

# РОЗРАХУНОК ЧАСТКОВИХ ПОХІДНИХ $\partial \Delta P / \partial Q$ МЕТОДОМ ТРИВІАЛЬНИХ РАДІУСІВ З УРАХУВАННЯМ ПОПЕРЕЧНИХ ПРОВІДНОСТЕЙ ТА КОЕФІЦІЄНТІВ ТРАНСФОРМАЦІЇ

Банін Д.Б., доц., к.т.н., Роздоба М.Ю., магістрант

КПІ імені Ігоря Сікорського, кафедра автоматизації енергосистем

**Вступ.** Розрахунок режимної характеристики – економічного еквіваленту реактивної потужності (ЕЕРП) є важливою задачею при вирішенні ряду технологічних і економічних питань в електроенергетиці [1]. Чисельно ЕЕРП дорівнює частковій похідній сумарних втрат активної потужності по реактивній потужності (РП) конкретного вузла розрахункової схеми. Еквівалент задіяний для оптимізації втрат і застосовується в чинних методиках щодо стимулювання споживачів до компенсації РП в своїх навантаженнях. Найпростішим елементом схем є тривіальний радіус, що складається з однієї гілки та двох вузлів - опорного по напрузі, та вузла з невідомим ЕЕРП.

**Мета роботи.** Ціллю даної роботи є розробка еталонної точної форми ЕЕРП в тривіальних радіусах з врахуванням поперечних провідностей ліній, трансформаторів і шунтуючих реакторів, а також дослідження рівня похибок при розрахунках ЕЕРП в розімкнених розподільчих мережах 110/35/10 кВ, методом декомпозиції на сукупність тривіальних радіусів [2].

**Матеріали і результати досліджень.** Вихідна і розрахункова форми тривіальних радіусів та кінцева модель представлені на рис. 1.

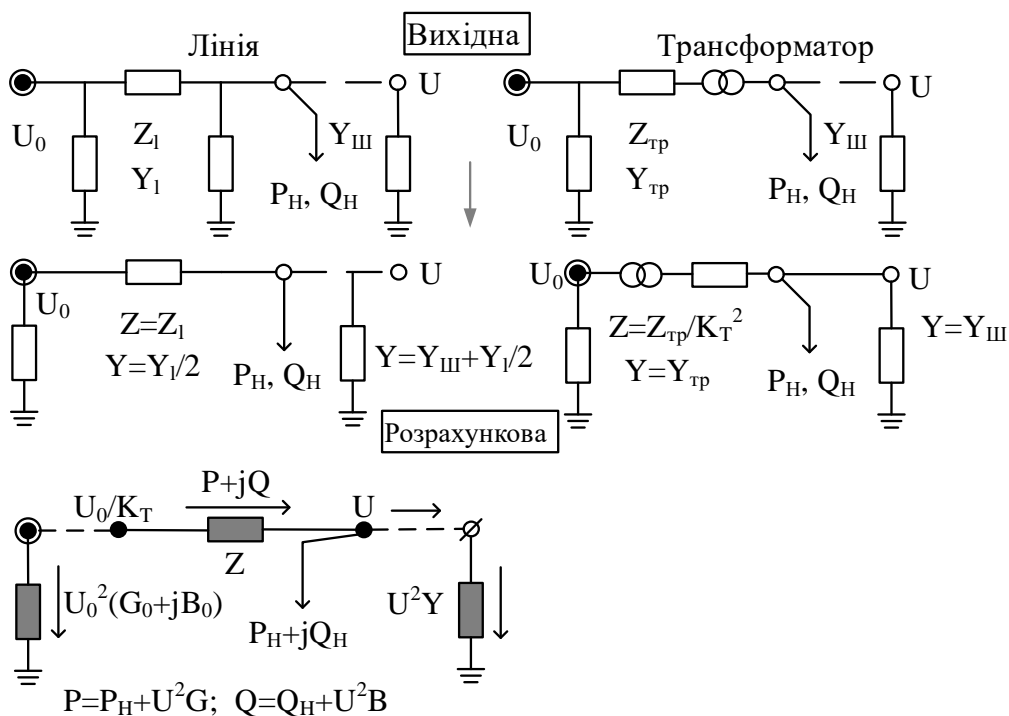


Рисунок 1 – Моделі тривіального радіусу з врахуванням поперечної провідності ліній і трансформаторів

