

АНАЛІЗ РОБОТИ СИСТЕМ КОМПЕНСАЦІЇ НЕАКТИВНИХ СКЛАДОВИХ СТРУМІВ У ЧАСТОТНІЙ ОБЛАСТІ В УМОВАХ НЕСИМЕТРІЇ НАПРУГИ МЕРЕЖІ ЖИВЛЕННЯ

М. В. Загірняк, М. С. Малякова, А. П. Калинов, В. П. Колосюк

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: mzagirn@kdu.edu.ua, andrii.kalinov@gmail.com

Проведено дослідження процесів компенсації в трифазній системі електропостачання в умовах несиметрії напруги мережі живлення з використанням кросс-векторної теорії миттєвої потужності в частотній області в аналітичному вигляді. Отримані результати дозволили запропонувати метод усунення впливу несиметричної напруги мережі живлення на роботу силового активного фільтра шляхом виключення відповідних складових напруги з алгоритму розрахунку компенсаційних струмів. Для цього запропоновано використання блоку симетрування сигналів напруги, призначеного для симетрування сигналів напруги живлення перед її подачею на систему управління компенсатором. Проведене математичне моделювання досліджуваної системи та аналіз отриманих чисельних даних показали ефективність і доцільність використання, запропонованого методу вдосконалення процесу компенсації в системах електропостачання при несиметрії напруг мережі живлення.

Ключові слова: силовий активний фільтр, компенсація, кросс-векторна теорія, несиметрія, блок симетрування, частотна область.

АНАЛИЗ РАБОТЫ СИСТЕМ КОМПЕНСАЦИИ НЕАКТИВНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ТОКА В ЧАСТОТНОЙ ОБЛАСТИ В УСЛОВИЯХ НЕСИММЕТРИИ НАПРЯЖЕНИЯ ПИТАЮЩЕЙ СЕТИ

М. В. Загірняк, М. С. Малякова, А. П. Калинов, В. П. Колосюк

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского

ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: mzagirn@kdu.edu.ua, andrii.kalinov@gmail.com

Проведено исследование процессов компенсации в трехфазной системе электроснабжения в условиях несимметрии напряжения питающей сети с использованием кросс-векторной теории мгновенной мощности в частотной области в аналитическом виде. Полученные результаты позволили предложить метод устранения влияния несимметричного напряжения питающей сети на работу силового активного фильтра путем исключения соответствующих составляющих напряжения из алгоритма расчета компенсационных токов. Для этого предложено использование блока симметрирования сигналов напряжений, предназначенного для симметрирования сигналов напряжения питания перед ее подачей на систему управления компенсатором. Проведенное математическое моделирование исследуемой системы и анализ полученных численных данных показали эффективность и целесообразность использования предложенного метода усовершенствования процесса компенсации в системах электроснабжения при несимметрии напряжений питающей сети.

Ключевые слова: силовой активный фильтр, компенсация, кросс-векторная теория, несимметрия, блок симметрирования, частотная область.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Відомо, що в більшості випадків реальне навантаження систем електропостачання характеризується деякою мірою нелінійності та несиметричності. Це призводить до появи вищих гармонік у складі струму та напруги, амплітудної та кутової несиметрії напруг і струмів системи електропостачання. До проблем, що з'являються внаслідок цього, належить збільшення втрат у трансформаторах, лініях електропередач, конденсаторах компенсаторів реактивної потужності та інше. Для усунення впливів несиметричних і нелінійних навантажень на мережу живлення як один із засобів використовують силові активні фільтри (САФ) [1–3].

Розрахунки компенсаційних струмів у трипровідній та чотирипровідній системах електропостачання здійснюються на базі відомих теорій потужності: Фрізе [4], $p-q$ [1–3], кросс-векторної [5, 6] та $p-q-r$ [1, 2, 7]. Із цих теорій відомо, що всі складові трифазної потужності, що споживаються навантаженням, крім постійної складової миттєвої потужності P_0 , є небажаними.

Однак на думку автора [3, 8–10] використання $p-q$ теорії миттєвої потужності для розрахунку компенсаційних струмів САФ у системі зі спотвореною та несиметричною напругою живлення є сумнівним. Це пояснюється тим, що інтерпретація складових

потужностей згідно з $p-q$ теорією миттєвої потужності, як доречі й інших теорій, не дає відповіді на питання – чим викликана несинусоїдальність та несиметрія – навантаженням або мережею. У роботі [10] зазначено, що робота САФ на базі $p-q$ теорії миттєвої потужності при спотворених напругах мережі може викликати ще більші спотворення сигналів струму.

Мета роботи – дослідження в частотній області та області часу процесів компенсації в системах електропостачання для вдосконалення методу компенсації неактивних складових струму при несиметрії напруг мережі живлення.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Розглянемо у частотній області в аналітичному вигляді процеси при компенсації у трифазній несиметрії навантаження, що викликана амплітудною несиметрією струмів. Прийнято, що напруга живлення трифазна симетрична й синусоїдна. Ортогональні косинусні та синусні частотні складові при цьому запи-

суються у вигляді: $U_{Aa1} = \frac{1}{2}U_{1m}$; $U_{Ab1} = 0$;

$U_{Ba1} = -\frac{1}{4}U_{1m}$; $U_{Bb1} = \frac{\sqrt{3}}{4}U_{1m}$; $U_{Ca1} = -\frac{1}{4}U_{1m}$;

$$U_{Cb1} = -\frac{\sqrt{3}}{4}U_{1m}$$

Підставлення в аналітичні вирази чисельних значень використовувалось для візуалізації вихідних та отриманих даних і контролю правильності аналітичних результатів. При цьому приймалися: максимальне амплітудне значення напруги $U_{1m} = 311$ В, кут зсуву першої гармонічної складової напруги $\varphi_{U1} = 0$, кут зсуву першої гармонічної складової струму $\varphi_{I1} = -30$.

