

**ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА НЕСИНУСОЇДАЛЬНОСТІ ФАЗНИХ НАПРУГ
З ВИКОРИСТАННЯМ ТРИФАЗНИХ ФІЛЬТРІВ СИМЕТРИЧНИХ СКЛАДОВИХ**

Д.К. Маков, канд.техн.наук, О.В. Поліщук

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут",

пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна.

E-mail: makov47@freenet.com.ua

Розроблено метод визначення коефіцієнта несинусоїдальності фазних напруг з використанням перетворювачів однофазної напруги в трифазну симетричну систему напруг прямої послідовності. Така трифазна напруга підключається до входу каскадно з'єднаних фільтрів симетричних складових (ФСС) напруг зворотної і прямої послідовностей і узгоджувальних схем типу УС1-3. Моделювання і дослідження динамічних властивостей пристроїв, що реалізують запропонований метод, показали, що при швидкому підключенні напруг прямої послідовності перехідний процес затухає раніше, ніж за півтора періоду напруги основної частоти. Бібл. 11, рис. 2, табл. 1.

Ключові слова: однофазна напруга, несинусоїдальність, якість електроенергії, фільтр симетричних складових.

Коефіцієнт викривлення синусоїдності (КВС) напруг є одним з важливих показників якості електроенергії (ПЯЕ) [2]. Складність його визначення диференціальними та аналогово-цифровими методами зростає в однофазних колах, де використовують напівпровідникові перетворювачі струму [6, 11], ємнісні накопичувачі енергії [4, 7], нелінійні та стохастичні навантаження [8, 9, 11].

Пропонується спрощення цієї задачі шляхом перетворення таких кіл у трифазні кола [1, 5], до складу яких вводяться фільтри симетричних складових (ФСС) з малою тривалістю перехідних процесів [3, 10] (рис. 1).

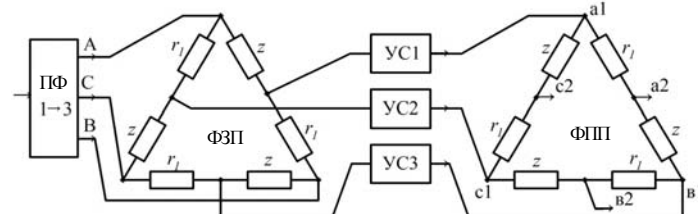


Рис. 1

Перетворювач ПФ 1→3 перетворює однофазну напругу в систему трифазних напруг прямої послідовності. Вони подаються на входні клемми фільтра зворотної послідовності (ФЗП), який послаблює їх і через узгоджувальні схеми УС1-УС3 подає на входні клемми (a1, b1, c1) фільтра прямої послідовності (ФПП). Цей фільтр послаблює напруги зворотної послідовності. Каскадне з'єднання ФЗП і ФПП значно послаблює напруги прямої і зворотної послідовностей основної частоти, тому

на вихідних клеммах (a2, b2, c2) ФПП залишаються лише напруги вищих гармонічних складових.

Для оцінки тривалості перехідного процесу такого каскадного з'єднання ФЗП і ФПП розглянемо випадок раптового підключення трифазної системи лінійних напруг на входи ФЗП як першого ФСС. Параметри елементів ФЗП і ФПП повинні мати наступні співвідношення: $z = r_1 e^{-j60^\circ}$, де z є комплексним опором паралельно з'єднаних r_2 і C , $r_2 = 2r_1$, $x_C = (\omega_0 C)^{-1} = 2r_1/\sqrt{3}$, постійна часу $\tau = Cr_1 r_2 / (r_1 + r_2) = (\omega_0 \sqrt{3})^{-1}$, $\omega_0 = 2\pi/T_0 = 314$ рад/с.

