



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ
УКРАЇНИ

УКРАЇНА

(19) UA (11) 96677 (13) C2
(51) МПК
H02J 3/18 (2006.01)

ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВІНАХІД

(54) СПОСІБ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНИХ НАВАНТАЖЕНЬ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ

1

2

(21) а201006967

(22) 07.06.2010

(24) 25.11.2011

(46) 25.11.2011, Бюл.№ 22, 2011 р.

(72) ЗУБЮК ЮРІЙ ПАВЛОВИЧ, КИРИЛЕНКО ОЛЕКСАНДР ВАСИЛЬОВИЧ, ТРАЧ ІГОР ВАСИЛЬОВИЧ

(73) ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРОДИНАМІКИ НАН УКРАЇНИ

(56) DE 10307972, 09.09.2004

SU 1612352 A1, 07.12.1990

US 4647837 A, 03.03.1987

RU 2183897 C1, 20.06.2002

SU 1702482 A1, 30.12.1991

UA 4614 C1, 28.12.1994

SU 1550592 A1, 15.03.1990

RU 2126580 C1, 20.02.1999

US 4174497 A, 13.11.1979

US 6114841 A, 05.09. 2000

US 6674267 B2, 06.01.2004

(57) 1. Спосіб компенсації реактивних навантажень електричної мережі, при якому в електричну мережу у складі паралельних гілок, а саме гілки з активно-індуктивним опором джерела напруги живлення, яка окрім основної частоти має вищі гармонічні складові з відомим спектром, та q гілок з активно-реактивними навантаженням, в загальній точці приєднання всіх гілок виконують інжекцію струмів I_{inj} з k частотами f_k , відмінними від основної частоти $f_{осн}$ електричної мережі $f_k \neq f_{осн}$, проводять операції:

вимірюють наведені напруги U_k у фазах в загальній точці приєднання всіх гілок на k частотах f_k ;

вимірюють амплітуди струмів I_{kq} гілки q на k частотах f_k ;

вимірюють кут φ_{kq} між наведеною напругою U_k та струмів I_{kq} гілки q на k частотах f_k ;

оцінюють повний опір Z_{kq} гілки q на кожній з k частот f_k струмів I_{kq}

$Z_{kq} = U_k / I_{kq}$, де I_{kq} - струм частоти f_k у гілці q;

оцінюють активний опір R_{kq} і реактивний опір X_{kq} гілки q по оцінці повного опору X_{kq} та кута φ_{kq} на k частотах f_k ;

оцінюють індуктивність L_{kq} чи ємність C_{kq} гілки q на k частотах f_k ;

$L_{kq} = X_{kq} / (2 * \pi * f_k)$ при $\varphi_{kq} > 0$ та

$C_{kq} = 1 / (X_{kq} * 2 * \pi * f_k)$ при $\varphi_{kq} < 0$;

оцінюють активний R_q та реактивний опори X_q , індуктивність L_q або ємність C_q елементів гілки q усередненням k результатів на частотах f_k

$R_q = 1 / k \sum_{n=1}^k R_{kq}$, $X_q = 1 / k \sum_{n=1}^k X_{kq}$,

$L_q = 1 / k \sum_{n=1}^k L_{kq}$, $C_q = 1 / k \sum_{n=1}^k C_{kq}$;

оцінюють реактивну провідність b_q гілки q

$b_q = 1 / X_q$;

здійснюють компенсацію реактивного опору X_q (чи реактивної провідності b_q) гілки q в будь-якій точці електричної мережі, який **відрізняється** тим, що

число k частот f_k для інжекцій струмів I_{inj} вибирають не менше трьох $k \geq 3$;

для кожної гілки q вимірюють амплітуди завад напруги та струмів на частотах інжекцій f_k до моменту початку t_0 інжекції струмів, і якщо до моменту початку t_0 інжекції струмів амплітуда напруги U_{niosk_t0} або струму I_{niosk_t0} завади на цій частоті перевищують задані пороги $U_{niosk_t0} > U_{lim_k}$

або $I_{niosk_t0} > I_{lim_k}$ відповідно, то на цій частоті оцінка активного R_q та реактивного L_q або C_q елементів гілки q не виконують, а усереднення результатів для розрахунку R_q , L_q або C_q виконують без врахування величини елементів на вказаній частоті, далі при виявленні хоча б однієї завади видають сигнал Quality1 індикації завад, причому кожне значення Quality1 приймає зна-

(13) C2

(11) 96677

(19) UA

чення, яке однозначно відповідає кожному набору частот завад на частотах інжекцій f_k ;

компенсацію реактивного X_q опору або провідності b_q елементу L_q або C_q виконують методом, який використовує дані про оцінені величини реактивного L_q або C_q елемента гілки q ;

компенсацію реактивної провідності b_q відгалуження q виконують паралельним увімкненням ємності C_{Kpq} компенсуючого пристрою (КП) у складі послідовності активного опору R_{Kpq} та ємності C_{Kpq} ; при цьому ємність C_{Kpq} визначається з наступних послідовних розрахунків:

а) розраховують C_{Kpq} з рівнянь

$$\omega_{осн} L_q (R_{Kpq}^2 + 1/(\omega_{осн} C_{Kpq})^2) - (1/\omega_{осн} C_{Kpq}) (R_q^2 + (\omega_{осн} L_q)^2) = 0$$

, де $\omega_{осн} = 2\pi f_{осн}$;

б) розраховують ω_p , ω_1 , ω_2 , ω_v , ε

$$\omega_p = \sqrt{1/L_{рез} C_{KП}} * \sqrt{(L_{рез}/C_{KП} - r_{рез}^2)/(L_{рез}/C_{KП})},$$

де $C_{KП} = \sum_{n=1}^q C_q$ - еквівалентна ємність q відгалужень,

$r_{рез} = K_r * R_{q=1}$ активний опір $q=1$ силового трансформатора, K_r - коефіцієнт коригування еквівалентного активного опору ($K_r = 1,2$),

$L_{рез} = K_L * L_{q=1}$ активний опір $L_{q=1}$ гілки силового трансформатора, K_L - коефіцієнт коригування еквівалентної індуктивності,

$$Q = \varphi_p L_{рез} / r_{рез},$$

$$\omega_2 - \omega_1 = \omega_p / Q,$$

$$\omega_1 = \omega_p - (\omega_2 - \omega_1) / 2,$$

$$\omega_2 = \omega_p + (\omega_2 - \omega_1) / 2,$$

$$\varepsilon = \omega_p * K_p,$$

де ε - додаткове частотне відхилення від резонансної частоти ω_p (рад/сек), K_p - коефіцієнт коригування частоти,

$$\omega_v = 2 * \pi * f_{осн} * v, v = 1, 2, \dots, v_{max},$$

де ω_v - кругова частота гармоніки v стуму навантаження,

v - номери гармоніки,

v_{max} - номер максимальної гармоніки спектра;

в) якщо має місце нерівність $(\omega_1 - \varepsilon) > \omega_v$ або $(\omega_2 + \varepsilon) < \omega_v$, то компенсацію виконують ємностями C_{Kpq} , ω_1 - нижня частота пропускання половинної потужності, ω_2 - верхня частота пропускання половинної потужності;

г) якщо має місце нерівність $(\omega_1 - \varepsilon) < \omega_v < \omega_p$, то зменшують значення рахункової ємності $C_{KП}$ до

значення $C_{KП}'$, при якому буде виконуватися нерівність $(\omega_1 - \varepsilon) > \omega_v$, далі ємність q -го відгалуження розраховують як $C_{Kpq}' = C_{Kpq} (C_{KП}' / C_{KП})$;

д) якщо має місце нерівність $\omega_p < \omega_v < (\omega_2 + \varepsilon)$, то збільшують значення розрахункової ємності $C_{KП}$ до $C_{KП}''$, при якому буде виконуватися нерівність $\omega_v > (\omega_2 + \varepsilon)$, далі ємність q -го відгалуження розраховують як $C_{Kpq}'' = C_{Kpq} (C_{KП}'' / C_{KП})$.

