept. assistant Electric Power Stations, +38(066)029-34-22, andrii.ivakhnov@khpі.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-8280-0033

*National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute".  
2, Kyrpychova Str., Kharkiv, Ukraine, 61002.*

**Lazurenko Oleksandr**, associated-prof. of dept. Electric Power Stations, +38(050)938-03-48, oleksandr.lazurenko@khpі.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-4409-629X

*National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute".  
2, Kyrpychova Str., Kharkiv, Ukraine, 61002.*

## APPROACHES TO THE FORMATION OF THE COMPOSITION AND BOUNDARIES OF ENERGY HUBS IN THE POWER GRID IN DECENTRALIZATION

***Abstract.** In the modern paradigm of decentralization of power systems, the issue of defining and forming energy hubs as components of a distributed system is important. The article investigates this issue both for existing power grids and when designing new ones. The IEEE 14-bus system was chosen as the research model due to the variability of the constituent elements and its widespread use as a*

*reference in academic and research programs, and as an environment for computer modeling pandapower. To verify the research results, the data on power flows and losses in the model under study are compared with the reference ones and a reproduction accuracy of 0.13% is obtained. The developed model with division into power hubs demonstrates that such an approach can significantly unload the energy hubs grid, which provides a number of advantages, such as a capacity reserve for increasing consumers and distributed generation or lower capital investments during power grid modernization. It was also found that such an approach increases the reliability of the power grid as a whole.*

**Keywords.** *Energy Hubs, IEEE 14-bus system, pandapower, decentralization, power balance.*

**Вступ.** Парадигмою розвитку сучасних електроенергетичних систем світу є «5Д енергосистема» [1]. Основним напрямком при створенні такої енергосистеми є децентралізація. Зміна підходів до управління, до поділу системи на відповідні частини (енерговузли або кластери) – це все є основними задачами на шляху реалізації цієї концепції. В статті розглядаються принципи поділу енергосистеми на енерговузли, досліджується можливість такого поділу на основі моделювання для посилення координації на рівні передачі та розподілу, розвитку розподіленої генерації, досягнення можливості зміни парадигми управління енергосистемою при активному розвитку регіональних енергетичних рішень і використання підходу до управління «знизу до гори».

**Мета роботи.** Використовуючи еталонну модель енергосистеми, яка відтворює основні процеси генерації, передачі, розподілу та споживання електроенергії, дослідити можливість децентралізації енергосистеми шляхом виділення в ній енерговузлової структури з перевіркою можливостей балансування потужності в ній.

**Огляд літератури.** Існує велика кількість наукових публікацій що досліджують енерговузли. Але, в основному, вони направлені на локалізовані питання, що відносяться до дослідження процесів в безпосередньо самому енерговузлі, коли він вже сформований, і немає детальних досліджень про те, як формувати енерговузли в існуючих електроенергетичних мережах для досягнення певного ефекту.

Так, у роботі [2] розглядається варіант вирішення питання оптимального планування енерговузла житлового комплексу методом багатокритеріальної частотної оптимізації на основі алгоритму рою частинок (Multi-objective Particle

Swarm Optimization) з метою одночасного зменшення інвестиційних та експлуатаційних витрат і підвищення надійності енергопостачання.

У роботі [3] розглядається вирішення питання ефективного управління в енерговузлі в двонаправлених мікромережах з метою оптимізації використання різних енергоносіїв та забезпечення стабільності роботи системи за умов невизначеності, використовуючи децентралізований метод множників зі змінним напрямком (the alternating direction method of multipliers) у поєднанні з моделлю оптимізації RO-IGDT.

В якості енерговузла можна визначити окрему ділянку енергосистеми з метою первинного балансування потужності в межах цієї ділянки з різним ступенем самодостатності. За визначенням глосарію Укренерго енерговузол – це сукупність об’єктів енергосистеми, що розташовані на обмеженій частині території та об’єднані спільною інфраструктурою [4].

На Рисунок 1 показано схематичне зображення енерговузла в найменшому масштабі, і укрупненому, що описується згідно формули:

$$\begin{cases} \forall H_i = \sum_1^i \{A_i\} \geq 1, \text{ при } i = 1, 2, 3, \dots \\ \{H_i\} = C, \text{ при } i = 1, 2, 3, \dots \end{cases} \quad (1)$$

де  $H$  – енергетичний вузол;

$A$  – агент енерговузла.

$C$  – укрупнений енерговузол або мережа в цілому.

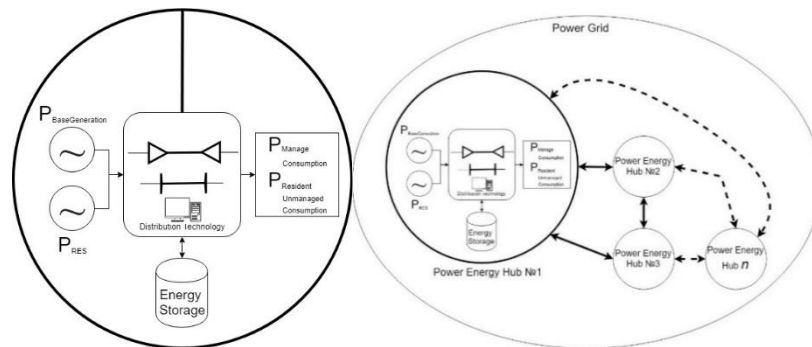


Рисунок 1 – Схематичне представлення енерговузла

Існують різні підходи до визначення типів енерговузлів. Ron de Graaf, дослідник незалежної міжнародної консалтингової компанії Haskoning, визначає, що енерговузли відіграють важливу роль у досягненні сталої та децентралізованої енергетичної системи, і виділяє такі чотири типи [5] енерговузлів:

- 1) енерговузол промислового майданчика: промислова зона зі значним споживанням енергії та відновлювальними джерелами енергії (ВДЕ);
- 2) енерговузол великого споживача енергії: забезпечення енергетичних потреб окремих великих енергоємних підприємств, таких як заводи або центри обробки даних;
- 3) енерговузол забудованого середовища: енергохаби для міських районів, ці хаби допомагають керувати енергетичним попитом споживачів житлових та комерційних будівель;
- 4) Енерговузол сталої мобільності: орієнтовані на підтримку інфраструктури зарядки електромобілів та інших рішень для мобільності.

Такий підхід є цікавим, але дещо звуженим, бо описує, в основному, системи електропостачання різних споживачів. Тому в даному дослідженні пропонується до розгляду більш широкий підхід до децентралізації енергосистем, і виділення енерговузлів в багаторівневому баченні. Для цього визначимо типізацію енерговузлів відносно їх самодостатності в балансуванні [6] – збалансований, надлишковий та дефіцитний.

