

О.Д.Музиченко¹, докт.техн.наук, Ю.О.Музиченко²

¹ – вул. Незалежності, 64, с. Літки, Броварський район, Київська область, 07411, Україна, e-mail: litky@ukr.net .

² – ТОВ «Мережеві технології»,

а/я 132, пр. Курчатова, 2, Нетишин, Хмельницька обл., 30100, Україна, e-mail: nettech@ukr.net

Для збільшення живучості електричних мереж запропоновано застосувати стабілізатор фаз. Описано електромагнітний пристрій, розроблений на основі виявлення та дослідження нових властивостей фільтру струмів нульової послідовності. Пристрій названо стабілізатором потенціалів фаз (скорочено – стабілізатор фаз). Пристрій призначено для усунення експлуатаційних порушень якості електропостачання багатофазних електричних кіл, наприклад, мереж та машин змінного струму. Дано визначення поняття «Стабілізатор фаз». Встановлено, що третина або дві треті фільтру струмів нульової послідовності проявляють властивості стабілізатора фаз. Бібл. 10, рис. 10.

Ключові слова: стабілізатор фаз, фільтр струмів нульової послідовності, стабілізація потенціалів, якість електричної енергії, мережа, двигун, перенос енергії між фазами, суміщення, обрив фази, надійність, живучість.

Основна проблема сучасної електроенергетики – перерви живлення. Проблема полягає у залежності електропостачання від пошкоджуваності одного із великої множини компонентів лінії та установок електропередачі [2]. Повітряні мережі є ненадійними і споживачі, особливо в сільській місцевості, живуть у стані постійного очікування перерв живлення. Трифазна електропередача, яка розроблена у фірмі AEG (Німеччина) 120 років тому під керівництвом М.О.Доливо-Добровольського, добре послужила людству, але на даний час потребує вдосконалення [1,10]. Аварії мереж були раніше і далі будуть у майбутньому, але задача електроенергетиків полягає у забезпеченні неперервності електропостачання споживачів при всіх можливих режимах, включно з аварійними. Вирішенню проблеми надійності і живучості електропередачі присвячена дана стаття. Забезпечення якості напруги в аварійних та безаварійних режимах електропередачі постає складовою проблеми. За цього стану аварійний режим електропередачі мусимо назвати також робочим режимом.

Вирішенню зазначеної проблеми сприяє також програма Smart Grid [10]. На думку авторів, у цій програмі мало уваги приділяється технологічним засобам, які забезпечують надійність та живучість електропостачання при наявності та відсутності резервування і при неочікуваному виході з ладу одного компоненту мережі. Наскільки відомо, до технологічної частини вказаної програми входить лише FACTS та двостороння комунікація між елементами електричної мережі [7,8]. Нами пропонуються методи та засоби, які: оперативно, тобто параметрично, можуть замінити всі компоненти фази разом із пошкодженим компонентом значної ділянки мережі на резервну фазу, всі компоненти якої не містять непошкодженого компоненту; за допомогою резервної фази забезпечити відстрочене по часу відновлення пошкодженого компоненту; без істотних перехідних електромагнітних процесів у мережі відновити систему електропостачання, після чого ця система є готовою для сприйняття нового. На думку авторів, технологічна частина програми Smart Grid може бути доповнена запропонованими методами та засобами. Такі методи та засоби розроблені на основі нового компоненту – стабілізатора фаз, за допомогою якого досягається багатократне підвищення надійності та живучості слабо резервованої електричної мережі при аварійних режимах електропостачання, генерування та електромагнітного перетворення електричної енергії.

Визначення стабілізатора фаз. Стабілізатор фаз (СФ) за призначенням є пристроєм, приєднаним паралельно до багатофазного кола, наприклад, мережі, який зменшує чутливість фаз кола до експлуатаційних порушень якості електричної енергії (до несиметрії, вищих гармонік напруг та струмів, коливань напруг, короточасних та довгочасних перерв електропостачання, перехідних процесів, обривів проводів та коротких замикань, наведених напруг, високочастотних процесів, імпульсів напруг та струмів комутаційного та грозового характеру, змін потенціалів контуру заземлення та нульової фази тощо).