2. Спосіб за п. 1, який **відрізняється** тим, що число частот f_k струмів інжекцій $k = 4$.

3. Спосіб за п. 1, який **відрізняється** тим, що частоти струмів інжекцій f_k $f_1 < f_{осн}$, $f_2 < f_{осн}$, $f_3 > f_{осн}$, $f_4 > f_{осн}$.

4. Спосіб за п. 1, який **відрізняється** тим, що оцінку повного опору Z_{kq} , активного R_{kq} , реактивного елементів X_{kq} гілки q на кожній з k частот f_k струмів виконують для всіх частот за одним з наступних варіантів:

а) одночасно для всіх k частот f_k ;

б) послідовно у часі для кожної з k частот f_k ;

в) послідовно у часі для пар будь-яких частот (f_1, f_2) , (f_3, f_4) , ..., (f_{k-1}, f_k) ;

г) послідовно у часі для наборів $[f_1, f_2, \dots], \dots, [f_{k-n}, \dots, f_k]$ будь-якої кількості частот із загального числа k частот.

5. Спосіб за пп. 1-4, який **відрізняється** тим, що k частот f_k струмів інжекцій розподіляють квазівипадково в заданому діапазоні частот.

6. Спосіб за п. 1, який **відрізняється** тим, що електрична мережа трифазна, та струмами інжекції I_{inj} є три струми, які вводять в фазні проводи по схемі фаза - фаза або по схемі фаза - нейтраль.

7. Спосіб за п. 1, який **відрізняється** тим, що електрична мережа однофазна, та струмом інжекції I_{inj} є один струм, який вводять у фазу електричної мережі по схемі фаза - нуль.

8. Спосіб за п. 1, який **відрізняється** тим, що джерелом напруги живлення (електрорушійної сили) є трансформатор, приєднаний до енергосистеми.

9. Спосіб за п. 1, який **відрізняється** тим, що коефіцієнт коригування частоти K_p приймає значення в діапазоні 0-0,1.

10. Спосіб за п. 1, який **відрізняється** тим, що коефіцієнт коригування еквівалентного активного опору K_r приймає значення в діапазоні 1,0-1,6.

11. Спосіб за п. 1, де коефіцієнт коригування еквівалентної індуктивності K_L може приймати значення в діапазоні 0,9-1,2.

12. Спосіб за п. 1, який **відрізняється** тим, що величина $f_{осн}$ приймає значення 50 Гц або 60 Гц.

13. Спосіб за п. 1, який **відрізняється** тим, що при одночасному застосуванні часткових індивідуаль-

ної та групової (централізованої) компенсації ємність $C_{кпq}$ відгалуження q розділяють на складові $C_{кпгq}$ та $C_{кплq}$

$$C_{кпq} = C_{кпгq} + C_{кплq},$$

де $C_{кпгq}$ - складова ємності $C_{кпq}$ в груповій (централізованій) компенсації КП при загальній ємності групової (централізованої) компенсації $C_{скпг} = \sum C_{кпгq}$,

$C_{кплq}$ - складова ємності $C_{кпq}$ в індивідуальній компенсації q - того відгалуження,

ємність групової компенсації $C_{кпг}$ приєднують в найближчий до джерела живлення точці електричної мережі.

14. Спосіб за п. 13, де ємність $C_{кпг}$ групової компенсації КП $C_{кпг} = C_{кп}$ при $C_{кплq} = 0$ (має місце тільки групова компенсація).

15. Спосіб за п. 13, де ємність $C_{кпг}$ групової компенсації КП $C_{кпг} = 0$, а $\sum C_{кплq} = C_{кп}$ (має місце тільки індивідуальна компенсація).

Винахід належить до області компенсації реактивної потужності в електричних мережах та системах електропостачання. Компенсація реактивної потужності здійснюється шляхом оцінки параметрів елементів електричної мережі і відповідної компенсації реактивного струму.

Відомі способи [1] компенсації реактивної потужності електричних активно-індуктивних навантажень шляхом паралельного приєднання конденсаторних батарей визначеної реактивної потужності. Причому визначення реактивної потужності (РП) Q , здійснюється вимірюванням кута зсуву між напругою і струмом, наприклад в трифазній системі за струмом однієї з фаз i_A та лінійній напрузі між двома фазами трифазної мережі, наприклад u_{BC} за відомим алгоритмом $Q = \overline{u_{BC}} \cdot \overline{i_A} / \sqrt{3}$, де верхня риска означає усереднення на періоді, або за результатами вимірювання струму і напруги в одній фазі. Кут між струмом і напругою вимірюється за допомогою фазочутливого випрямляча (ФЧВ), на вхід якого подається струм фази, а на інший комутуючий вхід - напруга двох інших фаз.

Відомі пристрої для керування компенсуючою ємнісною батареєю: наприклад регулятор MRM-12 [2], в якому є датчики фазного струму й напруги, які увімкнені так, що на виході є сигнал, пропорційний коефіцієнту потужності, з якого віднімається сигнал, пропорційний заданому значенню коефіцієнта потужності, і різницевий сигнал, подається до виконавчого блока, що змінює кількість увімкнених конденсаторів так, щоб звести до нуля різницевий сигнал.

Такий спосіб визначення ємності компенсуючого пристрою (КП) за величиною, знаком РП та коефіцієнтом потужності використовує переважна більшість сучасних регуляторів ємності конденсаторних установок [3]. Недоліком здійснення компенсації за параметрами величини і знаку реактивної потужності та коефіцієнта потужності є те, що ці способи є зазвичай неефективними у випадках наявності вищих гармонічних складових напруг і струмів, оскільки:

а) коефіцієнт потужності визначається тільки для перших гармонік відповідних напруг та струмів,

б) наразі немає загальновизнаного поняття «реактивна потужність в несинусоїдальних режимах», а коефіцієнт потужності визначається тільки для перших складових ступеню і напруги. Наприклад, існують прилади, що одночасно вимірюють до восьми різних значень реактивної потужності за визначеннями різних авторів. Так, в приладі FLUKE 6100A [4] відома фірма FLUKE Corporation передбачила можливість вимірювання шести реактивних потужностей згідно з наступними алгоритмами (за прізвищами авторів визначень РП, крім останнього): 1) Budeanu, 2) Fryze, 3) Kusters & Moore, 4) Shepherd & Zakikhani, 5) Sharon/Czarnecki, 6) робоча група IEEE. Відомі дослідження [5], що показують суттєву відмінність величин РП, виміряної такими приладами.