При вирішенні питання виділення енерговузлів в існуючій енергосистемі, першочергово потрібно визначити критерії, за якими можна об'єднувати агентів енергосистеми в окремі енерговузли. Авторами пропонується чотири основних варіанти для такого формування складу і меж:

- 1) топографічне – за відстанню зв'язків, з врахуванням тупикових гілок;
- 2) за напругою – в одному класі напруги (між трансформаторами);
- 3) балансуєчі (за потужністю) – базова потужна генерація і потужний споживач;

4) за типом агентів – об'єднання певної кількості однотипних агентів (до прикладу громада з просьюмерами) або виокремлення агентів першої категорії надійності електроживлення.

Надалі ці варіанти можливо комбінувати для деталізації енерговузла відповідно до особливостей енергетики регіону та агентів, що будуть в його складі.

**Методи та модельні експерименти.** На першому кроці дослідження був проведений вибір мережевої моделі і програмного засобу розрахунків, далі проведена верифікація відносно еталонних значень обраної моделі.

Для зручності подальшого використання і розбиття на енерговузли модель для дослідження повинна базуватися на графо-аналітичній структурі з можливістю визначити вершини (агенти енерговузла) і ребра (зв'язки між агентами). Розміри моделі повинні бути достатніми для виділення декількох типів енерговузлів відповідно до різних способів класифікації. Була обрана 14-шинна система IEEE завдяки своїй простоті та широкому використанню як еталон в академічних та дослідницьких програмах. Структура моделі (Рисунок 2) IEEE 14-bus system [7] складається з шин, генераторів, ліній та навантажень, що представляє спрощене наближення до типової електроенергетичної системи, має різні рівні напруги і велику кількість агентів для можливості виділення енерговузлів для проведення аналізу. Аналіз та дослідження моделі енергосистеми зазвичай виконується за допомогою аналізу потоків потужності. Рішення прийняті на даній структурі можуть бути релевантні для масштабування.

Для проведення моделювання існує декілька основних інструментів для комп'ютерного моделювання електроенергетичних систем, зокрема для IEEE 14-bus system, такі як: Matlab Simulink [8], DIgSILENT PowerFactory [9], PCAD [10], pandapower [11].

Вимоги до програмного забезпечення:

- доступність використання
- можливість промоделювати велику кількість ітерацій (рік або більше);
- можливість створювати велику розгалужену мережу;

- можливість гнучко вносити зміни та отримувати дані.

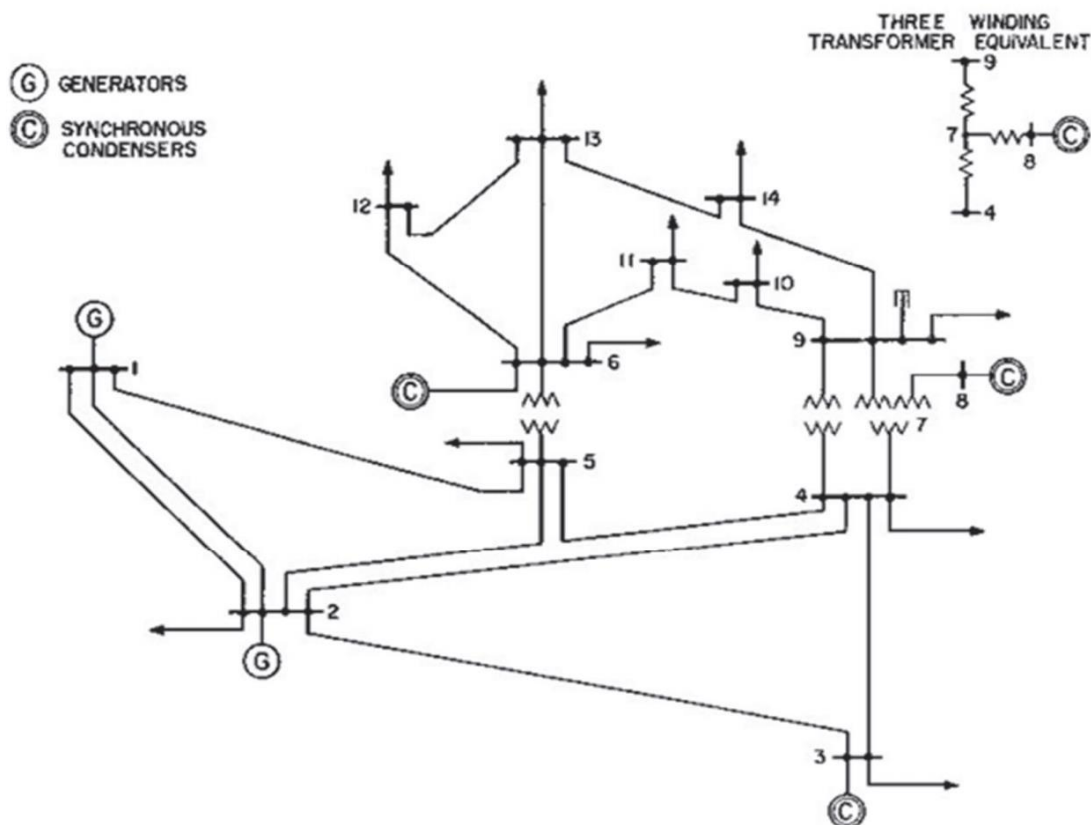


Рисунок 2 – IEEE 14-bus system [7]

Для досліджень прийнято рішення використовувати pandapower як доступний opensource застосунок з широкими можливостями моделювання [12], націленими саме на електроенергетичні системи. Для перевірки точності роботи середовища моделювання і базової моделі як такої, в Таблиця 1 наведено еталонні дані моделі IEEE 14-bus system за перетоками потужності і втратам в ЛЕП, а в Таблиця 2 ті ж самі дані отримані з моделі в середовищі pandapower.