Ортогональні косинусні та синусні частотні складові трифазного струму: $I_{Aa1} = \frac{\sqrt{3}}{4}I_{1m}$;

$$I_{Ab1} = -\frac{1}{4}I_{1m}; \quad I_{Ba1} = 0; \quad I_{Bb1} = \frac{1}{2}\varepsilon_B I_{1m};$$

$$I_{Ca1} = -\frac{\sqrt{3}}{4}\varepsilon_C I_{1m}; \text{ де } \varepsilon_B, \varepsilon_C \text{ - коефіцієнти несиметрії фази B і фази C відповідно.}$$

Чисельні значення коефіцієнтів несиметрії приймалися $\varepsilon_B = 0,8$, $\varepsilon_C = 1,2$ відповідно. Криві трифазного несиметричного струму зображено на рис. 1.

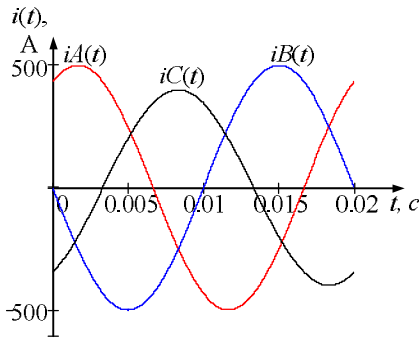


Рисунок 1 – Трифазний амплітудно несиметричний струм навантаження

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

– постійна складова миттєвої активної потужності:

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

– косинусна ортогональна складова другої гармоніки миттєвої активної потужності:

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

– синусна ортогональна складова другої гармоніки миттєвої активної потужності:

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

– середньоквадратичне значення другої гармоніки миттєвої активної потужності:

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

– постійна складова реактивної потужності:

$$Q_0 = -\frac{\sqrt{3}}{2}U_{1m}I_{1m} \sin(\varphi_{I1})[1 + \varepsilon_B + \varepsilon_C]; \quad (5)$$

– косинусна ортогональна складова другої гармоніки миттєвої реактивної потужності:

$$Q_{2a} = \frac{3}{8}U_{1m}I_{1m} \cos(\varphi_{I1})[\varepsilon_C - \varepsilon_B] + \frac{\sqrt{3}}{8}U_{1m}I_{1m} \sin(\varphi_{I1})[2 - \varepsilon_B - \varepsilon_C]; \quad (6)$$

– синусна ортогональна складова другої гармоніки миттєвої реактивної потужності:

$$Q_{2b} = -\frac{3}{8}U_{1m}I_{1m} \sin(\varphi_{I1})[\varepsilon_B - \varepsilon_C] - \frac{\sqrt{3}}{8}U_{1m}I_{1m} \cos(\varphi_{I1})[2 - \varepsilon_B - \varepsilon_C]; \quad (7)$$

– середньоквадратичне значення другої гармоніки миттєвої реактивної потужності:

$$Q_{2rms} = \sqrt{Q_{2a}^2 + Q_{2b}^2} = \frac{\sqrt{3}}{4}U_{1m}I_{1m} \sqrt{[1 + \varepsilon_B^2 + \varepsilon_C^2 - \varepsilon_C \varepsilon_B - \varepsilon_C - \varepsilon_B]}. \quad (8)$$

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 залежать від кута зсуву фаз струму відносно напруги.

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:

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

$$I_{B b1} = \frac{1}{8} I_{1m} [3\varepsilon_B - 1 - \varepsilon_C];$$

– для фази C:

$$I_{C a1} = \frac{\sqrt{3}}{24} I_{1m} [1 + \varepsilon_B - 5\varepsilon_C];$$

$$I_{C b1} = \frac{1}{8} I_{1m} [1 + \varepsilon_B - \varepsilon_C].$$

Вірність отриманих ортогональних складових компенсаційного струму підтверджується тим, що при підстановці $\varepsilon_B = \varepsilon_C = 1$ вирази (1)–(8) набувають вигляду виразів, характерних для роботи системи із симетричним навантаженням, тобто: $P_{2a} = 0$; $P_{2b} = 0$; $Q_{2a} = 0$; $Q_{2b} = 0$; $P_{2rms} = 0$; $Q_{2rms} = 0$; $P_0 = \frac{3}{2} U_m I_m \cos(\varphi_{11})$.

Результатом якісного процесу компенсації є досягнення амплітудної симетрії кривих сигналу трифазного струму (рис. 2).

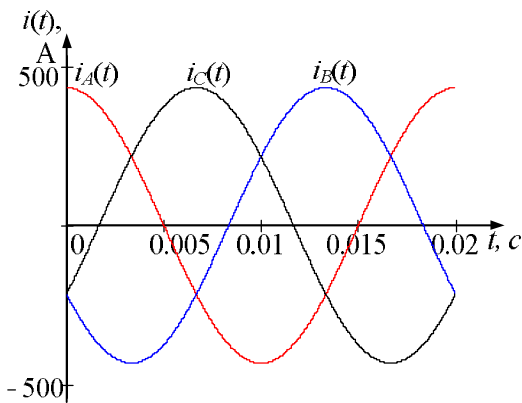


Рисунок 2 – Скомпенсований струм мережі з несиметричним навантаженням

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

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

Аналіз складових миттєвої потужності залежно від зміни коефіцієнта амплітудної несиметрії струму ε (рис. 3, 4) й коефіцієнту зміни опорів навантаження $1/\varepsilon$ в одній із фаз (рис. 5, 6) дозволяє визначити інтегральні параметри енергетичних процесів, що може бути застосовано для розрахунку параметрів і встановлення потужності САФ.