Очевидно, що за такої ситуації величина і знак РП та коефіцієнт потужності не є ефективними для вибору параметра КП та компенсації реактивних навантажень.

Цей висновок розповсюджується і на спосіб компенсації ємнісних навантажень шляхом паралельного увімкнення відповідної котушки індуктивності, традиційний варіант якої наведено, наприклад, в [6]. Таким чином, оскільки параметр РП в мережах з несинусоїдальними напругами/струмами не може однозначно, а значить і оптимально, визначити параметр (ємність чи індуктивність) паралельного (поперечного) компенсаційного пристрою, то авторами пропонується цей параметр визначати відповідно за індуктивністю чи ємністю навантаження, шляхом інжекції в електричну мережу струмів нехарактерних частот, вимірюванням їх та відповідних напруг у певних точках електричної мережі.

Комбіновані індуктивно-ємнісні КП не розглядаються.

Найбільш близьким до пропонованого є Метод виявлення і визначення місцеположення з низьким і високим імпедансом для електричних мереж з заземленою через дугогасний реактор нейтраллю [7]. Спосіб компенсації виконується за допомогою інжекції в електричну мережу, в місці установки розподільного трансформатора, струмів на двох частотах, відмінних від основної частоти. Далі вимірюють наведені цими струмами напруги в електричній мережі, а також кути між напругою та струмом на кожній частоті. Далі вимірюють повний опір

на кожній із частот, активна і реактивна складові. Подальшу компенсацію реактивних параметрів проводять з урахуванням вирахованих параметрів елементів електричної мережі. Спосіб дозволяє здійснити оптимальну компенсацію додаткових втрат, що створюються неякісним споживачем електроенергії. Керуючий пристрій виробляє для кожної фази свій струм управління, який впливає на фазне тиристорне джерело компенсуючого струму.

Вказаний спосіб реалізують таким чином. В електричну мережу вводять струми на двох частотах f_1 та f_2 , відмінні від частоти основної гармоніки f_{50} електричної мережі. Вимірюють наведену струмами напругу. Вираховують значення повного опору Z_k та кут між напругою і струмом для кожної частоти φ_k . Вираховується активний R_k і реактивний опір X_k на кожній частоті. Розраховують індуктивність $L_k = X_k / (2\pi f_k)$.

Розраховують дійсні параметри електричної мережі усередненням значень, отриманих на $K=2$ частотах $L = \sum(L_k)/K$, $R = \sum(R_k)/K$, виконують корегування рівня компенсації згідно з отриманими значеннями параметрів електричної мережі L , R .

Недоліком прототипу є можливість суттєвих похибок при оцінці параметрів реактивних навантажень для визначення параметрів КП. Це пов'язано з наявністю гармонічних завад в електричній мережі і можливістю співпадіння частоти завади і частоти однієї з частот інжекції і, відповідно, помилки при визначенні значення активного і реактивного елементів відгалужень електричної мережі. Неточне визначення значення реактивного елементу відгалуження приводить до неточної реактивної компенсації відгалуження і відповідно знижується ефективність компенсації.

Таким чином, розглянутий спосіб не дозволяє ефективно здійснювати обчислення параметра реактивного навантаження для здійснення його компенсації.

Задачею винаходу є підвищення точності визначення параметрів (ємність чи індуктивність) елементів компенсуючого пристрою (КП) за рахунок інжекції струмів в електричну мережу, причому число частот для інжекцій струмів не менше трьох $k \geq 3$, оцінки параметрів електричної мережі, а саме активного опору та індуктивності або ємності відгалужень, усередненням результатів щонайменше вимірювань на трьох частотах, неврахуванням (відкиданням) вимірювань на частотах, що співпадають з завадами, та наступної компенсацією реактивної потужності за значеннями оцінених активних опорів, індуктивностей чи ємностей реактивних навантажень (елементів відгалужень), а також наступної операції збільшення або зменшення розрахункової ємності. Таке рішення задачі забезпечує досягнення нового технічного результату - підвищення ефективності компенсації реактивного струму відгалуження електричної мережі.

Поставлена задача вирішується таким чином. У відомий спосіб, який включає наступну послідовність операцій:

- в електричну мережу у складі паралельних гілок, а саме гілки з активно-індуктивним опором джерела напруги живлення, яка окрім основної

частоти має вищі гармонічні складові з відомим спектром, та q гілок з активно-реактивними навантаженням, в загальній точці приєднання всіх гілок виконують інжекцію струмів I_{inj} з k частотами f_k , відмінними від основної частоти $f_{осн}$ електричної мережі $f_k \neq f_{осн}$, після чого вимірюють наведену напругу U_k у фазах в загальній точці приєднання всіх гілок на k частотах f_k ;

- вимірюють амплітуди струмів I_{kq} гілки q на k частотах f_k ;

- вимірюють кут φ_{kq} між наведеною напругою U_k та струмів I_{kq} гілки q на k частотах f_k ;

- оцінюють повні опори Z_{kq} гілки q на кожній з k частот f_k струмів I_{kq} $Z_{kq} = U_k / I_{kq}$, де I_{kq} - струм частоти f_k у гілці q ;

- оцінюють активний опір R_{kq} і реактивний опір X_{kq} гілки q по оцінці повного опору X_{kq} та кута φ_{kq} на k частотах f_k ,

- оцінюють індуктивності L_{kq} чи ємності C_{kq} гілки q на k частотах f_k

$$L_{kq} = X_{kq} / (2\pi f_k) \text{ при } \varphi_{kq} > 0 \text{ та}$$

$$C_{kq} = 1 / (X_{kq} 2\pi f_k) \text{ при } \varphi_{kq} < 0;$$

- оцінюють активний R_q та реактивний опори X_q , індуктивності L_q або ємності C_q елементів гілки q усередненням k результатів на частотах f_k

$$R_q = 1/k \sum_{n=1}^k R_{kq}, \quad X_q = 1/k \sum_{n=1}^k X_{kq},$$

$$L_q = 1/k \sum_{n=1}^k L_{kq}, \quad C_q = 1/k \sum_{n=1}^k C_{kq};$$

- оцінюють реактивні провідності b_q гілки q

$$b_q = 1/X_q;$$

- здійснюють компенсацію реактивного опору X_q (чи реактивної провідності b_q) гілки q в будь-якій точці електричної мережі.

