

УДК 621.317.7

М. Й. Бурбело, д.т.н., проф.; В. І. Романовський, к.т.н, доц.

ВИМІРЮВАЛЬНИЙ КАНАЛ ДЛЯ УСТАНОВОК ДИНАМІЧНОЇ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

Запропоновано структурні схеми швидкодіючого вимірювального каналу для установок динамічної компенсації реактивної потужності, оснований на інтегруванні миттєвих потужностей на ковзному інтервалі часу тривалістю півперіоду напруги живлення з використанням затримки в часі одного з ортогональних складників миттєвої потужності.

Ключові слова: розподільні електричні мережі, якість електричної енергії, реактивна потужність, динамічна компенсація.

Вступ

Застосування установок динамічної компенсації реактивної потужності в електричних мережах забезпечує одночасну оптимізацію низки параметрів якості електроенергії (усталеного відхилення, коливання та несиметрії напруги) і вимагає вдосконалення їхнього інформаційного забезпечення. Особливо складним є створення швидкодіючих вимірювальних каналів параметрів, що характеризують несиметричність електричного трифазного навантаження. Зокрема це стосується вимірювальних каналів статичних тиристорних компенсаторів (СТК), статичних компенсаторів на базі інверторів напруги, призначених для динамічної компенсації реактивної потужності та симетрування струмів і напруг у вузлах приєднання, які вимагають здійснення регульовальних дій із затримкою в часі, що не перевищує половини періоду напруги живлення.

Обґрунтування результатів

Для аналізу несиметричних режимів трифазних електричних мереж напругою 6, 10, 35 кВ з ізольованою нейтраллю використовують комплексну повну потужність і умовну потужність зворотної послідовності

$$\underline{S} = 3 \left(\dot{U}_1 I_1^* + \dot{U}_2 I_2^* \right) = 1,5 \left(\dot{U}_\alpha I_\alpha^* + \dot{U}_\beta I_\beta^* \right); \quad (1)$$

$$\underline{S}_2 = 3 \left(\dot{U}_1 I_2^* + \dot{U}_2 I_1^* \right) = 1,5 \left(\dot{U}_\alpha I_\alpha^* - \dot{U}_\beta I_\beta^* \right), \quad (2)$$

де $\dot{U}_1, \dot{U}_2, I_1, I_2$ – комплексні напруги та комплексні спряжені струми відповідно прямої та зворотної послідовностей; $\dot{U}_\alpha, \dot{U}_\beta, I_\alpha, I_\beta$ – комплексні напруги та комплексні спряжені струми в ортогональній системі координат Кларка.

У [1, 2] розроблено алгоритми для отримання інформації про активний та реактивний складники повної потужності $\underline{S} = P + jQ$, а в [3 – 6] про дійсний та уявний складники умовної потужності зворотної послідовності $\underline{S}_2 = P_2 + jQ_2$, під час побудови яких використано підхід, що ґрунтується на інтегруванні добутку миттєвих напруг і струмів на ковзному інтервалі часу тривалістю півперіоду ($T/2$):

$$P(t) = \frac{3}{T} \int_{t-T/2}^t (u_\alpha i_\alpha + u_\beta i_\beta) dt; \quad Q(t) = \frac{3}{T} \int_{t-T/2}^t (u_\alpha i_\alpha - u_\beta i_\beta) dt; \quad (3)$$

$$P_2(t) = \frac{3}{T} \int_{t-T/2}^t (u_\alpha i_\alpha - u_\beta i_\beta) dt; \quad Q_2(t) = \frac{3}{T} \int_{t-T/2}^t (u_\alpha' i_\alpha - u_\beta' i_\beta) dt, \quad (4)$$

де u_α', u_β' – перетворення Гільберта ортогональних складників напруги.

Такий підхід відповідає теорії реактивної потужності С. Буденю.