Таблиця 1 – Еталонні дані перетоків і втрат в ЛЕП IEEE 14-bus system (without FACTS devices) [7]

| From bus | To bus | Line Flows  |         |               |         | Line losses |          |
|----------|--------|-------------|---------|---------------|---------|-------------|----------|
|          |        | Sending End |         | Receiving End |         | Pl, MW      | Ql, MVar |
|          |        | P, MW       | Q, MVar | P, MW         | Q, MVar |             |          |
| 1        | 2      | 157.08      | -20.45  | -152.772      | 27.756  | 4.309       | 7.305    |
| 1        | 5      | 75.513      | 5.217   | -72.74        | 0.922   | 2.773       | 6.139    |
| 2        | 3      | 73.396      | 3.545   | -71.063       | 1.66    | 2.333       | 5.204    |
| 2        | 4      | 55.943      | 1.079   | -54.273       | 0.387   | 1.67        | 1.465    |
| 2        | 5      | 41.733      | 2.848   | -40.813       | -3.717  | 0.92        | -0.868   |
| 3        | 4      | -23.137     | 7.099   | 23.528        | -7.41   | 0.391       | -0.312   |
| 4        | 5      | -59.585     | 11.574  | 60.064        | -10.063 | 0.479       | 1.511    |
| 4        | 7      | 27.066      | -4.104  | -27.066       | 5.565   | 0           | 1.46     |
| 4        | 9      | 15.464      | 3.454   | -15.464       | -2.177  | 0           | 1.277    |
| 5        | 6      | 45.889      | 11.258  | -45.889       | -6.529  | 0           | 4.729    |
| 6        | 11     | 8.287       | 8.898   | -8.165        | -8.641  | 0.123       | 0.257    |
| 6        | 12     | 8.064       | 3.176   | -7.984        | -3.008  | 0.081       | 0.168    |
| 6        | 13     | 18.337      | 9.981   | -18.085       | -9.485  | 0.252       | 0.496    |
| 7        | 8      | 0           | -20.362 | 0             | 21.03   | 0           | 0.668    |
| 7        | 9      | 27.066      | 14.798  | -27.066       | -13.84  | 0           | 0.957    |
| 9        | 10     | 4.393       | -0.904  | -4.387        | 0.92    | 0.006       | 0.016    |
| 9        | 14     | 8.637       | 0.321   | -8.547        | -0.131  | 0.089       | 0.19     |
| 10       | 11     | -4.613      | -6.72   | 4.665         | 6.841   | 0.051       | 0.12     |
| 12       | 13     | 1.884       | 1.408   | -1.873        | -1.398  | 0.011       | 0.01     |
| 13       | 14     | 6.458       | 5.083   | -6.353        | -4.869  | 0.105       | 0.215    |

Таблиця 2 – Дані перетоків і втрат в ЛЕП при моделюванні IEEE 14-bus system в середовищі pandapower

| From bus | To bus  | Line Flows  |          |               |          | Line losses |          | Loading, % |
|----------|---------|-------------|----------|---------------|----------|-------------|----------|------------|
|          |         | Sending End |          | Receiving End |          | Real        | Reactive |            |
|          |         | P, MW       | Q, MVar  | P, MW         | Q, MVar  | Pl, MW      | Ql, MVar |            |
| 0 (1)    | 1 (2)   | 156.88      | -20.40   | -152.59       | 27.68    | 4.30        | 7.27     | 151%       |
| 0 (1)    | 4 (5)   | 75.518      | 3.85     | -72.75        | 2.23     | 2.76        | 6.08     | 72%        |
| 1 (2)    | 2 (3)   | 73.24       | 3.56     | -70.91        | 1.60     | 2.32        | 5.16     | 71%        |
| 1 (2)    | 3 (4)   | 56.13       | -1.55    | -54.45        | 3.02     | 1.68        | 1.47     | 54%        |
| 1 (2)    | 4 (5)   | 41.52       | 1.17     | -40.61        | -2.10    | 0.90        | -0.93    | 40%        |
| 2 (3)    | 3 (4)   | -23.29      | 4.47     | 23.66         | -4.84    | 0.37        | -0.36    | 24%        |
| 3 (4)    | 4 (5)   | -61.16      | 15.82    | 61.67         | -14.20   | 0.51        | 1.62     | 63%        |
| 5 (6)    | 10 (11) | 7.35        | 3.56     | -7.30         | -3.44    | 0.06        | 0.12     | 8%         |
| 5 (6)    | 11 (12) | 7.79        | 2.50     | -7.71         | -2.35    | 0.07        | 0.15     | 8%         |
| 5 (6)    | 12 (13) | 17.75       | 7.22     | -17.54        | -6.80    | 0.21        | 0.42     | 18%        |
| 8 (9)    | 9 (10)  | 5.23        | 4.22     | -5.21         | -4.18    | 0.02        | 0.03     | 6%         |
| 8 (9)    | 13 (14) | 9.43        | 3.61     | -9.31         | -3.36    | 0.12        | 0.25     | 10%        |
| 9 (10)   | 10 (11) | -3.79       | -1.62    | 3.80          | 1.64     | 0.01        | 0.03     | 4%         |
| 11 (12)  | 12 (13) | 1.61        | 0.75     | -1.61         | -0.75    | 0.01        | 0.01     | 2%         |
| 12 (13)  | 13 (14) | 5.643851    | 1.747174 | -5.58977      | -1.63707 | 0.054078    | 0.110105 | 6%         |

Порівнюючи результати видно, що похибка в розрахунку даних знаходиться в межах 0,13 %, що свідчить про високі показники точності відтвореної моделі, і можливість подальших досліджень в середовищі pandapower, отримуючи достовірні дані роботи енергомережі.

Модель IEEE 14-bus system в своєму складі на одинадцяти шинах має споживачів зі статичною характеристикою потужності. Для подальших досліджень, з метою працювати з динамічними даними, а саме зі змінним характером споживання в мережу вводяться профілі одинадцяти типових споживачів (рис. 3) відповідно приєднаним до шин. Тип профілю споживання для конкретної шини призначався з огляду на електричні характеристики на шині, так профілі 1–4 – це профілі потужного споживання великого регіону, а інші профілі характерні типовим одиничним споживачам. Профілі вводяться як «scale» параметр, що множитья при масштабуванні на статичний показник потужності вихідної моделі. Профілі отримано з бази даних kaggle [13], а також з бази REopt [14].

**Profile 1** – погодинне споживання та виробництво електроенергії типове для Румунії ( $P = 21.7$  MW); **Profile 2** – погодинні дані про споживання енергії від PJM USA ( $P = 94.2$  MW); **Profile 3** – погодинне споживання електроенергії типове для Туреччини ( $P = 47.8$  MW); **Profile 4** – погодинні дані PJM (AEP) про споживання енергії в США ( $P = 7.6$  MW); **Profile 5** – погодинне споживання електроенергії великим офісом (REopt) ( $P = 11.2$  MW); **Profile 6** – погодинне споживання електроенергії Strip Mall (REopt) ( $P = 29.5$  MW); **Profile 7** – погодинне споживання електроенергії складом (REopt) ( $P = 9$  MW); **Profile 8** – погодинне споживання електроенергії квартирним будинком (REopt) ( $P = 3.5$  MW); **Profile 9** – погодинне споживання електроенергії в амбулаторно-поліклінічній медичній допомозі (REopt) ( $P = 6.1$  MW); **Profile 10** – погодинне споживання електроенергії лікарняним корпусом (REopt) ( $P = 13.5$  MW); **Profile 11** – погодинне споживання електроенергії супермаркетом (REopt) ( $P = 14.9$  MW).