Розглянемо одну з фаз вихідної напруги \dot{U}_{a2c2}

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

де $\dot{U}_{c1a1} = -\dot{U}_{BA} z / (r_1 + z) + \dot{U}_{CA} r_1 / (r_1 + z); \quad \dot{U}_{b1a1} = \dot{U}_{CB} z / (r_1 + z) - \dot{U}_{AB} r_1 / (r_1 + z). \quad (2)$

Позначивши $z(p) = r_2 (1 + p C r_2)$, отримаємо

$$K_1(p) = z(p) (r_1 + z(p))^{-1} = r_2 ((r_1 + r_2) (1 + p\tau))^{-1}, \quad \tau = C r_1 r_2 / (r_1 + r_2)^{-1}, \quad K_2(p) = r_1 (r_1 + z(p))^{-1} = 1 - K_1(p). \quad (3)$$

Імпульсні реакції цих блоків можна записати у вигляді

$$h_1(t) = L^{-1}[K_1(p)] = \frac{r}{r+r} \cdot \frac{1}{\tau} e^{-t/\tau}; \quad h_2(t) = L^{-1}[K_2(p)] = \delta(t) - \frac{r}{r+r} \cdot \frac{1}{\tau} e^{-t/\tau}. \quad (4)$$

Тоді $U_{c1a1}(p) = U_{CA}(p) K_2(p) - U_{BA}(p) K_1(p), \quad U_{b1a1}(p) = U_{CB}(p) K_1(p) - U_{AB}(p) K_2(p)$

Переходячи у часову область і вважаючи стрибок напруг по всіх трьох фазах одночасним, отримаємо

$$u_{c1a1}(t) = (\theta(t) \cdot u_{CA}(t)) * h_2(t) - (\theta(t) \cdot u_{BA}(t)) * h_1(t), \quad u_{b1a1}(t) = (\theta(t) \cdot u_{CB}(t)) * h_1(t) - (\theta(t) \cdot u_{AB}(t)) * h_2(t), \quad (5)$$

де $\theta(t)$ – функція Хевісайда; $\theta(t) = 1, \quad t \in [0, \infty]$, а символ * показує операцію згортки.

Лінійні напруги в стаціонарному режимі визначаються як $u_{AB}(t) = U_m \cos(\omega t + \psi - \pi/3),$

$u_{CB}(t) = U_m \cos(\omega t + \psi), \quad u_{CA}(t) = U_m \cos(\omega t + \psi + \pi/3),$ де ψ – початкова фаза.

Із виразів (5) з урахуванням (4) отримуємо рівняння

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

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

$$u_{c1a1}(t) = U_m e^{-t/\tau} \cos(\psi + \pi/3). \quad (6)$$

Аналогічно отримаємо реакцію другої фази на стрибок трифазної напруги

$$u_{b1a1}(t) = U_m e^{-t/\tau} \cos(\psi - \pi/3). \quad (7)$$

Перехідний процес на вихідних клеммах ФЗП при підключенні до його вхідних клем напруг прямої послідовності – це тільки реакція на прихід напруги в момент часу $t = 0$, яка не містить гармонічної складової (при відсутності на вхідних клеммах напруг зворотної послідовності). Тому на ФПП напруги прямої послідовності потрапляють лише як експоненціальні напруги типу (6) і (7). Використовуючи вираз (1), отримаємо для однієї з фаз вихідної напруги каскадного з'єднання ФЗП і ФПП напруг зворотної та прямої послідовності

$$u_{c2a2}(t) = u_{c1a1}(t) * h_1(t) - u_{b1a1}(t) * h_2(t), \quad (8)$$

звідки після відповідних перетворень отримаємо, що $u_{c2a2}(t) = U_m e^{-t/\tau} \left(2t \sin \psi / \sqrt{3} \tau - \cos(\psi + \pi/3) \right)$. (9)

Перший член у дужках виразу (9) є більшим за другий. Результати розрахунків наведено у таблиці, де k – кількість періодів.

$k = t/T_0$	$\frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{t}{\tau} \cdot e^{-t/\tau}$	$e^{-t/\tau}$
1	$2,3 \cdot 10^{-4}$	$1,9 \cdot 10^{-5}$
1,2	$3,2 \cdot 10^{-5}$	$2,0 \cdot 10^{-6}$

Дослідження показали, що навіть при найбільш несприятливій початковій фазі ($\psi = \pm \pi/2$) трифазної системи напруг основної частоти перехідний процес триває не більше 1,2 періоду напруги основної частоти електромережі. Результати моделювання (рис. 2, а) показали, що підключення трифазної системи напруг до каскадного з'єднання ФЗП і ФПП підтверджує отримані аналітичні результати.

Таким чином, каскадне з'єднання ФСС зворотної та прямої послідовності (тобто ФЗП і ФПП) характеризується малою інерційністю і може бути рекомендоване як швидкодіючий режекторний фільтр напруги основної частоти при виділенні напруги вищих гармонік.