Однак, як показано в [4, 5], перехідні характеристики вимірювального каналу для величин P_2, Q_2 , в основу реалізації якого покладено формули (4), мають значне перерегулювання, що негативно впливатиме на стійкість системи динамічної компенсації реактивної потужності. Для зменшення перерегулювання було запропоновано використання виразів [4]

$$P_2(t) = \frac{3}{T} \int_{t-T/2}^t (u_\alpha i_\alpha - u_\beta' i_\beta') dt; \quad Q_2(t) = \frac{3}{T} \int_{t-T/2}^t (u_\alpha' i_\alpha + u_\beta i_\beta') dt, \quad (5)$$

де i_β' – перетворення Гільберта ортогонального складника струму, застосування яких виключає перерегулювання системи динамічної компенсації реактивної потужності.

Недоліком вимірювального каналу є необхідність застосування трьох інтегровальних перетворювачів Гільберта, досить складних у реалізації [7].

Для отримання складників потужностей можна також використати наявний фазовий зсув 90 електричних градусів, який існує між ортогональними складниками трифазних напруги та струму [5]:

$$P(t) = \frac{3}{T} \int_{t-T/2}^t (p_\alpha(t) + p_\beta(t)) dt; \quad Q(t) = \frac{3}{T} \int_{t-T/2}^t (q_\alpha(t) - q_\beta(t)) dt; \quad (6)$$

$$P_2(t) = \frac{3}{T} \int_{t-T/2}^t (p_\alpha(t) - p_\beta(t)) dt; \quad Q_2(t) = \frac{3}{T} \int_{t-T/2}^t (q_\alpha(t) + q_\beta(t)) dt, \quad (7)$$

де $q_\alpha = u_\beta i_\alpha; q_\beta = u_\alpha i_\beta$ – ортогональні складники миттєвих реактивних потужностей.

Такий підхід відповідає теорії реактивної потужності С. Фріз. Він виключає необхідність використання інтегровального перетворення, що істотно спрощує реалізацію швидкодіючих вимірювальних каналів. У той же час перерегулювання для величин P_2, Q_2 буде значним [5].

З метою зменшення перерегулювання пропонуємо підхід, який полягає в застосуванні фазового зсуву на чверть періоду напруги живлення ($T/4$) сигналів, пропорційних ортогональним складникам миттєвих потужностей. Тоді замість (4) отримаємо

$$P_2(t) = \frac{3}{T} \int_{t-T/2}^t (p_\alpha(t) - p_\beta(t - T/4)) dt; \quad (8)$$

$$Q_2(t) = \frac{3}{T} \int_{t-T/2}^t (q'_\alpha(t) - q'_\beta(t - T/4)) dt,$$

а замість (7) отримаємо

$$P_2(t) = \frac{3}{T} \int_{t-T/2}^t (p_\alpha(t) - p_\beta(t - T/4)) dt; \quad (9)$$

$$Q_2(t) = \frac{3}{T} \int_{t-T/2}^t (q_\alpha(t) + q_\beta(t - T/4)) dt,$$

де $p_\alpha = u_\alpha i_\alpha; p_\beta = u_\beta i_\beta; q'_\alpha = u'_\alpha i_\alpha; q'_\beta = u'_\beta i_\beta$ – ортогональні складники миттєвих активних потужностей.

На рис. 1, а зображено залежності $p_\alpha(t), p_\beta(t), p_\beta(t - T/4), p(t), p_2(t)$, а на рис. 1, б –

$q_\alpha(t), q_\beta(t), q_\beta(t - T/4), q(t), q_2(t)$, отримані шляхом математичного моделювання відповідно до формул (6), (9). Аналогічні залежності отримуємо за формулами (3), (8). Основною особливістю залежностей $p_2(t), q'_2(t), q_2(t)$, які входять у підінтегральні вирази (8) і (9), що забезпечують відсутність перерегулювання під час перехідного процесу, є мала амплітуда їхніх коливань. Саме завдяки цій особливості забезпечується відсутність перерегулювання на виході інтегровальних пристроїв вимірювального каналу.