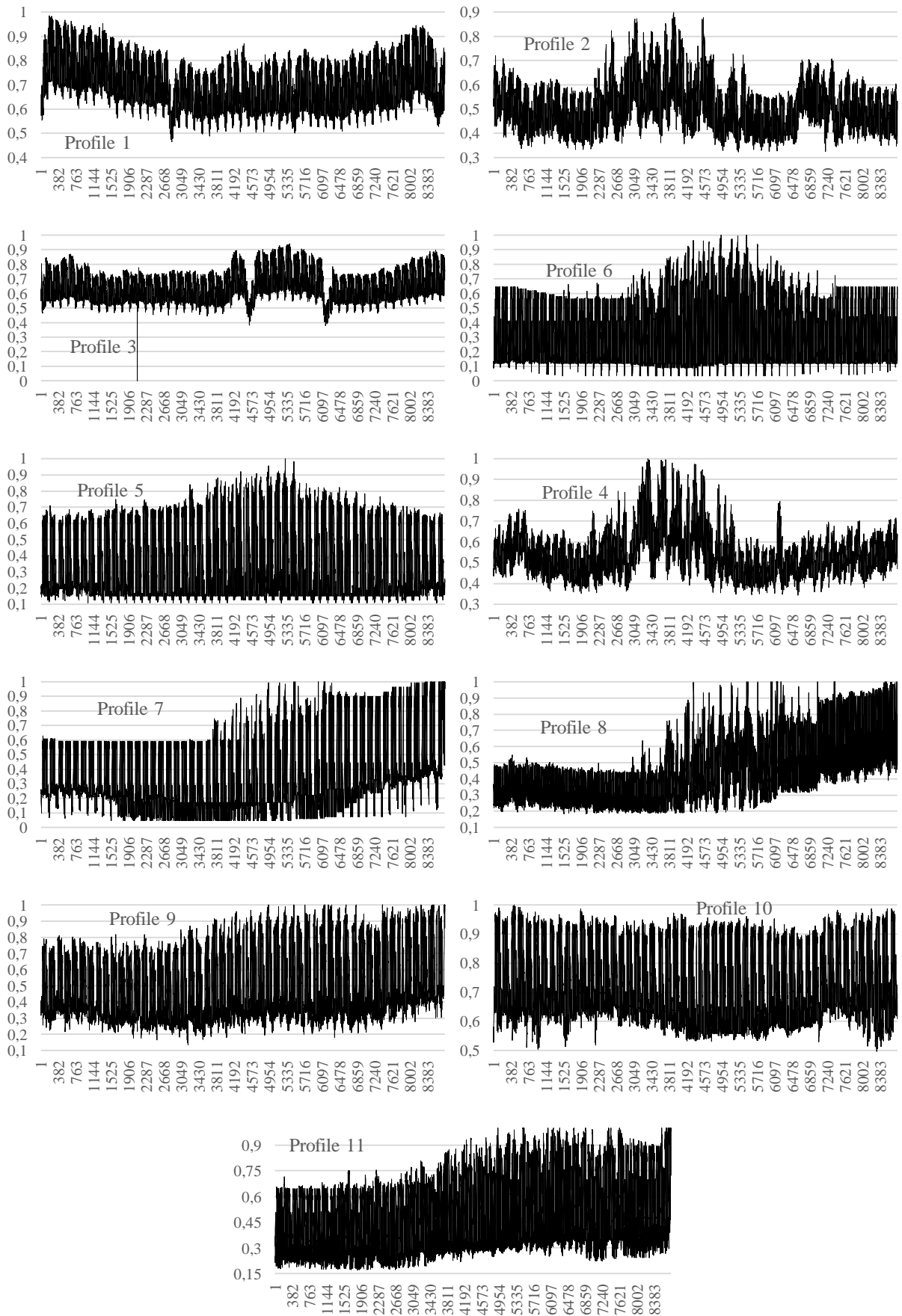


Рисунок 3 – Профілі навантаження одинадцяти споживачів

Після перевірки достовірності результатів моделювання було проведене виділення енерговузлів на моделі. Варіанти визначених енерговузлів показані на Рисунок 4. Відповідно попередньо визначеного підходу формування енерговузлів, в першому варіанті виділяємо два енерговузли за класом напруги (Рисунок 4, а), модель IEEE 14–bus system має два основних класи напруги, а саме 0,208 та 145 кВ. Наступним варіантом (Рисунок 4, б) є комбінований підхід, коли перший енерговузол з напругою 145 кВ ділимо на два (за балансуючим підходом) за умови, що він включає потужні агенти генерації і споживання. І третім варіантом додаємо топографічний підхід, відносно якого приймаємо, що ЛЕП 1 та 2, які відповідають за зв'язок з енергосистемою, відносяться безпосередньо до енергосистеми і тому не будемо враховувати їх вплив на перший енерговузол.

Окрім цього, при балансному розділенні енерговузла 1 на два, ми враховували лінії залежно від напрямку потоку потужності в них. Для ліній, які можуть одночасно відноситись до двох вузлів, прийняли, що лінія буде відноситись до вузла, в який по ній передається потужність.