Стабілізатор фаз за будовою – електромагнітний пристрій, що містить один або декілька однофазних магнітопроводів або ж один багатострижневий магнітопровід та обмотки, які розташовані на вказаних магнітопроводах і з'єднані між собою у трипроменеву зірку або багатокутник, або ж в їхній комбінації, причому затискачі СФ приєднані до виводів обмоток, потенціали яких роз-

ташовані на годографі, що є копією годографу фаз багатофазного кола, наприклад, електричної мережі. Обмотки СФ виконані з «тісним» електромагнітним зв'язком, при якому виконується принцип рівності намагнічуючих та розмагнічуючих ампер-витків робочих струмів (на відміну від струмів намагнічування) та принцип взаємної компенсації радіальних та осьових складових магнітних полів розсіювання, а фази СФ мають обмежену на одиницю кількість ступенів свобод, наприклад, три. Іноді у вигляді СФ може виступати його частина, яка не є самостійним пристроєм; ця частина включена, наприклад, у коло приймача, трансформатора або двигуна.

Стабілізатори фаз використовуються як джерело гарантованого живлення: у разі зникнення напруги в одній або декількох фазах мережі СФ параметрично і миттєво створює страхову (резервну) фазу, напруга якої приблизно дорівнює напрузі зниклої фази мережі; фазний кут напруги страхової фази приблизно дорівнює фазному куту напруги зниклої фази; а потужність зниклої фази передається із діючих фаз багатофазного кола за допомогою одного або двох СФ у знеструмлений провід приймального кінця лінії мережі. Цей складний шлях передачі енергії СФ виконують параметрично, тобто без участі персоналу або автоматики. СФ сам параметрично визначає величину потужності, необхідної для підтримання напруги споживача у межах необхідної величини.

Фізичний зміст стабілізатора фаз. Потенціал $U(A)$ фази, наприклад, фази A електричного кола на площині комплексної змінної зображується рухливою точкою (вузлом), яка характеризується чутливістю (рухливістю) $dU(A)/dI(A)$, де $I(A)$ – зовнішній струм (струм навантаження), що зміщує положення потенціалу точки A на величину $\Delta U(A)$; чутливість фази визначається при нечутливих (нерухомих) інших фазах кола (мережі). Під дією зовнішніх несиметричних струмів $I(A), I(B), I(C), \dots, I(0)$ потенціали фаз $A, B, C, \dots, 0$ у проміжному вузлі лінії мережі відхиляються від початкового розташування (на годографі) і можуть зайняти довільні положення.

При приєднанні СФ [4–6] до мережі зміщення потенціалів $\Delta U(i)$ i -тих фаз кола істотно змінюються. Причина в тому, що потенціали кожної однієї фази СФ формуються під сумарною дією напруг та струмів всіх i -тих фаз мережі і розташовуються на годографі, форма якого повторює годограф фаз мережі. Після приєднання СФ до фаз діючої мережі виникає ситуація, коли потенціали фаз мережі і СФ не співпадають. Як наслідок, між фазами мережі та СФ виникає передача (обмін) енергії між фазами СФ та мережею. В результаті цього процесу у слабкі або перевантажені фази мережі передається додаткова потужність, через що якість електричних напруг мережі відновлюється. Те навантаження, яке без СФ прикладалося до однієї фази, при наявності СФ прикладається до системи всіх фаз мережі, об'єднаних СФ. Родовою ознакою властивостей СФ є параметрична стабілізація потенціалів фаз.

