

УДК 621.316.13

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТРАНСФОРМАТОРА ПОСЛІДОВНОГО АКТИВНОГО ФІЛЬТРА НА ЯКІСТЬ НАПРУГИ

- БОНДАРЕНКО С.С.** аспірант кафедри систем електроспоживання та енергетичного менеджменту Кременчуцького національного університету ім. Михайла Остроградського, Кременчук, Україна, e-mail: sergi1994@gmail.com;
- БЯЛОБРЖЕСЬКИЙ О.В.** канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри систем електроспоживання та енергетичного менеджменту Кременчуцького національного університету ім. Михайла Остроградського, Кременчук, Україна, e-mail: seemAl@kdu.edu.ua;
- ВЛАСЕНКО Р.В.** асистент кафедри систем електроспоживання та енергетичного менеджменту Кременчуцького національного університету ім. Михайла Остроградського, Кременчук, Україна, e-mail: laplandec267@gmail.com;

**Мета роботи.** Дослідити особливості використання трансформаторів послідовного силового активного фільтра для реалізації повздовжньої компенсації.

**Методи дослідження.** Методи рішення систем диференціальних рівнянь першого порядку, методи матричних перетворень, методи чисельного моделювання, методи розрахунку активної частини потужності Фрізе, методи теорії перетворення систем координат.

**Отримані результати.** Розроблено функціональну схему послідовного силового активного фільтра при реалізації повздовжньої компенсації, досліджено зв'язок параметрів трансформатора з параметрами режиму, розглянуто процеси, які протікають в трансформаторі, розроблено спосіб визначення сигналу управління послідовного фільтра, в середовищі візуального програмування розроблено модель спрощеної системи електроспоживання, проведено ланку досліджень, на підставі аналізу яких, показана ефективність застосування запропонованого рішення за рівнем напруги навантаження. Для оцінки впливу трансформатора на напругу навантаження проведено серію експериментів із зміною активною потужністю навантаження. Сформульовано висновки що до впливу параметрів трансформаторів активного фільтра на напругу навантаження.

**Наукова новизна.** Недотримання якості енергетичних показників призводить до економічних збитків, зниження надійності функціонування електричних мереж і порушення технологічних процесів, збільшенню додаткових втрат в мережах і елементах електрообладнання, скороченням терміну служби силового електрообладнання енергетичних систем. Повздовжня компенсація є одним із рішень для забезпечення якості електроенергії. компенсація забезпечує підвищення динамічної стійкості лінії електропередачі і стабільність напруги основної мережі. На підставі аналізу відомих робіт встановлено, що пасивні компенсатори з незмінною структурою все менш задовольняють вимоги до підтримки якості електроенергії. Як наслідок, розробляються та впроваджуються керовані фільтрокомпенсуючі пристрої – силові активні фільтри. Принцип дії компенсатора – постійно створює гармонійні напруги, які точно відповідають гармонійним компонентам, що генеруються навантаженням. Компенсується спотворення, вже присутнє в системі електроживлення. У результаті напруга, залишається синусоїдальною. Компенсаційні властивості активного фільтра залежать від алгоритма визначення сигналу управління. З використанням теорії потужності Фрізе запропонована певна послідовність синтезу сигналу управління послідовним силовим активним фільтром.

**Практична цінність.** Розроблено функціональну схему послідовного силового активного фільтра при реалізації повздовжньої компенсації, створено певну послідовність синтезу сигналу управління компенсатором, досліджено вплив трансформаторів при реалізації повздовжньої компенсації.

**Ключові слова:** повздовжня компенсація; силовий активний фільтр; трансформатор; теорія Фрізе.

### I. ВСТУП

На сучасному етапі розвитку, забезпечення якості електроенергії являється основним завданням електротехніки. Несиметрія, несинусоїдальність, провали напруги призводять до погіршення роботи пристроїв та виникнення додаткових втрати активної потужності у всіх елементах системи електропостачання: в лі-

ніях електропередачі, трансформаторах, електричних машинах, статичних конденсаторах. Повздовжня компенсація є одним із кращих рішень для забезпечення якості електроенергії [1]. Повздовжня компенсація забезпечує підвищення динамічної стійкості лінії електропередачі і стабільність напруги основної мережі.

**II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ**

Впровадження на електричних установках пристроїв силової перетворювальної техніки дозволяє вирішити такі задачі як: симетрування, фільтрації та компенсації. При цьому пасивні фільтри з незмінною структурою все менш задовольняють вимоги до підтримки якості електроенергії [1]. Як наслідок, розробляються та впроваджуються САФ [2]. Він є ефективним рішенням для компенсації провалів напруги, флікера, несиметрії і гармонійних складових в напрузі мережі. Принцип роботи пристрою полягає у тому, що спеціальний напівпровідниковий перетворювач, використовуючи енергію джерела напруги, формує у своїх мережних провідниках напругу, за гармонійним складом аналогічний напрузі навантаження (за винятком першої гармоніки), але протилежний за знаком. У результаті відбувається взаємна компенсація неосновних гармонік напруги навантаження і зазначених напівпровідникових перетворювачів. Попередні дослідження компенсаційних властивостей активного фільтра залежать від алгоритма визначення заданого сигналу управління[4]. Тому з розвитком науки та техніки активно вдосконалюються не тільки апаратна частина компенсатора але і його алгоритмічні засоби. Оскільки силові активні фільтри дозволяють здійснити: двосторонній обмін енергією з живлячою мережею, то для правильного визначення компенсаційних характеристик та для правильного відправлення імпульсів керування, які відповідають визначеній заданій напрузі компенсатора роботи фільтра, реалізується

алгоритм управління послідовним силовим активним фільтром.

