

УДК 621.314

**АНАЛІЗ У ЧАСТОТНІЙ ОБЛАСТІ РОБОТИ СИСТЕМ КОМПЕНСАЦІЇ СКЛАДОВИХ ПОТУЖНОСТІ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ****М. С. Малякова, А. П. Калінов**Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського  
вул. Першотравнева, 20, Кременчук, 39600, Україна. E-mail: mariia.maliakova@gmail.com

Проведено аналітичне дослідження в частотній області процесів компенсації у системі електропостачання з нелінійним та несиметричним навантаженням з використанням крос-векторної теорії миттєвої потужності. Формування величин, необхідних для аналізу компенсаційних процесів, здійснювалось із використанням автоматизованого методу формування частотних складових електричних величин, що базується на алгоритмі дискретної згортки. У результаті проведених розрахунків були отримані складові миттєвої активної й реактивної потужності, середньоквадратичні значення їх змінних складових у функції гармонічних складових струму, коефіцієнтів амплітудної та фазової несиметрії. Аналіз отриманих аналітичних залежностей вказує на те, що рівень змінних складових потужностей при амплітудно-несиметричних струмах навантаження нелінійно залежить від рівня несиметрії, а середньоквадратичні значення миттєвої активної й реактивної потужності не залежать від кута зсуву фаз струму. У випадку фазової несиметрії середньоквадратичні значення миттєвої активної й реактивної потужностей нелінійно залежать від кута несиметрії та не залежать від кута зсуву фаз струму. Показано, що після компенсації амплітудної несиметрії відбувається симетрування амплітуди сигналів струмів, тобто амплітуди струмів усереднюються. Отримані аналітичні залежності компенсаційних струмів дозволяють визначити завантаження силових ключів фаз силового активного фільтра й здійснити правильний його вибір за струмом найбільш перевантажених ключів інвертора. Отримані аналітичні вирази компенсаційного струму підтверджуються побудовою кривих скомпенсованого струму. Для чисельного аналізу впливу компенсації тих чи інших складових миттєвих потужностей було розраховано потужність втрат і коефіцієнт корисної дії мережі до та після компенсації небажаних складових миттєвих потужностей.

**Ключові слова:** компенсація, теорія миттєвої потужності, крос-векторна теорія, аналітичний аналіз, частотна область.

**АНАЛИЗ В ЧАСТОТНОЙ ОБЛАСТИ РАБОТЫ СИСТЕМ КОМПЕНСАЦИИ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ****М. С. Малякова, А. П. Калинов**Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского  
ул. Первомайская, 20, Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: mariia.maliakova@gmail.com

Проведено аналітичне дослідження в частотній області процесів компенсації в системі електропостачання з нелінійною та несиметричною навантажкою з використанням крос-векторної теорії миттєвої потужності. Формування величин, необхідних для аналізу компенсаційних процесів, здійснювалось із використанням автоматизованого методу формування частотних складових електричних величин, оснований на алгоритмі дискретної згортки. В результаті проведених розрахунків були отримані складові миттєвої активної й реактивної потужностей, середньоквадратичні значення їх змінних складових у функції гармонічних складових струму, коефіцієнтів амплітудної та фазової несиметрії. Аналіз отриманих аналітичних залежностей вказує на те, що рівень змінних складових потужностей при амплітудно-несиметричних струмах навантаження нелінійно залежить від рівня несиметрії, а середньоквадратичні значення миттєвої активної й реактивної потужностей не залежать від кута зсуву фаз струму. У випадку фазової несиметрії середньоквадратичні значення миттєвої активної й реактивної потужностей нелінійно залежать від кута несиметрії та не залежать від кута зсуву фаз струму. Показано, що після компенсації амплітудної несиметрії відбувається симетрування амплітуди сигналів струмів, тобто амплітуди струмів усереднюються. Отримані аналітичні залежності компенсаційних струмів дозволяють визначити перевантаження силових ключів фаз силового активного фільтра й здійснити правильний його вибір по току найбільш перевантажених ключів інвертора. Отримані аналітичні вирази компенсаційного струму підтверджуються побудовою кривих скомпенсованого струму. Для чисельного аналізу впливу компенсації тих чи інших складових миттєвих потужностей було розраховано потужність втрат і коефіцієнт корисної дії мережі до та після компенсації небажаних складових миттєвих потужностей.

**Ключевые слова:** компенсация, теория мгновенной мощности, кросс-векторная теория, аналитический анализ, частотная область.

**АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ.** Відомо, що в більшості випадків реально навантаження систем електропостачання характеризується деякою мірою нелінійністю й несиметричністю. Це призводить до появи вищих гармонік у складі струму й напруги, амплітудної та кутової несиметрії напруг і струмів системи електропостачання. До проблем, що з'являються внаслідок цього, відносяться збільшення втрат у трансформаторах, лініях електропередач, конденсаторах компенсаторів реактивної потужності

літудної та кутової несиметрії напруг і струмів системи електропостачання. До проблем, що з'являються внаслідок цього, відносяться збільшення втрат у трансформаторах, лініях електропередач, конденсаторах компенсаторів реактивної потужності

ті й т.ін. Для усунення впливів несиметричних нелінійних навантажень на мережу живлення використовують, як один із засобів, силові активні фільтри (САФ) [1–4].

Розрахунки компенсаційних струмів у трипровідній і чотирипровідній системі електропостачання здійснюється на базі відомих теорій потужності: Маєвського [5],  $p-q$  [1, 2, 6, 7], кросс-векторної [8, 9] та  $p-q-r$  [1, 2, 8, 10]. Із цих теорій відомо, що всі складові трифазної потужності, які споживаються навантаженням, крім постійної складової миттєвої потужності  $P_0$ , є небажаними. Тобто в системі електропостачання компенсації підлягають постійна  $\bar{q}$  і змінна  $\tilde{q}$  складові миттєвої реактивної потужності та змінна  $\tilde{p}$  складова миттєвої активної потужності.

При дослідженні існуючих теорій потужності для розрахунку компенсаційних струмів автори [1, 3, 8, 9, 11–14] зазначають, що кожній із відомих теорій притаманні певні недоліки. Також до цих теорій є питання, на які поки що не знайдено однозначної відповіді. Так, теорія потужності Маєвського не пристосована для побудови системи усунення вищих гармонік струму й компенсації реактивної потужності за допомогою САФ, не дозволяє враховувати спотворення напруг мережі живлення та не може бути застосована для чотирипровідних систем зі струмами нульової послідовності [8].

Крос-векторна теорія потужності у випадку спотворених та несиметричних напруг живлення не забезпечує повної компенсації нульового струму, а також повного симетрування фазних струмів [8, 9].

Багато питань постає навколо  $p-q$  теорії потужності. Критичний огляд літературних джерел [3, 8, 9, 11–14] показав, що ця теорія не дозволяє проводити компенсацію в чотирипровідній системі з нульовим проводом у випадку несиметричної та спотвореної напруги живлення. Також мають місце великі значення коефіцієнтів спотворення синусоїдальності кривих струмів після корекції САФ при несинусоїдальній напрузі живлення.

У роботі [11] дослідник ставить перед авторами [6]  $p-q$  теорії потужності дуже важливі питання, а саме: чи можливо якісно ідентифікувати властивості трифазних систем лише за двома потужностями  $p$  та  $q$ , при тому, що трипровідна трифазна система навіть із синусоїдальною напругою живлення та струмами може описуватись трьома складовими потужностями: активною  $P$ , що відповідає постійній передачі енергії до навантаження, реактивною  $Q$ , яка виникає через наявність реактивних елементів у навантаженні, та потужністю спотворення  $D$ , що з'являється внаслідок несиметрії струмів живлення. Особливо це питання стосується випадку, коли напруга живлення спотворена.

Можливість застосування  $p-q$  теорії потужності для систем зі спотвореною напругою живлення заслуговує, на думку автора робіт [11, 13, 14], більш детального дослідження. Так, на думку цього ж автора [3, 11–14], використання  $p-q$  теорії миттєвої

потужності для розрахунку компенсаційних струмів САФ у системі із спотвореною та несиметричною напругою живлення є сумнівним. Це пояснюється тим, що інтерпретація складових потужностей, згідно з  $p-q$  теорією миттєвої потужності, як, до речі, й інших теорій, не дає відповіді на питання, чим викликана несинусоїдальність та несиметрія – навантаженням або мережею. У [13] зазначено, що робота САФ на базі  $p-q$  теорії миттєвої потужності при спотворених напругах мережі може викликати ще більші спотворення синусоїдності струму.