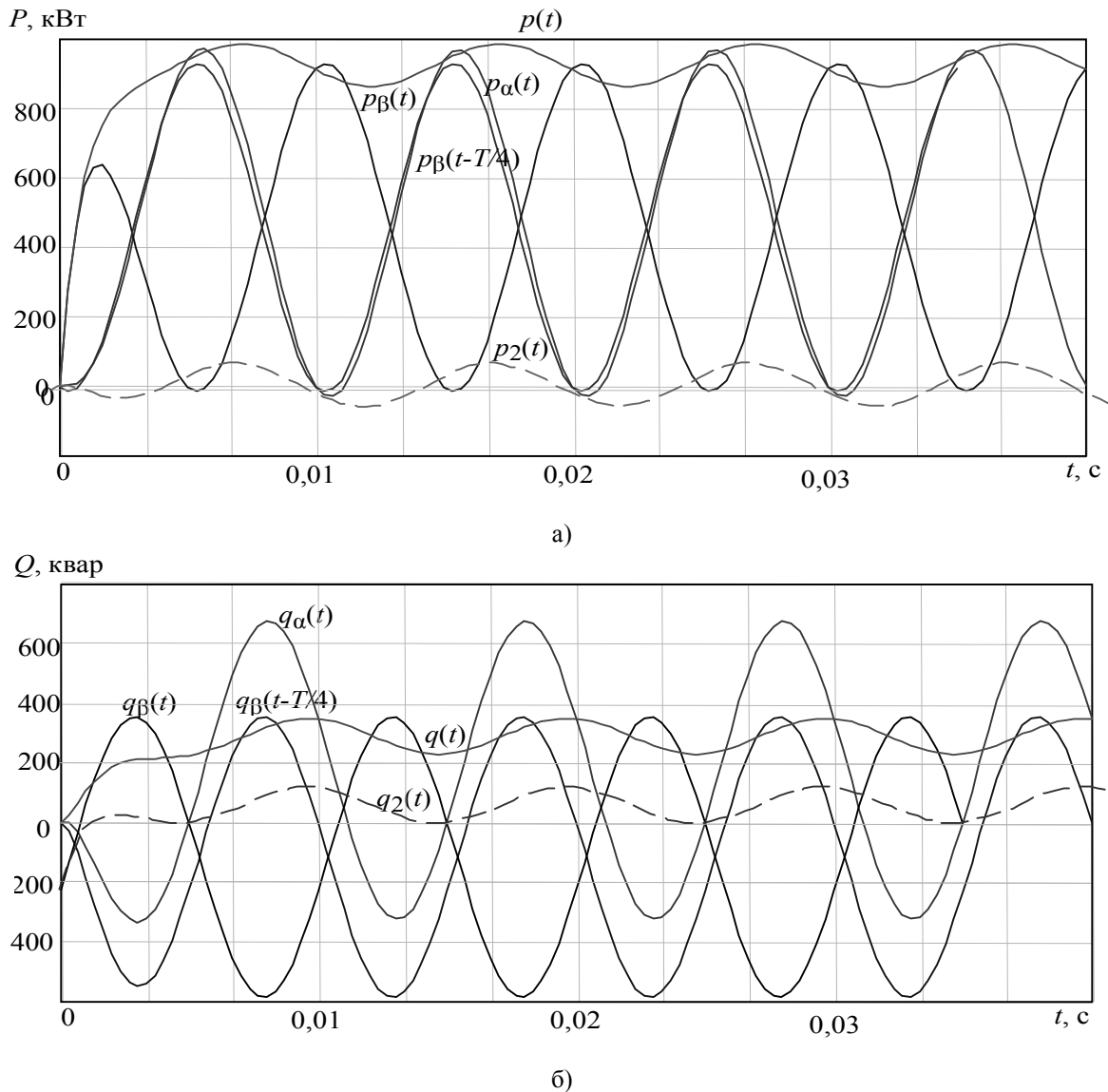


Рис. 1. Формування складників: а) $P(t), P_2(t)$; б) $Q(t), Q_2(t)$

На рис. 2, а зображено структурну схему вимірювального каналу, що реалізує алгоритм (8), який складається з трансформатора напруги $ТН$, трансформаторів струму $ТС$, масштабного перетворювача напруг $ПН$, масштабного перетворювача струмів у напруги $ПС$, перетворювачів потужності $ПП1, \dots, ПП4$, елементів затримки сигналів у часі $ЕЗ1$ та $ЕЗ2$, елемента ковзного інтегрування $ЕКІ$ (елементи затримки і ковзного інтегрування реалізують із використанням мікроконтролера). На структурній схемі вимірювального каналу (рис 2, б), що реалізує алгоритм (9), інтегратори відсутні.