Прийняті наступні позначення параметрів та характеристик:

$Z_1, Y_1, Z_{TP}, Y_{TP}, Y_{Ш}$  – опори та провідності ліній трансформаторів і шунтів;

$K_T, Z, Y(G, B)$  – коефіцієнт тр-ра та приведені значення опорів і провідностей

$U_0, U, P_H, Q_H, P, Q$  – напруги опорного вузла та вузла з невідомим ЕЕРП, потужності навантаження або генерації та потік потужності у радіусі.

Для виводу часткової похідної втрат від реактивної потужності використовуємо повну формулу для розрахунку активних втрат і рівняння стану режиму для елементарного радіуса.

$$\Delta P = (P^2 + Q^2) \cdot R / U^2 + U^2 G + U_0^2 G_0 - \text{Втрати}$$

$$U = U_0 / k_T - Z \hat{S}_H / \hat{U} + U \hat{Y} - \text{Рівняння режиму}$$

Оскільки необхідно обчислити похідну по реактивній потужності вузла  $Q_H$ , розкриємо вираз втрат:

$$\Delta P = [(P_H + U^2 G)^2 + (Q_H + U^2 B)^2] \cdot R / U^2 + U^2 G + U_0^2 G_0.$$

Загальний вираз повної похідної для складної функції  $\Delta P = f(Q, U)$  є функцією трьох складових – часткових похідних:

$$\partial \Delta P / \partial Q_H = \partial \Delta P / \partial Q_H + (\partial \Delta P / \partial U) \cdot (\partial U / \partial Q_H).$$

Розрахуємо значення часткової похідної  $\partial \Delta P / \partial Q_H$  :

$$\partial \Delta P / \partial Q_H = \partial [(Q_H^2 + 2Q_H U^2 B + U^4 B^2) / U^2 \cdot R] / \partial Q_H = 2Q_H R / U^2 + 2BR.$$

Тут з рівняння (3) виключились втрати від активної поперечної провідності (G). Друга складова потребує перетворень:

$$\partial \Delta P / \partial U = \partial [P_H^2 / U^2 \cdot R + 2P_H G R + U^2 G^2 R + Q_H / U^2 \cdot R + 2Q_H B R + U^2 B^2 R + U^2 G] / \partial U = \partial [-2P_H^2 / U^3 \cdot R + 2UG^2 R - 2Q_H^2 / U^3 \cdot R + 2UB^2 R + 2UG].$$

Якщо позначити навантажувальні втрати  $\Delta P_H = (P_H^2 + Q_H^2) R / U^2$  отримаємо кінцевий вираз для другої складової:

$$\partial \Delta P / \partial U = -2\Delta P_H / U + 2UR(G^2 + B^2) + 2UG.$$

Для розрахунку третьої складової  $\partial U / \partial Q$  скористаємося рівняннями стану режиму, попередньо помноживши обидві частини цього рівняння на

спряжений комплекс напруги  $\hat{U}$ . Розпишемо результат в комплексних складових:

$$U^2 = U_0 / k_T (U' - jU'') - (R + jX)(P_H + jQ_H) - U^2(R + jX)(G - B).$$

$$U^2 = U_0 U' / k - jU_0 U'' / k - RP_H - XQ_H - jXP_H + jRQ_H - U^2(RG + XB) - jU^2(XG - RB).$$

Виділивши дійсну та уявну частини, отримаємо систему з двох рівнянь:

$$\begin{cases} U^2(1 + RG + XB) = U_0 / k \cdot \sqrt{U^2 - U''^2} - RP_H - XQ_H \\ U^2(XG + RB) = -U_0 / k \cdot U'' - XP_H - RQ_H \end{cases}.$$

Для зручності, позначимо  $(1 + RG + XB) = V$ ,  $(XG + RB) = W$ , і отримаємо більш компактний запис:

$$\begin{cases} U^2V = U_0 / k \cdot \sqrt{U^2 - U''^2} - RP_H - XQ_H \\ U^2W = -U_0 / k \cdot U'' - XP_H - RQ_H \end{cases}.$$

