

УДК 621.317.38

М.І. ГрибокНаціональний університет “Львівська політехніка”
кафедра “Інформаційно-вимірювальна техніка”**МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ АКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ
ЗМІЩЕННЯМ СИСТЕМИ КООРДИНАТ**

© Грибок М.І., 2003

Досліджена можливість вимірювання активної потужності зміщенням системи координат. Подано синтез схем вимірювання.**Active power measurement possibility is investigated by the coordinate axis displacement. Such synthesis methodology and it's scheme realization are shown.****1. Вступ**

Враховуючи з функції кривих струму та напруги в однофазному електричному колі

$$i(t) = \sum_L \sqrt{2} I_L \sin(L\omega t - \beta_L),$$

$$u(t) = \sum_k \sqrt{2} U_k \sin(k\omega t - \alpha_k),$$

одержуємо вирази потужності активної P , реактивної Q та спотворень D

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) i(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \sum_L U_k I_L \cos(\beta_L - \alpha_k),$$

$$Q = \sum_{k=L \in G} U_k I_L \sin(\beta_L - \alpha_k),$$

$$D = \sqrt{\sum_{K \neq L} [U_K^2 \cdot I_L^2 + U_L^2 I_K^2 - 2U_K I_L \cos(\varphi_L - \varphi_K)]},$$

де G – множина еквівалентних гармонік напруги $u(t)$ і струму $i(t)$, I_L , U_k – діючі значення гармонік струму і напруги; L , k – номери гармонік струму і напруги; β_L, α_k – кути фазових зсувів гармонік струму та напруги, $\varphi_L = \beta_L - \alpha_L$; $\varphi_k = \beta_k - \alpha_k$

Повна потужність

$$S = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u_k^2(t) dt} \cdot \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_L^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{K \in N} U_K^2} \cdot \sqrt{\sum_{L \in N} I_L^2} = U_D I_D.$$

Фіктивна потужність

$$P_f^2 = Q^2 + D^2 = S^2 - P^2.$$

Взаємозв'язок S , P , Q і D

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 = P^2 + P_f^2.$$

Повна потужність $\vec{S}$ є векторною величиною і в тривимірному векторному просторі подана на рис. 1.

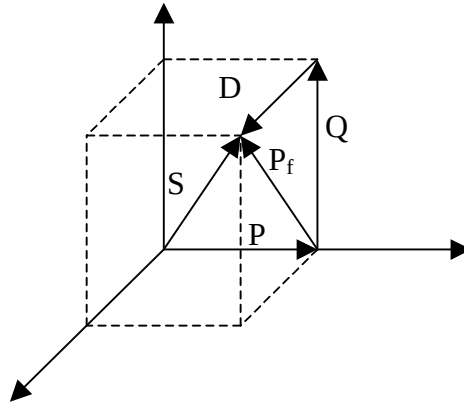


Рис. 1. Повна потужність S та її складові P , Q , D в тривимірному векторному просторі

Більшість методів вимірювання активної потужності основана на реалізації скалярного добутку напруг $k_U u(t)$ і $k_i i(t)$, де k_U , k_i – коефіцієнти передачі перетворювачів напруги та струму, відповідно [1]. Для одержання напруги пропорційної струму, послідовно з опором навантаження $\dot{Z}$ вмикається опір R_0 . При цьому для зменшення впливу R_0 на енергетичні процеси в колі вибираємо $R_0 \ll |\dot{Z}|$. Тоді принципово напруга $i(t)R_0$ і напруга $u(t)$ на опорі $\dot{Z}$ значно відрізняються між собою. А тому значно відрізняються між собою коефіцієнти k_U , k_i . А це утруднює збереження рівності фазочастотних характеристик перетворювачів напруги та струму в діапазоні частот.

Оскільки похибка перемноження сучасних аналогових перемножувачів зростає із зменшенням напруги по їх входах, то значення k_U і k_i із зміною $u(t)$ і $i(t)$, як правило, змінюється в $\sqrt{10}$ разів, що ускладнює процедуру представлення результатів вимірювання. Тому пошук нових методів вимірювання активної потужності є актуальним. Мало дослідженим в цьому плані є метод зміщення системи координат застосовно до вимірювання потужності.

2. Вимірювання активної потужності методом зміщення системи координат

З метою проведення більш повних викладок матеріалу розглянемо послідовне з'єднання (рис. 2) активного R_0 та довільного комплексного опору $\dot{Z}$.