Із викладеного стає зрозумілою необхідність у подальшому дослідженні та розвитку зазначених теорій миттєвої потужності та методів компенсації небажаних складових потужностей в електричних мережах. При цьому аналіз сигналів в області часу має суттєві обмеження. Так, на думку автора робіт [11, 14], неможливо якісно оцінювати властивості системи електропостачання з використанням лише миттєвих значень, а аналіз у частотній області нічим не поступається аналізу в області часу [11]. Автор [2] також визнає, що певний ефект при компенсації небажаних складових досягається за рахунок поєднання миттєвих та інтегральних способів розрахунку компенсаційних струмів. До того ж керування струмами компенсатора тільки умовно можна назвати таким, що миттєво реагує на зміни у мережі живлення, оскільки виділення змінної складової із активної та реактивної миттєвих потужностей відбувається з використанням інтегрування (усереднення) миттєвих сигналів. Також у роботі [15] показано, що аналіз знаку складових активної потужності фаз, що утворюються одночастотними гармонічними складовими струму та напруги, дозволяє визначати, що є основним джерелом спотворень – мережа або нелінійне навантаження.

Тобто використання аналізу сигналів струмів напруг та потужностей у частотній області є ефективним та потужним інструментом дослідження. При цьому подання сигналів напруги та струму у комплексному вигляді для аналізу складових потужностей, незважаючи на таке надання у класичній літературі з електротехніки [4, 16], не є коректним, що проявляється при перемноженні сигналів напруг або струмів, які надані у комплексному вигляді [17].

Подання та оперування сигналами струму та напруги, що надані в тригонометричній формі у вигляді суми косинусних та синусних функцій різної частоти [13, 18], є громіздким та складним при значній кількості гармонічних складових. При цьому надання сигналів струму та напруги в частотній області у вигляді ортогональних косинусних та синусних компонент при використанні операції дискретної згортки [19–23] є коректним та зручним інструментом дослідження. Дискретна згортка двох масивів частотних ортогональних компонент є аналогом перемноження миттєвих сигналів в області часу. При цьому дана операція виключає тригонометричні перетворення й дає чіткий та прогнозований результат.

Метою даної роботи є аналітичне дослідження процесів компенсації систем електропостачання з використанням крос-векторної теорії миттєвої потужності в частотній області.

**МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.** Розглянемо процеси компенсації в системі електропостачання для трифазного навантаження як найбільш загального випадку. Для можливості отримання компенсаційних струмів в аналітичному вигляді, а також для спрощення математичних перетворень процес аналізу запропоновано здійснювати в частотній області. Для спрощення аналітичних розрахунків та можливості використання крос-векторної теорії миттєвої потужності приймається припущення про відсутність впливу струмів на спотворення напруг мережі.

Формування величин, необхідних для аналізу компенсаційних процесів, здійснювалось із використанням автоматизованого методу формування частотних складових електричних величин, що базується на алгоритмі дискретної згортки [19–21].

В ідеальному випадку при неспотвореній напрузі живлення при симетричному й лінійному навантаженні мережею електропостачання буде споживатися лише постійна складова миттєвої активної потужності  $P_0$ :

$$P_0 = \frac{3}{2} U_{1m} I_{1m} \cos(\varphi). \quad (1)$$

У рамках даної роботи досліджувались компенсаційні процеси для трифазної системи при нелінійному та несиметричному навантаженні. Для всіх випадків прийнято, що напруга трифазна симетрична й синусоїдна, тобто при наданні ортогональними косинусною та синусною у частотній області має вигляд:

$$U_{Aa1} = \frac{1}{2} U_{1m}; \quad U_{Ab1} = 0; \quad U_{Ba1} = -\frac{1}{4} U_{1m};$$

$$U_{Bb1} = \frac{\sqrt{3}}{4} U_{1m}; \quad U_{Ca1} = -\frac{1}{4} U_{1m}; \quad U_{Cb1} = -\frac{\sqrt{3}}{4} U_{1m}.$$

Розрахунки проводились в аналітичному вигляді. Підставлення в аналітичні вирази чисельних значень використовувалось для візуалізації вихідних даних та контролю правильності аналітичних результатів. При цьому приймались: максимальне амплітудне значення напруги  $U_{1m} = 311$  В, кут зсуву першої гармонічної складової напруги  $\varphi_{U1} = 0$ .

І. Розглянемо випадок нелінійного навантаження, яке обумовлює появу п'ятої гармоніки у складі струму та протікання струму не у фазі з напругою живлення, що спричиняє появу миттєвої реактивної потужності. Чисельні значення амплітуд першої та п'ятої гармонік струму відповідно  $I_{1m} = 500$  А,  $I_{5m} = 100$  А. Для даного прикладу вихідні ортогональні косинусні та синусні складові трифазного струму мережі в частотній області з кутом зсуву першої та п'ятої гармонічної складової струму  $\varphi_{I1} = -30$  ел.град.,  $\varphi_{I5} = -60$  ел.град. відпо-

відно:  $I_{Aa1} = \frac{\sqrt{3}}{4} I_{1m}; \quad I_{Aa5} = \frac{1}{4} I_{5m}; \quad I_{Ab1} = -\frac{1}{4} I_{1m};$   
 $I_{Ab5} = \frac{\sqrt{3}}{4} I_{5m}; \quad I_{Ba1} = 0; \quad I_{Ba5} = \frac{1}{4} I_{5m}; \quad I_{Bb1} = \frac{1}{2} I_{1m};$   
 $I_{Bb5} = -\frac{\sqrt{3}}{4} I_{5m}; \quad I_{Ca1} = -\frac{\sqrt{3}}{4} I_{1m}; \quad I_{Ca5} = -\frac{1}{2} I_{5m};$   
 $I_{Cb1} = -\frac{1}{4} I_{1m}; \quad I_{Cb5} = 0.$  Криві несинусоїдного струму системи електропостачання зображені на рис. 2.

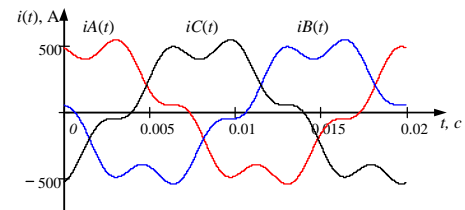


Рисунок 2 – Трифазний несинусоїдний струм системи електропостачання

Згідно з крос-векторною теорією миттєвої потужності, миттєва активна та реактивна потужність розраховується в області часу за виразами:

$$p(t) = u_A(t)i_A(t) + u_B(t)i_B(t) + u_C(t)i_C(t);$$

$$q(t) = [u_C(t) - u_B(t)]i_A(t) + [u_C(t) - u_A(t)]i_B(t) + [u_B(t) - u_A(t)]i_C(t).$$

У випадку нелінійного навантаження, що обумовлює несинусоїдність струмів мережі, з'являються змінні складові миттєвої активної та реактивної потужності. При наданні їх у частотній області отримуємо наступні вирази:

– постійна складова миттєвої активної потужності:

$$P_0 = \frac{3}{2} U_{1m} I_{1m} \cos(\varphi_{I1}); \quad (2)$$

– косинусна ортогональна складова шостої гармоніки миттєвої активної потужності:

$$P_{6a} = \frac{3}{4} U_{1m} I_{5m} [5 \cos(5\varphi_{I5})]; \quad (3)$$

– синусна ортогональна складова шостої гармоніки миттєвої активної потужності:

$$P_{6b} = \frac{3}{4} U_{1m} I_{5m} [5 \sin(5\varphi_{I5})]; \quad (4)$$

– середньоквадратичне значення шостої гармоніки миттєвої активної потужності:

$$P_{6rms} = \frac{3}{4} U_{1m} I_{5m}; \quad (5)$$

– постійна складова миттєвої реактивної потужності:

$$Q_0 = \frac{3\sqrt{3}}{2} U_{1m} I_{1m} \sin(\varphi_{I1}); \quad (6)$$

– косинусна ортогональна складова шостої гармоніки миттєвої реактивної потужності:

$$Q_{6a} = U_{1m} I_{5m} \begin{bmatrix} -12\sqrt{3} \sin(\varphi_{I5}) \cos^4(\varphi_{I5}) + \\ + 9\sqrt{3} \sin(\varphi_{I5}) \cos(\varphi_{I5})^2 - \\ - \frac{2}{4} \sqrt{3} \sin(\varphi_{I5}) \end{bmatrix}; \quad (7)$$