**III. МЕТА РОБОТИ**

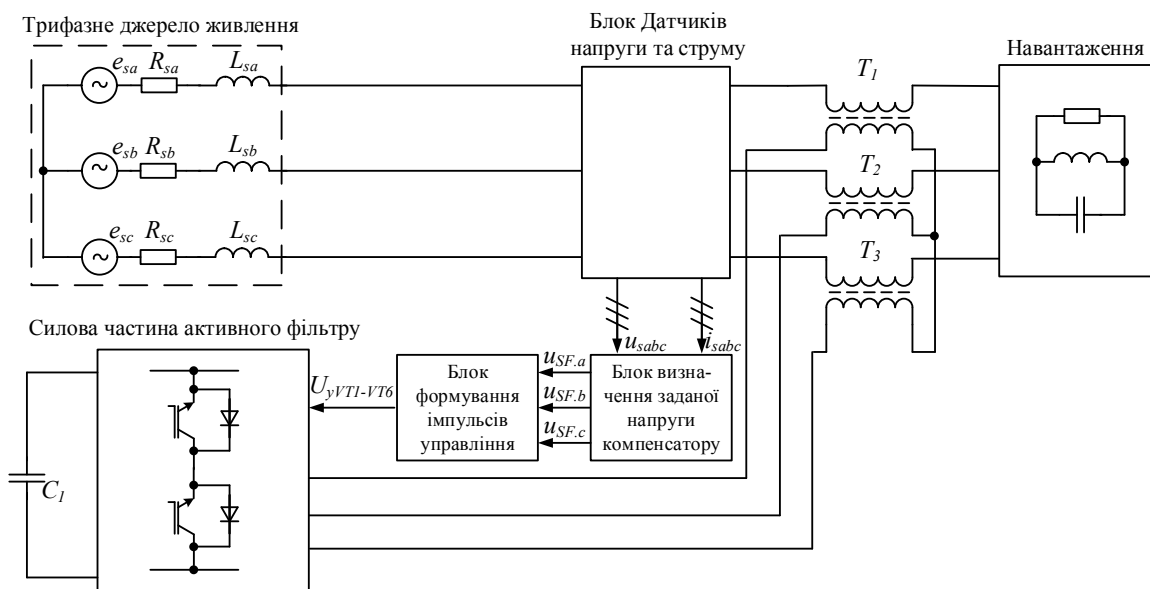
Дослідити особливості використання трансформаторів послідовного силового активного фільтра для реалізації повздовжньої компенсації.

**IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГУ МАТЕРІАЛУ І АНАЛІЗ ОТРИМАННИХ РЕЗУЛЬТАТІВ**

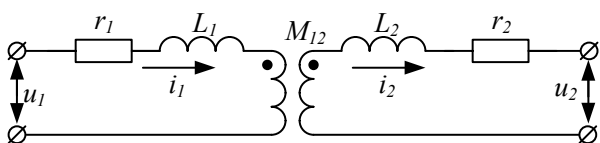
Розглянемо випадок, в якому реалізація повздовжньої компенсації виконується послідовним силовим активним фільтром, який підключений до мережі через однофазні трансформатори.

Принцип роботи послідовного силового активного фільтра полягає у тому, що напівпровідниковий перетворювач формує у своїх мережних провідниках напругу, за гармонійним складом аналогічний напрузі навантаження (за винятком першої гармоніки), але протилежний за знаком. У результаті відбувається взаємна компенсація неосновних гармонік напруги навантаження і зазначених напівпровідникових перетворювачів.

Послідовний силовий активний фільтр (рис. 1) підключається до мережі через три однофазні двообмоткові трансформатори, які в свою чергу підключені до силової частини перетворювача фільтра до якого також під'єднаний накопичуючий конденсатор  $C_1$ .



**Рисунок. 1** Функціональна схема послідовного трифазного силового активного фільтра



**Рисунок. 2** Схема заміщення трансформатора

Для визначення впливу трансформатора на режим роботи пристрою розглянемо зв'язок параметрів трансформатора з параметрами режиму (рис. 2).

При роботі двообмоткового трансформатора протікають електромагнітні процеси, які можна описати системою диференціальних рівнянь[5]:

$$u_1 = i_1 r_1 + L_{1\sigma} \frac{di_1}{dt} - w_1 \frac{d\Phi_0}{dt}; \quad (1)$$

$$-u_2 = i_2 r_2 + L_{2\sigma} \frac{di_2}{dt} - w_2 \frac{d\Phi_0}{dt}, \quad (2)$$

де  $u_1, u_2$  – напруги первинної і вторинної обмоток трансформатора;  $i_1, i_2$  – струми первинної і вторинної обмоток трансформатора;  $r_1, r_2$  – активний опір первинної і вторинної обмоток трансформатора;  $L_{1\sigma}, L_{2\sigma}$  – індуктивність розсіювання первинної і вторинної обмоток трансформатора;  $w_1, w_2$  – кількість витків первинної і вторинної обмоток трансформатора;  $\Phi_0$  – основний магнітний потік в магнітопроводі трансформатора.

При навантаженні основний магнітний потік в сталевому осерді трансформатора створюється дією магніторушійної сили первинної і вторинної обмоток. Основний магнітний потік  $\Phi_0$  магнітопроводу визначимо за виразом:

$$\Phi_0 = \frac{i_1 w_1 + i_2 w_2}{R_\mu} = \lambda_\mu (i_1 w_1 + i_2 w_2), \quad (3)$$

де  $R_\mu$  – магнітний опір трансформатора;  $\lambda_\mu$  – магнітна провідність магнітопроводу трансформатора.