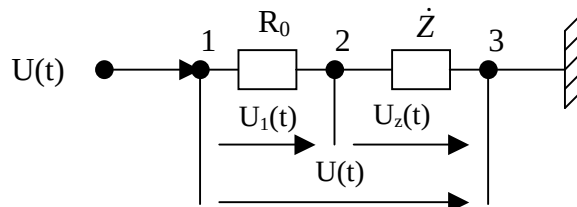


Рис. 2. Послідовне з'єднання активного R_0 та довільного комплексного опору $\dot{Z}$

Струм в послідовно з'єднаних R_0 і $\dot{Z}$:

$$i(t) = \frac{U_1(t)}{R_0}.$$

Повна потужність в опорі $\dot{Z}$ (точки 2–3) :

$$S^2 = U_{zd}^2 I_d^2 = \left[\frac{1}{T} \int_0^T U_z^2(t) dt \right] \left[\frac{1}{T} \int_0^T \frac{U_1^2(t) dt}{R_0^2} \right] = \frac{U_{zd}^2 * U_{d1}^2}{R_0^2} = P^2 + Q^2 + D^2 .$$

Повна потужність між точками 1 – 3:

$$\begin{aligned} S_1^2 = U_{zd}^2 I_d^2 &= \left[\frac{1}{T} \int_0^T U^2(t) dt \right] \left[\frac{1}{T} \int_0^T \frac{U_1^2(t) dt}{R_0^2} \right] = \left[\frac{1}{T} \int_0^T [U_1(t) + U_z(t)]^2 dt \right] \left[\frac{1}{T} \int_0^T \frac{U_1^2(t) dt}{R_0^2} \right] = \\ &= \left[\frac{1}{T} \int_0^T [U_1^2(t) + U_z^2(t) + 2U_1(t)U_z(t)] dt \right] \left[\frac{1}{T} \int_0^T \frac{U_1^2(t) dt}{R_0^2} \right] = \left[U_{d1}^2 + U_{dz}^2 + \frac{1}{T} \int_0^T 2U_1(t)U_z(t) dt \right] \frac{U_{d1}^2}{R_0^2} = \\ &= \left[\frac{U_{d1}^2}{R_0} + \frac{U_{dz}^2}{R_0} + 2P \right] \frac{U_{d1}^2}{R_0} = (P + P_0)^2 + Q^2 + D^2 , \end{aligned}$$

It $\frac{1}{T} \int_0^T 2U_1(t)U_z(t)/R_0 dt = 2P$ \$ U_L U_{L1}\$ U_{L2} – діючі значення напруг $U(t)$, $U_1(t)$, $U_z(t)$, відповідно

$\frac{U_{d1}^2}{R_0} = P_0$ – потужність, яка виділяється в зразковому активному опорі R_0 .

Знаходимо різницю квадратів модулів:

$$S_1^2 - S^2 = 2PP_0 + P_0^2 = \frac{U_{d1}^4}{R_0^2} + \frac{U_{dz}^2 * U_{d1}^2}{R_0^2} + 2PP_0 - \frac{U_{dz}^2 * U_{d1}^2}{R_0^2} = P_0^2 + 2PP_0 .$$

Звідси значення активної потужності в колах з лінійним та нелінійним навантаженням визначається з виразу:

$$P = \frac{S_1^2 - S^2 - P_0^2}{2P_0} .$$

Після нескладних перетворень: $P = \frac{U_d^2 - U_{dz}^2 - U_{d1}^2}{2R_0}$. Одержаний вираз збігається з [2, 3,4].

3. Синтез схем вимірювання активної потужності на основі зміщення системи координат

Оскільки повна потужність $\dot{S}$ та її складові $\dot{P}$, $\dot{Q}$, $\dot{D}$ є векторними величинами, то для синтезу схем вимірювання активної потужності можна використати узагальнену методику синтезу методів вимірювання параметрів векторних величин із зміщенням системи координат [5...,8]. При цьому слід враховувати лише те, що при вимірюванні потужності та її складових векторними величинами є і напруги на зразковому R_0 та досліджуваному $\dot{Z}$ опорах. Особливістю вимірювання потужності є і те, що значення зразкового опору R_0 повинно бути набагато меншим від опору Z навантаження з метою якнайменшого впливу на реальні процеси у вимірювальному колі. З іншого боку, враховуючи аналіз похибок вимірювання параметрів векторних величин із зміною системи координат видно, що похибка вимірювання потужності:

$$\delta p = \left(\frac{p}{p_0} + \frac{p_0}{p} + 2 + \frac{p_f^2}{pp_0} \right) \delta s_2 + \left(\frac{p}{p_0} + \frac{p_f^2}{pp_0} \right) \delta s_1 + \left(1 + \frac{p_0}{2p} \right) \delta p_0$$

залежить від співвідношення складових P і P_0 , а також $\frac{P_f^2}{PP_0}$. Тому синтез методів та схем

будемо проводити з умови забезпечення мінімуму похибки. Для цього введемо ряд умовностей. Коефіцієнти передачі вольтметрів V_1, V_2, V_3 повинні бути однаковими і вхідні опори вольтметрів R_v значно більші R_0 і Z , тобто виконується умова $R_v \gg R_0, R_v \gg |Z|$.