Для кращого розуміння суті СФ покладемося на механічний аналог – ободи коліс або обручі бочки, які скріплюють положення шпичь або клепок бочки відповідно, і тим зменшують розповзання шпичь та клепок при ударах. Кожна шпичка колеса без ободу має велику рухливість, спиці при скріпленні їх з ободом набувають значної жорсткості. Аналогічно цьому СФ концентрує розташування фаз у межах годографу при експлуатаційних порушеннях якості напруг кола (мережі) та електропостачання в цілому. Механічним аналогом СФ з нульовою фазою є вісь колеса, обід якого виконує роль СФ.

Властивості стабілізатора фаз. Стабілізатор фаз – це родова назва електротехнічних пристроїв, які характеризуються рядом фундаментальних властивостей:

1. Генерувати напругу принаймні четвертої фази; оскільки кількість ступенів свобод обмежена трьома (або двома при іншій системі відліку, наприклад, в осях $d-q$) незалежними фазами, то кожна наступна, наприклад, четверта, є залежною від трьох попередніх незалежних фаз [5,6];
2. Генерувати симетричні складові напруг прямої, зворотної та нульової послідовностей принаймні у четвертій фазі [5,6].
3. Генерувати або поглинати симетричні складові струмів прямої, зворотної, нульової та вищих послідовностей навантаження принаймні у четвертій фазі [5,6].
4. Перекачувати (передавати) активну та реактивну енергію з одних фаз в інші і навпаки [5,6].
5. Змінювати величину потужності перекачування активної та реактивної енергії у широких межах, у тому числі стабілізувати потужність перекачування енергії або міняти її знак [5].
6. Параметрично перетворювати режими принаймні двох частин багатофазного кола, у одній частині з яких має місце симетричний режим, а у другій частині несиметричний, наприклад, неповнофазний режим і навпаки [4,5].
7. Виконувати параметричне врівноваження режимів частин електричної та/або електромеханічної систем, наприклад, «лінія-двигун», «лінія-трансформатор», «лінія-автотрансформатор» або «лінія-генератор», кожна частина яких працює при симетричному та/або несиметричному режимах [4,5,6].

8. Суміщуватися з електричними машинами змінного струму всіх видів, включно з асинхронізованими синхронними машинами (двигунами та генераторами); при цьому сумарна встановлена потужність зменшується на величину від 30% до 40% [4].

9. Суміщуватися з силовими трансформаторами та автотрансформаторами всіх видів, з шунтовими дроселями, з реакторами; із перетворювачами кількості фаз; із трансформаторними та автотрансформаторними фільтрами вищих гармонік; застереження: при деяких видах суміщення можлива часткова втрата властивостей СФ.

10. Перерозподіляти струми багатофазних кіл та обмежувати надструми силових трансформаторів підстанцій при обривах проводів багатофазних кіл, наприклад, електричних мереж [5,6].

11. Частково обмежувати надструми трансформаторів підстанцій при міжфазних коротких замиканнях та замиканнях на землю багатофазних кіл, наприклад, електричних мереж [5].

12. Зменшувати коефіцієнти несиметрії напруг за нульовою та зворотною послідовністю мереж у випадку обриву одного з лінійних проводів до значень, приписаних державними та міжнародними стандартами [5].

13. Усувати перерви електропостачання при перемиканнях фідерів електричних мереж [6].

14. Усувати перерви електропостачання при регулюваннях напруг електричних мереж.

15. Регулювати величину прохідної потужності мережі способом зміни фазного кута зсуву електрорушійної сили джерела.

16. Взаємно компенсувати магнітні поля у стрижнях СФ при дії імпульсних струмів.

17. Захищати електричну мережу та її приймачі від імпульсних напруг комутаційного та грозового походження.

18. Захищати електричну мережу від дії квазі-постійних струмів геомагнітних бур.

19. Захищати електричну мережу від дії електромагнітного імпульсу (ЕМІ).

20. Виконувати роль резервних синхронізованих та синфазованих джерел гарантованого живлення багатофазних кіл, нормальна робота фаз яких може бути порушена внаслідок передбачених та непередбачених обставин [4,5].

21. Обмежувати фазні напруги мережі до допустимого рівня при фазних коротких замиканнях.