Підставивши (3) в (1-2) отримаємо, згідно з другим законом Кірхгофа для магнітних кіл, систему диференціальних рівнянь електромагнітних перехідних процесів в двообмотковому трансформаторі:

$$u_1 = i_1 r_1 + (L_{1\sigma} + w_1^2 \lambda_\mu) \frac{di_1}{dt} + w_1 w_2 \lambda_\mu \frac{di_2}{dt}; \quad (4)$$

$$u_2 = i_2 r_2 + (L_{2\sigma} + w_2^2 \lambda_\mu) \frac{di_2}{dt} + w_2 w_1 \lambda_\mu \frac{di_1}{dt}; \quad (5)$$

Позначимо  $w_1^2 \lambda_\mu = M_{11}$  – взаємна індуктивність первинної обмотки трансформатора;  $w_1 w_2 \lambda_\mu = M_{11} \frac{1}{K_{T12}}$  – взаємні індуктивності між первинною і відповідними вторинними обмотками трансформатора, де  $K_{T12} = \frac{w_1}{w_2}$  – коефіцієнти трансформації трансформатора між первинною і відповідною вторинною обмоткою.  $w_2^2 \lambda_\mu = M_{11} \frac{1}{K_{T12}^2} = M_{22}$  – взаємні індуктивності обмоток трансформатора;  $L_{1\sigma} + M_{11} = L_1$  – повна індуктивність первинної обмотки трансформатора;  $L_{2\sigma} + M_{22} = L_2$  – повна індуктивність вторинної обмотки трансформатора;

Після відповідних перетворень рівнянь (4-5), ви-

користовуючи прийняті позначення, отримаємо:

$$u_1 = i_1 r_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M_{12} \frac{di_2}{dt}; \quad (6)$$

$$-u_2 = M_{12} \frac{di_1}{dt} + i_2 r_2 + L_2 \frac{di_2}{dt}. \quad (7)$$

Формування напруги на вторинній обмотці трансформатора здійснюється виходячи з напруги компенсації яку можна представити відповідним вектором для трьох фаз  $\mathbf{u}_2 = \mathbf{u}_{SF}^* = [u_{SF.a}^* \ u_{SF.b}^* \ u_{SF.c}^*]^T$  послідовного силового активного фільтру визначаємо [6] як різницю між вектором напруги мережі  $\mathbf{u}_S = [u_{S.a} \ u_{S.b} \ u_{S.c}]^T$  та вектором напруги основної гармоніки прямої послідовності  $\mathbf{u}_{S1+} = [u_{S1+.a} \ u_{S1+.b} \ u_{S1+.c}]^T$ :

$$\mathbf{u}_{SF}^* = \mathbf{u}_S - \mathbf{u}_{S1+} \quad (8)$$

Для розрахунку вектора напруги основної гармоніки прямої послідовності  $\mathbf{u}_{S1+}$  використаємо складову напруги, яка визначається виходячи з передачі виключно активної потужності  $\mathbf{u}_a = [u_{a.a} \ u_{a.b} \ u_{a.c}]^T$ . При цьому додатково масштабуємо амплітуду до заданої амплітуди напруги навантаження  $U_{Lm}^*$  наступним шляхом:

$$\mathbf{u}_{S1+} = \mathbf{u}_a \cdot \left( \frac{U_{Lm}^*}{U_{am}} \right) \quad (9)$$

де амплітуда активної складової напруги:

$$U_{am} = \frac{2}{3} \sqrt{u_{aa}^2 + u_{ab}^2 + u_{ac}^2}. \quad (10)$$

Для визначення складової напруги, яка відповідає передачі виключно активної потужності  $\mathbf{u}_a$  використаємо положення теорії Фрізе [7,8]. При цьому в якості струму навантаження використаємо його компоненту основної гармоніки прямої послідовності  $i_{1+}$ , наступним чином:

$$\mathbf{u}_a = \frac{P}{I_{RMS}^2} \mathbf{i}_{1+}. \quad (11)$$

Квадрат ефективного значення струму визначається на підставі вимірюного струму за фазами  $\mathbf{i}_S = [i_{S.a} \ i_{S.b} \ i_{S.c}]^T$ :

$$I_{RMS}^2 = \frac{1}{T_c} \int_{t-T_c}^t \mathbf{i}_S \cdot \mathbf{i}_S^T dt; \quad (12)$$

Активна потужність  $P$  визначається шляхом усереднення на періоді мережевої напруги  $T_c$  митте-

вої потужності  $p = \mathbf{u}_S \cdot \mathbf{i}_S^T$ :

$$P = \frac{1}{T_c} \int_{t-T_c}^t p dt = \frac{1}{T_c} \int_{t-T_c}^t (u_{S,a} i_{S,a} + u_{S,b} i_{S,b} + u_{S,c} i_{S,c}) dt. \quad (13)$$

Компонента основної гармоніки прямої послідовності струму навантаження  $\mathbf{i}_{I+}$ , покладається відносною та має одиничну амплітуду. Для визначення зазначеної компоненти струму скористаємось наступною послідовністю дій. З вимірної напруги мережі  $\mathbf{u}_S$ , яка у загальному випадку є несинусоїдальною та несиметричною виділимо компоненти що відповідають основній частоті та симетрично розташовані. Для цього виконаємо перетворення координат вектору  $\mathbf{u}_S$  з рухомої  $abc$  у нерухому  $dq$ :

$$\mathbf{u}_{S,dq} = \mathbf{T}_{abc}^{dq} \mathbf{u}_S, \quad (14)$$

де  $\mathbf{T}_{abc}^{dq}$  – матриця трансформації  $abc$  до  $dq$ ,

$$\mathbf{T}_{abc}^{dq} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \sin(\omega t) & \sin(\omega t - 120^\circ) & \sin(\omega t + 120^\circ) \\ \cos(\omega t) & \cos(\omega t - 120^\circ) & \cos(\omega t + 120^\circ) \end{bmatrix}. \quad (15)$$

Для визначення поточної фази  $\omega t$  визначимо узагальнений вектор напруги в системі координат  $\alpha\beta$

$$\mathbf{u}_{S,\alpha\beta} = \mathbf{T}_{abc}^{\alpha\beta} \mathbf{u}_{S,abc}; \quad (16)$$