Тому схему рис. 3, а можна використовувати лише у випадку, коли синфазна складова U_x напруги $\dot{U}_{23}$ і квадратурна складова U_y сумірні і напруга $U_{12} \approx U_x$ (рис. 3, б). Якщо відштовхуватись від параметрів потужності $\dot{S}_{23}$, то потрібно, щоб $P \approx P_f$ і $P \approx P_0$ (рис. 3, в). При виконанні вищевказаних умов схема рис. 3, а забезпечить мінімальну похибку вимірювання потужності P . Фіктивну потужність P_f можна знайти з виразу: $P_f = \sqrt{S_{23}^2 - P^2}$.

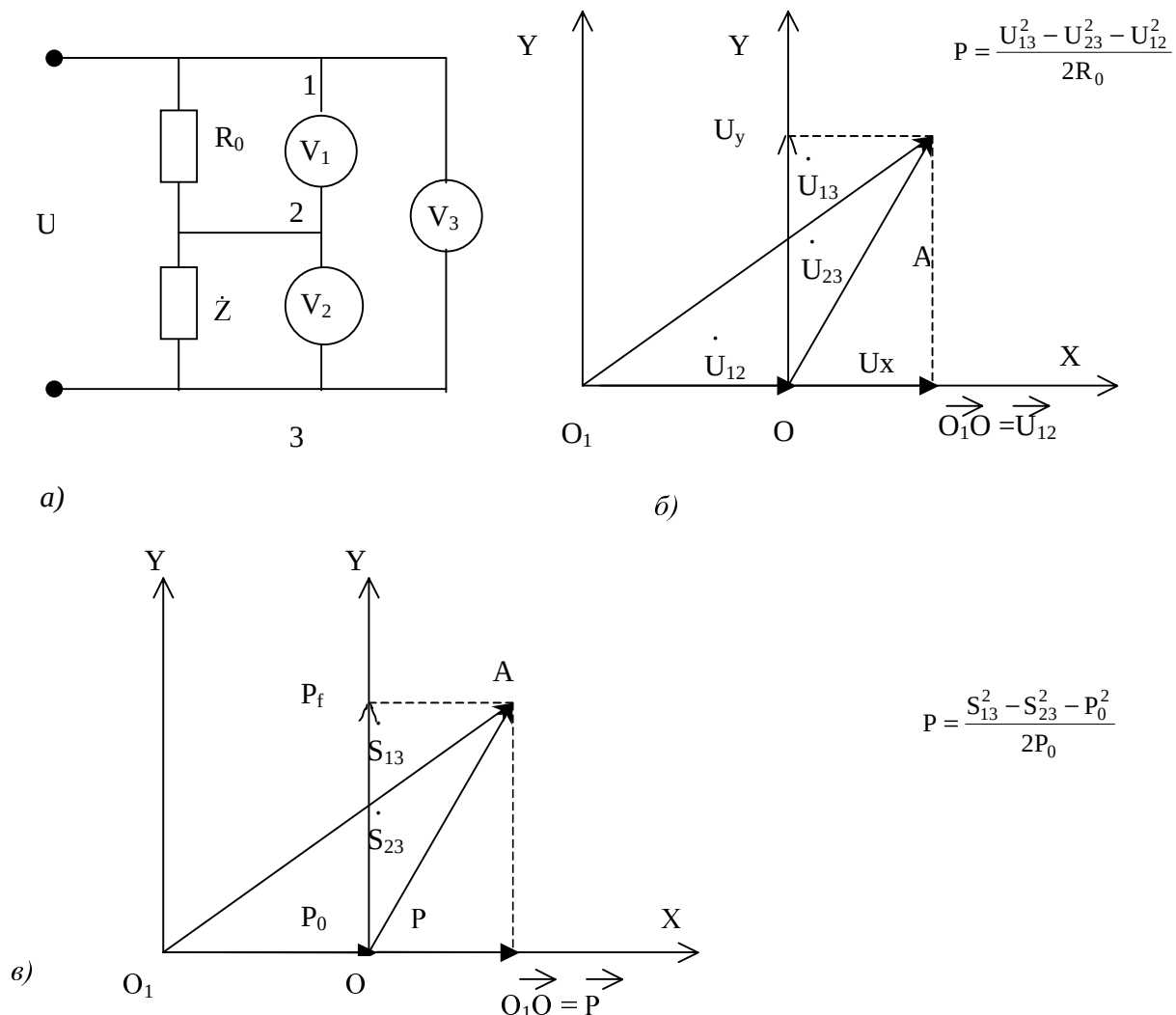


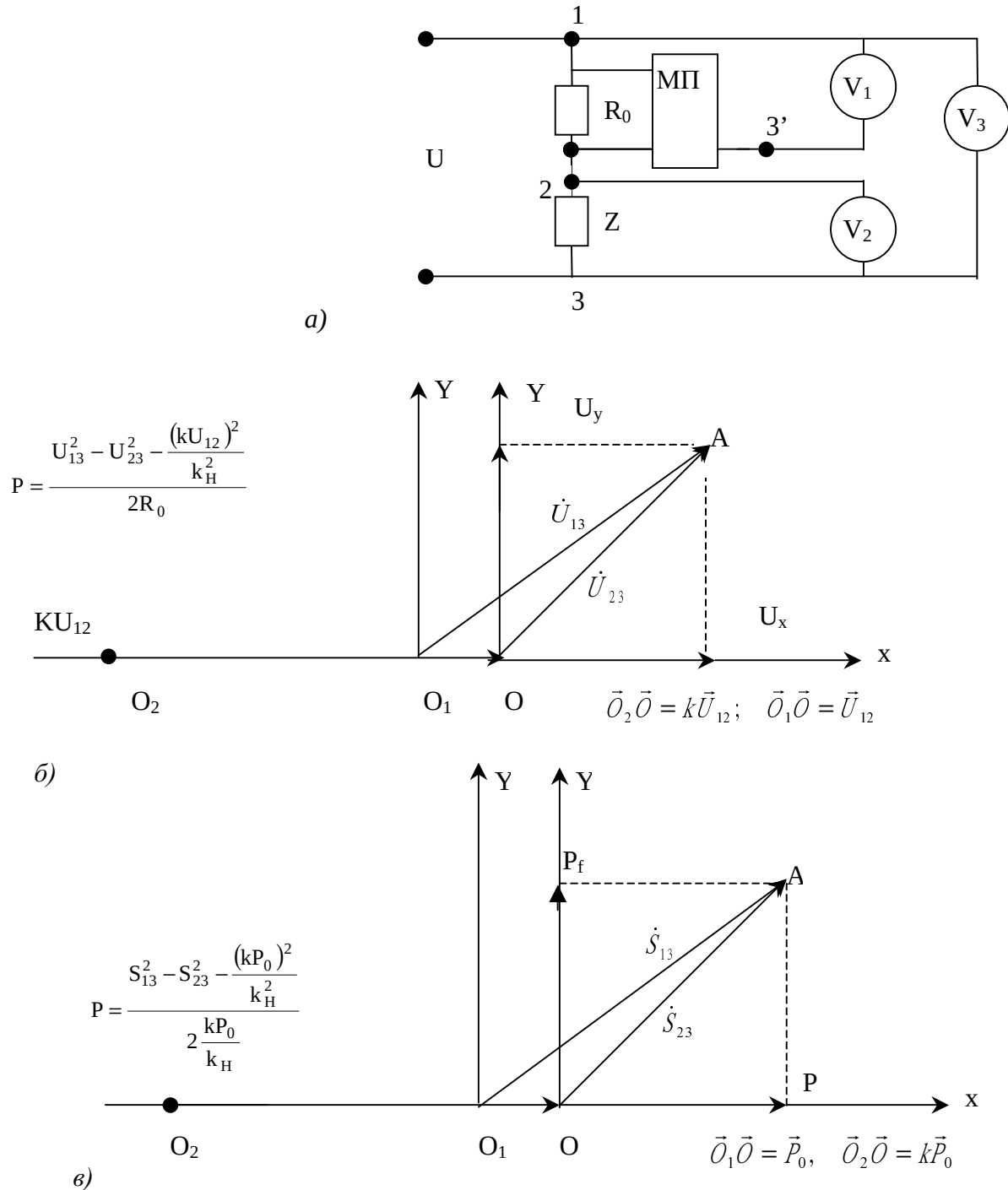
Рис. 3.