– синусна ортогональна складова шостої гармоніки миттєвої реактивної потужності:

$$Q_{6b} = U_{1m} I_{5m} \begin{bmatrix} 12\sqrt{3} \cos^5(\varphi_{I5}) - \\ - 15\sqrt{3} \cos^3(\varphi_{I5}) + \\ + \frac{15\sqrt{3}}{4} \cos(\varphi_{I5}) \end{bmatrix}; \quad (8)$$

– середньоквадратичне значення шостої гармоніки миттєвої реактивної потужності:

$$Q_{6rms} = \frac{3\sqrt{3}}{4} U_{1m} I_{5m}. \quad (9)$$

Згідно з крос-векторною теорією потужності, компенсаційні струми в області часу отримуються наступним чином:

$$\begin{aligned} i_{cA}(t) &= \frac{\tilde{p}(t)u_A(t)}{u_S^2(t)} + \frac{q_C(t)u_B(t) - q_B(t)u_C(t)}{u_S^2(t)}; \\ i_{cB}(t) &= \frac{\tilde{p}(t)u_B(t)}{u_S^2(t)} + \frac{q_A(t)u_C(t) - q_C(t)u_A(t)}{u_S^2(t)}; \\ i_{cC}(t) &= \frac{\tilde{p}(t)u_C(t)}{u_S^2(t)} + \frac{q_B(t)u_A(t) - q_A(t)u_B(t)}{u_S^2(t)}, \end{aligned} \quad (10)$$

де  $u_S(t) = \sqrt{u_A^2(t) + u_B^2(t) + u_C^2(t)}$ ;  $\tilde{p}(t) = p(t) - P_0$ ;

$$q_A(t) = i_C(t)u_B(t) - i_B(t)u_C(t);$$

$$q_B(t) = i_A(t)u_C(t) - i_C(t)u_A(t);$$

$$q_C(t) = i_B(t)u_A(t) - i_A(t)u_B(t).$$

Відповідно до (10) були отримані вирази розрахунку компенсаційних струмів у частотній області для трьох фаз:

– для фази А:

$$I_{cA} = \frac{\tilde{P}}{U_S * U_S} * U_A + \frac{Q_B * U_C - Q_C * U_B}{U_S * U_S}; \quad (11)$$

– для фази В:

$$I_{cB} = \frac{\tilde{P}}{U_S * U_S} * U_B + \frac{Q_A * U_C - Q_C * U_A}{U_S * U_S}; \quad (12)$$

– для фази С:

$$I_{cC} = \frac{\tilde{P}}{U_S * U_S} * U_C + \frac{Q_B * U_A - Q_A * U_B}{U_S * U_S}. \quad (13)$$

У виразах (11)–(13)

$$U_S = \sqrt{U_A * U_A + U_B * U_B + U_C * U_C}; \quad \tilde{P} = P - P_0;$$

$$Q_A = I_C * U_B - I_B * U_C; \quad Q_B = I_A * U_C - I_C * U_A;$$

$$Q_C = I_B * U_A - I_A * U_B; \quad * - \text{операція дискретної згортки.}$$

Відповідно до виразів (11)–(13) були розраховані ортогональні косинусні та синусні складові активного та реактивного складових компенсаційного струму, аналітичні вирази в частотній області яких наведено нижче:

– для фази А:

$$I_{AP a5} = \frac{1}{8} I_{5m}; \quad I_{AP b5} = \frac{\sqrt{3}}{8} I_{5m}; \quad I_{AP a7} = \frac{1}{8} I_{5m};$$

$$I_{AP b7} = \frac{\sqrt{3}}{8} I_{5m}; \quad I_{AQ b1} = -\frac{1}{4} I_{1m}; \quad I_{AQ a5} = \frac{1}{8} I_{5m};$$

$$I_{AQ b5} = \frac{\sqrt{3}}{8} I_{5m}; \quad I_{AQ a7} = -\frac{1}{8} I_{5m}; \quad I_{AQ b7} = -\frac{\sqrt{3}}{8} I_{5m};$$

– для фази В:

$$I_{BP a5} = \frac{1}{8} I_{5m}; \quad I_{BP b5} = -\frac{\sqrt{3}}{8} I_{5m}; \quad I_{BP a7} = -\frac{1}{4} I_{5m};$$

$$I_{BQ a1} = \frac{\sqrt{3}}{8} I_{1m}; \quad I_{BQ b1} = \frac{1}{8} I_{1m}; \quad I_{BQ a5} = \frac{1}{8} I_{5m};$$

$$I_{BQ b5} = -\frac{\sqrt{3}}{8} I_{5m}; \quad I_{BQ a7} = \frac{1}{4} I_{5m};$$

– для фази С:

$$I_{CP a5} = -\frac{1}{4} I_{5m}; \quad I_{CP a7} = \frac{1}{8} I_{5m}; \quad I_{CP b7} = -\frac{\sqrt{3}}{8} I_{5m};$$

$$I_{CQ a1} = -\frac{\sqrt{3}}{8} I_{1m}; \quad I_{CQ b1} = \frac{1}{8} I_{1m}; \quad I_{CQ a5} = -\frac{1}{4} I_{5m};$$

$$I_{CQ a7} = -\frac{1}{8} I_{5m}; \quad I_{CQ b7} = \frac{\sqrt{3}}{8} I_{5m}.$$

Для визначенні ортогональних косинусних та синусних складових компенсаційного струму визначається сума активних та реактивних складових компенсаційних струмів. Отримані аналітичні вирази наведено нижче:

– для фази А:

$$I_{Ab1} = -\frac{1}{4} I_{1m}; \quad I_{Aa5} = \frac{1}{4} I_{5m}; \quad I_{Ab5} = \frac{\sqrt{3}}{4} I_{5m};$$

– для фази В:

$$I_{Ba1} = -\frac{\sqrt{3}}{8} I_{1m}; \quad I_{Bb1} = \frac{3}{8} I_{1m};$$

– для фази С:

$$I_{Ca1} = \frac{\sqrt{3}}{8} I_{1m}; \quad I_{Cb1} = \frac{1}{8} I_{1m}; \quad I_{Ca5} = -\frac{1}{2} I_{5m}.$$

Як видно з наведених вище аналітичних виразів, при отриманні компенсаційного струму відбувається взаємна компенсація сьомої гармоніки активної та реактивної складових компенсаційного струму. Отже, для якісної компенсації вищих гармонічних складових струму навантаження необхідно використовувати як активну, так і реактивну складову компенсаційного струму. Окреме використання не забезпечить необхідного гармонічного складу сигналу компенсаційного струму та, відповідно, навпаки ще більше спотворить струм мережі.

Вірність отриманих аналітичних виразів компенсаційного струму підтверджується побудовою кри-

вих скомпенсованого струму (рис. 3): відсутністю вищих гармонік та зсуву фаз струму відносно напруг (рис. 4).