З другого рівняння цієї системи визначимо складову  $U''$ :

$$U'' = (RQ_H - XP_H) / (U_0 / k) - U^2W / (U_0 / k).$$

Підставивши значення  $U''$  у перше рівняння маємо вираз з модулем напруги:

$$U^2V = (U_0 / k) \cdot \sqrt{U^2 - [(RQ_H - XP_H) - U^2W]^2 / (U_0 / k)^2} - (RP + XQ).$$

Виконавши перенос складової  $(RP + XQ)$  в праву частину рівняння і звівши в квадрат обидві його частини, отримаємо:

$$\begin{aligned} [U^2V + (RP + XQ)]^2 &= \left[ \sqrt{U^2(U_0 / k)^2 - [(RQ_H - XP_H) - U^2W]^2} \right]^2 \\ &= U^4V^2 + 2U^2U^4RP_H + 2U^2VXQ_H + R^2P_H^2 + 2RP_HXQ_H + X^2Q_H^2 = \\ &= U^2(U_0 / k)^2 - R^2Q_H^2 + 2RQ_HXP_H - X^2P_H^2 + 2U^2WRQ_H - 2U^2WXP_H - U^4W^2. \end{aligned}$$

Позначивши нев'язку правої та лівої частини рівняння через  $F$  і, об'єднавши аналогічні вирази, отримаємо рівняння для подальшого диференціювання:

$$F = U^4(V^2 + W^2) + 2U^2[V(RP_H + XQ_H) + W(XP_H - RQ_H)] - U^2(U_0/k)^2 + Z^2P_H^2 + Z^2Q_H^2.$$

Вираз (4) є неявною функцією F(Q,U). Використаємо математичну форму:

$$\partial U / \partial Q = (-\partial F / \partial Q) / (\partial F / \partial U).$$

$$\partial F / \partial Q = 2U^2VX - 2U^2WR + 2Z^2Q_H = 2U^2(VX - WR) + 2Z^2Q_H.$$

$$\partial F / \partial U = 4U^3(V^2 + W^2) + 4U \cdot [V(RP_H + XQ_H) + W(XP_H - RQ_H)] - 2U(U_0/k)^2.$$

Кінцевий вираз для третьої складової  $\partial U / \partial Q$  має вигляд:

$$\partial U / \partial Q_H = \left[ -U^2(VX - WR) + Z^2Q_H \right] / U \left[ 2U^2(V^2 + W^2) + 2(V(RP_H + XQ_H) + W(XP_H - RQ_H)) - (U_0k)^2 \right].$$

В якості контрольного прикладу оберемо сукупність елементарних радіусів відповідно з шунтуючим реактором ( $Y_{III}$ ), потім з  $Y_{III}$  і лінією, де є провідність на землю ( $Y_1$ ) потім в наступних радіусах з'являється коефіцієнт трансформації ( $K_T$ ) і, нарешті, маємо радіус з  $Y_{III}$ ,  $Y_1$ ,  $K_T$  і напругою БП, яка менша напруги вузла радіусу з невідомим ЕЕРП. Всі вказані варіанти підготовлені в файлі TRAD1 в форматах UZL і VET. Результати представлені на рис. 2.

Розглянутий метод тривіальних радіусів в розрахунках часткових похідних  $\partial \Delta P / \partial Q$ , який порівняно простий і максимально швидкодіючий, пропонувався для ручних контрольних обчислень, а також при визначенні ЕЕРП в Методиці [4] для розімкнутих розподільчих мереж обленерго та їх філій. При цьому кожна гілка розрахункової схеми представлялася як елементарний радіус, а невідоме ЕЕРП фіксувалось як сума похідних  $\partial \Delta P / \partial Q$  по його трасі до балансуєчого вузла схеми, що аналогічно розрахункам падінь напруг. Для аналізу похибок цього методу обрана схема (рис. 3), де можливо виділити 5 автономних радіусів (100-1, 1-2 ... 2-5). Відзначимо, що у вузлі 5 встановлена генерація реактивної потужності шляхом задавання ємнісної поперечної провідності ( $B = -500$  [мкСім]). Для кожного радіуса розрахована похідна  $\partial \Delta P / \partial Q$  і визначений ЕЕРП згідно дослідженого методу (RAD), наприклад:

- вузол1: ЕЕРП (RAD) = 0.0334 = 0.0334;
- вузол2: ЕЕРП (RAD) = 0.0334 + 0.0185 = 0.0519;
- вузол3: ЕЕРП (RAD) = 0.0334 + 0.0185 + 0.0071 = 0.0590, і т.д.

На малюнку також наведені живлячі потоки радіусів, їх навантаження та результат ЕЕРП (REZ), отриманий методом чисельного диференціювання з

високою точністю розрахункового режиму. Незважаючи на дотримання балансів потужностей в опорних вузлах радіусів маємо значні похибки ЕЕРП (8.7%, 12.2%, 13.4% ...).

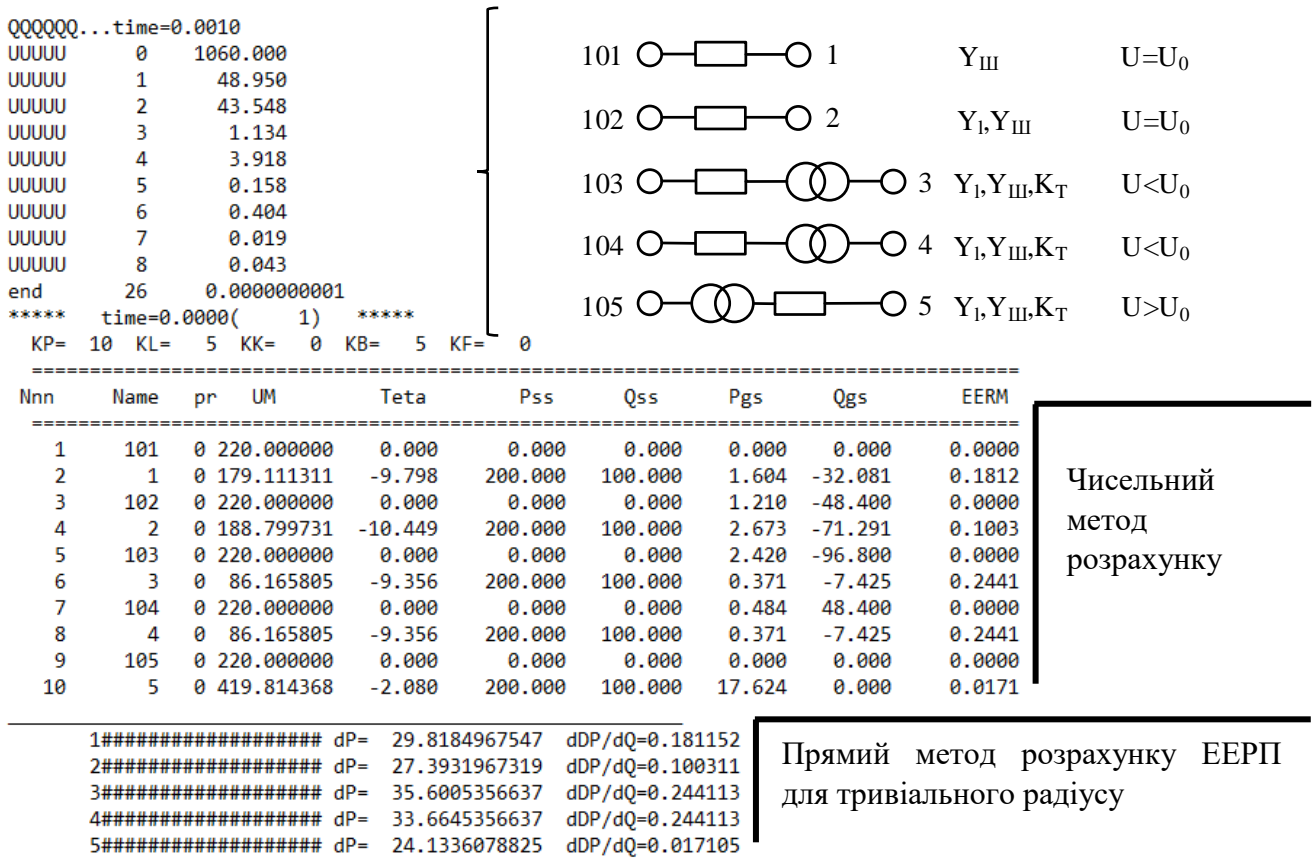


Рисунок 2 – Результати роботи комплексу Z\_REGIM по схемі TRAD1 з розрахунком ЕЕРП прямим і чисельним методами диференціювання

Таким чином, розглянутий метод не може бути рекомендований для економічних розрахунків, наприклад, ЕЕРП при обчисленні плати споживачам за перетікання реактивної потужності.

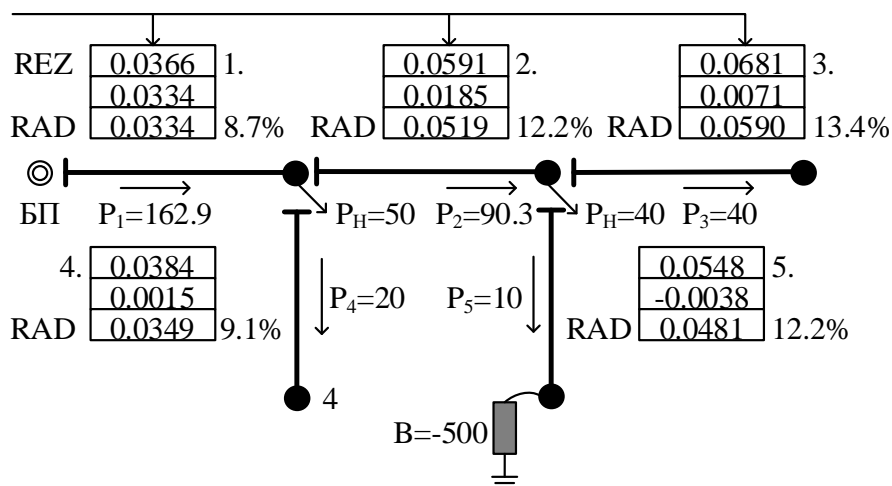


Рисунок 3 – Аналіз похибок методу тривіальних радіусів, при розрахунку розімкнених розподільчих мереж

**Висновки.** Розроблена точна пряма форма розрахунку ЕЕРП для елементарних схем – тривіальних радіусів. Відпрацьована технологія розрахунку похідних  $\partial \Delta P / \partial Q$  з урахуванням ліній, трансформаторів