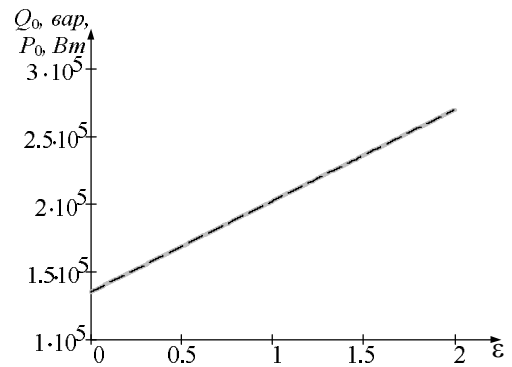


Рисунок 3 – Залежність постійної складової активної P_0 (—) і реактивної Q_0 (---) потужності від коефіцієнта несиметрії струму

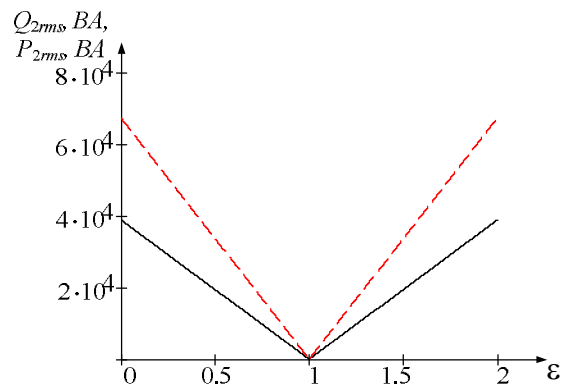


Рисунок 4 – Залежність середньоквадратичного значення складової активної P_{2rms} (—) та реактивної Q_{2rms} (---) потужності від коефіцієнта несиметрії струму

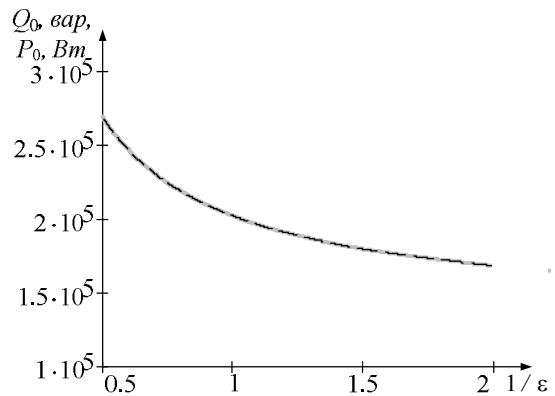


Рисунок 5 – Залежність постійної складової активної P_0 (—) та реактивної Q_0 (---) потужності від коефіцієнту зміни опорів навантаження $1/\varepsilon$ в одній із фаз

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

$$I_{A a1} = \frac{1}{2} I_{1m}; I_{A b1} = 0; I_{B a1} = -\frac{1}{4} I_{1m} \varepsilon_B;$$

$$I_{B\,bl} = \frac{\sqrt{3}}{4} I_{1m} \varepsilon_B; \quad I_{C\,al} = -\frac{1}{4} I_{1m} \varepsilon_C; \quad I_{C\,bl} = -\frac{\sqrt{3}}{4} I_{1m} \varepsilon_C.$$

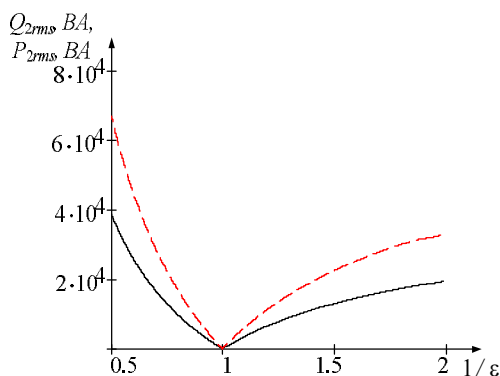


Рисунок 6 – Залежність середньоквадратичного значення складової активної P_{2rms} (—) та реактивної Q_{2rms} (---) потужності від коефіцієнту зміни опору навантаження $1/\varepsilon$ в одній із фаз

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

– для фази А:

$$I_{A\,al} = \frac{1}{2} I_{1m} \left[\frac{1 + \varepsilon_B + \varepsilon_C}{3} \right], \quad I_{A\,bl} = 0;$$

– для фази В:

$$I_{B\,al} = -\frac{1}{4} I_{1m} \left[\frac{1 + \varepsilon_B + \varepsilon_C}{3} \right], \quad I_{B\,bl} = \frac{\sqrt{3}}{4} I_{1m} \left[\frac{1 + \varepsilon_B + \varepsilon_C}{3} \right];$$

– для фази С:

$$I_{C\,al} = -\frac{1}{4} I_{1m} \left[\frac{1 + \varepsilon_B + \varepsilon_C}{3} \right], \quad I_{C\,bl} = -\frac{\sqrt{3}}{4} I_{1m} \left[\frac{1 + \varepsilon_B + \varepsilon_C}{3} \right].$$

На підставі отриманих виразів можна зробити висновок, що при компенсації до складу 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 і здійснити правильний його вибір за струмом найбільш перевантаженого ключа інвертора.