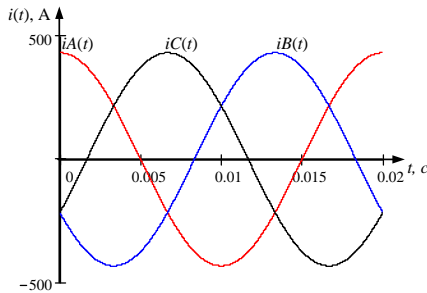


Рисунок 3 – Скомпенсований струм мережі з нелінійним навантаженням

II. Наступним прикладом для дослідження компенсаційних процесів у системі електропостачання приймалась амплітудна несиметрія струмів. Вихідні ортогональні косинусні й синусні складові трифазного струму надані у частотній області:

$$I_{Aa1} = \frac{\sqrt{3}}{4} I_{1m}; \quad I_{Ab1} = -\frac{1}{4} I_{1m}; \quad I_{Ba1} = 0;$$

$$I_{Bb1} = \frac{1}{2} \varepsilon_B I_{1m}; \quad I_{Ca1} = -\frac{\sqrt{3}}{4} \varepsilon_C I_{1m}; \quad I_{Cb1} = -\frac{1}{4} \varepsilon_C I_{1m},$$

де  $\varepsilon_B$ ,  $\varepsilon_C$  – коефіцієнти несиметрії фази B та фази C відповідно; кут зсуву першої гармонічної складової струму  $\varphi_{I1} = -30^\circ$ . Чисельні значення коефіцієнтів несиметрії приймалися  $\varepsilon_B = 0,8$ ,  $\varepsilon_C = 1,2$  відповідно. Криві трифазного несиметричного струму зображено на рис. 5.

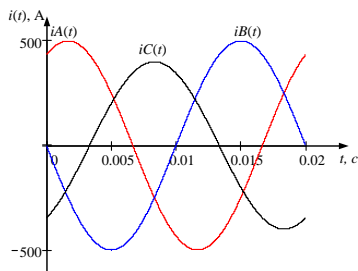


Рисунок 5 – Трифазний амплітудно-несиметричний струм системи електропостачання

У випадку несиметричного навантаження, що обумовлює амплітудну несиметрію струмів мережі, з'являються змінні складові миттєвої активної та реактивної потужності. При наданні їх у частотній області отримаємо наступні вирази:

– постійна складова миттєвої активної потужності:

$$P_0 = \frac{1}{2} U_{1m} I_{1m} \cos(\varphi_{I1}) [1 + \varepsilon_B + \varepsilon_C]; \quad (14)$$

– косинусна ортогональна складова другої гармоніки миттєвої активної потужності:

$$P_{2a} = \frac{1}{8} U_{1m} I_{1m} \cos(\varphi_{I1}) [2 - \varepsilon_B - \varepsilon_C] + \frac{\sqrt{3}}{8} U_{1m} I_{1m} \sin(\varphi_{I1}) [\varepsilon_B - \varepsilon_C]; \quad (15)$$

– синусна ортогональна складова другої гармоніки миттєвої активної потужності:

$$P_{2b} = \frac{1}{8} U_{1m} I_{1m} \sin(\varphi_{I1}) [2 - \varepsilon_B - \varepsilon_C] + \frac{\sqrt{3}}{8} U_{1m} I_{1m} \cos(\varphi_{I1}) [\varepsilon_C - \varepsilon_B]; \quad (16)$$

– середньоквадратичне значення другої гармоніки миттєвої активної потужності:

$$P_{2rms} = \sqrt{P_{2a}^2 + P_{2b}^2} = \frac{1}{4} U_{1m} I_{1m} \sqrt{1 + \varepsilon_B^2 + \varepsilon_C^2 - \varepsilon_C \varepsilon_B - \varepsilon_C - \varepsilon_B}; \quad (17)$$

– постійна складова реактивної потужності:

$$Q_0 = -\frac{\sqrt{3}}{2} U_{1m} I_{1m} \sin(\varphi_{I1}) [1 + \varepsilon_B + \varepsilon_C]; \quad (18)$$

– косинусна ортогональна складова другої гармоніки миттєвої реактивної потужності:

$$Q_{2a} = \frac{3}{8} U_{1m} I_{1m} \cos(\varphi_{I1}) [\varepsilon_C - \varepsilon_B] + \frac{\sqrt{3}}{8} U_{1m} I_{1m} \sin(\varphi_{I1}) [2 - \varepsilon_B - \varepsilon_C]; \quad (19)$$

– синусна ортогональна складова другої гармоніки миттєвої реактивної потужності:

$$Q_{2b} = -\frac{3}{8} U_{1m} I_{1m} \sin(\varphi_{I1}) [\varepsilon_B - \varepsilon_C] - \frac{\sqrt{3}}{8} U_{1m} I_{1m} \cos(\varphi_{I1}) [2 - \varepsilon_B - \varepsilon_C]; \quad (20)$$

– середньоквадратичне значення другої гармоніки миттєвої реактивної потужності:

$$Q_{2rms} = \sqrt{Q_{2a}^2 + Q_{2b}^2} = \frac{\sqrt{3}}{4} U_{1m} I_{1m} \sqrt{1 + \varepsilon_B^2 + \varepsilon_C^2 - \varepsilon_C \varepsilon_B - \varepsilon_C - \varepsilon_B}. \quad (21)$$

Аналіз отриманих аналітичних рівнянь вказує на те, що рівень змінних складових потужностей нелінійно залежить від рівня несиметрії, а середньоквадратичні значення другої гармоніки миттєвої активної  $P_{2rms}$  та реактивної  $Q_{2rms}$  потужностей не залежить від кута зсуву фаз струму.

Згідно з крос-векторною теорією були розраховані компенсаційні струми у частотній області:

– для фази A:

$$I_{Aa1} = -\frac{\sqrt{3}}{12} I_{1m} [-2 + \varepsilon_B + \varepsilon_C]; \quad I_{Ab1} = -\frac{1}{4} I_{1m};$$

– для фази B:

$$I_{Ba1} = \frac{\sqrt{3}}{24} I_{1m} [1 + \varepsilon_B + \varepsilon_C]; \quad I_{Bb1} = \frac{1}{8} I_{1m} [3\varepsilon_B - 1 - \varepsilon_C];$$

– для фази C:

$$I_{Ca1} = \frac{\sqrt{3}}{24} I_{1m} [1 + \varepsilon_B - 5\varepsilon_C]; \quad I_{Cb1} = \frac{1}{8} I_{1m} [1 + \varepsilon_B - \varepsilon_C].$$

Вірність отриманих ортогональних складових компенсаційного струму підтверджується тим, що при підстановці  $\varepsilon_B = \varepsilon_C = 1$  рівняння (14)–(21) набувають вигляд виразів, характерних для роботи системи із симетричним навантаженням:  $P_{2a} = 0$ ;  $P_{2b} = 0$ ;  $Q_{2a} = 0$ ;  $Q_{2b} = 0$ ;  $P_{2rms} = 0$ ;  $Q_{2rms} = 0$ ;  

$$P_0 = \frac{3}{2} U_m I_m \cos(\varphi_{I1}) .$$

Отримані аналітичні залежності дозволяють проводити дослідження як для невеликих відхилень опорів у фазах, так і для випадків граничних режимів: обрив фази ( $\varepsilon=0$ ) та коротке замикання ( $1/\varepsilon=0$ ).

Аналіз побудованих залежностей показав, що більші за значеннями величини змінних складових потужності виникають при зменшенні опорів навантаження порівняно із збільшенням на відповідну величину.

Аналіз складових миттєвої потужності залежно від зміни коефіцієнта амплітудної несиметрії струму  $\varepsilon$  (рис. 6, 7) й коефіцієнту зміни опорів навантаження  $1/\varepsilon$  в одній із фаз (рис. 8, 9) дозволяє визначити інтегральні параметри енергетичних процесів, що може бути застосовано для розрахунку параметрів та встановлення потужності САФ.