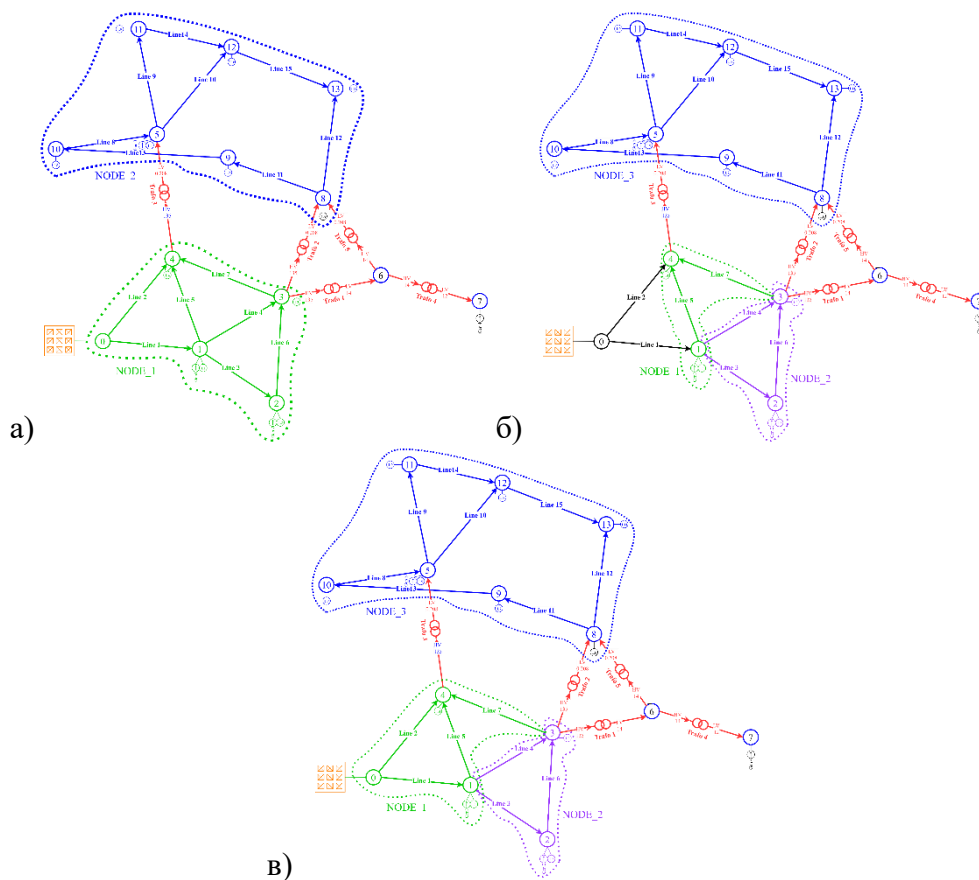


Рисунок 4 – Варіанти формування енерговузлів в IEEE 14–bus system:  
 а) 2 енерговузли, б) 3 енерговузли, в) 3 енерговузли без врахування ЛЕП 1 та 2

Після поділу мережі на енерговузли для моделювання режиму роботи з генерацією, необхідно додати безпосередньо потужність генерації точну таку, яка забезпечує потреби споживання в енерговузлі відповідно графіка навантаження, що визначається за формулою:

$$P_{Gen}(t) = \sum_1^n P_{Load}(t) + \sum_1^n P_{LineLosses}(t) \quad (2)$$

де  $n$  – кількість агентів (навантажень, ЛЕП), що входять в енерговузол.

Знаючи точне значення генерації, можна знайти мінімальне значення генерації для додаткового балансування за формулою:

$$P_{GenMin} = \min(P_{Gen}(t)) \quad (3)$$

Графіки розрахунку генерації показано на Рисунок 5 для двовузлового поділу, і на Рисунок 6 для тривузлового поділу.

Таблиця 3 – Порівняльна таблиця результатів розрахунку при виокремленні енерговузлів в мережі IEEE 14-bus system

|   | Без генерації        | 2 вузли               |                     | 3 вузли              |                     | 3 вузли без ЛЕП 1,2   |                     |
|---|----------------------|-----------------------|---------------------|----------------------|---------------------|-----------------------|---------------------|
|   |                      | Gen                   | Gen Min             | Gen                  | Gen Min             | Gen                   | Gen Min             |
| Надходження з мережі<br>$EG_{\Sigma}, GW$           | 1282.560<br>*103.36% | 22.161<br>*1.79 %     | 647.232<br>*52.16 % | -27,637<br>*-2.23 %  | 667,577<br>*53.8 %  | -2,681<br>*-0.22 %    | 678,893<br>*54.71 % |
| Сумарні втрати в ЛЕП<br>$P_{\Sigma b}, GW$          | 41.747<br>*3.36%     | 19.586<br>*1.58 %     | 24.188<br>*1.95 %   | 14,110<br>*1.14 %    | 17,345<br>*1.4 %    | 13,984<br>*1.13 %     | 17,538<br>*1.41 %   |
| Сумарна генерація<br>$P_{\Sigma gen}, GW$           | 0<br>*0 %            | 1282.560<br>*103.36 % | 617.767<br>*49.79 % | 1282,56<br>*103.36 % | 617,767<br>*49,79 % | 1257,478<br>*101.34 % | 579,457<br>*46.7 %  |
| Сумарне споживання<br>$P_{\Sigma gen}, GW$          | 1240.812             |                       |                     |                      |                     |                       |                     |
| Сумарні втрати трансформаторів<br>$P_{\Sigma b}, W$ | 3.19 E-7<br>*0 %     | 4.27 E-7<br>*0 %      | 7.60 E-7<br>*0 %    | 4,77 E-7<br>*0 %     | -4,51 E-7<br>*0%    | 1,05 E-7<br>*0 %      | -1,84 E-7<br>*0 %   |
| Максимальне завантаження ліній 1/2,<br>%            | 151.8                | 39.4                  | 95.6                | 33,2                 | 99,8                | 30,3                  | 101                 |
| Максимальне завантаження в лініях 3<br>- 15, %      | 60.3                 | 56                    | 59.4                | 36                   | 42,5                | 35,9                  | 42,6                |