З метою зменшення впливу R_0 на енергетичні процеси у вимірювальному колі вибирають $R_0 \ll |Z|$. Однак при використанні схеми рис. 3, а різко зростають похибки вимірювання потужності. Частково цей недолік усунено в схемі рис. 4, а, в якій напруга U_{12} масштабується (підсилюється) масштабним перетворювачем МП в K разів. При цьому напруги $k\dot{U}_{12}, \dot{U}_{23}, \dot{U}_{13}$ сумірні і можуть вимірюватись вольтметрами V_1, V_2, V_3 однакової

розрядності. Масштабний перетворювач не повинен вносити додаткових фазових зсувів і повинен лише лінійно масштабувати вектор $\dot{U}_{12}$ (рис. 4, б).

Порівняно з напругою U_{12} похибка вимірювання напруги kU_{12} вольтметром V зменшиться, тобто зменшиться значення похибки δ_{p0} у виразі δ_p .

Однак в силу того, що напруга $U_{12} \ll U_x$ і $U_y \gg U_{12}$ (рис. 4, б), похибка вимірювання потужності буде велика. Це ж саме судження має місце з векторних діаграм рис. 4, в, де $P_0 \ll P$, $P_f \gg P_0$. (рис. 4, б). Вектори $\dot{U}_x \approx \dot{U}_y$, а також $\dot{U}_{13'} \approx \dot{U}_x$. Ця ж умова виходить і з векторних діаграм рис. 4, в, оскільки $kP_0 \approx P$, $P_f \approx P$.



