

УДК 621.317.789

А.А. Щерба, Д.К. Маков, О.В. Поліщук

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ

## ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА СПОТВОРЕННЯ СИНУСОЇДНОСТІ З ВИКОРИСТАННЯМ ФІЛЬТРІВ СИМЕТРИЧНИХ СКЛАДОВИХ

Стаття присвячена виділенню напруги одного з найскладніших для вимірювання показника якості електроенергії, нормованого Держстандартом 13109-97 [1], – коефіцієнта спотворення синусоїдності кривої напруги для міжфазних (фазних) напруг. При аналого-цифровому виділенні цього показника якості використовуються дискретизація в часі (адаптивна до змінного періоду  $T_m$  основної частоти електромережі), аналого-цифрове перетворення миттєвих значень напруг електромережі. При цьому отримані коди миттєвих значень містять домінуючі і неінформативні складові напруг основної частоти. Цих складових бажано позбутися перед АЦП. Один із можливих шляхів – використання диференціального методу вимірювання [2] характеризується чималою складністю. В наступній роботі для значного послаблення напруг основної частоти запропоновано використовувати каскадне з'єднання фільтрів симетричних складових напруг зворотної та прямої послідовності. Проведені дослідження і моделювання динамічних властивостей цього з'єднання показали, що при підключенні до його входів стрибком напруги прямої послідовності основної частоти (домінуюча складова трифазної напруги) перехідний процес на його виходах практично повністю закінчується після  $1,2T_m$ .

**Ключові слова:** коефіцієнт спотворення синусоїдності кривої напруги для міжфазних (фазних) напруг, показники якості електроенергії.

### Вступ

**Постановка завдання.** Задача забезпечення необхідної якості електроенергії є однією з найбільш важливих проблем сучасної електроенергетики. Тому розробка нових більш ефективних способів визначення показників якості електроенергії є важливим і актуальним електротехнічним напрямком. Відповідно до Держстандарту України № 13109-97 [1] одним із найбільш складних для визначення статичних показників якості електроенергії є коефіцієнт спотворення синусоїдності (КСС) кривої напруги для міжфазних (фазних) напруг, який характеризується напругою вищих гармонік. Для аналогового усунення домінуючої неінформативної напруги основної частоти необхідний використовувати режекторний фільтр напруги, який не пропустить напругу з частотою 49 – 51 Гц і має малу тривалість перехідного процесу – бажано до двох періодів напруги основної частоти, тобто до 0,04 секунди. Розв'язок цієї задачі для однофазних кіл визиває суттєві ускладнення, які спрощуються при використанні трифазних кіл.

**Аналіз останніх досягнень і публікацій.** Для аналого-цифрових приладів визначення КСС напруги (з адаптивною до періоду дискретизацією в часі та аналого-цифровим перетворенням її миттєвих значень) характерним є наявність домінуючої та неінформативної складової напруги прямої послідовності основної частоти. Для розширення динамічного діапазону визначення КСС напруги можливим вирішенням цієї проблеми є використання диференціального методу вимірювання [2]. Але реалізація цього метода достатньо складна.

**Мета статті.** Метою статті є розробка способу послаблення домінуючої неінформативної напруги основної частоти електромережі з малою тривалістю перехідного процесу з наступним аналого-цифровим перетворенням. Для цього пропонується використати каскадне з'єднання фільтрів симетричних складових (ФСС) напруг зворотної і прямої послідовності та узгоджувальних схем (УС1–3) між ними [3 – 5], як показано на рис. 1.

### Виклад основного матеріалу

Трифазна напруга А, В, С підключається до входів ФСС напруги зворотної послідовності. З виходів цього ФСС через узгоджувальні схеми УС1-3 вихідна трифазна напруга підключається до входів а1, в1, с1 ФСС напруги прямої послідовності.

Вихідний сигнал вимірюється на виходах а2, в2, с2 цього ФСС. Каскадне з'єднання цих ФСС перешкоджає проходженню напруг прямої та зворотної послідовностей основної гармонічної складової, тобто взагалі напруги основної частоти.