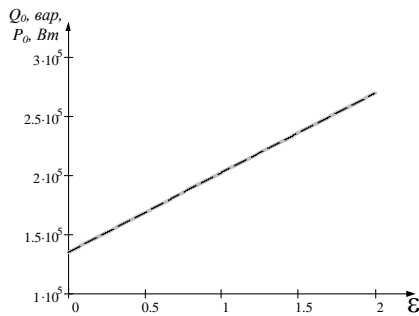


Рисунок 6 – Залежність постійної складової активної  $P_0$  (—) та реактивної  $Q_0$  (---) потужності від коефіцієнта несиметрії струму

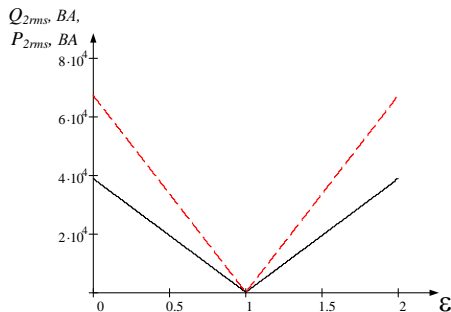


Рисунок 7 – Залежність середньоквадратичного значення складової активної  $P_{2rms}$  (—) та реактивної  $Q_{2rms}$  (---) потужності від коефіцієнта несиметрії струму

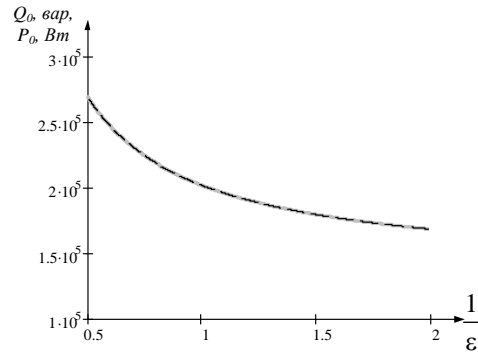


Рисунок 8 – Залежність постійної складової активної  $P_0$  (—) та реактивної  $Q_0$  (---) потужності від коефіцієнта зміни опорів навантаження  $1/\varepsilon$  в одній із фаз

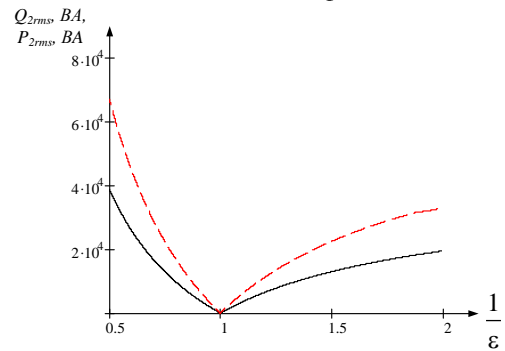


Рисунок 9 – Залежність середньоквадратичного значення складової активної  $P_{2rms}$  (—) та реактивної  $Q_{2rms}$  (---) потужності від коефіцієнта зміни опорів навантаження  $1/\varepsilon$  в одній із фаз

Криві струму та напруг (рис. 10, 11) підтверджують адекватність отриманих аналітичних виразів компенсаційних струмів. Результатом якісного процесу компенсації є досягнення амплітудної симетрії кривих сигналу трифазного струму (рис. 10), а також його протіканням у фазі з напругою мережі (рис. 11), тобто усунення реактивної складової.

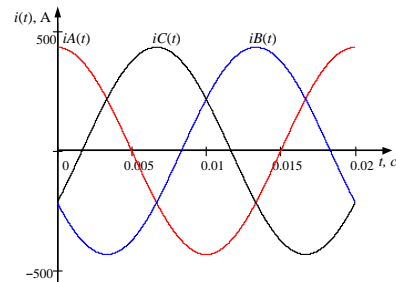


Рисунок 10 – Скомпенсований струм мережі з несиметричним навантаженням

При компенсації амплітудної несиметрії струмів навантаження викликає інтерес питання, як після компенсації розподіляться амплітуди струмів, а також як вони будуть залежати від коефіцієнтів несиметрії. Проведення компенсації у частотній області в аналітичній формі дозволяє це надати наочно. Для спрощення аналітичних виразів розглянемо описа-

ний вище випадок для активного навантаження. Вихідні гармонічні складові струму приведені нижче:

$$I_{Aa1} = \frac{1}{2} I_{1m}; \quad I_{Ab1} = 0; \quad I_{Ba1} = -\frac{1}{4} I_{1m} \varepsilon_B;$$

$$I_{Bb1} = \frac{\sqrt{3}}{4} I_{1m} \varepsilon_B; \quad I_{Ca1} = -\frac{1}{4} I_{1m} \varepsilon_C; \quad I_{Cb1} = -\frac{\sqrt{3}}{4} I_{1m} \varepsilon_C.$$

Після проведення компенсації всіх небажаних складових отримуються наступні аналітичні вирази компенсаційного струму:

– для фази *A*:

$$I_{Aa1} = \frac{1}{2} I_{1m} \left[ \frac{1 + \varepsilon_B + \varepsilon_C}{3} \right]; \quad I_{Ab1} = 0;$$

– для фази *B*:

$$I_{Ba1} = -\frac{1}{4} I_{1m} \left[ \frac{1 + \varepsilon_B + \varepsilon_C}{3} \right]; \quad I_{Bb1} = \frac{\sqrt{3}}{4} I_{1m} \left[ \frac{1 + \varepsilon_B + \varepsilon_C}{3} \right];$$

– для фази *C*:

$$I_{Ca1} = -\frac{1}{4} I_{1m} \left[ \frac{1 + \varepsilon_B + \varepsilon_C}{3} \right]; \quad I_{Cb1} = -\frac{\sqrt{3}}{4} I_{1m} \left[ \frac{1 + \varepsilon_B + \varepsilon_C}{3} \right].$$

На підставі наданих виразів можна зробити висновок, що при компенсації у склад ортогональних складових струму кожної фази вноситься відношення  $\left[ \frac{1 + \varepsilon_B + \varepsilon_C}{3} \right]$ , що дозволяє симетрувати амплітуди сигналів струму. Тобто амплітуди струмів усереднюються.

Цей висновок та отримані аналітичні залежності компенсаційних струмів дозволяють визначити завантаження силових ключів фаз САФ та здійснити правильний його вибір за струмом найбільш перевантаженого ключа інвертора.

III. Ще одним випадком несиметричного навантаження в мережі електропостачання є кутова несиметрія струму. Розглянемо випадок несиметрії струму фази *C*. Кут зсуву першої гармоніки струму фази *A* та *B* дорівнює  $\varphi_{I1} = -30$  ел. град., кут зсуву першої гармоніки струму фази *C* –  $\Delta\varphi_{I1} = -10$  ел. град. Вихідні ортогональні косинусні та синусні складові трифазного струму подані в частотній області:

$$I_{Aa1} = \frac{1}{2} I_{1m} \cos(\varphi_{I1}); \quad I_{Ab1} = \frac{1}{2} I_{1m} \sin(\varphi_{I1});$$

$$I_{Ba1} = -\frac{1}{2} I_{1m} \sin\left(\frac{1}{6}\pi + \varphi_{I1}\right); \quad I_{Bb1} = \frac{1}{2} I_{1m} \left(\frac{1}{6}\pi + \varphi_{I1}\right);$$

$$I_{Ca1} = -\frac{1}{2} I_{1m} \cos\left(\frac{1}{3}\pi + \varphi_{I1} + \Delta\varphi_{I1}\right);$$

$$I_{Cb1} = -\frac{1}{2} I_{1m} \sin\left(\frac{1}{3}\pi + \varphi_{I1} + \Delta\varphi_{I1}\right).$$

Криві струмів мережі електропостачання наведено на рис. 12.

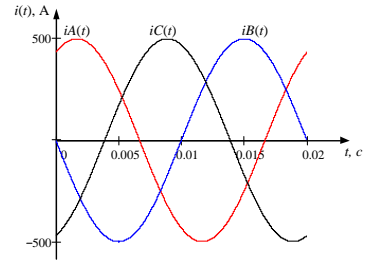


Рисунок 12 – Струми системи електропостачання з кутовою несиметрією фази *C*

При наданні змінних ортогональних складових миттєвих активної та реактивної потужностей у частотній області отримаємо наступні вирази:

– постійна складова миттєвої активної потужності:

$$P_0 = U_m I_m \left[ \cos(\varphi_{I1}) + \frac{\cos(\varphi_{I1} + \Delta\varphi_{I1})}{2} \right]; \quad (22)$$

– косинусна ортогональна складова другої гармоніки миттєвої активної потужності:

$$P_{2a} = \frac{1}{8} U_m I_m \left[ \begin{array}{l} \cos(\varphi_{I1}) + \sqrt{3} \sin(\varphi_{I1}) - \\ - \cos(\varphi_{I1} - \Delta\varphi_{I1}) - \\ - \sqrt{3} \sin(\varphi_{I1} - \Delta\varphi_{I1}) \end{array} \right]; \quad (23)$$