З метою підвищення ефективності компенсації реактивних навантажень електричної мережі вводяться нові операції:

- число k частот f_k для інжекцій струмів I_{inj} , вибирають не менше трьох $k \geq 3$;

- для кожної гілки q вимірюють амплітуди завад напруги та струмів на частотах інжекцій f_k до моменту початку t_0 інжекції струмів, і якщо до моменту початку t_0 інжекції струмів амплітуда напруги U_{niosk_t0} або струму I_{niosk_t0} завади на цій частоті перевищують задані пороги $U_{niosk_t0} > U_{lim_k}$ або $I_{niosk_t0} > I_{lim_k}$ відповідно, то на цій частоті оцінка активного R_q та реактивного L_q або C_q елементів гілки q не виконують, а усереднення результатів для розрахунку R_q , L_q

або C_q виконують без врахування величини елементів на вказаній частоті, далі при виявленні хоча б однієї завади видають сигнал Quality1 індикації завад, причому кожне значення Quality1 приймає значення, яке однозначно відповідає кожному набору частот завад на частотах інжекцій f_k ;

- компенсація реактивного X_q опору або провідності b_q елементу L_q або C_q виконують методом, який використовує дані про оцінені величини реактивного L_q або C_q елемента гілки q ;

$$\omega_{\text{осн}} L_q (R_{\text{КП}q}^2 + 1/(\omega_{\text{осн}} C_{\text{КП}q})^2) - (1/\omega_{\text{осн}} C_{\text{КП}q}) (R_q^2 + (\omega_{\text{осн}} L_q)^2) = 0,$$

де $\omega_{\text{осн}} = 2\pi f_{\text{осн}}$;

б) розраховують ω_p , ω_1 , ω_2 , ω_v , ε

$$\omega_p = \sqrt{1/L_{\text{рез}} C_{\text{КП}}} * \sqrt{(L_{\text{рез}}/C_{\text{КП}} - r_{\text{рез}}^2)/(L_{\text{рез}}/C_{\text{КП}})},$$

де $C_{\text{КП}} = \sum_{n=1}^q C_q$ - еквівалентна ємність q відгалужень,

$r_{\text{рез}} = K_r * R_{q=1}$ активний опір $q=1$ силового трансформатора, K_r - коефіцієнт коригування еквівалентного активного опору ($K_r = 1,2$),

$L_{\text{рез}} = K_L * L_{q=1}$ активний опір $L_{q=1}$ гілки силового трансформатора, K_L - коефіцієнт коригування еквівалентної індуктивності,

$$Q = \varphi_p L_{\text{рез}} / r_{\text{рез}},$$

$$\omega_2 - \omega_1 = \omega_p / Q,$$

$$\omega_1 = \omega_p - (\omega_2 - \omega_1) / 2,$$

$$\omega_2 = \omega_p + (\omega_2 - \omega_1) / 2,$$

$$\varepsilon = \omega_p * K_p,$$

де ε - додаткове частотне відхилення від резонансної частоти ω_p (рад/сек.), K_p - коефіцієнт коригування частоти,

$$\omega_v = 2 * \pi * f_{\text{осн}} * v, v = 1, 2, \dots, v_{\text{max}},$$

де ω_v - кругова частота гармоніки v стуму навантаження,

v - номери гармоніки,

v_{max} - номер максимальної гармоніки спектра;

в) якщо має місце нерівність $(\omega_1 - \varepsilon) > \omega_v$ або $(\omega_2 + \varepsilon) < \omega_v$, то компенсацію виконують ємностями $C_{\text{КП}q}$, ω_1 - нижня частота пропускання половинної потужності, ω_2 - верхня частота пропускання половинної потужності;

г) якщо має місце нерівність $(\omega_1 - \varepsilon) < \omega_v < \omega_p$, то зменшують значення рахункової ємності $C_{\text{КП}}$ до значення $C_{\text{КП}}'$, при якому буде виконуватися

- компенсацію реактивної провідності b_q відгалуження q виконують паралельним увімкненням ємності $C_{\text{КП}q}$ компенсуючого пристрою (КП) у складі послідовності активного опору $R_{\text{КП}q}$ та ємності $C_{\text{КП}q}$, при цьому ємність $C_{\text{КП}q}$ визначають з наступних послідовних розрахунків:

а) розраховують $C_{\text{КП}q}$ з рівнянь

нерівність $(\omega_1 - \varepsilon) > \omega_v$, далі ємність q -го відгалуження розраховують як $C_{\text{КП}q}' = C_{\text{КП}q} (C_{\text{КП}}' / C_{\text{КП}})$;

д) якщо має місце нерівність $\omega_p < \omega_v < (\omega_2 + \varepsilon)$, то збільшують значення розрахункової ємності $C_{\text{КП}}$ до $C_{\text{КП}}''$, при якому буде виконуватися нерівність $\omega_v > (\omega_2 + \varepsilon)$, далі ємність q -го відгалуження розраховують як $C_{\text{КП}q}'' = C_{\text{КП}q} (C_{\text{КП}}'' / C_{\text{КП}})$.

Число частот f_k струмів інжекцій $k=4$.

Частоти струмів інжекцій f_k можуть бути $f_1 < f_{\text{осн}}$, $f_2 < f_{\text{осн}}$, $f_3 > f_{\text{осн}}$, $f_4 > f_{\text{осн}}$.

Оцінка повного опору $Z_{\text{к}q}$, активного $R_{\text{к}q}$, реактивного елементів $X_{\text{к}q}$ гілки q на кожній з k частот f_k струмів виконується для всіх частот за одним з наступних варіантів:

а) одночасно для всіх k частот f_k ;

б) послідовно у часі для кожної з k частот $Z_{\text{к}q}$;

в) послідовно у часі для пар будь-яких частот (f_1, f_2) , (f_3, f_4) , ..., (f_{k-1}, f_k) ;

г) послідовно у часі для наборів $[f_1, f_2, \dots]$, ..., $[f_{k-n}, \dots, f_k]$ будь-якої кількості частот із загального числа k частот.

Зокрема, k частот f_k струмів інжекцій розподілені квазівипадково в заданому діапазоні частот.

Зокрема, електрична мережа трифазною, та струмами інжекції I_{inj} є три струми, які вводяться в фазні проводи по схемі фаза - фаза або по схемі фаза - нейтраль.

Зокрема, електрична мережа може бути однофазною, та струмом інжекції I_{inj} є один струм, який вводиться у фазу електричної мережі по схемі фаза - нуль.

Зокрема, джерелом напруги живлення (електрорушійної сили) може бути трансформатор, приєднаний до енергосистеми.

Зокрема, коефіцієнт коригування частоти K_p приймає значення в діапазоні 0-0,1.

Зокрема, коефіцієнт коригування еквівалентного активного опору K_r приймає значення в діапазоні 1,0-1,6.

Зокрема, коефіцієнт коригування еквівалентної індуктивності K_L приймає значення в діапазоні 0,9-1,2.

Зокрема, величина $f_{осн}$ приймає значення 50 Гц або 60 Гц.

Для випадку одночасного застосування часткових індивідуальної та групової (централізованої) компенсації ємність $C_{кпq}$ відгалуження q розділяють на складові $C_{кпгq}$ та $C_{кплq}$

$$C_{кпq} = C_{кпгq} + C_{кплq},$$

де $C_{кпгq}$ - складова ємності $C_{кпq}$ в груповій (централізованій) компенсації КП при загальній ємності групової (централізованої) компенсації $C_{скпг} = \sum C_{кпгq}$,

$C_{кплq}$ - складова ємності $C_{кпq}$ в індивідуальній компенсації q -того відгалуження.

Ємність групової компенсації $C_{кпг}$ приєднують в найближчій до джерела живлення точці електричної мережі.