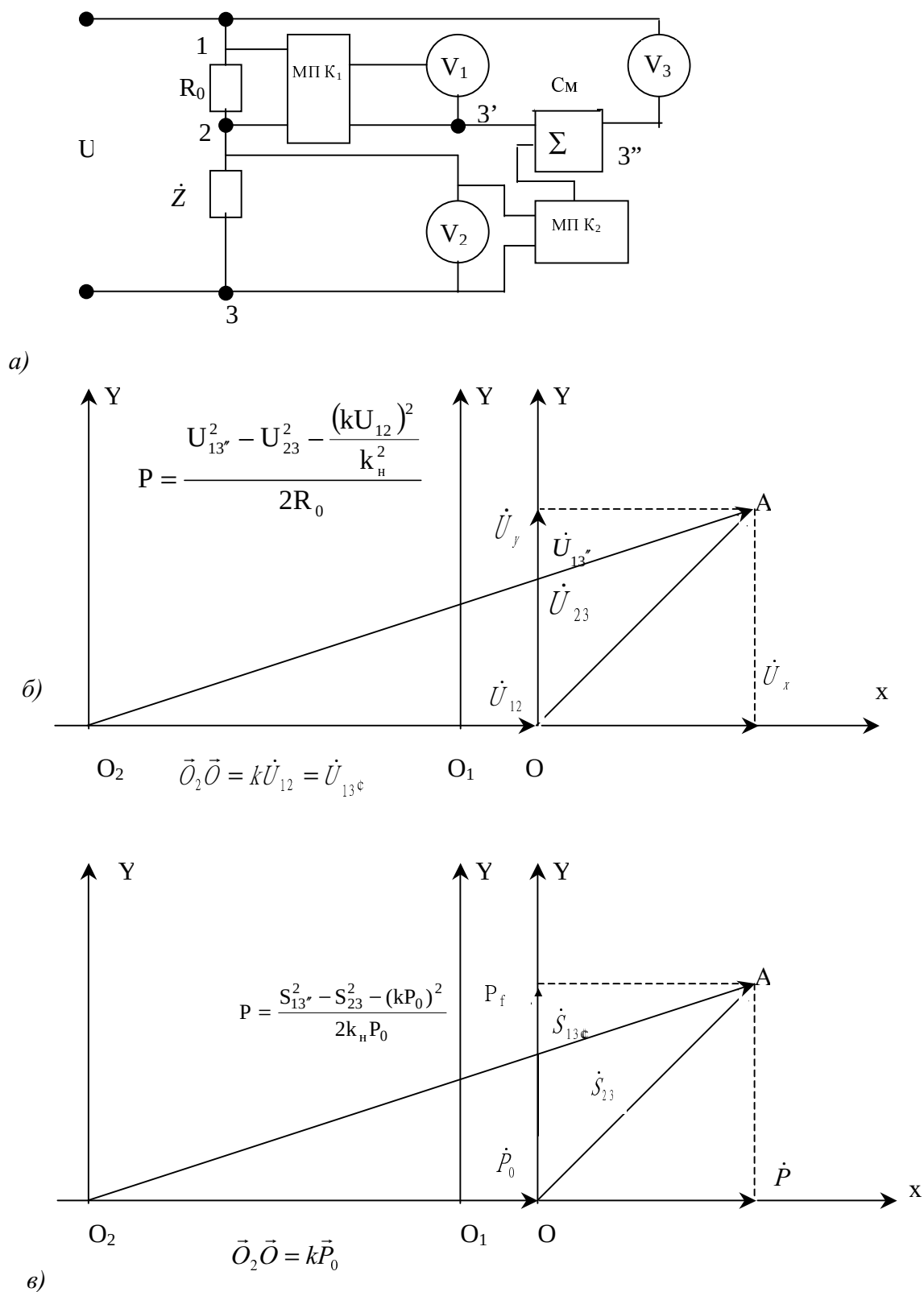
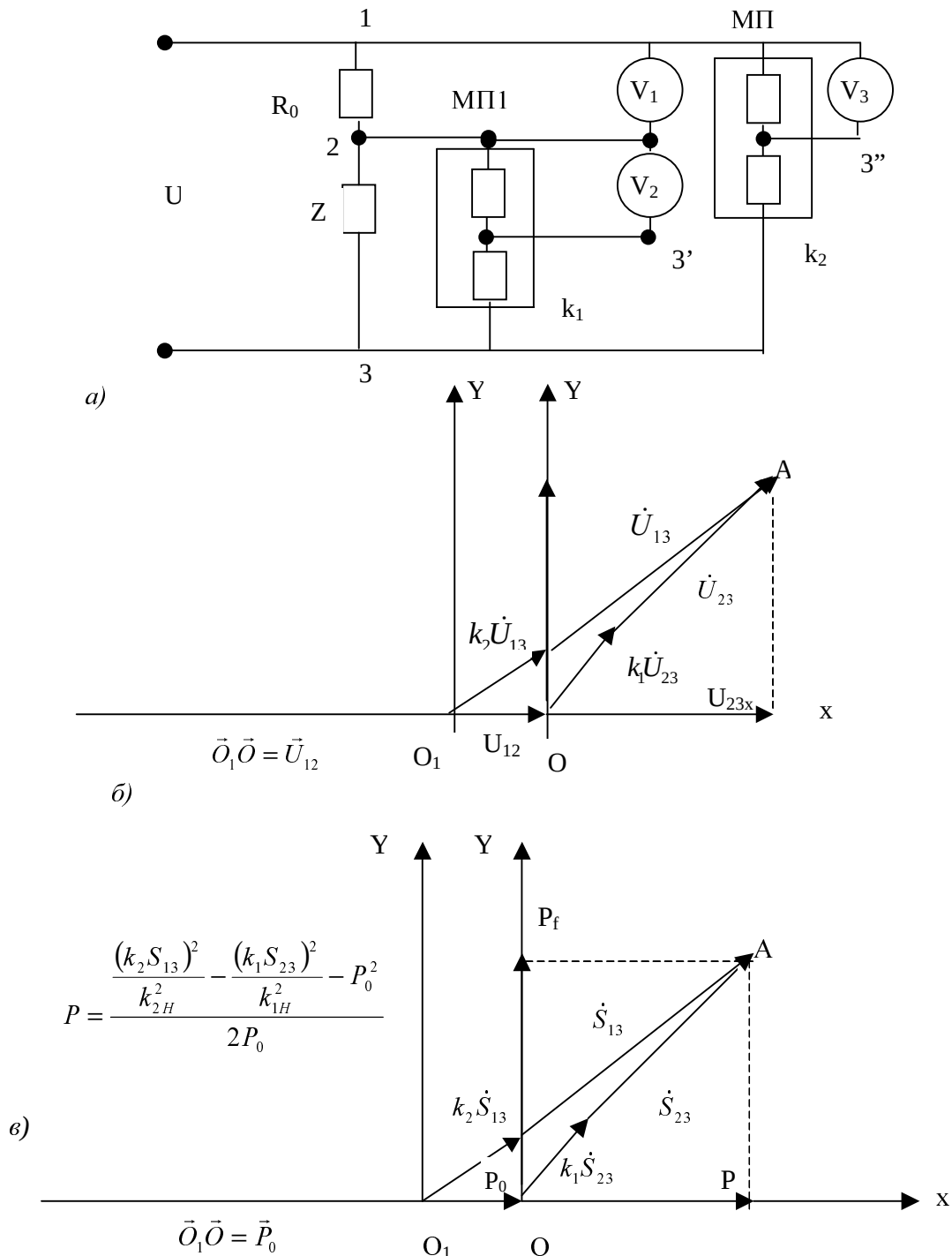


Рис. 5.