Аналіз отриманих виразів складових миттєвої активної й реактивної потужностей в аналітичному вигляді показав, що несиметрія напруги живлення викликає появу змінних складових миттєвої активної потужності, але не викликає появу змінних складових реактивної потужності. При цьому несиметричне навантаження викликає появу змінних складових як активної, так і реактивної потужностей.

Відзначимо, що аналіз отриманих виразів для компенсації неактивних складових струмів у частотній області показав, що коректна робота САФ можлива без урахування несиметричних складових напруги живлення й гармонійних спотворень, які викликані впливом навантаження на криві сигналів струму, тобто, незалежно від того, чим викликана несиметрія або гармонійні спотворення струму: навантаженням, або мережею живлення, використання

при формуванні компенсаційного струму гармонійних складових напруги без урахування несиметричних складових дозволяє здійснити якісну компенсацію. Це дає певні можливості вдосконалення методів компенсації.

Наступним етапом досліджень є оцінка впливу несиметрії напруги на процеси компенсації. При цьому висувається гіпотеза про те, що в системі управління компенсатора при розрахунках струмів компенсації необхідно використовувати сигнали без урахування несиметрії напруги живлення.

Для дослідження режимів компенсації неактивних складових струмів навантаження при наявності несиметрії напруг мережі живлення була розроблена математична модель ділянки мережі електропостачання (рис. 7). Вона складається із симетричного/несиметричного лінійного навантаження, активно-індуктивних опорів мережі живлення, блоків вимірювання струмів і напруг, компенсатора, системи управління компенсатором, блока сепарації (БС), а також блока симетрування сигналів напруг (БССН).

При аналізі роботи САФ в умовах несиметрії напруги мережі були обрані відношення потужності короткого замикання (КЗ) мережі до потужності навантаження P_{SC} / P_L що дорівнюють п'яти та двадцяти. Це відповідає випадкам «слабкої» і «сильної» мережі живлення, тобто, коли напруга живлення під дією струмів навантаження відповідно істотно і несуттєво спотворюються.

У процесі моделювання були проаналізовані дві конфігурації досліджуваної ділянки мережі електропостачання: джерело з несиметричною напругою живлення – лінійне симетричне навантаження, джерело з несиметричною напругою живлення – лінійне несиметричне навантаження.

При моделюванні приймалися наступні значення параметрів потужності КЗ ділянки мережі $P_{SC1} = 1,64 \cdot 10^6$ Вт; параметри лінійного навантаження: для $P_{SC} / P_L = 5 - L_L = 1 \cdot 10^{-3}$ Гн, $R_L = 0,04$ Ом, для $P_{SC} / P_L = 20 - L_L = 3,8 \cdot 10^{-3}$ Гн, $R_L = 1,8$ Ом. У коло компенсатора послідовно включений дросель із параметрами $L_r = 0,3 \cdot 10^{-3}$ Гн, $R_r = 0,01$ Ом. Рівень несиметрії напруги живлення оцінювався за коефіцієнтом зворотної послідовності і приймався 3,98 % для випадку $P_{SC} / P_L = 5$ і 4,03 % для $P_{SC} / P_L = 20$.

Для реалізації запропонованого авторами метода компенсації використовується БССН (рис. 8).

Він призначений для симетрування сигналів напруги живлення перед подачею її на систему управління компенсатором. Таким чином з алгоритму формування компенсаційних струмів виключаються несиметричні складові напруги, викликані мережею живлення.

У БССН за допомогою блоку Fourier transform визначаються амплітудні значення напруг кожної фази (рис. 8, I). Отримані чисельні значення додаються, а потім – усереднюються (рис. 8, II). Шляхом ділення отриманих значень на вихідну амплітуду визначаються коефіцієнти K_A, K_B, K_C (рис. 8, III), необхідні для симетрування амплітуд напруг кожної фази (рис. 8, IV). Після цього на систему управління компенсатором подається сигнал напруг без складових, викликаних несиметрією напруги мережі живлення.

Несиметрична напруга живлення – лінійне навантаження. Розглянемо випадок роботи ділянки мережі електропостачання при несиметрії напруги живлення та лінійному навантаженні.

режі електропостачання при несиметрії напруги живлення та лінійному навантаженні.

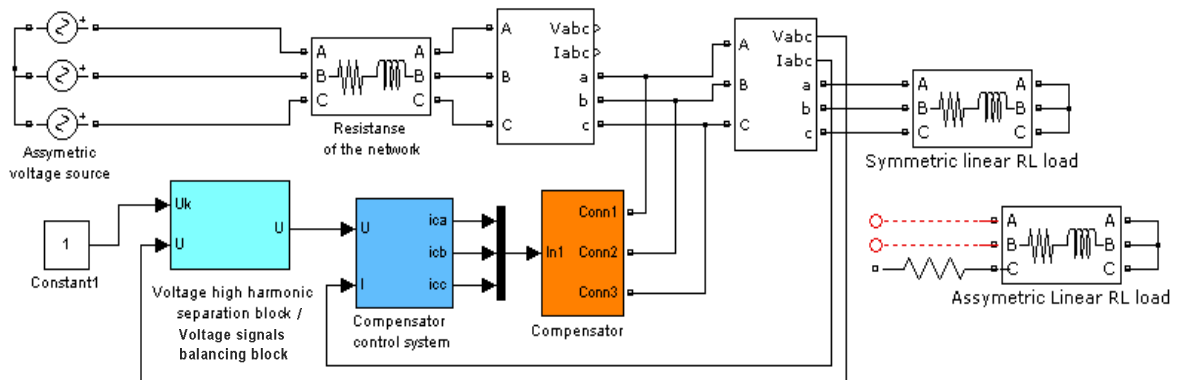


Рисунок 7 – Математична модель мережі енергопостачання з системою компенсації при несиметрії