22. Стабілізувати потенціал робочої нульової фази, захисної нульової фази та нульової фази логічного нуля на рівні потенціалу віддаленої та близької (контуру заземлення) до землі при фазних коротких замиканнях.

23. Параметрично змінювати маршрути протікання електричних струмів у багатофазних колах для утворення страхуючих маршрутів, які здатні забезпечити неперервність електропостачання споживача при аваріях, наприклад, при короткому замиканні або обриві одного із проводів лінійних фаз [4,5].

24. Автоматизувати і зробити безпечним процес заміни пошкодженого вузла або компоненту електричної мережі без знеструмлення мережі в цілому [4].

25. Знизити опори прямої, зворотної, нульової та інших послідовностей між фазами стабілізатора фаз принаймні у 1,5–12,0 разів порівняно з аналогічними опорами трансформаторів високовольтних та низьковольтних мереж.

26. Зменшувати відхилення однієї або декількох фазних напруг [4,5].

27. Зменшувати вищі гармоніки струмів та напруг електричного кола, наприклад, третю, п'яту, сьому, а у деяких випадках, – другу, четверту, шосту, восьму тощо.

Цей список не вичерпує основних властивостей СФ і може бути продовженим при потребі. Вказані вище властивості виявлені і підтверджені експериментальними та промисловими зразками СФ потужністю до 630 кВА і вище. Родовою ознакою перерахованих властивостей СФ є стабілізація потенціалів фаз об'єктів електричного кола: неповнофазного режиму живильної мережі; несиметричного режиму; перехідного процесу; коливального процесу; імпульсного процесу тощо.

Місце СФ у класифікації фільтрів струмів нульової послідовності. При розробці СФ виконано порівняння будови, властивостей СФ з його аналогами. Найближчими аналогами до СФ є два класи пристроїв: вимірювальні фільтри струмів нульової послідовності (ВФСНП) та автотрансформаторні фільтри струмів нульової послідовності (АФСНП). Аналогами класу АФСНП є пристрої, які відрізняються лише назвою. Так, синонімами до назви «АФСНП» є назви: «нейтралер», «шунтовий симетруючий пристрій (ШСП)», «перетворювач лінійних напруг у фазні» тощо. Тому порівняння СФ доцільно проводити з класами ВФСНП та АФСНП. В результаті порівняння СФ та ВФСНП спільних ознак не виявлено. Крім того, у класі аналогів АФСНП виявлений парадокс: класичне розуміння «фільтру» як давача сигналу передбачає зворотний вплив виходу фільтру на вхідні характеристики

напруг та струмів; «фільтр» виступає у ролі «генератора»? Отже назва та поняття «фільтр» не співпадає з суттю явищ ні у СФ, ні у АФСНП.

При класифікації СФ встановлено наступне.

1. Відсутність спільних ознак у будові, властивостях та призначенні однофазних, двофазних, чотирифазних, п'ятифазних СФ та АФСНП.

2. Співпадіння властивостей та призначень схем трифазних СФ та АФСНП тільки після переносу властивостей СФ на АФСНП.

3. Часткове співпадіння ознак будови, властивостей та призначень схем шестифазних СФ та АФСНП; так, для АФСНП наявність виводу нульової фази є обов'язковою ознакою, а в СФ – не обов'язковою; частина пристроїв СФ принципово може бути виконана тільки на трансформаторах, на відміну від АФСНП, які виконуються на автотрансформаторах.

4. Відсутність спільних властивостей та призначень трифазних та шестифазних СФ, з одного боку, і трифазних та шестифазних АФСНП, з другого боку. Зокрема, один і той самий трифазний або шестифазний СФ у залежності від режиму роботи може поглинати («фільтрувати») або генерувати струми нульової і інших послідовностей, а АФСНП – тільки поглинати («фільтрувати»), до того ж лише струми нульової послідовності.