Алгебраїчне додавання векторів $\vec{U}_{13} + \vec{U}_{23} = \vec{U}_{13''}$ дало можливість різко зменшити похибку вимірювання потужності, оскільки компоненти $U_{13''}, U_x, U_y$ (рис. 5, б) стали

сумірними. Те ж саме торкається компонент kP_0 , P , P_f (рис. 5, в). Недоліком схеми рис. 5, а є необхідність використання як МПІ підсилювача напруги з малими фазовими зсувами в діапазоні частот. Тому схема рис. 6, а замість підсилювача МПІ містить подільник напруги $\dot{U}_{23}$ МПІ, оскільки в реальній практиці вимірювань $U_{23} \gg U_{12}$. Однак таке рішення не дає добрих метрологічних характеристик, оскільки в цій схемі $\dot{U}_{13} = \dot{U}_{12} + \dot{U}_{23}$, тобто здійснюється алгебраїчна сума масштабованих векторів. Через що $U_{12} \ll U_x$ (рис. 6, б), $P_0 \ll P$ (рис. 6, в) похибка вимірювання потужності буде велика.



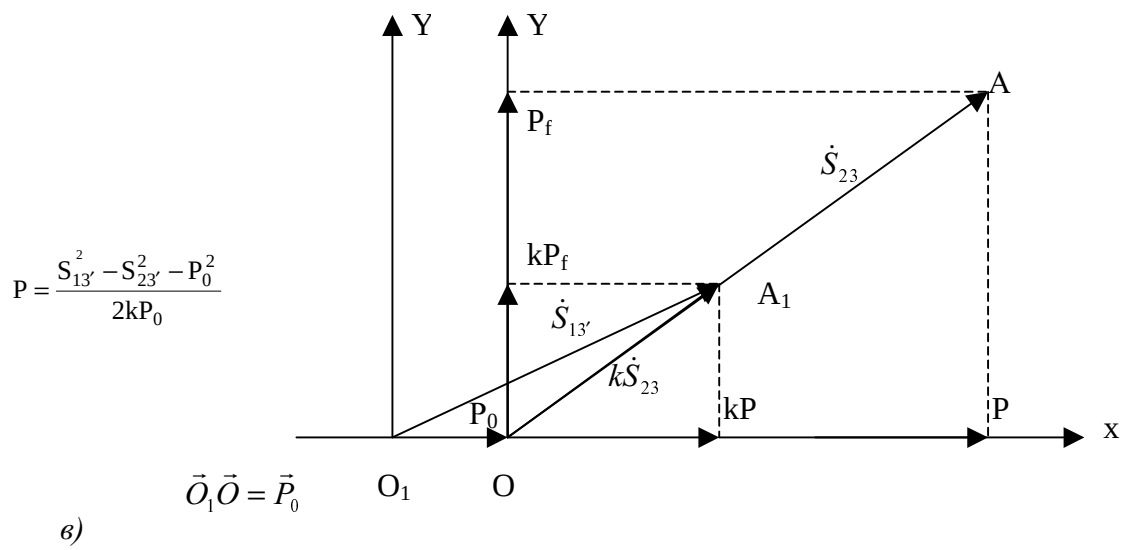
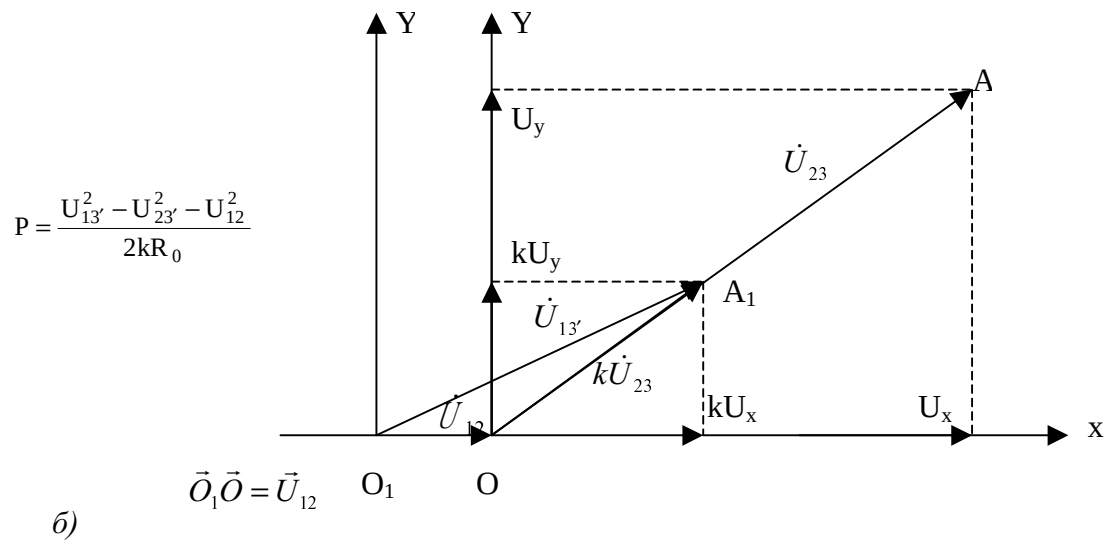
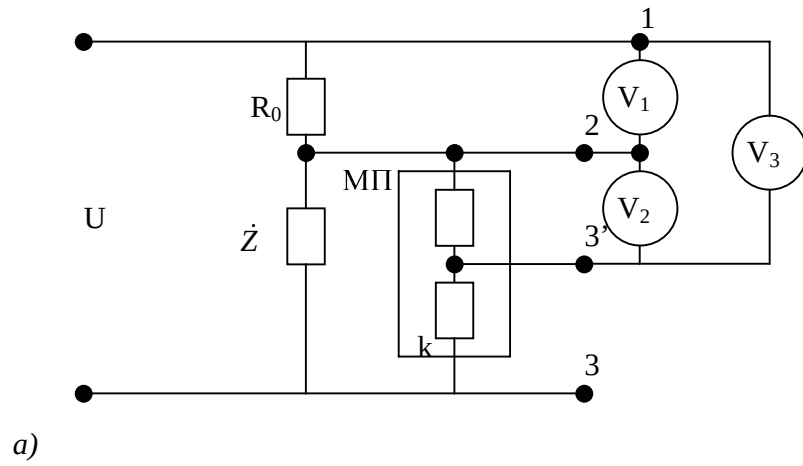