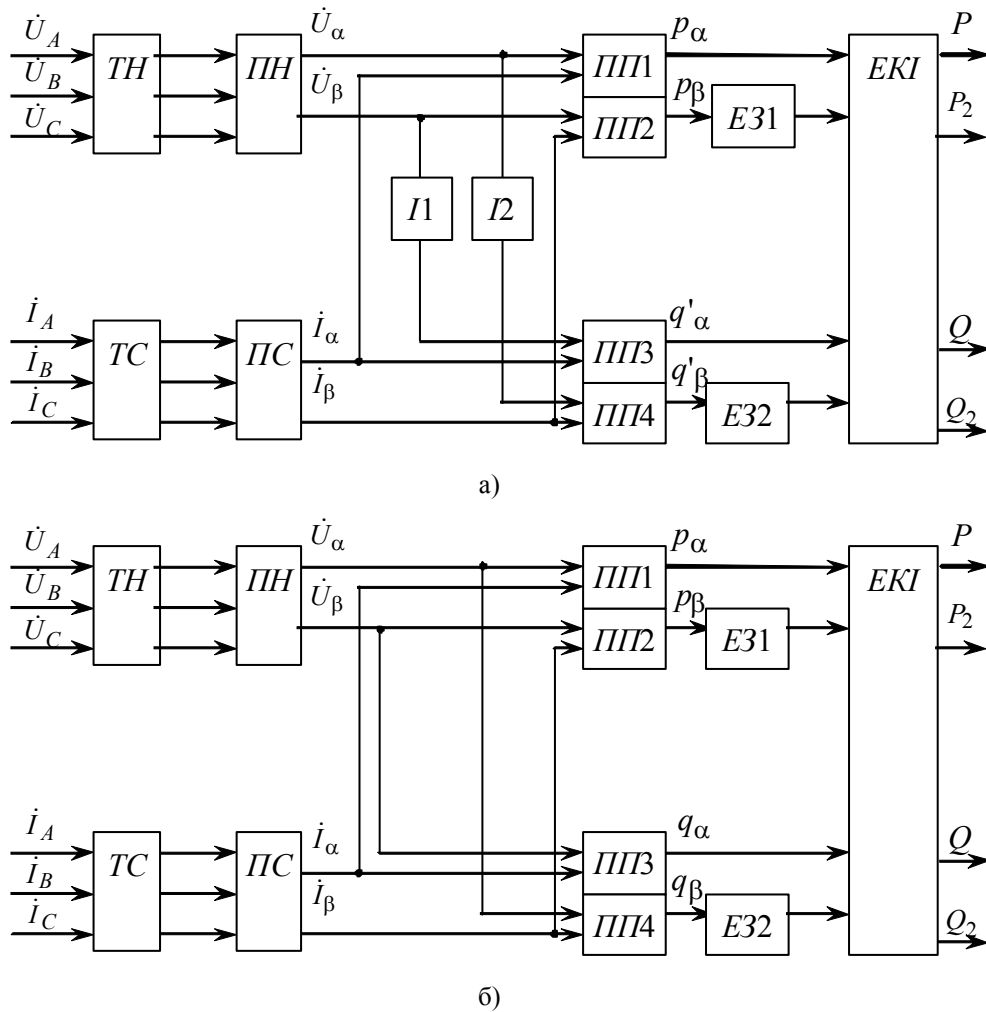


Рис. 2. Структурні схеми вимірювального каналу:
 а) із використанням алгоритму (8); б) із використанням алгоритму (9)

Дослідимо роботу вимірювального каналу в перехідних режимах, наприклад, під час увімкнення до мережі несиметричного навантаження. На рис. 3, а і б подано перехідні характеристики вимірювального каналу для величин P, Q та P_2, Q_2 під час увімкнення до мережі 10 кВ несиметричного навантаження $\underline{S} = P + jQ = 925 + j291$ кВ·А, $\underline{S}_2 = P_2 + jQ_2 = 13 + j59$ кВ·А. Як впливає з наведених залежностей, перерегулювання під час увімкнення навантаження по всіх виходах вимірювального каналу відсутнє.