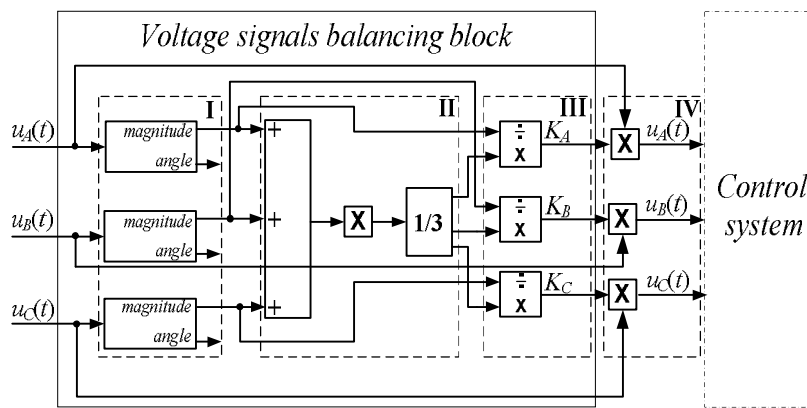


Рисунок 8 – Блок симетрування сигналів напруг мережі живлення

При дослідженні несиметрія вносилась у фазу A на величину коефіцієнта $\varepsilon_A = 0,885$ (рис. 9, I). Рівень несиметрії в такому випадку за коефіцієнтом зворотної послідовності напруги K_{2U} дорівнює 3,98 %.

У такій системі несиметрія напруги живлення (рис. 9, I) обумовлює несиметрію струму в точці підключення навантаження (рис. 10, I). У такому випадку класичний компенсатор (рис. 9, 10, II) працює достатньо ефективно – дозволяє досягти рівня несиметрії струму за коефіцієнтом K_{2I} , який дорівнює 1,76 %, що входить у допустимі норми (ДСТУ ІЕС 61000–2–2–2001).

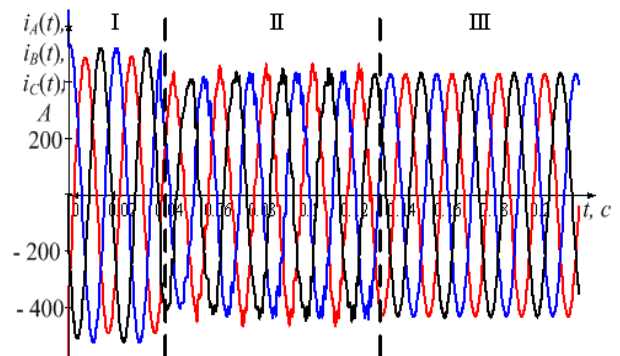


Рисунок 10 – Струми мережі (I), після включення класичного компенсатора (II) та після включення компенсатора із БССН і БС (III)

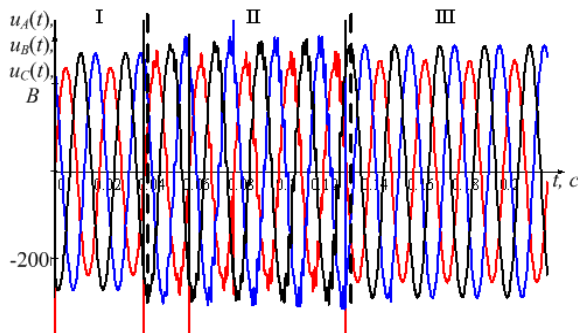


Рисунок 9 – Напруга мережі (I), після включення класичного компенсатора(II) і після включення компенсатора із БССН і БС (III)

Однак, як і зазначав автор робіт [3, 8–10], на ділянці II (рис. 9, 10), де працює класичний компенсатор, спостерігається суттєве гармонічне спотворення форми сигналу напруги (рис. 9, II) і струму (рис. 10, II), що оцінюється за коефіцієнтом несинусоїдності напруг K_U (ДСТУ ІЕС 61000–2–2–2001) і струмів K_I (total harmonic distortion (THD)) (IEEE Std. 1459–2010) струму THD_I та напруги THD_U , зі значеннями 9 і 11 % відповідно.

Це обумовлено тим, що на систему управління компенсатором подається сигнал напруги, що є сповореним внаслідок некоректної роботи системи ке-

рування САФ у умовах несиметрії напруг живлення.