Рис. 7.

Найбільш оптимальною являється схема рис. 7, а. В ній масштабний перетворювач МП (подільник напруги) ввімкнено між точками 2–3. Відбувається множення вектора $\dot{U}_{23}$ (рис. 7, б) на скаляр k , в результаті чого одержуємо вектор $\dot{U}_{23'} = k\dot{U}_{23}$. В ньому компоненти $kU_x \approx U_{12}$, $kU_y \approx U_{12}$, що дає підставу здійснювати алгебраїчне додавання векторів

$$\dot{U}_{13'} = \dot{U}_{12} + k\dot{U}_{23}.$$

Ті ж судження можна зробити з рис. 7, в. Тут $P_0 \approx kP$; $P_0 \approx kP_f$, а

$$\begin{aligned} \dot{U}_{13'} &= \dot{U}_{12} + \dot{U}_{23'} \\ \dot{S}_{13'} &= \dot{P}_0 + \dot{S}_{23'} \end{aligned}$$

В інтелектуальних засобах вимірювань потужності вибір одного з синтезованих методів відбувається так. Спочатку проводиться грубе вимірювання P і P_f . Після якого, залежно від значень P і P_f і P_0 , вибирається метод, який забезпечує мінімальну похибку вимірювання P і P_f .

4. Висновки

Запропоновано нову методику синтезу схем вимірювання активної потужності зміщенням системи координат. Синтезовані схеми основані на вимірюванні квадрата діючих значень напруг і є наступним розвитком методології синтезу схем, відомих як схеми трьох вольтметрів [2, 3, 4].

1. Безикович А.Я., Шапиро Е.З. Измерение электрической мощности в звуковом диапазоне частот. –Л.: Энергия, 1980. 2. Marsetta L.A. An Evolution of As Power Measurement/ IEEE Trans. On Instr. And Meas. (1972)/ 11, p/323-357. 3. Kahman M., Stielner M. Ein Vorschlag für die genaue Messung der elektrischen Wirkleistung mit EffektivWert -Spannungs -Messern. „PTB-Mitteilungen“, 1989. – №6. – S.419–424. 4. Bojna I.; Jahn P.: Fehleranalyse der Leistungsmessung mittels der Dreivoltmeterverfahren. *Měžici technika*, 4 (1974)/ S.1–4. 5. Теоретичні основи та принципи проектування високоточних інтелектуальних мультиметрів системного застосування / Звіт про НДР, В.Ф.Ткаченко, Б.І.Стадник, М.І. Грибок та інші. № держ.реєстр. 0198И002407. Львів, 1998. 6. Грибок М. Алгоритмічні методи вимірювання параметрів скалярних величин. // Вимірювальна техніка та метрологія. – 2001. – № 58. 7. Грибок М. Інтелектуальні методи вимірювання параметрів векторних величин // Вісн. ДУ “Львівська політехніка”. – 2001. – №415. 8. А.с. №1155954 (СССР) Цифровой измеритель мощности. – Грибок Н.И., Лаврив В.Н., Савенко С.А. – Опубл. В Б.И., 1985. – №18.