– синусна ортогональна складова другої гармоніки миттєвої активної потужності:

$$P_{2b} = \frac{1}{8} U_m I_m \left[ \begin{array}{l} \sin(\varphi_{I1}) - \sqrt{3} \cos(\varphi_{I1}) + \\ + \sqrt{3} \cos(\varphi_{I1} - \Delta\varphi_{I1}) - \\ - \sin(\varphi_{I1} - \Delta\varphi_{I1}) \end{array} \right]; \quad (24)$$

– середньоквадратичне значення другої гармоніки миттєвої активної потужності:

$$P_{2rms} = \frac{1}{2} U_m I_m \sqrt{\left[ \sin\left(\frac{\Delta\varphi_{I1}}{2}\right)^2 \right]}; \quad (25)$$

– постійна складова миттєвої реактивної потужності:

$$Q_0 = \sqrt{3} U_m I_m \left[ \frac{\sqrt{3}}{2} \sin(\varphi_{I1} + \Delta\varphi_{I1}) + \sin(\varphi_{I1}) \right]; \quad (26)$$

– косинусна ортогональна складова другої гармоніки миттєвої реактивної потужності:

$$Q_{2a} = \frac{1}{8} U_m I_m \left[ \begin{array}{l} -3 \cos(\varphi_{I1} + \Delta\varphi_{I1}) + \\ + \sqrt{3} \sin(\varphi_{I1} + \Delta\varphi_{I1}) + \\ + 3 \cos(\varphi_{I1}) - \\ - \sqrt{3} \sin(\varphi_{I1}) \end{array} \right]; \quad (27)$$

– синусна ортогональна складова другої гармоніки миттєвої реактивної потужності:

$$Q_{2b} = \frac{1}{8} U_m I_m \begin{bmatrix} -3 \sin(\varphi_{I1} + \Delta\varphi_{I1}) - \\ -\sqrt{3} \cos(\varphi_{I1} + \Delta\varphi_{I1}) + \\ +3 \sin(\varphi_{I1}) + \sqrt{3} \cos(\varphi_{I1}) \end{bmatrix}; \quad (28)$$

– середньоквадратичне значення другої гармоніки миттєвої реактивної потужності:

$$Q_{2rms} = \frac{1}{2} U_m I_m \sqrt{3 \sin\left(\frac{\Delta\varphi_{I1}}{2}\right)^2}. \quad (29)$$

Аналіз отриманих виразів показав, що середньоквадратичне значення другої гармоніки миттєвої активної  $P_{2rms}$  та реактивної  $Q_{2rms}$  потужності нелінійно залежать від кута несиметрії  $\Delta\varphi_{I1}$  та не залежать від кута зсуву фаз струму. При аналізі процесу компенсації були отримані графіки залежності постійних складових та середньоквадратичних значень миттєвих активної та реактивної потужностей досліджуваної системи від кута зсуву першої гармоніки фази С  $\Delta\varphi_{I1}$  (рис. 13, 14).

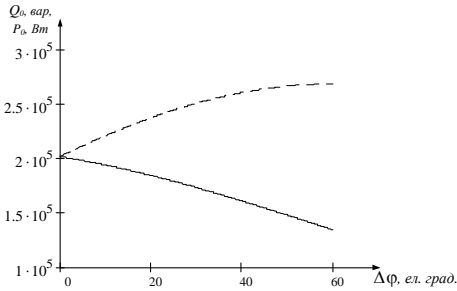


Рисунок 13 – Залежність постійної складової активної  $P_0$  (—) та реактивної  $Q_0$  (---) потужності від коефіцієнта кутової несиметрії струму

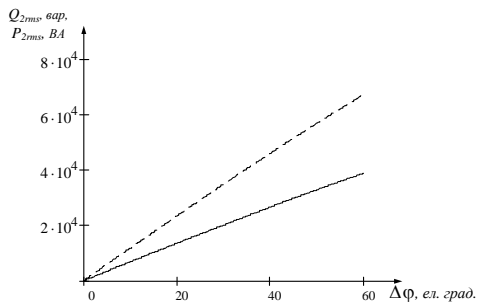


Рисунок 14 – Залежність середньоквадратичного значення складової активної  $P_{2rms}$  (—) та реактивної  $Q_{2rms}$  (---) потужності від коефіцієнта кутової несиметрії струму

Згідно з крос-векторною теорією були розраховані компенсаційні струми в частотній області для досліджуваної системи електропостачання з кутовою несиметрією струму:

– для фази А:

$$I_{Aa1} = -\frac{1}{6} I_{1m} (\cos(\varphi_{I1} + \Delta\varphi_{I1}) - \cos(\varphi_{I1}));$$

$$I_{Ab1} = \frac{1}{2} I_{1m} \sin(\varphi_{I1});$$

– для фази В:

$$I_{Ba1} = -\frac{1}{12} I_{1m} (\cos(\varphi_{I1}) - \cos(\varphi_{I1} + \Delta\varphi_{I1}) + 3\sqrt{3} \sin(\varphi_{I1}));$$

$$I_{Bb1} = \frac{1}{4} I_{1m} \left( -\sin(\varphi_{I1}) + \frac{\sqrt{3}}{3} \cos(\varphi_{I1}) - \frac{1}{3} \cos(\varphi_{I1} + \Delta\varphi_{I1}) \right);$$

– для фази С:

$$I_{Ca1} = \frac{1}{12} I_{1m} \left( 2 \cos(\varphi_{I1}) - 2 \cos(\varphi_{I1} + \Delta\varphi_{I1}) + 3\sqrt{3} \sin(\varphi_{I1} + \Delta\varphi_{I1}) \right);$$

$$I_{Cb1} = \frac{1}{2} I_{1m} \left( -\frac{1}{2} \sin(\varphi_{I1} + \Delta\varphi_{I1}) + \frac{\sqrt{3}}{3} \cos(\varphi_{I1}) - \frac{\sqrt{3}}{3} \cos(\varphi_{I1} + \Delta\varphi_{I1}) \right).$$

Скомпенсовані струми мережі зображено на (рис. 15), який ілюструє вірність розрахованих компенсаційних струмів.

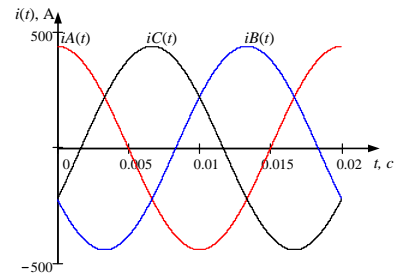


Рисунок 15 – Скомпенсований струм мережі з несиметричним навантаженням

Вірність отриманих ортогональних складових компенсаційного струму підтверджується тим, що при  $\varphi_A = \varphi_B = \varphi_C$ , тобто  $\Delta\varphi = 0$ , рівняння (17)–(24) набувають вигляду виразів, характерних для роботи системи із симетричним навантаженням:  $P_{2a} = 0$ ;  $P_{2b} = 0$ ;  $Q_{2a} = 0$ ;  $Q_{2b} = 0$ ;  $P_{2rms} = 0$ ;  $Q_{2rms} = 0$ , тобто мережею буде споживатись лише постійна активна складова миттєвої потужності  $P_0$ .

Для чисельного аналізу впливу компенсації тих чи інших складових миттєвих потужностей було розраховано потужність втрат і коефіцієнт корисної дії (ККД) мережі до та після компенсації всіх небажаних складових миттєвої потужності для трьох розглянутих випадків – несинусоїдальності, амплітудної та кутової несиметрії струму мережі. Розрахунок ККД досліджуваної мережі електропостачання здійснювався за виразами, що описані у роботі [24].

Для визначення, як компенсація змінної складової активної миттєвої потужності, а також постійної та змінної складової миттєвої реактивної потужності впливає на зміну втрат і ККД, було проаналізовано три випадки. У першому – було проведено компенсацію всіх небажаних складових потужностей, тобто змінну складову миттєвої активної потужності  $\tilde{p}$ , постійну  $Q_0$  та змінну  $\tilde{q}$  складові миттєвої реактивної потужності. У другому – скомпенсовано змінні складові активної  $\tilde{p}$  та реактивної  $\tilde{q}$  потужностей, та



у третьому – скомпенсовано лише постійну складову миттєвої реактивної потужності  $Q_0$ . Розрахунки проводились при відношенні потужності короткого замикання до потужності навантаження, яке дорівнює 40. Результати розрахунків зведено до табл. 1. Аналіз енергетичних характеристик мережі для варіанту компенсації тільки змінних складових миттєвих по-

тужностей  $\tilde{p}$  та  $\tilde{q}$  має певний інтерес при розрахунку САФ при комбінованому застосуванні з конденсаторною системою компенсації реактивної потужності  $Q_0$ . Саме такий варіант структурної системи компенсації є найбільш економічно привабливим з причини достатньо високої вартості САФ.