Ємність $C_{кпг}$ групової компенсації КП $C_{кпг} = C_{кп}$ при $C_{кплq} = 0$ (має місце тільки групова компенсація).

Ємність $C_{кпг}$ групової компенсації КП $C_{кпг} = 0$, а $\sum C_{кплq} = C_{кп}$ (має місце тільки індивідуальна компенсація).

Порівняльний аналіз відомих технічних рішень показує, що введення нових операцій є необхідним і достатнім для досягнення нового технічного результату - підвищення ефективності компенсації реактивних навантажень (реактивної потужності) в електричній мережі змінного струму. Технічний результат запропонованого способу досягається за рахунок компенсації реактивного X_q опору або провідності b_q елементу L_q або C_q , і виконують методом, який використовує дані про оцінені величини реактивного L_q або C_q елемента q гілок електричної мережі. Також технічний результат запропонованого способу досягається за рахунок того, що в електричну мережу вводять струми I_{inj} інжекції не менше трьох $k \geq 3$ частот f_k , відрізняються від основної частоти $f_{осн}$ електричної мережі $f_k \neq f_{осн}$. Завдяки цьому є можливість усереднювати результати на більшій кількості частот. Також технічний результат досягається за рахунок того, що вимірюють рівні завад струмів і напруг кожного q -го відгалуження на частотах інжекцій f_k до моменту початку t_0 інжекції струмів I_{inj} . У разі, якщо що завада напруги U_{knos_t0} або струму I_{knois_t0} на частоті f_k перевищує заданий поріг $U_{fknois_t0} > U_{k_lim}$ або $I_{fknois_t0} > I_{k_lim}$, то на цій частоті f_k оцінка активного та реактивного елементів відгалуження q не виконують, а усереднення результатів для розрахунку R_q , L_q або C_q виконують без врахування величини елементів на вказаній частоті. При виявленні хоча б однієї завади видається сигнал Quality 1 індика-

ції завад, причому кожне значення Quality 1 приймає значення, яке однозначно відповідає кожному набору частот завад на частотах інжекцій f_k . Завдяки цьому не беруться до уваги вимірювання на частотах елементів, де значні завади, і про що видається сигнал індикації. Також технічний результат досягається за рахунок того, що компенсація реактивної потужності відгалуження виконується відповідно до оціненої величини реактивного елемента L_q або C_q цього відгалуження. Також технічний результат досягається за рахунок того, що у разі, якщо провідність b_q має індуктивний характер $b_q < 0$, то компенсація реактивної провідності b_q відгалуження q виконується паралельним увімкненням ємності $C_{кпq}$ компенсуючого пристрою (КП) у складі послідовності активного опору $R_{кпq}$ та ємності $C_{кпq}$. Також технічний результат досягається за рахунок того, що у випадку нерівності $(\omega_1 - \varepsilon) < \omega_v < \omega_p$, де ω_v кругова частота гармоніки v стуму навантаження та ω_1 , ω_2 розрахункові частоти електричної мережі, значення $C_{кпq}$ коригують зменшенням ємності до $C_{кпq}'$, а у випадку нерівності $\omega_p < \omega_v < (\omega_2 + \varepsilon)$, значення $C_{кпq}$ коригують збільшенням ємності до $C_{кпq}''$.

На фіг. 1, 2, 3 зображена функціональна схема способу.

На фіг. 1 зображена блок-схема способу, етап оцінки індуктивності L_{kq} або ємності C_{kq} гілки q на k -ій частоті f_k .

На фіг. 2 зображена блок-схема способу, етап оцінки R_q , X_q , L_q або C_q елементів гілки q .

На фіг. 3 зображена блок-схема способу, етап визначення ємності $C_{кпq}$.

Спосіб працює таким чином. Число k частот f_k для інжекцій струмів I_{inj} вибирають не менше трьох $k \geq 3$. Для кожної гілки q вимірюють амплітуди завад напруги та струмів на частотах інжекцій f_k до моменту початку t_0 інжекції струмів. Якщо до моменту початку t_0 інжекції струмів амплітуда напруги U_{knos_t0} або струму I_{knois_t0} завади на цій частоті перевищують задані пороги $U_{knos_t0} > U_{lim_k}$ або $I_{knois_t0} > I_{lim_k}$ відповідно, то на цій частоті оцінку активного R_q та реактивного L_q або C_q елементів гілки q не виконують, а усереднення результатів для розрахунку R_q , L_q або C_q виконують без врахування величини елементів на вказаній частоті. При виявленні хоча б однієї завади видають сигнал Quality1 індикації завад, причому кожне значення Quality1 приймає значення, яке однозначно відповідає кожному набору частот завад на частотах інжекцій f_k .

Далі в загальній точці приєднання всіх гілок електричної мережі виконується інжекція струмів I_{inj} з k частотами f_k , відрізними від основної частоти $f_{осн}$ електричної мережі $f_k \neq f_{осн}$. Вимірюється наведена напруга U_k у фазах в загальній точці приєднання всіх гілок на k частотах f_k . Число k частот f_k для інжекцій струмів I_{inj} - вибирається не менше трьох $k \geq 3$. Вимірюються амплітуди струмів I_{kq} гілки q на k частотах f_k . Вимірюються кути φ_{kq} між наведеною напругою U_k та струмами I_{kq} гілки q на k частотах f_k . Далі оцінюється повний опір Z_{kq} гілки q на кожній з k частот f_k струмів I_{kq} :

$Z_{kq} = U_k / I_{kq}$, де I_{kq} - струм частоти f_k у гілці

q.

Далі оцінюють активний опір R_{kq} і реактивний опір X_{kq} гілки q по оцінці повного опору Z_{kq} та кута φ_{kq} на k частотах f_k . Оцінюють індуктивність L_{kq} чи ємність C_{kq} гілки q на k частотах f_k :

$$L_{kq} = X_{kq} / (2 \pi f_k) \text{ при } \varphi_{kq} > 0 \text{ та}$$

$$C_{kq} = 1 / (X_{kq} 2 \pi f_k) \text{ при } \varphi_{kq} < 0.$$

Далі оцінюють активний R_q та реактивний опір X_q , індуктивності L_q або ємності C_q елементів гілки q усередненням k результатів на частотах f_k :

$$R_q = 1/k \sum_{n=1}^k R_{kq}, \quad X_q = 1/k \sum_{n=1}^k X_{kq},$$

$$\omega_{\text{осн}} L_q (R_{\text{кп}q}^2 + 1/(\omega_{\text{осн}} C_{\text{кп}q})^2) - (1/\omega_{\text{осн}} C_{\text{кп}q}) (R_q^2 + (\omega_{\text{осн}} L_q)^2) = 0,$$

де $\omega_{\text{осн}} = 2\pi f_{\text{осн}}$;

б) розраховують ω_p , ω_1 , ω_2 , ω_v , ε

$$\omega_p = \sqrt{1/L_{\text{рез}} C_{\text{кп}}} \cdot \sqrt{(L_{\text{рез}} / C_{\text{кп}} - r_{\text{рез}}^2) / (L_{\text{рез}} / C_{\text{кп}})},$$