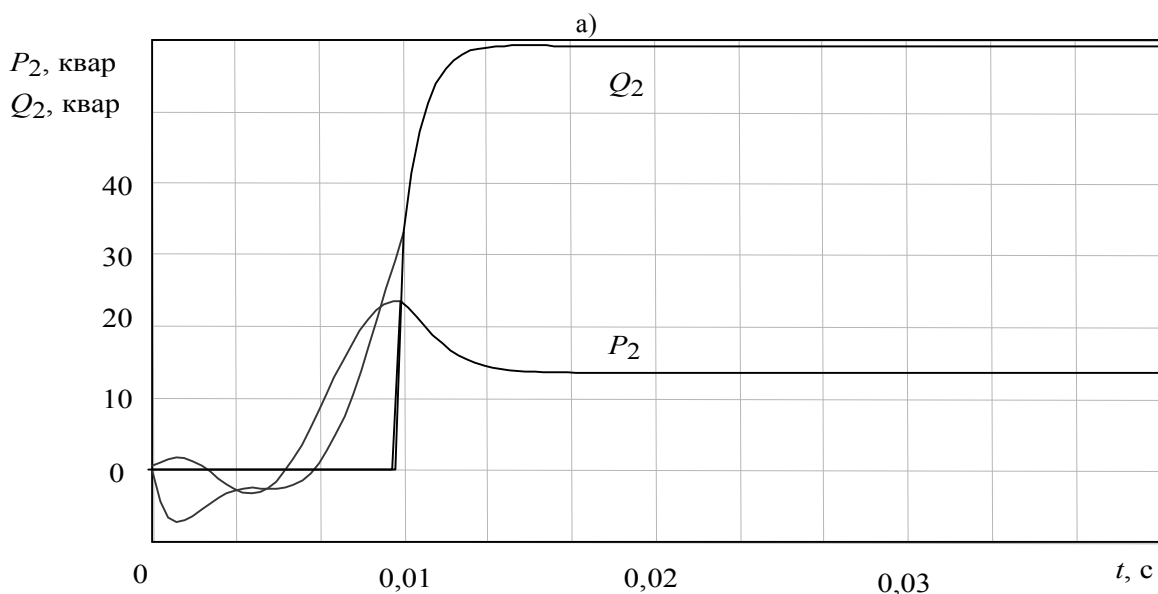
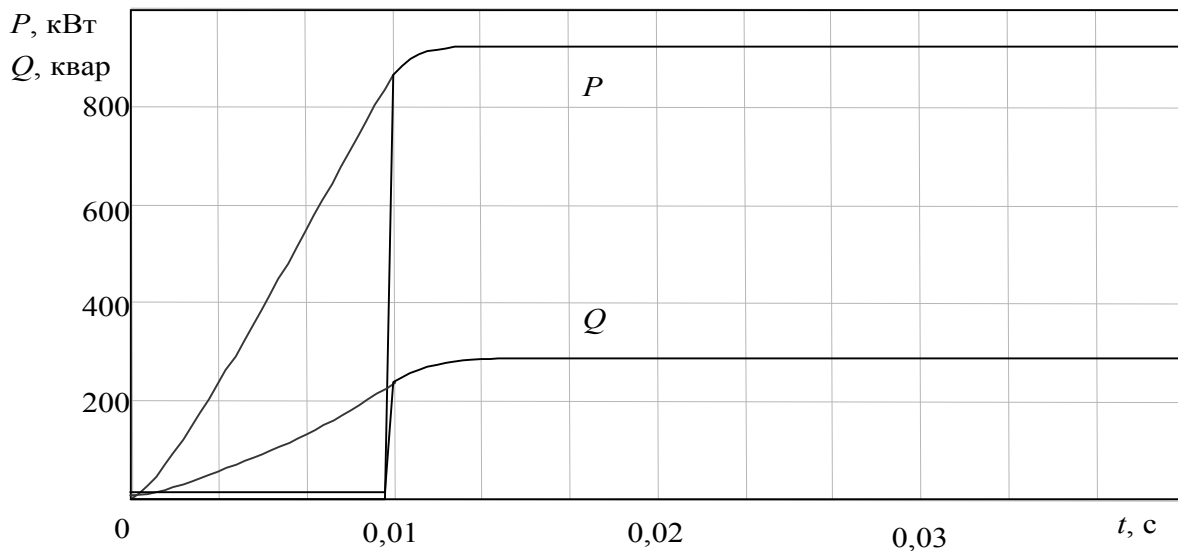