\* значення в відсотках відносно величини сумарного споживання

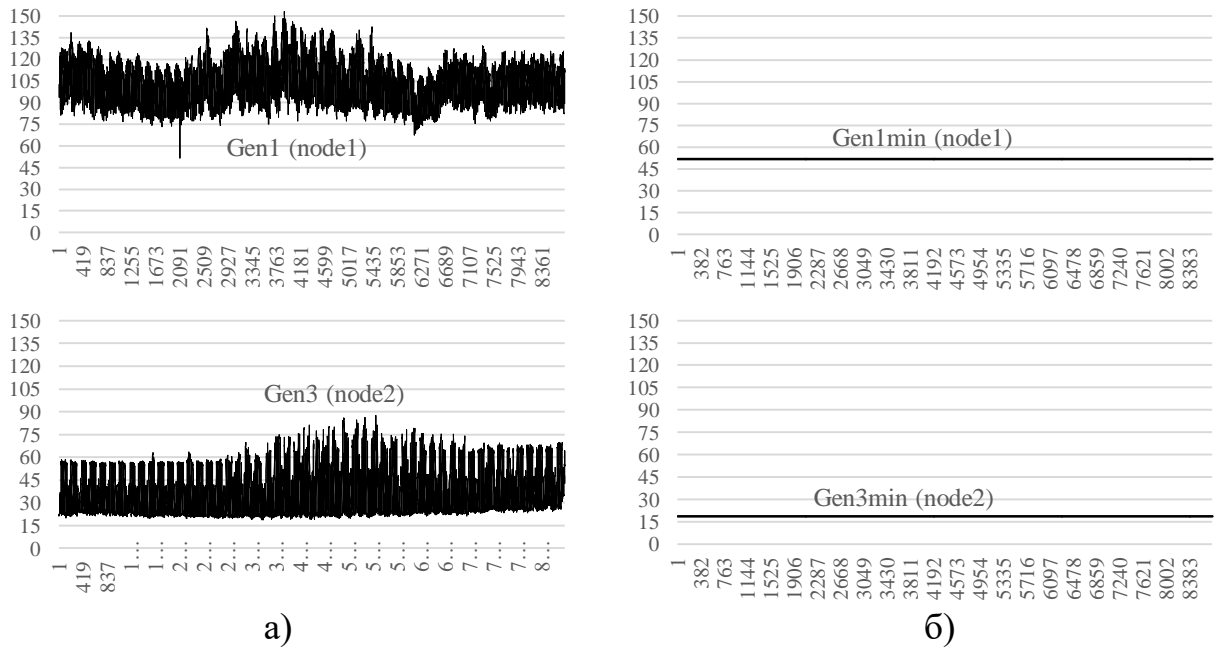


Рисунок 5 – Генерація двовузлової мережі: а) точна, б) мінімальна

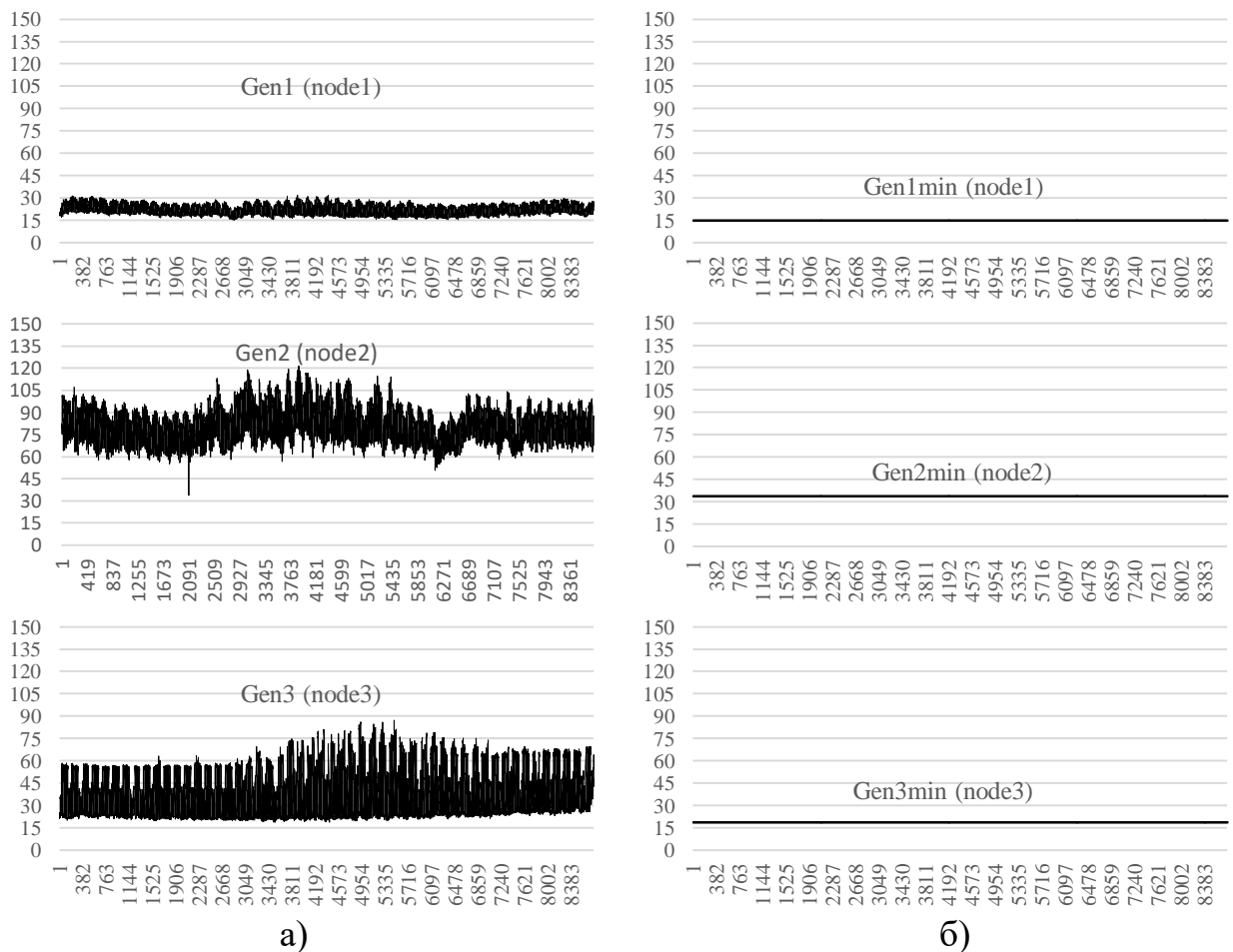


Рисунок 6 – Генерація тривузлової мережі: а) точна, б) мінімальна

Результат моделювання показав, що виділення енерговузлів з метою підтримки балансу потужності в них є виправданим. Починаючи з першого поділу

на два енерговузли, зменшилось завантаження ліній зв'язку з енергосистемою на 112,4 %, відносно початкового перевантаження лінії в 151,8 %. І навіть, якщо моделювати режим наявної мінімальної потужності генерації, то ця лінія починає працювати в нормальному режимі без перевантаження як це відбувається в режимі надходження всієї енергії з енергосистеми. Далі можна бачити, що деталізація, додаткове зменшення масштабу енерговузлів дає більш точні результати, при яких починає спостерігатися майже точний баланс в виділеній енергосистемі – ЛЕП працюють з меншими перетоками потужності, тобто в більш легких умовах.

Окрім цього цікавим є дослідження сталої роботи такої мережі у випадку аварійного відключенні ЛЕП. Досліджено мережу при поділі на два енерговузли, в якому циклічно відключається повністю одна з ЛЕП – моделюються всі режими роботи, лінія вмикається знову і виконується перехід до наступної ітерації циклу. В якості результату, для оцінки надійності в Таблиця 5 наведені дані завантаження ЛЕП в досліді відключення з генерацією та для порівняння в Таблиця 4 – завантаження ЛЕП при відключенні, коли вся енергія надходить з енергомережі. Для зручності сприйняття до таблиць застосовано ефект хітмапи.