де $C_{\text{кп}} = \sum_{n=1}^q C_q$ - еквівалентна ємність q відгалужень,

$r_{\text{рез}} = K_r \cdot R_{q=1}$ активний опір $q=1$ силового трансформатора, K_r - коефіцієнт коригування еквівалентного активного опору ($K_r = 1,2$),

$L_{\text{рез}} = K_L \cdot L_{q=1}$ активний опір $L_{q=1}$ гілки силового трансформатора, K_L - коефіцієнт коригування еквівалентної індуктивності,

$$Q = \omega_p L_{\text{рез}} / r_{\text{рез}},$$

$$\omega_2 - \omega_1 = \omega_p / Q,$$

$$\omega_1 = \omega_p - (\omega_2 - \omega_1) / 2,$$

$$\omega_2 = \omega_p + (\omega_2 - \omega_1) / 2,$$

$$\varepsilon = \omega_p \cdot K_p,$$

де ε - додаткове частотне відхилення від резонансної частоти ω_p (рад/сек), K_p - коефіцієнт коригування частоти,

$$\omega_v = 2 \pi f_{\text{осн}} \cdot v, \quad v = 1, 2, \dots, v_{\text{max}},$$

де ω_v - кругова частота гармоніки v струму навантаження,

v - номери гармоніки,

v_{max} - номер максимальної гармоніки спектра;

$$\omega_{\text{осн}} L_{\text{кп}q} (R_q^2 + 1/(\omega_{\text{осн}} C_q)^2) - (1/\omega_{\text{осн}} C_q) (R_{\text{кп}q}^2 + (\omega_{\text{осн}} L_{\text{кп}q})^2) = 0$$

Зокрема, число частот інжекцій може бути $k=4$.

Зокрема, частоти інжекцій можуть бути $f_1 < f_{\text{осн}}$, $f_2 < f_{\text{осн}}$, $f_3 > f_{\text{осн}}$, $f_4 > f_{\text{осн}}$.

Зокрема, оцінка повного опору Z_{kq} , активного R_{kq} , реактивного елементів X_{kq} гілки q на кожній з k частот f_k струмів виконується для всіх частот за одним з наступних варіантів:

а) одночасно для всіх k частот f_k ,

$$L_q = 1/k \sum_{n=1}^k L_{kq}, \quad C_q = 1/k \sum_{n=1}^k C_{kq}.$$

Оцінюють реактивну провідність b_q гілки q

$$b_q = 1/X_q.$$

Далі у разі, коли провідність b_q має індуктивний характер $b_q < 0$, компенсація реактивної провідності b_q відгалуження q виконують паралельним увімкненням ємності $C_{\text{кп}q}$ компенсуючого пристрою (КП) у складі послідовності активного опору $R_{\text{кп}q}$ та ємності $C_{\text{кп}q}$. При цьому ємність $C_{\text{кп}q}$ визначають з наступних послідовних розрахунків:

а) розраховують $C_{\text{кп}q}$ з рівнянь

в) якщо має місце нерівність $(\omega_1 - \varepsilon) > \omega_v$ або $(\omega_2 + \varepsilon) < \omega_v$, то компенсація виконують ємностями $C_{\text{кп}q}$, ω_1 - нижня частота пропускання половинної потужності, ω_2 - верхня частота пропускання половинної потужності;

г) якщо має місце нерівність $(\omega_1 - \varepsilon) < \omega_v < \omega_p$, то зменшують значення рахункової ємності $C_{\text{кп}}$ до значення $C_{\text{кп}}'$, при якому буде виконуватися нерівність $(\omega_1 - \varepsilon) > \omega_v$. Далі компенсацію виконують ємностями $C_{\text{кп}q} = C_{\text{кп}q} (C_{\text{кп}}' / C_{\text{кп}})$;

д) якщо має місце нерівність $\omega_p < \omega_v < (\omega_2 + \varepsilon)$, то збільшують значення розрахункової ємності $C_{\text{кп}}$ до $C_{\text{кп}}''$, при якому буде виконуватися нерівність $\omega_v > (\omega_2 + \varepsilon)$. Далі компенсація виконується ємностями $C_{\text{кп}q} = C_{\text{кп}q} (C_{\text{кп}}'' / C_{\text{кп}})$.

Далі у разі, коли b_q має ємнісний характер $b_q > 0$, компенсація реактивної провідності b_q елементу q відгалуження виконують паралельним увімкненням реактивної провідності КП $b_{\text{кп}}$ складі послідовності активного опору $R_{\text{кп}q}$ та індуктивного елементу $L_{\text{кп}q}$, значення яких розраховується з наступного рівняння:

б) послідовно у часі для кожної з k частот f_k ,

в) послідовно у часі для пар будь-яких частот (f_1, f_2) , (f_3, f_4) , ..., (f_{k-1}, f_k) ,

г) послідовно у часі для наборів $[f_1, f_2, \dots], \dots, [f_{k-n}, \dots, f_k]$ будь-якої кількості частот із загального числа k частот.

Зокрема, k частот f_k струмів інжекцій можуть бути розподілені квазівипадково в заданому діапазоні частот.

Зокрема, електрична мережа може бути трифазною, та струмами інжекції I_{inj} є три струми, які вводяться в фазні проводи по схемі фаза - фаза або по схемі фаза - нейтраль.

Зокрема, електрична мережа може бути однофазною, та струмом інжекції I_{inj} є один струм, який вводиться у фазу електричної мережі по схемі фаза - нуль.

Зокрема, джерелом напруги живлення (електрорушійної сили) може бути трансформатор, приєднаний до енергосистеми.

Зокрема, коефіцієнт коригування частоти K_p приймає значення в діапазоні 0-0,1.

Зокрема, коефіцієнт коригування еквівалентного активного опору K_r приймає значення в діапазоні 1,0-1,6.

Зокрема, коефіцієнт коригування еквівалентної індуктивності K_L приймає значення в діапазоні 0,9-1,2.

Зокрема, величина $f_{осн}$ приймає значення 50 Гц або 60 Гц.

Зокрема у випадку одночасного застосування часткових індивідуальної та групової (централізованої) компенсації ємність $C_{кпq}$ відгалуження q розділяється на складові $C_{кпгq}$ та $C_{кплq}$
 $C_{кпq} = C_{кпгq} + C_{кплq}$, де $C_{кпгq}$ - складова ємності $C_{кпq}$ в груповій (централізованій) компенсації КП при загальній ємності групової (централізованої) компенсації $C_{скпг} = \sum C_{кпгq}$ де $C_{кплq}$ - складова ємності $C_{кпq}$ індивідуальній компенсації q -того відгалуження.

Ємність групової компенсації $C_{кпг}$ приєднується в найближчій до джерела живлення точці електричної мережі.

Зокрема ємність $C_{кпг}$ групової компенсації КП $C_{кпг} = C_{кп}$ при $C_{кплq} = 0$ (має місце тільки групова компенсація).

Зокрема ємність $C_{кпг}$ групової компенсації КП $C_{кпг} = 0$, а $\sum C_{кплq} = C_{кп}$ (має місце тільки індивідуальна компенсація).