На виходах всієї схеми а2, в2, с2 будуть присутні тільки вищі гармоніки. Співвідношення між елементами ФСС такі:

- $z = r_1 e^{-j60^\circ}$ ,  $z$  складається з паралельного з'єднання  $r_2$  і конденсатора  $C$ , ( $r_2 = 2r_1, x_C = 1/(\omega_0 C) = 2r_1/\sqrt{3}$ ),
- постійна часу  $\tau = C r_1 r_2 / (r_1 + r_2) = 1/(\omega_0 \sqrt{3})$ ;
- кругова частота  $\omega_0 = 2\pi f_0 = 2\pi / T_m = 314$  (рад/с),
- $1/f_0 = T_m$  – період напруги основної частоти електромережі.

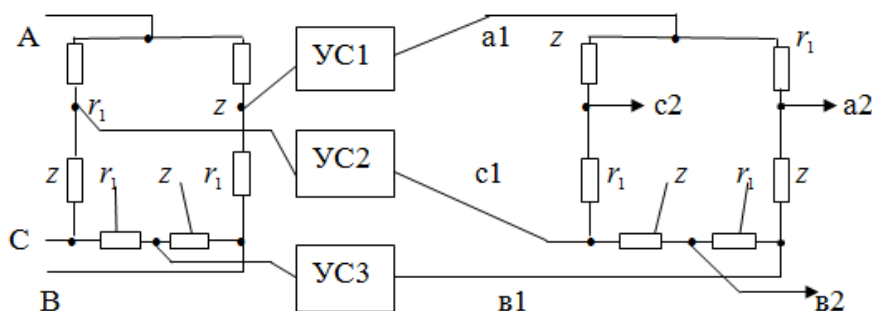


Рис. 1. Схема каскадного з'єднання фільтрів симетричних складових

Розглянемо одну з фаз вихідної напруги:

$$\dot{U}_{c2a2} = \dot{U}_{c1a1} \dot{z}/(r_1 + \dot{z}) - \dot{U}_{b1a1} r_1/(r_1 + \dot{z}), \quad (1)$$

де  $\dot{U}_{c1a1} = -\dot{U}_{BA} \dot{z}/(r_1 + \dot{z}) + \dot{U}_{CA} r_1/(r_1 + \dot{z});$

$$\dot{U}_{b1a1} = \dot{U}_{CB} \dot{z}/(r_1 + \dot{z}) - \dot{U}_{AB} r_1/(r_1 + \dot{z}). \quad (2)$$

При цьому  $z(p) = r_2/(1 + pCr_2)$ , позначимо

$$K_1(p) = z(p)/(r_1 + z(p)) = \frac{r_2}{r_1 + r_2} \cdot \frac{1}{1 + p\tau},$$

$$\tau = Cr_1 r_2 / (r_1 + r_2); \quad (3)$$

$$K_2(p) = r_1/(r_1 + z(p)) = 1 - K_1(p).$$

Імпульсні реакції цих блоків:

$$h_1(t) = L^{-1}[K_1(p)] = \frac{r_2}{r_2 + r_1} \cdot \frac{1}{\tau} e^{-t/\tau}; \quad (4)$$

$$h_2(t) = L^{-1}[K_2(p)] = \delta(t) - \frac{r_2}{r_2 + r_1} \cdot \frac{1}{\tau} e^{-t/\tau}, \quad (5)$$

тоді

$$U_{c1a1}(p) = U_{CA}(p)K_2(p) - U_{BA}(p)K_1(p);$$

$$U_{b1a1}(p) = U_{CB}(p)K_1(p) - U_{AB}(p)K_2(p).$$

Переходячи у часову область і вважаючи стрибок напруг за всіма трьома фазами одночасним, отримаємо:

$$u_{c1a1}(t) = (\theta(t) \cdot u_{CA}(t)) * h_2(t) - (\theta(t) \cdot u_{BA}(t)) * h_1(t), \quad (6)$$

$$u_{b1a1}(t) = (\theta(t) \cdot u_{CB}(t)) * h_1(t) - (\theta(t) \cdot u_{AB}(t)) * h_2(t), \quad (7)$$

де  $\theta(t)$  – функція Хевісайда;  $\theta(t) = 1, t \in [0, \infty]$ .