Для усунення гармонічного спотворення сигналів струму та напруги пропонується використовувати блок сепарації (БС) вищих гармонік напруги живлення, що викликані спотворенням мережі (рис. 11). Він призначений для виключення з алгоритму формування компенсаційних струмів [11–13]

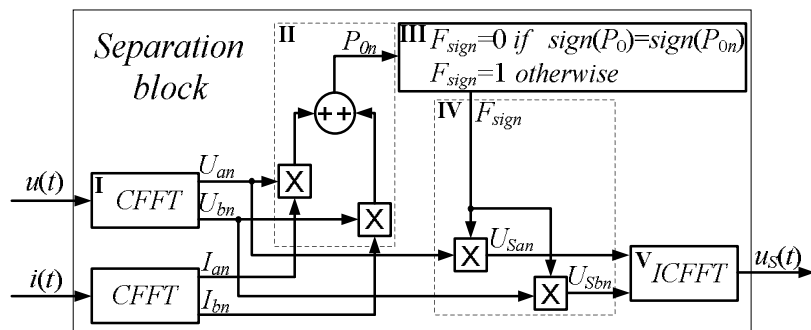


Рисунок 11 – Блок сепарації сигналів напруг мережі живлення

У БС із використанням швидкого перетворення Фур'є (CFFT) здійснюється перехід у частотну область (рис. 11, I), що дозволяє визначити гармонійний склад напруги в точці підключення компенсатора. Визначення гармонік напруги, викликаних гармонічними спотвореннями мережі живлення, у БС відбувається за рахунок аналізу знака відповідної частотної складової активної потужності [13]:

$$P_0 = P_{01} + P_{02} + \dots + P_{0n}, \quad (9)$$

де $P_{0n} = I_{an}U_{an} + I_{bn}U_{bn}$ (рис. 11, II), n – номер гармоніки, I_{an} , I_{bn} – відповідно косинусна і синусна гармонійні складові струму n -ї гармоніки, U_{an} , U_{bn} – відповідно косинусна і синусна гармонійні складові напруги n -ї гармоніки.

Згідно з [13], якщо знак відповідної складової P_{0n} збігається зі знаком P_0 (рис. 11, III), це означає, що відповідна гармоніка напруги U_n викликана спотворенням мережі живлення. Якщо знаки не збігаються – це означає, що відповідна гармоніка напруги викликана протіканням несинусоїдальних струмів нелінійного навантаження.

З отриманого гармонійного складу напруги виключаються гармоніки, викликані спотворенням мережі (рис. 11, IV). Далі, із використанням зворотного перетворення Фур'є (ICFFT) здійснюється перехід в область часу (рис. 11, V). Після виконаних даних операцій на систему управління компенсатором подається напруга $u_s(t)$ без гармонійних складових, викликаних спотворенням напруги мережі живлення.

Для кількісної оцінки режимів компенсації розраховувалися наступні параметри (табл. 1): THD_I і THD_U , падіння напруги на опорах живлення ΔU , активна потужність живлення P_0 , RMS значення змінних складових активної \tilde{p}_{rms} та реактивної \tilde{q}_{rms} потужностей, постійна складова реактивної потужності Q , коефіцієнти несиметрії струму і напруги за зворотною послідовністю K_{2I} та K_{2U} відповідно,

тих вищих гармонік напруги в точці підключення компенсатора, які викликані не протіканням струмів навантаження, а спотворенням джерела живлення. У реальних умовах ці гармоніки напруги можуть бути викликані потужними нелінійними споживачами, які підключені ближче до джерела живлення.

потужність втрат на активних опорах мережі живлення ΔP і коефіцієнт корисної дії мережі живлення (ККД) η [14] без урахування і з урахуванням (ΔP_k , η_k) витіснення струмів у провідниках мережі. Врахування витіснення струмів здійснювалось збільшенням активного опору R_k на k -ї гармоніці в \sqrt{k} раз. Дані наведені для режимів роботи при $P_{SC} / P_L = 5$ і $P_{SC} / P_L = 20$.

Отримані дані (табл. 1) показують, що компенсація з використанням БСЧН і БС порівняно з класичною компенсацією дозволяє досягти кращого симетрування сигналів струму, що ілюструє: $K_{2I} = 0,176\%$, практично нульове значення THD_I та THD_U ; зменшення падіння напруги на опорах мережі ΔU ; зменшення реактивної потужності Q ; змінних складових активної \tilde{p}_{rms} та реактивної \tilde{q}_{rms} потужностей зменшення втрат і, як наслідок, збільшення ККД. Такі результати спостерігаються при режимах роботи із суттєвим ($P_{SC} / P_L = 5$) і несуттєвим ($P_{SC} / P_L = 20$) спотворенням сигналів струмів і напруг.

Несиметрична напруга живлення – несиметричне лінійне навантаження. Розглянемо випадок роботи ділянки мережі електропостачання при несиметрії напруги живлення та несиметричному лінійному навантаженні.

При дослідженні несиметрія вносилась у фазу A напруги живлення на величину коефіцієнта $\varepsilon_A = 0,885$ та у фазу C навантаження із рівнем 10% від величини її активної складової (рис. 12, 13, I). Рівень несиметрії в такому випадку за коефіцієнтом оберненої послідовності напруги K_{2U} склав 4,03%.

При такому режимі роботи спостерігаються ті ж самі зміни показників роботи (табл. 2), що й у попередньому випадку – компенсатор із БСЧН і БС дозволяє зменшити рівень несиметрії струму навантаження до $K_{2I} = 1,72\%$ і підтримувати THD_I і THD_U на практично нульовому рівні (рис. 13, III).