Операції усереднення результатів (не менше трьох значень) дозволяють збільшити точність вимірювання [8] параметрів елементів відповідного відгалуження. Ці операції ефективні при відсутності завад, але при наявності значної завади хоча б на одній з частот результат буде значно відхилятися від правильного значення справжнього. Операції з відкиданням вимірів на частотах завад дозволяють збільшити точність вимірювання елементів відгалуження.

Операції компенсації реактивної потужності за значеннями реактивних параметрів елементів від-

галужень дозволяють відмовитися від складного аналізу всього спектру струмів та напруги відгалужень, який може мати діапазон від інтергармоніки 50 Гц/10=10 Гц до 50-ї гармоніки 2500 Гц.

Операції компенсація з урахуванням збільшення або зменшення розрахункової ємності дозволяє відмовитися від складного аналізу всього спектру струмів та напруги відгалужень, який може мати діапазон від інтергармоніки 50 Гц/10=10 Гц до 50-ї гармоніки 2500 Гц.

Таким чином, наявність п'яти 5 факторів, які підвищують ефективність компенсації, а саме по-перше, інжекції струмів в електричну мережу, причому число частот для інжекцій струмів не менше трьох $k \geq 3$, по-друге, оцінки параметрів електричної мережі, а саме активного опору та індуктивності або ємності відгалужень, і усереднення результатів щонайменше вимірювань на трьох частотах, по-третє, неврахуванням (відкиданням) вимірювань на частотах, що співпадають з завадами, по-четверте наступної компенсацією реактивної потужності за значеннями оцінених активних опорів, індуктивностей чи ємностей реактивних навантажень (елементів відгалужень), по-п'яте збільшення або зменшення розрахункової ємності.

Література.

1. Авторському свідоцтві СРСР № 1612352, МКВ SH02J3/18. Автоматический регулятор коэффициента мощности / В.В. Бутко. Оpubл. 07.12.90, Бюл. № 45.

2. Журнал "Електроінформ", 2003 р., № 1, ст. 35-36.

3. Шишкин С.А. Построение схем измерения входных параметров регуляторов реактивной мощности конденсаторных установок // ЭЛЕКТРОТЕХНИКА № 10-2003 -С. 52-55.

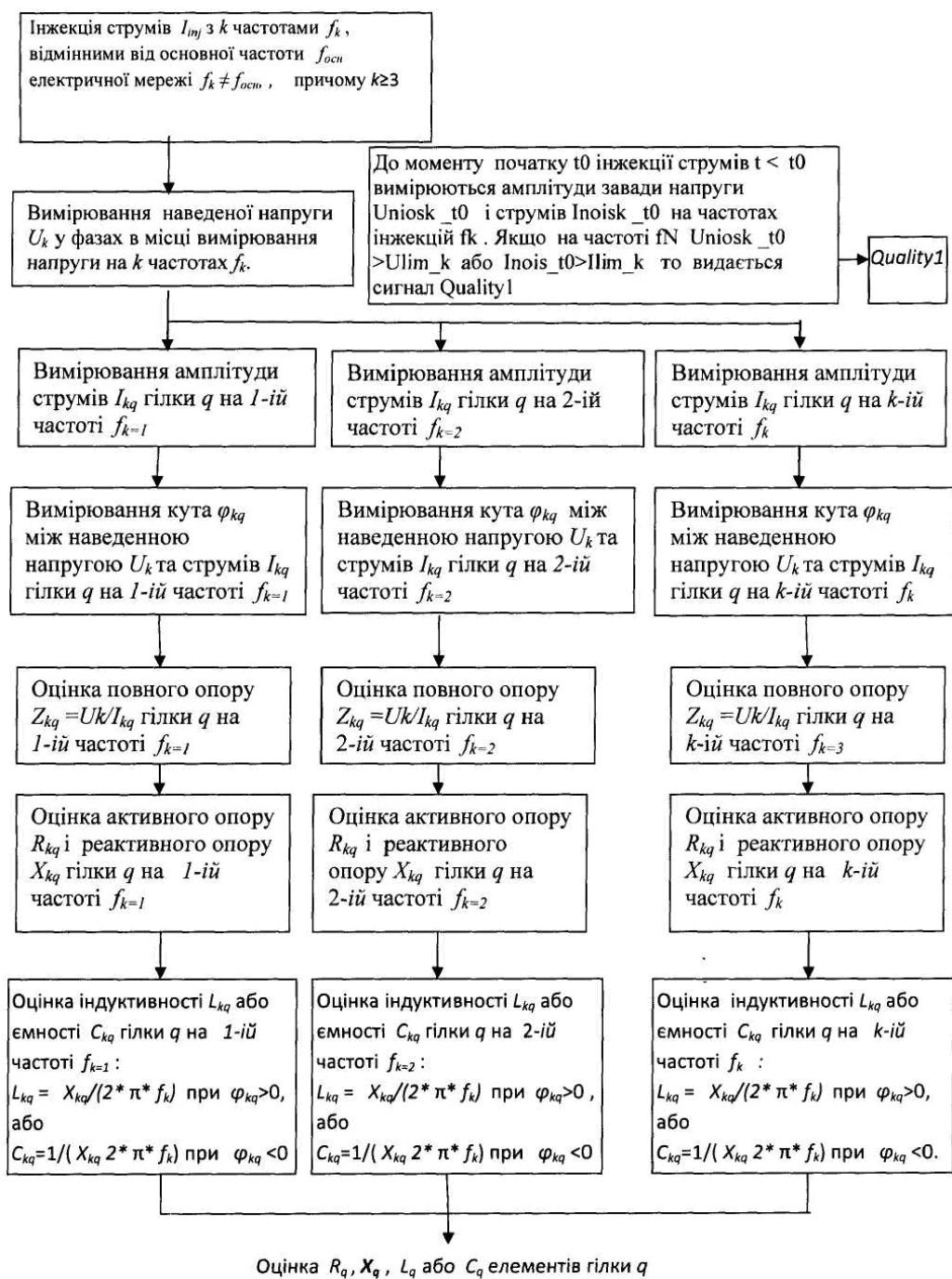
4. Fluke 6100A E lectricl Power standard/Users manual: PN 18 87628, Version 6.0//http://assets.fluke.com/manuals/6100a_umeng0600.pdf, p. 1-18.

5. Cataliotti A., Cosentino V., Nuccio S. The Measurement of Reactive Energy in Polluted Distribution Power Systems: An Analysis of the Performance of Commercial Static Meters//Power Delivery, IEEE Transactions on: July 2008 Volume: 23 Issue: 3, P. 1296 – 1301.