де  $\mathbf{T}_{abc}^{\alpha\beta}$  – матриця трансформації координат  $abc$  до  $\alpha\beta$

$$\mathbf{T}_{abc}^{\alpha\beta} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}. \quad (17)$$

В результаті визначаємо поточну фазу напруги основної частоти  $\omega t$ :

$$\omega t = \theta = \arctg \frac{u_{S,\alpha}}{u_{S,\beta}}. \quad (18)$$

Усереднюючи на періоді  $T_c$  результат перетворення  $\mathbf{u}_{S,dq}$  визначаємо постійні складові напруги мережі в координатах  $dq$ :

$$\bar{u}_{S,d} = \frac{1}{T_c} \int_{t-T_c}^t u_{S,d} dt; \quad (19)$$

$$\bar{u}_{S,q} = \frac{1}{T_c} \int_{t-T_c}^t u_{S,q} dt, \quad (20)$$

Виконуючи зворотне перетворення координат  $dq$  до  $abc$  вектора  $\bar{\mathbf{u}}_{S,dq} = [\bar{u}_{S,d} \quad \bar{u}_{S,q}]$  визначимо вектор напруги мережі прямої послідовності основної гармоніки:

$$\mathbf{u}_{S1+} = \mathbf{T}_{abc}^{dq-I} \bar{\mathbf{u}}_{S,dq}. \quad (21)$$

Визначимо амплітуду вектора напруги мережі прямої послідовності  $\bar{\mathbf{u}}_{S,dq}$ :

$$\bar{U}_{dqm} = \sqrt{\bar{u}_d^2 + \bar{u}_q^2}. \quad (22)$$

Для дослідження запропонованого рішення в середовищі візуального програмування на OEM розроблено модель спрощеної системи електроспоживання (рисунок 4) яка включає джерело живлення з еквівалентним активним та індуктивним опорами *Three-phase source*, два джерела вищих гармонік (*AC voltage source1* та *AC voltage source2*), блок вимірювання напруги та струму мережі (*Source measurement*), блок трансформаторів активного фільтра (*Controlled series transformer*), блок вимірювання напруги та струму навантаження (*Load measurment*), лінійне активно-індуктивне навантаження (*Three-phase series RLC load*).

Схема блоку трансформаторів наведена на (рис. 3а) та включає три трансформатори (*Linear transformer 1-3*) первинна обмотка яких під'єднана в розрив силового кола фаз мережі. Для спрощення дослідження режиму вторинна обмотка отримує живлення від програмованого джерела ЕРС (*Controlled voltage source 1-3*). Керуючим сигналом джерела ЕРС є сигнал  $\mathbf{u}_{SF}^*$ . Цей сигнал формується на виході підсистеми *Compensation voltage unit* (рис 3б).

На вхід блоку *Compensation voltage unit* подається напруга мережі  $\mathbf{u}_S$  та активна складова напруги  $\mathbf{u}_a$ . В блоці  $f(u)$  визначається амплітуда активної складової напруги за виразом (10).

Активна складова напруги  $\mathbf{u}_a$  формується в блоці *Voltage active components detector* (рис.3в). На вхід блоку подається напруга мережі  $\mathbf{u}_S$ , компонента основної гармоніки прямої послідовності струму навантаження  $\mathbf{i}_{I+}$  та струм мережі  $\mathbf{i}_S$ . Процес формування сигналу відбувається за виразами (11-13).

Компонента основної гармоніки прямої послідовності струму навантаження  $\mathbf{i}_{I+}$  формується в блоці *Fundamental harmonic positive sequence detector* (рис. 3г), на підставі мережевої напруги шляхом виконання трансформацій та перерахунків за виразами (14-23).

Параметри елементів схеми, які були використані для дослідження роботи пристрою який підключено через однофазні трансформатори зведені до таблиці 1.

Для дослідження роботи послідовного силового активного фільтра було синтезовано модель пристрою та системи визначення заданої напруги послідовного силового активного фільтра (рис 4).