Таблиця 1 – Дані зміни втрат і ККД при різних варіантах компенсації складових миттєвих потужностей

Несинусоїдність струму	Режим	Параметр	$\Delta U, \%$	$P_0, \text{кВт}$	$\Delta P_m, \text{кВт}$	$I_{rms}, \text{А}$			$Q_0, \text{квар}$	$\eta, \%$
						фаза А	фаза В	фаза С		
	До компенсації		2,94	202	7,007	360,555			-202	95,2
	$\tilde{p} + q$		2,5	202	5,05	306,186			0	97,4
	$\tilde{p} + \tilde{q}$		2,88	202	6,733	176,777			-202	95,5
	$Q_0$		2,56	202	5,319	157,123			0	97,2
Амплітудна несиметрія струму	До компенсації		2,9	202	6,913	353,553	282,243	424,264	-202	95,3
	$\tilde{p} + q$		2,5	202	5,062	306,186			0	97,4
	$\tilde{p} + \tilde{q}$		2,9	202	6,776	354,141	336,031	371,371	-202	95,5
	$Q_0$		2,5	202	6,913	316,886	255,767	348,807	0	97,3
Фазова несиметрія струму	До компенсації		3	202	7,301	367,696			-230	95,2
	$\tilde{p} + q$		2,6	202	5,28	312,689			0	97,4
	$\tilde{p} + \tilde{q}$		3	202	7,292	362,299	371,557	368,47	220	95,2
	$Q_0$		2,6	202	5,288	320,931	313,229	304,372	0	97,4

**ВИСНОВКИ.** Проведені дослідження процесів компенсації вищих гармонік і амплітудної та фазової несиметрії струмів навантаження з реалізацією в частотній області дозволили отримати аналітичні залежності компенсаційних струмів і струмів у мережі до та після компенсації у функції амплітуд вищих гармонік струму й у функції коефіцієнтів несиметрії.

Отримані аналітичні вирази показали, що при амплітудній несиметрії середньоквадратичні значення змінних складових миттєвих активної та реактивної потужності залежать тільки від коефіцієнта амплітудної несиметрії й не залежать від кута зсуву фаз струму відносно напруги. При роботі САФ у мережі з несиметричним навантаженням відбувається симетрування струмів мережі. Амплітуда струмів після компенсації несиметрії дорівнює середньому значенню струмів до компенсації.

Показано, що покращення якості струму шляхом компенсації небажаних складових потужностей дозволяє зменшити потужність втрат у системі електропостачання й збільшення ККД. Аналіз компенсаційних процесів показав, що найбільшого зменшення втрат можливо досягти за рахунок одночасного усунення всіх небажаних складових миттєвих потужностей.

Отримані аналітичні залежності інтегральних енергетичних показників можуть бути застосовані при техніко-економічному аналізі меж комбінованого застосування конденсаторних систем компенсації реактивної потужності та САФ. Визначені аналітичні залежності середньоквадратичних значень змінних складових миттєвих потужностей у функції значень вищих гармонік та коефіцієнтів несиметрії можуть

бути застосовані при розрахунках необхідних параметрів САФ, а аналітичні вирази компенсаційних струмів – для правильного вибору САФ за струмом силових ключів найбільш перевантаженої його фази.

ЛІТЕРАТУРА

1. Kim H., Blaabjerg F., Bak-Jensen B., Choi J. Instantaneous power compensation in three-phase systems by using p-q-r theory // IEEE Transactions on power electronics. – 2002. – Iss. 17 (5). – PP. 701–710.
2. Михальський В.М., Соболев В.М., Чопик В.В., Шаповал І.А. Стратегія мінімізації небажаних складових миттєвої потужності із застосуванням різних топологій паралельних активних фільтрів // Технічна електродинаміка. – 2014. – Вип. 1. – С. 41–50.
3. Leszek S. Czarniecki. Effect of supply voltage harmonics on IRP – based switching compensator control // IEEE Trans. on power electronics. – 2008. – PP. 1–5.
4. Демирчан К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В. Теоретические основы электротехники. – СПб.: Питер-Пресс, 2009. – 432 с.
5. Маевский О.А. Энергетические показатели вентиляльных преобразователей. – М.: Энергия, 1975. – 320 с.
6. Akagi H., Watanabe E.H., Aredes M. Instantaneous power theory and applications to power conditioning. – Wiley-interscience a John Wiley & Sons, inc., Publication.: Mohamed E. El-Hawary, Series Editor. – 2007.
7. Watanabe E.H., Afonso J.L., Monteiro L.F.C., Akagi H. Instantaneous p-q power theory for control of compensators in micro-grids // International school on

nonsinusoidal currents and compensation June 15–18, 2010. – Lagow, Poland. – PP. 17–26.

8. Домнин И.Ф., Жемеров Г.Г., Крылов Д.С., Сокол Е.И. Современные теории мощности и их использование в преобразовательных системах силовой электроники // *Технічна електродинаміка. Тематичний випуск.* – 2004. – С. 80–90.

9. Жемеров Г.Г., Ильина О.В. Теория мощности фризе и современные теории мощности // *Электротехника і електромеханіка.* – 2007. – Вип. 6. – С. 63–65.

10. Поліщук С.Й., Артеменко М.Ю., Михальський В.М. Аналітична побудова координатних систем теорії миттєвої потужності трифазних кіл для керування пристроями активної фільтрації // *Технічна електродинаміка. Перетворення параметрів електричної енергії.* – 2013. – Вип. 2. – С. 25–35.

11. Leszek S. Czarnecki. On some misinterpretations of the instantaneous reactive power p-q theory // *IEEE Transactions on power electronics.* – 2004. – Iss. 19 (3). – PP. 828–836.

12. Leszek S. Czarnecki. Comments to the paper: Instantaneous p-q theory for compensating nonsinusoidal systems // *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review).* – 2009. – Iss. 85 (6). – PP. 167–169.

13. Leszek S. Czarnecki, Samuel S. Pearce CPC-based comparison of compensation goals in systems with nonsinusoidal voltages and currents // *International school on nonsinusoidal currents and compensation.* – 2010. – Lagow, Poland. – PP. 27–36.

14. Leszek S. Czarnecki. Effect of supply voltage harmonics on IRP – based switching compensator control // *IEEE Trans. on power electronics.* – 2008. – PP. 1–5.

15. Zagirnyak M.V., Mamchur D.G., Kalinov A.P. Elimination of the influence of supply mains low-quality parameters on the results of induction motor diagnostics // *19th International Conference on Electrical Machines, ICEM 2010.* – Art. no. 5608071. – PP. 1–6.

16. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: учебник. – М.: Гардарики, 2001. – 638 с.

17. Шидловська Н.А. Аналіз нелінійних електричних кіл методом малого параметру.– К.: Євроіндекс, 1999. – 192 с.

18. Жарський Б.К., Новський В.О., Голубев В.В. Перетворення параметрів електромагнітної енергії вентиляними комутаторами: монографія. – К.: Інститут електродинаміки НАН України, 2013. – 323 с.

19. Сидоренко В.М., Мамчур Д.Г., Родькін Д.Й., Чорний О.П. Визначення складових миттєвої потужності електричних сигналів // *Електроінформ.* – Львів, 2005. – Вип. 1. – С. 12–14.

20. Нуссбаумер Г. Быстрое преобразование Фурье и алгоритмы вычисления сверток. – М.: Радио и связь, 1985. – 248 с.

21. Zagirnyak M., Kalinov A., Maliakova M. An algorithm for electric circuits calculation based on instantaneous power component balance // *Przegląd elektrotechniczny (Electrical Review).* – 2011. – R. 87 NR 12b/2011. – PP. 212–215.