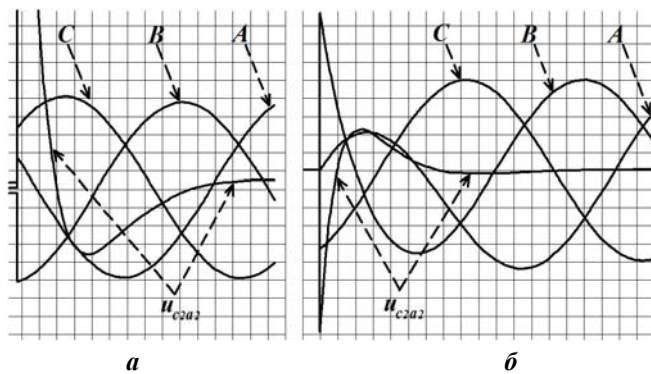


Рис. 2

Результати моделювання перехідних процесів при стрибку однофазної напруги на вході ПФ 1 → 3 схеми на рис. 1 відображені на рис. 2, б. Як видно, перехідний процес практично закінчується через 1,2 періоду основної частоти електромережі. Такий результат дає підстави стверджувати, що перетворювач фаз ПФ 1 → 3 та каскадне з'єднання ФСС напруг зворотної та прямої послідовностей основної частоти доцільно використовувати для послаблення домінуючої неінформативної напруги основної частоти при вимірюванні коефіцієнту викривлення синусоїдальності в однофазній нарузі. Для позбавлення залежності напруг на виходах ФСС від частоти доцільно синтезувати відповідний коректор.

1. Бамдас А.М., Кулинич В.А., Шапиро С.В. Статические электромагнитные преобразователи частоты и числа фаз. – М.-Л.: ГЭИ, 1961. – 208 с.

2. ГОСТ 13109-97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – 35 с.

3. Маков Д.К. Измеритель показателей качества электроэнергии, А.С. №970273 СССР // БИ. – 1982. – № 4.

4. Супруновская Н.И., Щерба А.А. Процессы перераспределения электрической энергии между параллельно соединенными конденсаторами // Техн. электродинамика. – 2015. – № 4. – С. 3–11

5. Щерба А.А., Маков Д.К., Полищук О.В. Визначення коефіцієнту спотворення синусоїдності з використанням фільтрів симетричних складових // Системи обробки інформації. – 2015. – Вип. 6 (131). – С. 150–152.

6. Щерба А.А., Супруновская Н.И. Закономерности повышения скорости нарастания разрядных токов в нагрузке при ограничении их максимальных значений // Техн. электродинамика. – 2012. – № 5. – С. 3 – 9.

7. Щерба А.А., Супруновская Н.И. Синтез электрических цепей с емкостными накопителями энергии в полупроводниковых формирователях мощных разрядных импульсов // Техн. электродинамика. – 2014. – № 1. – С. 3 – 11.

8. Ivanova O.M., Danylenko M.I., Monastyrsky G.E., Kolomytsev V.I., Koval Y.M., Shcherba A.A., Zaharchenko S.M., Portier R. Investigation of the formation mechanisms for Ti-Ni-Zr-Cu nanopowders fabricated by electrospark Erosion method in cryogenic liquids // *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*. – 2009. – Vol. 31. – No 5. – Pp. 603–614.
9. Rezinkina, M., Bydianskaya, E., Shcherba, A. Alteration of brain electrical activity by electromagnetic field // *Environmentalist*. – 2007. – Vol. 27. – No 4. – Pp. 417–422.
10. Shcherba A.A., Makov D.K. A method of determination of fundamental frequency's symmetric sequences and higher harmonics of three-phase voltage systems // *Proc. of the IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*, 2014, Kyiv, Ukraine. – Pp. 74–76.
11. Shcherba A.A., Suprunovska N.I. Study features of transients in the circuits of semiconductor discharge pulses generators with nonlinear electro-Spark load // *Proc. of the IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*, 2014, Kyiv, Ukraine. – Pp. 50–54.