Таблиця 1 – Показники роботи САФ в мережі з несиметричною напругою живлення та симетричним лінійним навантаженням

| Режим | Параметр | ΔU , В | THD_{U_s} , % | THD_{I_s} , % | P_{0s} , Вт | $\tilde{q}_{f_{\text{сим}}}$, ВА | $\tilde{P}_{f_{\text{сим}}}$, ВА | Q , вар | ΔP , Вт | ΔP_{k_s} , Вт | η , % | η_k , % | $K_{\text{Л}}$, % | $K_{\text{Л}}$, % |
|--|--------------------------------|----------------|-----------------|-----------------|--------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-------------------|--------------------|-----------------------|------------|--------------|--------------------|--------------------|
| $P_{\text{SC}} / P_L = 5$ | | | | | | | | | | | | | | |
| | До компенсації | 27,84 | 0 | 0 | $1,56 \cdot 10^5$ | $1,05 \cdot 10^3$ | $1,15 \cdot 10^4$ | $1,22 \cdot 10^5$ | $1,96 \cdot 10^4$ | $1,965 \cdot 10^4$ | 92,5 | 92,45 | 3,8 | 3,98 |
| | Після компенсації | 31,4 | 11 | 9 | $1,77 \cdot 10^5$ | $1,99 \cdot 10^4$ | $1,14 \cdot 10^4$ | 100 | $1,386 \cdot 10^4$ | $1,386 \cdot 10^4$ | 94,7 | 94,69 | 4,1 | 1,76 |
| | Після компенсації з БССН та БС | 24,25 | 0,2 | 0,005 | $1,78 \cdot 10^5$ | 1031 | 3465 | -85 | $1,383 \cdot 10^4$ | $1,383 \cdot 10^4$ | 94,72 | 97,72 | 4,25 | 0,176 |
| $P_{\text{SC}} / P_L = 20$ | | | | | | | | | | | | | | |
| | До компенсації | 7,376 | 0 | 0 | $4,9 \cdot 10^4$ | 400 | $1 \cdot 10^4$ | $3,19 \cdot 10^4$ | 1374 | 1377 | 92,85 | 91,9 | 3,99 | 3,985 |
| | Після компенсації | 6,55 | 0,5 | 5,06 | $5,064 \cdot 10^4$ | 1000 | 235 | 40 | 997 | 998 | 94,7 | 94,69 | 4,022 | 1,499 |
| | Після компенсації з БССН та БС | 6,52 | 0,3 | 2,1 | $5,066 \cdot 10^4$ | 500 | 928 | -9 | 994 | 994 | 94,73 | 94,73 | 4,068 | 0,092 |

Таблиця 2 – Показники роботи САФ в мережі з несиметричною напругою живлення та несиметричним лінійним навантаженням

| Режим | Параметр | ΔU , В | THD_{U_s} , % | THD_{I_s} , % | P_{0s} , Вт | $\tilde{q}_{f_{\text{сим}}}$, ВА | $\tilde{P}_{f_{\text{сим}}}$, ВА | Q , вар | ΔP , Вт | ΔP_{k_s} , Вт | η , % | η_k , % | $K_{\text{Л}}$, % | $K_{\text{Л}}$, % |
|--|--------------------------------|----------------|-----------------|-----------------|--------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|---------------------|--------------------|-----------------------|------------|--------------|--------------------|--------------------|
| $P_{\text{SC}} / P_L = 5$ | | | | | | | | | | | | | | |
| | До компенсації | 27,25 | 0 | 0 | $1,56 \cdot 10^5$ | 3500 | $1,21 \cdot 10^4$ | $-1,181 \cdot 10^5$ | $1,89 \cdot 10^4$ | $1,9 \cdot 10^4$ | 92,8 | 92,05 | 4,03 | 4,87 |
| | Після компенсації | 27,2 | 7,3 | 7,35 | $1,76 \cdot 10^5$ | $1,3 \cdot 10^4$ | 7700 | 450 | $1,362 \cdot 10^4$ | $1,362 \cdot 10^4$ | 94,71 | 94,7 | 4,15 | 1,72 |
| | Після компенсації з БССН та БС | 24,15 | 0,002 | 0,005 | $1,766 \cdot 10^5$ | 5510 | 5294,5 | -93,5 | $1,35 \cdot 10^4$ | $1,35 \cdot 10^4$ | 94,72 | 94,72 | 4,32 | 0,17 |
| $P_{\text{SC}} / P_L = 20$ | | | | | | | | | | | | | | |
| | До компенсації | 7,2 | 0 | 0 | $4,85 \cdot 10^4$ | 1002 | 3600 | $-3,07 \cdot 10^4$ | 1316 | 1316,4 | 94,4 | 94,4 | 4,01 | 4,9 |
| | Після компенсації | 6,43 | 0,5 | 5,05 | $4,995 \cdot 10^4$ | 929 | 236,4 | 30 | 968,4 | 968,8 | 94,71 | 94,705 | 4,023 | 1,46 |
| | Після компенсації з БССН та БС | 6,42 | 0,05 | 0,4 | $5,001 \cdot 10^4$ | 1584 | 1566 | -7 | 966,3 | 996,3 | 94,72 | 94,72 | 4,067 | 0,09 |

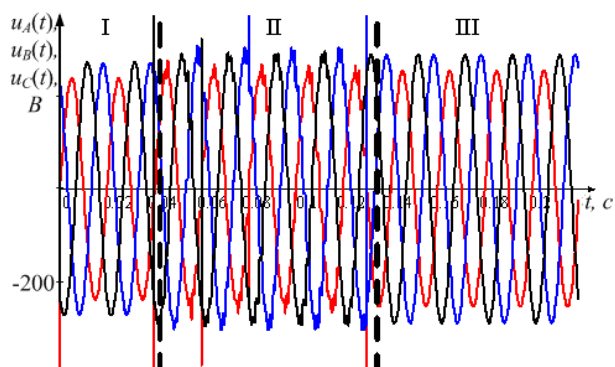


Рисунок 12 – Напряга мережі (I), після включення класичного компенсатора (II) і після включення компенсатора із БССН і БС (III)