Таблиця 4 – Завантаження ЛЕП при почерговому відключенні, коли енергія поступає з енергосистеми

|        | Line1 | Line2 | Line3 | Line4 | Line5 | Line6 | Line7 | Line8 | Line9 | Line10 | Line11 | Line12 | Line13 | Line14 | Line15 |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Line1  | 0%    | 154%  | 44%   | 18%   | 28%   | 42%   | 102%  | 12%   | 8%    | 20%    | 10%    | 10%    | 9%     | 3%     | 9%     |
| Line2  | 149%  | 0%    | 68%   | 62%   | 57%   | 23%   | 30%   | 10%   | 8%    | 19%    | 10%    | 10%    | 7%     | 3%     | 8%     |
| Line3  | 88%   | 64%   | 0%    | 70%   | 51%   | 91%   | 85%   | 11%   | 8%    | 19%    | 10%    | 10%    | 8%     | 3%     | 9%     |
| Line4  | 85%   | 63%   | 71%   | 0%    | 52%   | 20%   | 80%   | 12%   | 8%    | 20%    | 10%    | 10%    | 8%     | 3%     | 9%     |
| Line5  | 85%   | 63%   | 66%   | 58%   | 0%    | 24%   | 34%   | 10%   | 8%    | 19%    | 10%    | 10%    | 7%     | 3%     | 8%     |
| Line6  | 102%  | 48%   | 85%   | 39%   | 29%   | 0%    | 44%   | 10%   | 8%    | 19%    | 11%    | 11%    | 7%     | 3%     | 8%     |
| Line7  | 112%  | 37%   | 71%   | 69%   | 14%   | 20%   | 0%    | 18%   | 9%    | 22%    | 13%    | 9%     | 15%    | 4%     | 12%    |
| Line8  | 96%   | 50%   | 60%   | 44%   | 32%   | 28%   | 55%   | 0%    | 9%    | 22%    | 14%    | 10%    | 4%     | 3%     | 11%    |
| Line9  | 96%   | 51%   | 60%   | 44%   | 33%   | 28%   | 51%   | 11%   | 0%    | 26%    | 10%    | 11%    | 8%     | 6%     | 7%     |
| Line10 | 97%   | 51%   | 60%   | 44%   | 32%   | 28%   | 53%   | 13%   | 20%   | 0%     | 9%     | 17%    | 10%    | 14%    | 6%     |
| Line11 | 96%   | 51%   | 59%   | 44%   | 33%   | 28%   | 52%   | 14%   | 8%    | 18%    | 0%     | 12%    | 11%    | 3%     | 9%     |
| Line12 | 152%  | 66%   | 60%   | 45%   | 34%   | 27%   | 51%   | 5%    | 10%   | 26%    | 15%    | 0%     | 7%     | 5%     | 16%    |
| Line13 | 96%   | 50%   | 60%   | 44%   | 32%   | 28%   | 54%   | 4%    | 8%    | 21%    | 10%    | 10%    | 0%     | 3%     | 10%    |
| Line14 | 96%   | 51%   | 59%   | 44%   | 33%   | 28%   | 50%   | 10%   | 6%    | 20%    | 10%    | 11%    | 7%     | 0%     | 8%     |
| Line15 | 96%   | 51%   | 60%   | 44%   | 32%   | 28%   | 53%   | 14%   | 6%    | 13%    | 10%    | 16%    | 11%    | 2%     | 0%     |

Таблиця 5 – Завантаження ЛЕП при почерговому відключенні з генереацією при розбитті мережі на два нереговузли

|        | Line1 | Line2 | Line3 | Line4 | Line5 | Line6 | Line7 | Line8 | Line9 | Line10 | Line11 | Line12 | Line13 | Line14 | Line15 |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Line1  | 0%    | 40%   | 64%   | 50%   | 46%   | 24%   | 26%   | 21%   | 9%    | 24%    | 13%    | 9%     | 18%    | 4%     | 15%    |
| Line2  | 31%   | 0%    | 58%   | 38%   | 30%   | 27%   | 40%   | 22%   | 9%    | 25%    | 14%    | 9%     | 19%    | 4%     | 15%    |
| Line3  | 48%   | 28%   | 0%    | 62%   | 44%   | 90%   | 76%   | 23%   | 9%    | 25%    | 15%    | 9%     | 20%    | 4%     | 16%    |
| Line4  | 45%   | 25%   | 65%   | 0%    | 38%   | 22%   | 68%   | 23%   | 9%    | 25%    | 15%    | 9%     | 20%    | 4%     | 16%    |
| Line5  | 44%   | 25%   | 61%   | 43%   | 0%    | 25%   | 33%   | 22%   | 9%    | 24%    | 14%    | 9%     | 19%    | 4%     | 15%    |
| Line6  | 34%   | 15%   | 85%   | 25%   | 16%   | 0%    | 37%   | 22%   | 9%    | 24%    | 14%    | 9%     | 19%    | 4%     | 15%    |
| Line7  | 30%   | 14%   | 67%   | 57%   | 10%   | 21%   | 0%    | 29%   | 10%   | 28%    | 21%    | 10%    | 26%    | 5%     | 19%    |
| Line8  | 37%   | 18%   | 57%   | 34%   | 23%   | 29%   | 58%   | 0%    | 11%   | 31%    | 14%    | 14%    | 4%     | 6%     | 24%    |
| Line9  | 37%   | 18%   | 56%   | 33%   | 23%   | 29%   | 47%   | 23%   | 0%    | 33%    | 15%    | 10%    | 20%    | 6%     | 14%    |
| Line10 | 37%   | 18%   | 56%   | 34%   | 23%   | 29%   | 50%   | 27%   | 25%   | 0%     | 18%    | 16%    | 24%    | 19%    | 8%     |
| Line11 | 37%   | 17%   | 56%   | 34%   | 23%   | 29%   | 52%   | 14%   | 10%   | 27%    | 0%     | 11%    | 11%    | 5%     | 19%    |
| Line12 | 40%   | 17%   | 56%   | 34%   | 24%   | 30%   | 46%   | 22%   | 10%   | 26%    | 15%    | 0%     | 19%    | 5%     | 16%    |
| Line13 | 37%   | 17%   | 57%   | 34%   | 23%   | 29%   | 56%   | 4%    | 10%   | 30%    | 10%    | 13%    | 0%     | 5%     | 22%    |
| Line14 | 37%   | 18%   | 56%   | 33%   | 23%   | 29%   | 46%   | 22%   | 6%    | 27%    | 14%    | 9%     | 19%    | 0%     | 15%    |
| Line15 | 37%   | 18%   | 56%   | 34%   | 23%   | 29%   | 53%   | 29%   | 6%    | 13%    | 21%    | 16%    | 27%    | 2%     | 0%     |

**Висновок.** Дослідження показали, що для моделювання роботи енерговузлів можна користуватися мінімально достатньою, верифікованою моделлю IEEE 14–bus system, так як вона має різні класи напруг і достатньо розгалужену мережу. Для комп'ютерного моделювання доступним і зручним є інструмент pandapower, що при перевірці продемонстрував високу точність розрахунків з похибкою в 0,13 %.

З дослідження видно, що чим більше глибина розбиття енергосистеми, чим детальніша децентралізація, тим менше можна досягти втрат в мережі і меншу завантаженість обладнання. Це дає додаткові переваги в вигляді розширення можливостей наявної інфраструктури – з'являється запас потужності, яку можна передавати по лініям. Також це впливає на стійкість енергосистеми в цілому, що показало дослідження з аварійним почерговим відключенням ЛЕП. З'являється можливість впровадження в енерговузли відновлювальних джерел енергії, а також накопичувачів, саме на це спрямований подальший розвиток дослідження децентралізації енергосистем.

**БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК:**

1. Лазуренко О.П. та ін. Аналіз еволюції поняття «Споживачі електричної енергії» в сучасній енергетиці // Енергозбереження Енергетика Енергоаудит, 2025. № 3 (206). С. 49–58.
2. Davoudi M., Barmayoon M.H., Moeini-Aghtaie M. Multi-objective optimal planning of a residential energy hub based on multi-objective particle swarm optimization algorithm // IET Gener. Transm. Distrib, 2023. Т. 17. № 10. pp. 2435–2448.
3. Moradi M., Akbari Foroud A. Decentralized Energy Hub Management in Networked Microgrids With Bi-Directional Energy Trading: An RO-IGDT Approach // IET Gener. Transm. Distrib, 2025. Т. 19. № 1. pp. e70085.
4. Глосарій Укренерго. Термін: енерговузол [Електронний ресурс] // НЕК «Укренерго». URL: <https://ua.energy/glossary/energovuzol/>.
5. Ron de Graaf. Energy hubs: a solution to grid congestion on the path to net zero [Електронний ресурс] // Haskoning. 2024. URL: <https://www.haskoning.com/en/newsroom/blogs/2024/energy-hubs-a-solution-to-grid-congestion-and-the-path-to-net-zero>.
6. Ivakhnov A. та ін. Concept of Energy Hubs as a Base for Decentralization of the Power Grid // Systems, Decision and Control in Energy VII: Volume II: Power Engineering and Environmental Safety / под ред. Babak V., Zaporozhets A. Cham: Springer Nature Switzerland, 2025. pp. 93–127.
7. Rich C. Power Systems Test Case Archive. 14-bus Power Flow Test Case [Електронний ресурс]. 1962. URL: [https://labs.ece.uw.edu/pstca/pf14/pg\\_tca14bus.htm](https://labs.ece.uw.edu/pstca/pf14/pg_tca14bus.htm).
8. IEEE 14-bus System Simulink Model [Електронний ресурс], 2025. URL: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/46067-ieee-14-bus-system-simulink-model>.
9. IEEE 14-bus Test Case DIGSILENT PowerFactory: Prof. F. Gonzalez-Longatt [Електронний ресурс]. URL: [https://www.fglongatt.org/Test\\_Systems/IEEE\\_14bus\\_PF.html](https://www.fglongatt.org/Test_Systems/IEEE_14bus_PF.html).
10. IEEE 14-bus System [Електронний ресурс]. URL: <https://www.pscad.com/knowledge-base/article/26>.
11. Pandapower Power System Test Cases [Електронний ресурс] // pandapower. URL: [https://pandapower.readthedocs.io/en/latest/networks/power\\_system\\_test\\_cases.html#case-14](https://pandapower.readthedocs.io/en/latest/networks/power_system_test_cases.html#case-14).
12. Thurner L. and others. Pandapower-An Open-Source Python Tool for Convenient Modeling, Analysis, and Optimization of Electric Power Systems // IEEE Trans. Power Syst, 2017. Т. PP.
13. Find Open Datasets and Machine Learning Projects | Kaggle [Електронний ресурс]. URL: <https://www.kaggle.com/datasets>.
14. REopt | NREL [Електронний ресурс]. URL: <https://www.nrel.gov/reopt/>.

**REFERENCES:**

1. Lazurenko O. etc. Analysis of the evolution of the concept of "electricity consumers" in modern energy sector // Energy, Electronics and Electromechanics, 2025. № 3 (206). pp. 49–58.
2. Davoudi M., Barmayoon M.H., Moeini-Aghtaie M. Multi-objective optimal planning of a residential energy hub based on multi-objective particle swarm optimization algorithm // IET Gener. Transm. Distrib, 2023. Т. 17. № 10. pp. 2435–2448.
3. Moradi M., Akbari Foroud A. Decentralized Energy Hub Management in Networked Microgrids With Bi-Directional Energy Trading: An RO-IGDT Approach // IET Gener. Transm. Distrib, 2025. Т. 19. № 1. pp. e70085.
4. Glossary of Ukrenergo. Term: energouzol [Electronic resource] // NPC "Ukrenergo". URL: <https://ua.energy/glossary/energovuzol/>.
5. Ron de Graaf. Energy hubs: a solution to grid congestion on the path to net zero [Електронний ресурс] // Haskoning. 2024. URL: <https://www.haskoning.com/en/newsroom/blogs/2024/energy-hubs-a-solution-to-grid-congestion-and-the-path-to-net-zero>.
6. Ivakhnov A. etc. Concept of Energy Hubs as a Base for Decentralization of the Power Grid // Systems, Decision and Control in Energy VII: Volume II: Power Engineering and Environmental Safety / под ред. Babak V., Zaporozhets A. Cham: Springer Nature Switzerland, 2025. pp. 93–127.

7. Rich C. Power Systems Test Case Archive. 14-bus Power Flow Test Case [Electronic resource]. 1962. URL: [https://labs.ece.uw.edu/pstca/pf14/pg\\_tca14bus.htm](https://labs.ece.uw.edu/pstca/pf14/pg_tca14bus.htm).
8. IEEE 14-bus System Simulink Model [Electronic resource], 2025. URL: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/46067-ieee-14-bus-system-simulink-model>.
9. IEEE 14-bus Test Case DIgSILENT PowerFactory : Prof. F. Gonzalez-Longatt [Електронний ресурс]. URL: [https://www.fglongatt.org/Test\\_Systems/IEEE\\_14bus\\_PF.html](https://www.fglongatt.org/Test_Systems/IEEE_14bus_PF.html).
10. IEEE 14-bus System [Electronic resource]. URL: <https://www.pscad.com/knowledge-base/article/26>.
11. pandapower Power System Test Cases [Electronic resource] // pandapower. URL: [https://pandapower.readthedocs.io/en/latest/networks/power\\_system\\_test\\_cases.html#case-14](https://pandapower.readthedocs.io/en/latest/networks/power_system_test_cases.html#case-14).
12. Thurner L. etc. Pandapower-An Open-Source Python Tool for Convenient Modeling, Analysis, and Optimization of Electric Power Systems // IEEE Trans. Power Syst, 2017. Т. PP.
13. Find Open Datasets and Machine Learning Projects | Kaggle [Electronic resource]. URL: <https://www.kaggle.com/datasets>.
14. REopt | NREL [Електронний ресурс]. URL: <https://www.nrel.gov/reopt/>.

*Стаття надійшла до редакції: 18.07.2025; рецензування: 28.07.2025; прийнята до публікації 02.08.2025. Автори прочитали и дали згоду рукопису. The article was submitted on 18.07.2025; revised on 28.07.2025; and accepted for publication on 02.08.2025. The authors read and approved the final version of the manuscript.*