УДК 621.317.789

ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТИ ОДНОФАЗНОГО НАПРЯЖЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФИЛЬТРОВ СИММЕТРИЧНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ

Д.К. Маков, канд.техн.наук, О.В.Полищук

Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт",
пр. Победы, 37, Киев, 03056, Украина. E-mail: makov47@freenet.com.ua

Разработан метод измерения коэффициента несинусоидальности фазных и линейных напряжений с использованием преобразователя однофазного напряжения в трехфазную симметричную систему напряжений прямой последовательности. Такая система напряжений подключается на вход каскадно соединенных фильтров симметричных составляющих (ФСС) напряжений обратной и прямой последовательностей и согласующих схем типа УС1-3. Моделирование и исследование динамических свойств устройств, реализующих предложенный метод, показали, что при быстром подключении напряжений прямой последовательности переходный процесс затухает за время меньшее, чем полтора периода напряжения основной частоты. Библ. 11, табл. 1, рис. 2.

Ключевые слова: однофазное напряжение, несинусоидальность, качество электроэнергии, фильтр симметричных составляющих.

MEASUREMENT OF NONSINUSOIDAL FACTOR FOR SINGLE-PHASE VOLTAGE USING OF SYMMETRIC COMPONENTS FILTERS

D.K. Makov, O.V. Polishchuk

National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnical Institute",
pr. Peremohy, 37, Kyiv-56, 03056, Ukraine. E-mail: makov47@freenet.com.ua

The method for measurement of nonsinusoidal factor of phase and line voltages using the converter of single-phase voltage in three-phase symmetric system of is developed. Such system of voltages is connected on an input of symmetric components filters (SCF) connected in cascade of negative and positive phase-sequence voltages and matching networks of type US1-3. Simulation and study of dynamic properties of the devices that implement the proposed method, showed that at fast connection of positive phase-sequence voltages the transient decays for a time less than one and a half period of voltage of a fundamental frequency.

References 11, table 1, figures 2.

Keywords: single-phase voltage, nonsinusoidality, quality of the electric power, symmetric components filter.

1. Bamdas A.M., Kulinich V.A., Shapiro S.V. Static electromagnetic converters of frequency and numbers of phases. – Moskva-Leningrad: GEI, 1961. – 208 p. (Rus)
2. *State Standard 13109-97*. Norms of quality of electric energy in systems of an electrical supply of general purpose. – 35 p. (Rus)
3. Makov D.K. The electric power quality indicators' measurement device. Patent of USSR № №970273. (Rus)
4. Suprunovska N.I., Shcherba A.A. Processes of energy redistribution between parallel connected capacitors // *Tekhnichna Elektrodynamika*. – 2015. – No 4. – Pp. 3–11. (Rus)
5. Shcherba A.A., Makov D.K., Polishchuk O.V. Determination of sine wave distortion factor using symmetric components filters // *Systemy obrobky informatsii*. – 2015. – Issue 6 (131). – Pp. 150–152. (Ukr)
6. Shcherba A.A., Suprunovska N.I. Increasing regularities of rate of current rise in the load at limiting its maximal values // *Tekhnichna Elektrodynamika*. – 2012. – No 5. – Pp. 3–9. (Rus)
7. Shcherba A.A., Suprunovskaya N.I. Synthesis of electrical circuits with capacitive energy storages in semiconductor formers of power discharge pulses // *Tekhnichna Elektrodynamika*. – 2014. – No 1. – Pp. 3–11. (Rus)
8. Ivanova O.M., Danylenko M.I., Monastyrskyy G.E., Kolomytsev V.I., Koval Y.M., Shcherba A.A., Zaharchenko S.M., Portier R. Investigation of the formation mechanisms for Ti-Ni-Zr-Cu nanopowders fabricated by electrospark Erosion method in cryogenic liquids // *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*. – 2009. – Vol. 31. – No 5. – Pp. 603–614.
9. Rezinkina, M., Bydianskaya, E., Shcherba, A. Alteration of brain electrical activity by electromagnetic field // *Environmentalist*. – 2007. – Vol. 27. – No. 4. – Pp. 417–422.
10. Shcherba A.A., Makov D.K. A method of determination of fundamental frequency's symmetric sequences and higher harmonics of three-phase voltage systems // *Proc. of the IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*, 2014, Kyiv, Ukraine. – Pp. 74–76.
11. Shcherba A.A., Suprunovskaya N.I. Study features of transients in the circuits of semiconductor discharge pulses generators with nonlinear electro-Spark load // *Proc. of the IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*, 2014, Kyiv, Ukraine. – Pp. 50–54.

Надійшла 30.01.2016
Остаточний варіант 22.03.2016