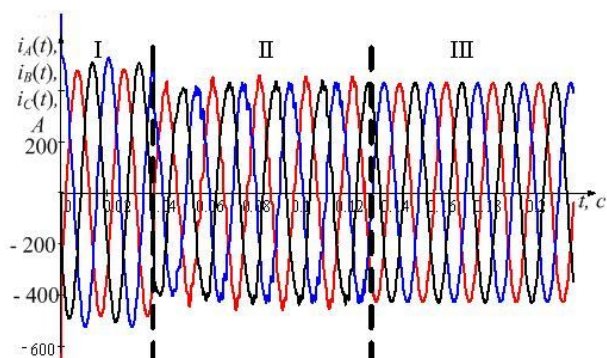


Рисунок 13 – Струми мережі (I), після включення класичного компенсатора (II) і після включення компенсатора із БССН і БС (III)

ВИСНОВКИ. Дослідження процесів компенсації неактивних складових миттєвої потужності систем електропостачання із несиметричним навантаженням у частотній області дозволив отримати аналітичні вирази компенсаційних струмів, що дозволяє визначити шляхи вдосконалення методів компенсації неактивних складових струму.

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

Проведені дослідження процесів компенсації неактивних складових струмів навантаження ділянки мережі електропостачання при несиметрії напруги живлення показали, що використання розробленого методу із симетруванням і сепарацією гармонік сигналів напруги мережі живлення, порівняно з класичною системою компенсації, дозволяє зменшити рівень несиметрії сигналів струму за коефіцієнтом зворотної послідовності на 1,3...1,5 % зменшити втрати в лініях електропередач на 0,5 %, збільшити коефіцієнт корисної дії системи електропостачання на 0,3...2,5 %, досягти практично нульового значення коефіцієнта несинусоїдності струмів, зменшити значення реактивної потужності після компенсації на 15...23 % і падіння напруги на опорах мережі живлення на 0,5...23 %.

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. Czarnecki Effect of supply voltage harmonics on IRP – based switching compensator control // IEEE Trans. on power electronics. – 2008. – PP. 1–5.
4. Akagi H., Kanazawa Y., Nabai A., Generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase circuits // Proceeding of Int. Power Electronic Conference. – 1983. – PP. 1375–1386.
5. 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.
6. Жемеров Г.Г., Ильина О.В. Теория мощности Фризе и современные теории мощности // Электротехника і електромеханіка. – 2007. – Вип. 6. – С. 63–65.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. 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. – Łagow, Poland. – PP. 27–36.
11. Zagirnyak M.V., Mamchur D.G. and 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.
12. 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.
13. Zagirnyak M., Kalinov A., Maliakova M. Analysis of instantaneous power components of electric circuit with a semiconductor element // Archive of electrical engineering. – 2013. – Iss. 62/2013 (3). – PP. 473–486.
14. 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 OF OPERATION OF COMPENSATION SYSTEMS NONACTIVE CURRENT COMPONENTS IN FREQUENCY-DOMAIN AT UNBALANCE OF MAINS SUPPLY VOLTAGE

M. Zagirnyak, M. Maliakova, A. Kalinov, V. Kolosyuk

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: mzagirn@kdu.edu.ua, andrii.kalinov@gmail.com

The processes of compensation in a three-wire power-supply system at voltage unbalance of mains supply voltage have been analytically investigated with the usage of cross-vector theory in frequency-domain. Received results allows to propose a method for elimination of mains supply voltage harmonic unbalance' influence on operation of an active power filter by means of exclusion of corresponding components from the algorithm of compensation current calculation. For this purpose it was proposed to use the voltage signal balancing block. It allows to balance the supply voltage signals for supplying by them the compensator control system. The conducted mathematical modeling of the considered system and the analysis of obtained numerical results demonstrated efficiency and expediency of the use of the proposed method for improvement the compensation process in power-supply systems with unbalance of mains supply voltages.

Key words: active power filter, compensation, cross-vector theory of instantaneous power, unbalance, balance block, 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.
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. Akagi, H., Kanazawa, Y. and Nabai, A. (1983), "Generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase circuits", *Proceeding of Int. Power Electronic Conference*, pp. 1375–1386.
5. 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, Tematichnyi vipusk*, pp. 80–90.
6. Gernerov, G.G. and Iljina, I.A. (2007), "The Fryze's power theory and modern power theories", *Electrical engineering and Electromechanics*, no. 6, pp. 63–65.
7. 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, Peretvorenniya parametriv elektrichnoyi energii*, no. 2, pp. 25–35.
8. 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.
9. Czarnecki, S. Leszek (2009), "Comments to the paper: Instantaneous p-q Theory for Compensating Nonsinusoidal Systems", *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)*, R. 85, no. 6, pp. 167–169.
10. 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, pp. 27–36, Łagow, Poland.
11. 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*, no. 5608071, pp. 1–6.
12. 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.
13. 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.
14. Gernerov, G.G., Domnin, I.F., Iljina, 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 electrotechnological complexes*, no. 1, pp. 52–57.

Стаття надійшла 25.06.2015.