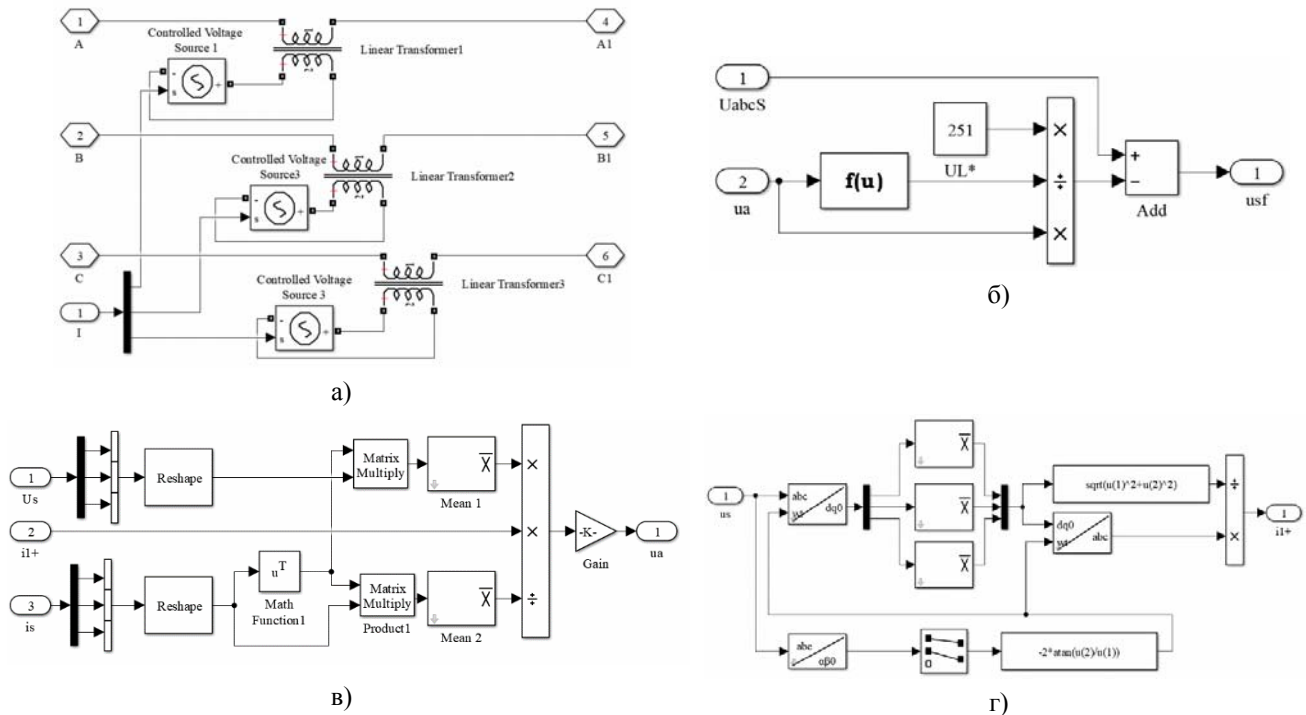


Рисунок. 3 Схеми блоків моделі: а – блок Controlled series transformer; б – блок Compensation v oltagе unit; в – блок Voltage active components detector; г – Fundamental harmonic positive sequence detector

Таблиця 1. Параметри досліджуваної моделі послідовного силового активного фільтра

| Елемент                | Параметр   | Значення              |
|------------------------|------------|-----------------------|
| Tree-phase source      | $R_s, Ohm$ | 0.004                 |
|                        | $L_s, H$   | 0.004                 |
|                        | $U_m, V$   | 380                   |
|                        | $f_s, Hz$  | 50                    |
| Linear Transformer 1-3 | $U_m, V$   | 380                   |
|                        | $I_n, A$   | 10                    |
|                        | $R_1, Ohm$ | 0.057                 |
|                        | $R_2, Ohm$ | 0.677                 |
|                        | $L_1, H$   | $2.958 \cdot 10^{-5}$ |
|                        | $L_2, H$   | $3.53 \cdot 10^{-4}$  |

| Елемент                    | Параметр   | Значення             |
|----------------------------|------------|----------------------|
| Linear Transformer 1-3     | $S_n, VA$  | 1000                 |
|                            | $f_n, Hz$  | 50                   |
| AC voltage source1         | $U, V$     | $\sqrt{2} \cdot 40$  |
|                            | $f, Hz$    | $3 \cdot 50$         |
| AC voltage source2         | $U, V$     | $\sqrt{2} \cdot 100$ |
|                            | $f, Hz$    | 50                   |
| Tree-phase series RLC load | $U_m, V$   | 380                  |
|                            | $f_n, Hz$  | 50                   |
|                            | $P_n, W$   | 2000                 |
|                            | $Q_n, var$ | 2000                 |

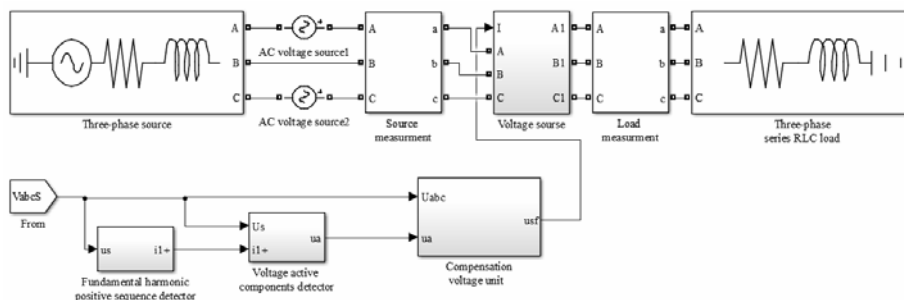
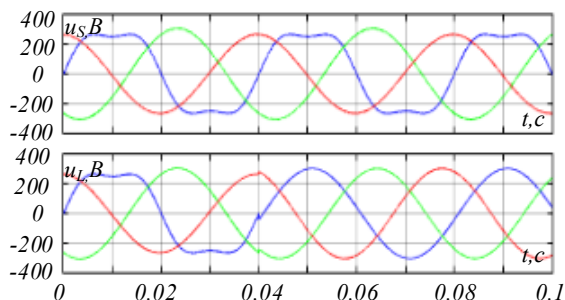


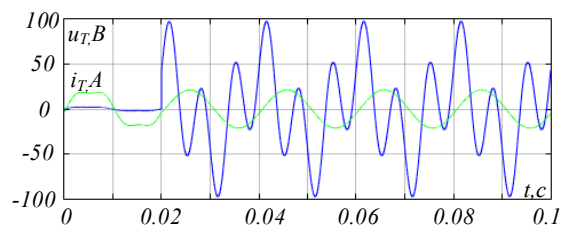
Рисунок. 4 Модель системи визначення сигналу управління послідовним силовим активним фільтром

На (рис. 5) наведені осцилограми напруги мережі по трьом фазам та напруги навантаження по трьом фазам.



**Рисунок. 5** Осцилограми напруги мережі  $u_S$  та напруг навантаження  $u_L$

На (рис. 6) наведені осцилограми напруги та струму одного з трансформаторів активного фільтру. Слід відзначити що напруга та струм трансформатора мають різну форму. В цьому випадку струм трансформатора зумовлений режимом навантаження *Tree-phase series RLC load*, а напруга зумовлена викривленнями мережевої напруги відносно напруги основної гармоніки прямої послідовності.



**Рисунок. 6** Осцилограми напруги  $u_T$  та струму  $i_T$  трансформатора

Для оцінки впливу трансформатора на напругу навантаження проведено серію експериментів із зміною активною потужністю навантаження  $P=2-10\text{кВт}$ . Результати занесені до таблиці 2.