22. Zagirnyak M., Kalinov A., Maliakova M. Analysis of instantaneous power components of electric circuit with a semiconductor element // *Archive of electrical engineering.* – Iss. 62/2013 (3). – PP. 473–486.

23. Zagirnyak M., Maliakova M., Kalinov A. Analysis of electric circuits with semiconductor converters with the use of a small parameter method in frequency domain // *COMPEL: The International journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering.* – Iss. 34/2015 (3). – PP. 808–823.

24. Жемеров Г.Г., Домнин И.Ф., Ильина И.А., Тугай Д.В. Энергоэффективность коррекции фазы тока и компенсаций пульсаций активной и реактивной мощностей в трехфазной системе электроснабжения // *Технічна електродинаміка. Електроенергетичні системи та установки.* – 2007. – Вип. 1. – С. 52–57.

## ANALYSIS IN THE FREQUENCY DOMAIN OF THE COMPENSATION OF THE ELECTRIC NETWORKS POWER COMPONENTS SYSTEM WORK

**M. Maliakova, A. Kalinov**

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: mariia.maliakova@gmail.com

An analytical research of the compensation processes in frequency-domain in the power supply system under nonlinear and asymmetric load using cross-vector theory instantaneous power was done. The necessary quantities for compensation analysis process were formed with the usage of the automated method for frequency components of electrical quantities forming based on discrete convolution algorithm. The instantaneous components of active and reactive power, RMS value of variable components as a function of harmonic components of current amplitude and phase asymmetry were received as a result of the calculations. Analysis of the analytical dependences indicates that the level of the variable power component nonlinearly depends of amplitude asymmetric level and instantaneous active and reactive power rms values does not depend on the angle of current phase shift. In the case of angular asymmetry– instantaneous active and reactive power rms values nonlinearly depends on the angle of asymmetry and do not depends on the angle of phase shift current. It was shown that signal amplitude currents balancing took place after amplitude asymmetry compensation, ie the currents amplitude averaged. Received analytical dependence of the compensation currents allows to determine the PAF phases switches load and to make the right choice for the most current inverter overloaded keys. Analytical expressions compensating current confirmed, curves offset current. Power losses and efficiency of the network before and after compensation of the unwanted instantaneous power components were calculated for the numerical analysis of the compensate effect of the one or another power components.

**Key words:** compensation, instantaneous power theory, cross-vector theory, analytical analysis, frequency-domain.

## REFERENCES

1. Kim, H., Blaabjerg, F., Bak-Jensen, B. and Choi, J. (2002), "Instantaneous Power Compensation in Three-Phase Systems by Using p-q-r Theory", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 17, no. 5, pp. 701–710.
2. Mykhalskiy, V.M., Sobolev, V.M., Chopik, V.V. and Shapoval, I.A. (2014), "The strategy of minimizing unwanted instantaneous power components with the usage of different parallel active filter topologies", *Tekhnichna elektrodynamika*, no. 1, pp. 41–50. (in Ukrainian)
3. Czarnecki, S. Leszek (2008), "Effect of Supply Voltage Harmonics on IRP – Based Switching Compensator Control", *IEEE Trans. on Power Electronics*, pp. 1–5.
4. Demirchian, K.S., Neiman, L.R. and Kurovkin, N.V. (2009), *Teoreticheskiye osnovy elektrotehniki* [Theoretical Fundamentals of Electrotechnics], Piter, St. Petersburg. (in Russian)
5. Maevskiy, O.A. (1975), *Energeticheskie pokazateli ventilnyh preobrazovateley* [Energy indexes of the valve inverters], Energiya, Moscow. (in Russian)
6. Akagi, H., Watanabe, E.H. and Aredes, M. (2007), *Instantaneous power theory and applications to power*, Wiley-interscience a John Wiley & Sons, inc., Publication.: Mohamed E. El-Hawary, Series Editor.
7. Watanabe, E.H., Afonso, J.L., Monteiro, L.F.C. and Akagi, H. (2010), "Instantaneous p-q Power Theory for Control of Compensators in Micro-Grids International", *International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation June 15–18, Lagow, Poland*, pp. 27–36.
8. Domnin, I.F., Gernerov, G.G., Krylov, D.S. and Sokol, E.I. (2004), "Modern power theories and their usage in power electronics converter systems", *Tekhnichna elektrodynamika, Tematichnyy vipusk*, pp. 80–90.
9. Gernerov, G.G. and Ilyina, I.A. (2007), "The Fryze's power theory and modern power theories", *Electrical engineering and Electromechanics*, no. 6, pp. 63–65. (in Russian)
10. Polischuk, S.Yu., Artemenko, M.Yu. and Mykhalskiy, V.M. (2013), "Analytical construction of theory instantaneous power coordinate systems of three-phase circuits for active filtering device management", *Tekhnichna elektrodynamika, Peretvorennaya parametrv elektrychnoyi energii*, no. 2, pp. 25–35. (in Ukrainian)
11. Czarnecki, S. Leszek (2004), "On some misinterpretations of the instantaneous reactive power p-q theory", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 19, no. 3, pp. 828–836.
12. Czarnecki, S. Leszek (2009), "Comments to the paper: Instantaneous p-q Theory for Compensating Nonsinusoidal Systems", *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)*, R. 85 NR 6/2009, pp. 167–169.
13. Czarnecki, S. Leszek and Pearce, Samuel S. (2010), "CPC-based comparison of compensation goals in systems with nonsinusoidal voltages and currents", *International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation, June 15–18, Lagow, Poland*, pp. 27–36.
14. Czarnecki, S. Leszek (2008), "Effect of Supply Voltage Harmonics on IRP – Based Switching Compensator Control", *IEEE Trans. on Power Electronics*, pp. 1–5.
15. Zagirnyak, M.V., Mamchur, D.G., and Kalinov, A.P. (2010), "Elimination of the influence of supply mains low-quality parameters on the results of induction motor diagnostics", *19th International Conference on Electrical Machines, ICEM 2010*, art. no. 5608071, pp. 1–6.
16. Bessonov, L.A. (2001), *Teoreticheskie osnovy elektrotehniki* [Theoretical foundations of electrical engineering. Electric circuits], Gardariki, Moscow. (in Russian)
17. Shydlovska, N.A. (1999), *Analysis of nonlinear electric circuits by the small parameter method*, Evroindeks, Kyiv. (in Ukrainian)
18. Zharskiy, B.K., Novskiy, V.O. and Golubev, V.V. (2013), *Peretvorennaya parametrv elektromagnitnoyi energii ventilnimy komutatoramy* [The conversion of electromagnetic energy parameters valve switches], Instytut elektrodynamiky NAN Ukrainy, Kyiv. (in Ukrainian)
19. Sidorenko, V.M., Mamchur, D.G., Rodkin, D.Y. and Chorny, O.P. (2005), "Assessment of instantaneous power constituent of electric signals", *Elektroinform*, Lviv, Vol. 1, pp. 12–14. (in Ukrainian)
20. Nussbaumer, H. (1985), *Bystroe preobrazovanie Furye i algoritmy vychisleniia svertok* [Fast Fourier transform and convolution algorithm], Translated by Kasimova, Yu.F. and Pchelintseva, I.P., Radio i Svyaz, Moscow. (in Russian)
21. Zagirnyak, M., Kalinov, A. and Maliakova, M. (2011), "An algorithm for electric circuits calculation based on instantaneous power component balance", *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)*, R. 87, no. 12b, pp. 212–215.
22. Zagirnyak, M., Kalinov, A. and Maliakova, M. (2013), "Analysis of instantaneous power components of electric circuit with a semiconductor element", *Archive of Electrical Engineering*, Vol. 62, no. 3, pp. 473–486.
23. Maliakova, M., Zagirnyak, M. and Kalinov, A. (2015), "Analysis of electric circuits with semiconductor converters with the use of a small parameter method in frequency domain", *COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, Vol. 34, no. 3, pp. 808–823.
24. Gernerov, G.G., Domnin, I.F., Ilyina, I.A. and Tugay, D.V. (2007), "Energy efficiency of the current phase correction and active and reactive power ripple compensation in three-phase power supply system", *Tekhnichna elektrodynamika, Power systems and electro-technological complexes*, no. 1, pp. 52–57. (in Russian)

Стаття надійшла 29.05.2015.