та поперечних провідностей. Виконаний аналіз похибок розрахунку ЕЕРП для розімкнених розподільчих мереж методом декомпозиції на сукупність тривіальних радіусів. Метод може бути задіяний для орієнтовних контрольних розрахунків.

#### Перелік посилань

1. Алгоритмізація та програмування електроенергетичних задач. Моделі, методи, алгоритми і програми для промислових комп'ютерних комплексів [Електронне видання]: навч. посіб. / Д. Б. Банін, М. Д. Банін, А. В. Гнатівський. – К.: НТУУ "КПІ", 2016. – 104 с.
2. Банін Д. Б. Економічні еквіваленти реактивної потужності. Математичний та чисельний аналіз. / Банін Д. Б., Яндутьський О.С., Банін М.Д. – Промелектро. – 2004. -№1. – с. 22-23.
3. Банін Д. Б. Технологічні умови впровадження та використання методики розрахунків плати за перетоки реактивної електроенергії між енергопостачальною організацією, та її споживачами / Ю.В. Щербина, Д.Б. Банін, А.Д. Голота. – К.: НТУУ «КПІ», 1999. – 122 с.
4. Методика розрахунків плати за перегікання реактивної електроенергії між електропостачальною організацією та її споживачами / Алімов О.М., Арбузов Е.Л., Банін Д.Б. та ін. // Офіційний вісник України, - 2002. – №6.