**Таблиця 2.** Результати досліджень рівня напруги навантаження

| $P_L, \text{кВт}$ |   | 2     | 4     | 6     | 8     | 10    |
|-------------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|
| $U_S, \text{В}$   | A | 222.8 | 222.5 | 222.2 | 222   | 221.7 |
|                   | B | 219.1 | 218.9 | 218.6 | 218.4 | 218.1 |
|                   | C | 189.9 | 189.7 | 189.4 | 189.2 | 188.9 |
| $U_L, \text{В}$   | A | 217   | 216.7 | 216.3 | 216   | 215.7 |
|                   | B | 217   | 216.7 | 216.3 | 216   | 215.7 |
|                   | C | 217   | 216.6 | 216.3 | 216   | 215.7 |

|                   |       |       |       |       | 7     |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $P_T, \text{Вт}$  | 138,7 | 141,2 | 144,8 | 149,7 | 155,8 |
| $Q_T, \text{Вар}$ | 181,2 | 366,2 | 549,9 | 735,2 | 919,4 |
| $THD\_U$          | 1,298 | 1,296 | 1,293 | 1,291 | 1,289 |

**V. ВИСНОВКИ**

Розроблено модель послідовного силового активного фільтру в системі електроспоживання з лінійним симетричним навантаженням на несинусоїдальною напругою мережі живлення, в якій враховані параметри схеми заміщення трансформаторів фільтру. Розроблена блок схема системи управління послідовним силовим активним фільтром дозволяє регулювати вихідну напругу фільтру та забезпечує її синусоїдальність та симетрію. В досліджуваному випадку при зміні потужності навантаження в розрахунковому діапазоні зниження діючого значення напруги навантаження не перевищує 1%. Пропоноване рішення потребує дослідження для випадку нелінійного навантаження. Пропоноване рішення потребує дослідження для випадку нелінійного навантаження.

**СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ**

- [1] Popescu, M. Optimum control strategy of three-phase shunt active filter World Academy of Science / M. Popescu. – 2009.– №10 – 1810-1815 p.
- [2] Жежеленко, И. В. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях / Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л. – М. : Энергоатомиздат, 2000. – 252 с.
- [3] Власенко, Р.В. Порівняння методів компенсації неактивної потужності трифазним силовим активним фільтром з адаптивним релейним регулятором струму / Р. Власенко. – Електротехніка та електроенергетика. – 2014. – №2 – С. 20-27 с.
- [4] Dixon, J.W. Analysis and evaluation of different modulation techniques for active power filters / Dixon J.W., Tepper S.M., Moran L.T. – APEC 94. – 1994. – 900 с.
- [5] Васютинский, С. Б. Вопросы теории и расчета трансформаторов / С.Б. Васютинский – Л. : Энергия, 1970. – 432 с
- [6] Ucar, M., Ozdemir S., Ozdemir E. A four-leg unified series-parallel active filter system for periodic and non-periodic disturbance compensation / Mehmet Ucar.– Electric Power Systems Research. –2010. – № 4 – С. 1132.
- [7] Власенко, Р. В. Система регулювання трифазного паралельного силового активного фільтра з нечітким регулятором в контурі струму / Р. В. Власенко, О. В. Бялобржеський, С. С. Бондаренко, С. М Якимець. // Вісник Кременчуцького національного університету ім. Михайла Остроградського. – 2016 – №6(101) – С. 15-21.

- [8] Власенко, Р. В. Корекція алгоритму визначення заданого струму силового активного фільтра на основі теорії Фрізе в умовах несиметрії / Р.В. Власенко, О.В. Бялобржеський // Електротехніка та електроенергетика. – 2016. – № 1 – 4-6.
- [9] Jantzen J. Tuning of fuzzy PID controllers / Jan Jantzen // Technical University of Denmark, Tech. – 1998. – 22p.
- [10] Сегада М.С. Электричні мережі та системи / М. С. Сегада – Льв.: НУ «Львівська політехніка», 2007 – 488 с.
- [11] Лазерев Ю. Моделирование процессов и систем Matlab / Ю. Лазерев. – Питер : Питер, 2005.– 280с.
- [12] Алексеев Б.А. Активные фильтры высших гармоник / Б. А. Алексеев. – М. : Электро. – 2007. – № 3. – С. 28–32.
- [13] Лохов С.М. Энергетические составляющие мощности вентильных преобразователей / С. М. Лохов. – Челябинск : ЮУрГУ. – 1999. – ч.1. – 106 с.
- [14] Жемеров Г.Г. Теория мощности Фризе и современные теории мощности / Г.Г. Жемеров. – Електротехніка і електромеханіка. – 2007. – №6. – С. 63-65.
- [1] Zakis J. Feasibility study of flexible systems for reactive power compensation / J. Zakis // *Технічна електродинаміка*. – 2010. – №10. – С. 14–20p.
- [15] Алексеев Б.А. Активные фильтры высших гармоник / Б.А. Алексеев. – Электро. – 2007. – № 3. – 28–32.
- [16] Волков, А. В Исследование функционирования и энергоэффективности применения силового активного фильтра для четырехпроводной трехфазной сети переменного напряжения / А.В. Волков, В.П. Метельский, В.А. Волков // *Технічна електродинаміка*. – 2010. – № 5. – С. 61–68.
- [17] Жуйков, В.Я. Особенности режимов работы ФКП / В.Я. Жуйков, Д.А. Николаець // *Технічна електродинаміка*. – 2011. – Част. 1. – С. 24–29.
- [18] Жемеров, Г.Г. Коэффициент несинусоидальности напряжения сети в точке подключения активного выпрямителя / Жемеров Г.Г., Ковальчук О.И. // *Технічна електродинаміка*. – 2011. – № 3. – С. 33–40.
- [19] Чаплыгин, Е.Е. Спектральное моделирование преобразователей с широтно-импульсной модуляцией: учебное пособие / Е.Е. Чаплыгин. – М.: МЭИ, 2009. – 56 с.
- [20] Колб, А.А. Электромагнітні процеси в силових активних компенсаторах неактивних складових потужності / А.А. Колоб – Кременчук: КДПУ, 2009. – №4 – 160–165.