Лінійні напруги в усталеному режимі

$$u_{AB}(t) = U_m \cos(\omega t + \psi - \pi/3),$$

$$u_{CB}(t) = U_m \cos(\omega t + \psi),$$

$$u_{CA}(t) = U_m \cos(\omega t + \psi + \pi/3),$$

де  $\psi$  – початкова фаза. Тому з рівнянь (6) і (7) з урахуванням (4) і (5) отримаємо

$$u_{c1a1}(t) = u_{CA}(t) - (\theta(t) \cdot u_{CA}(t)) * h_1(t) - (\theta(t) \cdot u_{BA}(t)) * h_1(t) = u_{CA}(t) - (\theta(t) \cdot u_{\Sigma}(t)) * h_1(t)$$

де  $u_{\Sigma}(t) = u_{CA}(t) + u_{BA}(t)$ .

$$\dot{U}_{\Sigma} = \dot{U}_{CA} + \dot{U}_{BA} = U_m e^{j\pi/3} \left( 1 + e^{j\pi/3} \right) = \sqrt{3} U_m e^{j\pi/2}.$$

Тоді

$$u_{c1a1}(t) = u_{CA}(t) - \int_0^t u_{\Sigma}(x) h_1(t-x) dx.$$

Після перетворень рівняння отримаємо, що

$$u_{c1a1}(t) = U_m e^{-t/\tau} \cos\left(\psi + \pi/3\right). \quad (8)$$

Аналогічно отримаємо реакцію другої фази на стрибок напруги

$$u_{b1a1}(t) = U_m e^{-t/\tau} \cos\left(\psi - \pi/3\right). \quad (9)$$

Перехідний процес на виходах першого ФСС (це – ФСС напруги зворотної послідовності) при підключенні на його входи напруги прямої послідовності стрибком – це реакція тільки на прихід напруги в момент часу  $t=0$  і не містить гармонічної складової (при відсутності на входах напруги зворотної послідовності). Тому на наступний ФСС напруги прямої послідовності потрапляють лише експоненціальні напруги виду (8) і (9).

Використовуючи (1), отримаємо для однієї з фаз вихідної напруги каскадного з'єднання ФСС напруги зворотної та прямої послідовності:

$$u_{c2a2}(t) = u_{c1a1}(t) * h_1(t) - u_{b1a1}(t) * h_2(t), \quad (10)$$

звідки після відповідних перетворень отримаємо

$$u_{c2a2}(t) = U_m e^{-t/\tau} \left( \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{t}{\tau} \sin \psi - \cos\left(\psi + \pi/3\right) \right). \quad (11)$$

Перший доданок є більшим. Результати розрахунків приведені в табл. 1 ( $k$  – кількість періодів  $T_m$  напруги основної частоти електромережі):

Таблиця 1

Результати розрахунків доданків формули (11)

$k=t/T_m$	$\left(2/\sqrt{3}\right) \cdot \tau^{-1} e^{-t/\tau}$	$e^{-t/\tau}$
0,5	$2,7 \cdot 10^{-2}$	$4,3 \cdot 10^{-3}$
1	$2,3 \cdot 10^{-4}$	$1,9 \cdot 10^{-5}$
1,2	$3,2 \cdot 10^{-5}$	$2,0 \cdot 10^{-6}$

Проведене моделювання підтвердило отримані вище хороші динамічні властивості запропоновано-го каскадного з'єднання ФСС.

Проведені дослідження показали, що навіть при найбільш несприятливій початковій фазі три-фазної напруги ( $\psi = \pm \pi/2$ ) після проходження 1,2 періоду напруги основної частоти електромережі перехідний процес практично затухає.

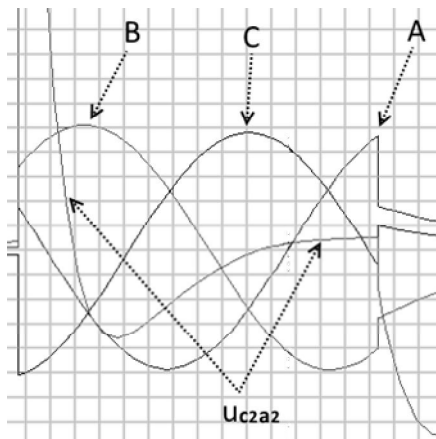


Рис. 2. Моделювання роботи каскадного з'єднання ФСС напруг зворотної та прямої послідовності при підключенні стрибком напруги прямої послідовності. Масштаб по горизонталі – Ims/кл., по вертикалі для фаз А, В, С – 2 В/кл., по вертикалі для вихідної напруги  $u_{c2a2}(t)$  ФСС – 0,4 В/кл

Такий результат дає підстави стверджувати, що каскадне з'єднання ФСС напруг зворотної та прямої послідовності основної частоти є доцільним використовувати для затримки домінуючої та неінформативної напруги основної частоти при вимірювання КСС. В зв'язку з залежністю напруги на виходах ФСС від частоти необхідно синтезувати відповідний частотний коректор.