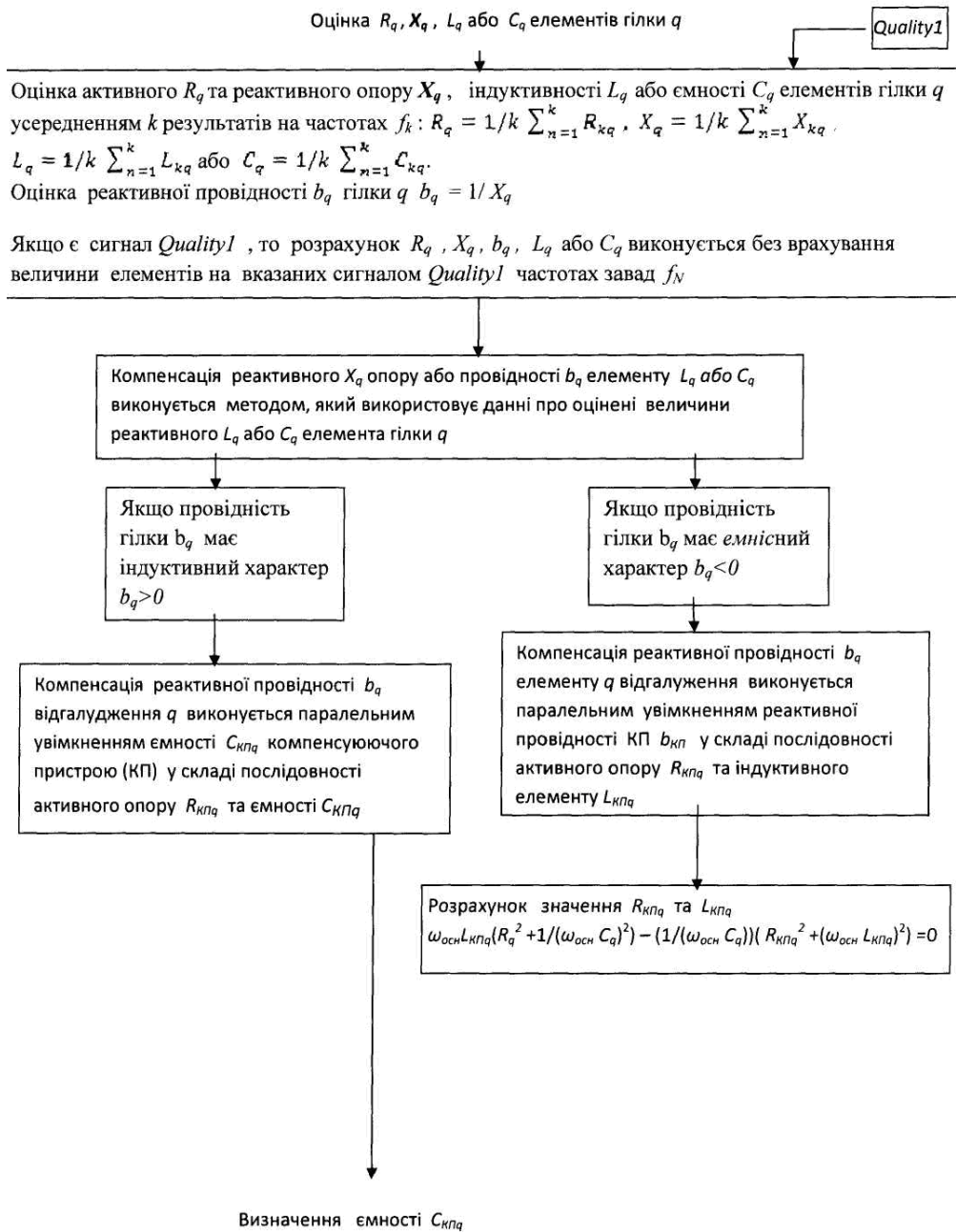
6. Установки типа BDA/OLMEX kompensacja mocy biernej//http://www. olmex.pl.

7. Патент Німеччини DE 10307972 , DRUML GERNOT, KUGI ANDREAS].

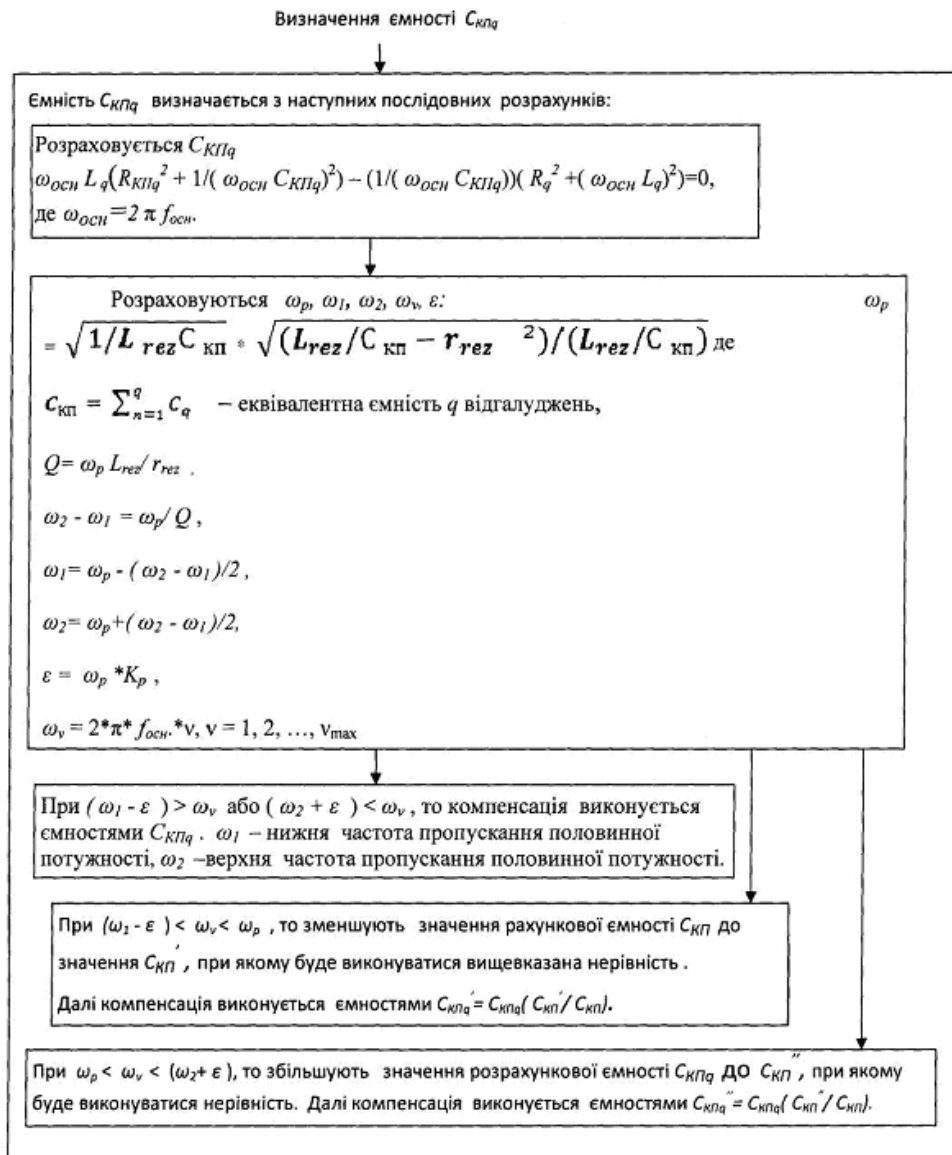
8. А.С. Якорева, В.А. Бисерова, Н.В. Демидова. Метрология, стандартизация и сертификация: Конспект лекций / М.:Эксмо, 280 кВ//www.fictionbook.ru/a s yakovleva/metrologia standartizacia/read online.



Фіг.1



Фіг.2



Фіг.3