Рис. 3. Перехідні характеристики вимірювального каналу:
а) для величин P , Q ; б) для величин P_2 , Q_2

Основними джерелами похибок вимірювального каналу є амплітудні та фазові похибки вимірювальних трансформаторів напруги і струму, а також похибки, зумовлені невідповідністю інтервалу інтегрування половині періоду напруги мережі [6].

Аналіз показав, що абсолютні похибки вимірювання несиметричних складників навантаження з використанням алгоритмів (8) і (9) не перевищують похибок вимірювання активної та реактивної потужностей. Використання алгоритму (8) можна рекомендувати за наявності несиметрії трифазної напруги і вищих гармонік у струмі навантаження. У той же час алгоритм (9) чутливий до несиметрії трифазної напруги, але інваріантний до наявності вищих гармонік у струмі навантаження.

Висновки

Отже, запропоновано вимірювальний канал параметрів несиметричних трифазних навантажень для пристроїв динамічної компенсації реактивної потужності, в основу принципу дії якого покладено інтегрування миттєвих потужностей на ковзному інтервалі

часу, що дорівнює половині періоду напруги живлення, з використанням затримки в часі одного з ортогональних складників миттєвої потужності. Вимірювальний канал має достатню стійкість у перехідних режимах, а також характеризується відсутністю методичних похибок вимірювань за наявності несиметрії трифазної напруги і вищих гармонік струму навантаження.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Бурбело М. Й. Компенсація реактивної потужності асинхронних двигунів в різкозмінних режимах навантаження / М. Й. Бурбело, А. В. Гадай // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2008. – № 1. – С. 65 – 68.
2. Бурбело М. Й. Динамічна компенсація реактивної потужності в перехідних режимах електроприводів / М. Й. Бурбело, А. В. Гадай: Монографія. – Вінниця: УНІВЕРСУМ – Вінниця, 2010. – 104 с.
3. Бурбело М. Й. Спосіб вимірювання параметрів несиметрії навантажень вузлів електричних мереж / М. Й. Бурбело, М. В. Кузьменко, М. В. Никитенко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2009. – № 3. – С. 30 – 33.
4. Бурбело М. Й. Вимірювання параметрів несиметричних швидкозмінних трифазних навантажень / М. Й. Бурбело, С. М. Мельничук, М. В. Никитенко // Технічна електродинаміка. – 2011. – № 2. – С. 54 – 56.
5. Бурбело М. Й. Вимірювальні канали для установок динамічної компенсації реактивної потужності та симетрування навантажень / М. Й. Бурбело, О. В. Бабенко, М. В. Никитенко // Вісник НУ “Львівська політехніка” Електроенергетичні та електромеханічні системи. – 2010. – № 666. – С. 14 – 18.
6. Бурбело М. Й. Вимірювальний перетворювач параметрів несиметричних швидкозмінних трифазних навантажень / М. Й. Бурбело, С. М. Мельничук, М. В. Никитенко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2011. – № 5. – С. 72 – 75.
7. Штамбергер Г. А. Измерения в цепях переменного тока (методы уравнивания) / Г. А. Штамбергер; под ред. К. Б. Карандеева. – Новосибирск: Наука, 1975. – 164 с.

Бурбело Михайло Йосипович – професор кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту.

Вінницький національний технічний університет.

Романовський Володимир Ігорович – доцент кафедри електроенергетики.

Сумський державний університет.