Стаття надійшла до редакції 06.04.2018

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО АКТИВНОГО ФИЛЬТРА НА КАЧЕСТВО НАПРЯЖЕНИЯ

БОНДАРЕНКО С.С.

аспирант кафедры систем электроснабжения и энергетического менеджмента Кременчугского национального университета им. Михаила Остроградского, Кременчуг, Украина, e-mail: sergj1994@gmail.com; ;

БЯЛОБРЖЕСЬКИЙ О.В.

канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры систем электроснабжения и энергетического менеджмента Кременчугского национального университета им. Михаила Остроградского, Кременчуг, Украина, e-mail: seemAl@kdu.edu.ua

ВЛАСЕНКО Р.В.

асистент кафедры систем электроснабжения и энергетического менеджмента Кременчугского национального университета им. Михаила Остроградского, Кременчуг, Украина, e-mail: laplandec267@gmail.com;

**Цель работы.** Исследовать особенности использования трансформаторов последовательного силового активного фильтра для реализации продольной компенсации

**Методы исследования.** Методы решения систем дифференциальных уравнений первого порядка, методы матричных преобразований, методы численного моделирования, методы расчета активной части мощности Фризе, методы теории преобразования систем координат..

**Полученные результаты.** Разработана функциональная схема последовательного силового активного фильтра при реализации продольной компенсации, исследована связь параметров трансформатора с параметрами режима, рассмотрены процессы, протекающие в трансформаторе, разработан способ определения сигнала управления последовательного фильтра, в среде визуального программирования разработана модель упрощенной системы электропотребления, проведено звено исследований, на основании анализа которых показана эффективность применения предлагаемого решения по уровню напряжения погрузочные тажесня. Для оценки влияния трансформатора на напряжение нагрузки проведена серия экспериментов с изменением активной мощностью нагрузки. Сформулированы выводы касательно воздействию параметров трансформаторов активного фильтра на напряжение нагрузки.

**Научна новизна.** Несоблюдение качества энергетических показателей приводит к экономическим потерям, снижением надежности функционирование электрических сетей и нарушение технологических процессов, увеличению дополнительных потерь в сетях и элементах электрооборудования, сокращением срока службы силового электрооборудования энергетических систем. Продольная компенсация является одним из решений для обеспечения качества электроэнергии. компенсация обеспечивает повышение динамической устойчивости линии электропередачи и стабильность напряжения основной сети. На основании анализа известных работ установлено, что пассивные компенсаторы с неизменной структурой все менее удовлетворяют требования к поддержке качества электроэнергии. Как следствие, разрабатываются и внедряются управляемые фильтрокомпенсирующие устройства - силовые активные фильтры. Принцип действия компенсатора - постоянно создает гармоничные напряжения, которые точно соответствуют гармоническим компонентам, генерируемые нагрузкой. Компенсируется искажения, уже присутствует в системе электропитания. В результате напряжение остается синусоидальным. Компенсационные свойства активного фильтра зависят от алгоритма определения сигнала управления. С применением теории мощности Фризе предложена определенная последовательность синтеза сигнала управления последовательным силовым активным фильтром.

**Практическая ценность.** Создана определенная последовательность синтеза сигнала управления компенсатором, исследовано влияние трансформаторов последовательного силового активного фильтра при реализации продольной компенсации.

**Ключевые слова:** *поздовжня компенсація; силовий активний фільтр; трансформатор; теорія Фризе.*

## INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF THE TRANSFORMER OF A SERIES ACTIVE FILTER ON THE QUALITY OF VOLTAGE

BONDARENKO S.S.

post-graduate student of the Department of Power Supply and Energy Management Systems of the Kremenchuk National University, Kremenchug, Ukraine, e-mail: sergj1994@gmail.com;

BIALOBRZHESKYI O.V.

Ph.D, Associate professor, Associate professor of the Department of Power Supply Systems and Energy Management of the Kremenchug National University. Mikhail Ostrogradsky, Kremenchug, Ukraine, e-mail: [seemAl@kdu.edu.ua](mailto:seemAl@kdu.edu.ua)

VLASENKO R.V

assistant of the Department of Power Supply Systems and Energy Management of the Kremenchug National University. Mikhail Ostrogradsky, Kremenchug, Ukraine, e-mail: laplandec267@gmail.com;

**Purpose.** Investigate the features of using a series power transformer for the implementation of longitudinal compensation.

**Methodology.** Methods of solving systems of differential equations of the first order, methods of matrix transformations, methods of numerical simulation, methods of calculating the active part of Frieze power, methods of the theory of transformation of coordinate systems.

**Findings.** The functional scheme of the successive power active filter is realized in the implementation of longitudinal compensation, the connection of the parameters of the transformer with the parameters of the mode is investigated, the processes that take place in the transformer are considered, a method for determining the signal of the control of the successive filter is developed, in the visual programming environment a model of the simplified system of electricity consumption has been developed, researches, on the basis of which analysis, the efficiency of application of the proposed solution according to the level of voltage on the invoice is shown ancestry A series of experiments with a change in the active load power was carried out to assess the impact of the transformer on the load voltage. The conclusions of the influence of the parameters of the active filter transformers on the load voltage are formulated.

**Originality.** Non-compliance with the quality of energy indicators leads to economic losses, reduced reliability of operation of electric networks and violation of technological processes, increase of additional losses in networks and elements of electrical equipment, shortening of service life of electrical power equipment of power systems. Longitudinal compensation is one of the solutions for ensuring the quality of electricity. Compensation provides for increasing the dynamic stability of the transmission line and the stability of the main network voltage. On the basis of the analysis of known works, it has been established that passive compensators with a permanent structure are less satisfied with the requirements for maintaining the quality of electricity. As a result, controlled filter compensating devices are developed and implemented - power active filters. The principle of the compensator - constantly creates harmonic voltages that exactly match the harmonic components generated by the load. The distortion is already compensated, already present in the power supply system. As a result, the voltage remains sinusoidal. The compensatory properties of the active filter depend on the algorithm for determining the control signal. With the use of the Frieze power theory, a cer-



tain sequence of the synthesis of a control signal by a series active active filter is proposed.