## Список літератури

1. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения: 13109–97. – Введ. 01.01.97(Rus).
2. Тесик Ю.Ф. Применение дифференциального метода к измерению показателей качества электроэнергии / Ю.Ф. Тесик // 36 наук праць ІЕД НАНУ. – 2005 – №3. – С. 16-21 (Rus).
3. Shcherba A.A. Cascade filters for extraction of higher harmonic voltage and voltage proportionate to frequency deviation for electrical condition monitoring / A.A. Shcherba, D.K. Makov, N.I. Suprunovska // The Eighth International Conference on Condition Monitoring and Machinery Failure Prevention Technologies CM 2011 / MFPT2011. 20-22 June 2011, Cardiff, UK, V.1. – P. 334-341.
4. Серпілін К.Л. Вимірювання коефіцієнта несинусоїдальності з використанням фільтрів симетричних складових / К.Л. Серпілін, Д.К. Маков // Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІРТК-2013), Шоста міжнародна науково-практична конференція, збірник тез, Київ: НАУ, 2013 – С. 84-86.
5. А.С. №970273 (СССР). Измеритель показателей качества электроэнергии / Д.К. Маков, опубл. в Б.И. 1982, №4 (Rus).

Надійшла до редколегії 7.04.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф. І.П. Захаров, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА СИНУСОИДАЛЬНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФИЛЬТРОВ СИММЕТРИЧНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ

А.А. Щерба, Д.К. Маков, О.В. Полищук

Статья посвящена выделению напряжения одного из наиболее сложных для измерения показателя качества электроэнергии, нормированного Госстандартом 13109-97 [1], – коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения для междуфазных (фазных) напряжений. При аналого-цифровом выделении этого показателя качества используются дискретизация во времени (адаптивная к переменному периоду  $T_m$  основной частоты электросети), аналого-цифровое преобразование мгновенных значений напряжений электросети. При этом полученные коды мгновенных значений содержат доминирующие неинформативные составляющие напряжений основной частоты. От этих составляющих желательно избавиться до АЦП. Один из возможных путей – использование дифференциального метода измерения [2] характеризуется повышенной сложностью. В данной работе для значительного ослабления напряжения основной частоты предложено использовать каскадное соединение фильтров симметричных составляющих обратной и прямой последовательности. Выполненные исследования и моделирование динамических свойств этого соединения показали, что при подключении к его входам скачком напряжения прямой последовательности основной частоты (доминирующая составляющая трехфазного напряжения) переходный процесс на его выходах практически полностью заканчивается после  $1,2T_m$ .

**Ключевые слова:** коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения для междуфазных (фазных) напряжений, показатели качества электроэнергии.

## DETERMINATION OF HARMONIC DISTORTION COEFFICIENT USING SYMMETRICAL SEQUENCES FILTERS

A. A. Shcherba, D. K. Makov, O. V. Polishchuk

This article deals with the determination voltage of one of the most complicated to measure the quality index of electric power, State Standard 13109-97 normalized [1], – harmonic distortion coefficient of the voltage curve for phase to phase (phase) voltages. Analog-to-digital determination of this quality index used sampling time (adaptive to variable period  $T_m$  of the fundamental frequency of the power supply), analog-to-digital conversion of the instantaneous values of the electric voltages. In this case, the instantaneous values obtained codes contain uninformative dominant components of the fundamental frequency voltages. From these elements, it is desirable to get rid of the ADC. One possible way - using the differential method of measurement [2] is characterized by increased complexity. In this paper, for the significant weakening of the fundamental frequency voltage is proposed to use a cascade connection of filters symmetrical components negative and positive sequence. The investigations and modeling of dynamic properties of this circuit have shown that when connected to the its inputs of a jump positive sequence voltages of fundamental frequency (the dominant component of the three-phase voltage) transitional process is finished on its output almost completely after  $1.2T_m$ .

**Keywords:** harmonic distortion coefficient of voltage phase to phase (phase) voltages, power quality indexes.