**Practical value.** A certain sequence of synthesizing the control signal of the compensator has been created, the effect of the power active filter transformers has been investigated for the realization of longitudinal compensation.

**Keywords:** compensator; power active filter; transformer; Frize theory.

#### REFERENCES

- [1] Popescu, M. (2010). Optimum control strategy of three-phase shunt active filter. *World Academy of Science*, 10, 1810-1815. [in English]
- [2] Zhezhenko I.V., Saenko Ju.L. (2000). Pokazateli kachestva jelektrojenergii i ih kontrol' na promyshlennyh predpriyatijah [Indicators of power quality and their control in industrial enterprises]. *Energoatomsdat*, 252. [in Russian]
- [3] Vlasenko, R., & Bialobrzheski, O. (2014). The analysis of energy processes in three-phase active power filter using spectral modeling. *Electrical Engineering And Power Engineering*, 1, 12-18. doi:http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2014-1-2 [in Ukraine]
- [4] Dixon J.W., Tepper S.M., Moran L.T. (1994). Analysis and evaluation of different modulation techniques for active power filters. *Applied power electronics conference and exposition*. England: APEC 94, 900. [in English]
- [5] Vasjutinskij, S.B. (1970). Questions of the theory and calculation of transformers. *Energy*, 432. [in Russian]
- [6] Ucar, M., Ozdemir, S., Ozdemir, E. (2011). A four-leg unified series-parallel active filter system for periodic and non-periodic disturbance compensation. *Electric Power Systems Research*, 81 – 1132. [in English]
- [7] Vlasenko, R. V., Bjalobrzhes'kij, O. V., Bondarenko, S. S., Jakimec', S.M. (2016). Sistema reguljuvannja trifaznogo paralelnogo si-lovogo aktivnogo fil'tra z nechitkim reguljatorom v konturi strumu [Control system for the three-phase parallel-active active filter with fuzzy controller in the current circuit]. *Visnik Kremenchuc'kogo nacional'nogo universitetu im. Mihajla Ostrograds'kogo*, 15-21. [in Ukraine]
- [8] Vlasenko, R., & Bialobrzheski, O. (2016). Correction algorithm for determining the given current active power filter based on the theory power fryze in terms of asymmetry. *Electrical Engineering And Power Engineering*, 1, 57-63. doi:http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2016-1-8 [in Ukraine]
- [9] Jantzen, J. (1998). Tuning of fuzzy PID controllers. *Technical University of Denmark. Tech. report*, 1, 22. [in English]
- [10] Segeda, M. S. (2007). Elektrichni merezhi ta sistemi [Electric networks and systems]. *Lviv. L'vivs'ka politehnika*, 488. [in Russian]
- [11] Lazerev, J. (2005). Modelirovanie processov i sistem Matlab [Modeling of Matlab processes and systems]. *Piter*, 280. [in Russian]
- [12] Alekseev, B.A. (2007). Active harmonic filters [Aktivnye fil'try vysshih garmonik]. *M. Electro*, 28-32. [in Russian]
- [13] Lohov, S.M. (1999). Jenergeticheskie sostavljajushhie moshhnosti ventil'nyh preobrazovatelej [Energy components of the power of the gate converters]. *Cheljabinsk. JuUrGU*, 106. [in Russian]
- [14] Zhemerov, G.G. (2007). Teorija moshhnosti Frize i sovremennye teorii moshhnosti [The theory of Friese's power and modern theory of power]. *Elektrotehnika i elektromehnika*, 63-65. [in Russian]
- [15] J. Zakis, D. Vinnikov, J. Laugis, I. Rankirs. (2010). Feasibility study of flexible systems for reactive power compensation. *Latvia*, 14–20. (in Russian)
- [16] Alekseev, B.A. (2007). Active harmonic filters [Aktivnye fil'try vysshih garmonik]. *Electro*, 28-32. [in Russian]
- [17] Volkov, A.V. (2010). V Issledovanie funkcionirovanija i jenergojef-fektivnosti primenenija silovogo aktivnogo fil'tra dlja chetyrehprovodnoj trehfaznoj seti peremennogo naprjazhenija [Study of the functioning and energy efficiency of the use of a power active filter for a four-wire three-phase alternating voltage network]. *Tehnichna elektrodinamika*, 5, 61–68. [in Russian]
- [18] Zhujkov, V.J., Mikolayetz, D.A. (2011). Features of modes work a filtering compensating devices. *Tekhnichna elektrodinamika*, 1, 24–29. (in Russian)
- [19] Zhemerov, G.G. and Kovalchuk, O.I. (2011). Kojefficient nesinusoidal'nosti naprjazhenija seti v tochke podkljuchenija aktivnogo vyprjamitelja [Voltage nonsinusoidality ratio of a network in a point of connection of the active rectifier], *Tekhnichna elektrodinami*, 1, 33–40. [in Russian]
- [20] Tchablygin, E.E. (2009). Spectralnoye modelirovaniye preobrazovateley c shirotno-impulsnoy modulyciyey [Spectral modelling of converters with pulse-width modulation] tutorial. *Moscow, MEI*, 1, 56. [in Russian]
- [21] Kolb, A.A. (2009). Elektromagnitni procesi v silovih aktivnih kompen-satorah neaktivnih skladovih potuzhnosti [Electromagnetic processes in power active filters of inactive components of capacity]. *Transaction of Kremenchuk State Polytechnic University*, 2, 160-165. [in Ukraine]