5. Однофазні та багатофазні трансформатори АФСНП, застосовані за новими властивостями та призначеннями СФ, переходять у клас СФ. Це означає, що трифазні та шестифазні АФСНП тільки після надання їм нових властивостей можуть бути використані за новим призначенням як СФ [6–10].

Співвідношення між множинами ознак СФ, АФСНП та ВФСНП показані на рис. 1, а, б, в.

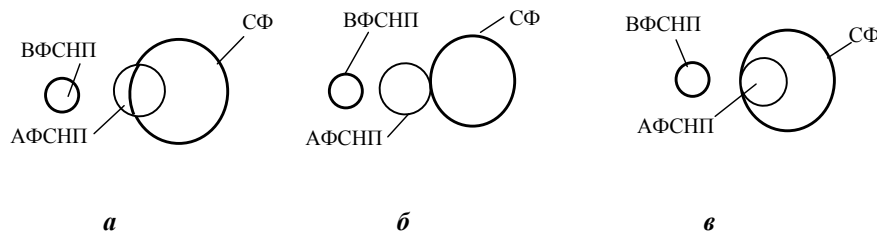


Рис. 1

За будовою множина аналогів СФ перетинається з множиною аналогів АФСНП і не перетинається з множиною аналогів ВФСНП (рис. 1, а). За властивостями множина аналогів СФ є дотичною до множини аналогів АФСНП за умови, якщо

останнім не надані властивості СФ (рис. 1, б). При перенесенні властивостей СФ на АФСНП множина останнім належить множині СФ (рис. 1, в).

Приклади виконання стабілізаторів фаз. СФ можуть бути виконані: у вигляді автотрансформаторного або трансформаторного фільтра струмів нульової послідовності; у вигляді автотрансформаторного або трансформаторного багатополосника, гілки якого є обмотками і ввімкнені у зірку або у багатокутник; з одностріжневим або багатостріжневим магнітопроводом; у вигляді суми однофазних трансформаторів, у вигляді схем, де обмотки ввімкнені у трикутник тощо. Для ілюстрації на рис. 2 показано топографічне зображення шестифазного СФ «сніжинка з нулем». Годографом розташування виводів А, В, С, D, E, F СФ є геометричне коло. Обмотки СФ на А2-В2, В2-С2, С2-Д2, Д2-Е2, Е2-Ф2, Ф2-А2, які на рис. 3 показані потовщеними лініями, між собою ввімкнені за схемою «шестикутник». Зображення СФ виконане на площині комплексної змінної у координатах $+1$ та $+j$, перпендикулярній до площини аркуша. Відрізки А1-А3, В1-В3, С1-С3, Д1-Д3, Е1-Е3, Ф1-Ф3 – частини

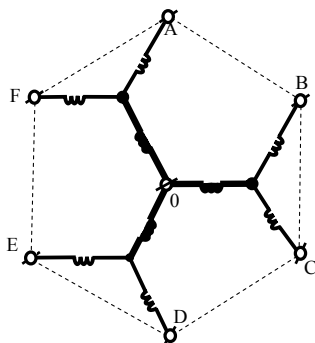


Рис. 2

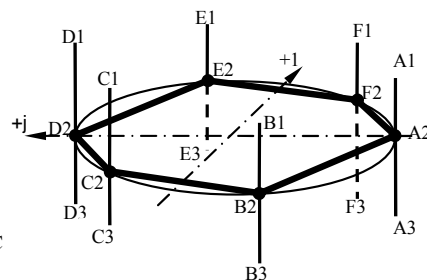


Рис. 3

проводів фаз лінії мережі, розташованих вздовж лінії мережі (вздовж координати простору). При суміщенні тримірного зображення лінії мережі та топографічного зображення СФ створюються сприятливі (комфортні) умови для відтворення та сприйняття читачем складних процесів, які проходять у багатофазній мережі із СФ.

Деякі інші варіанти зображень СФ показані на рис. 4 – рис. 6 та рис. 9. Обмотки СФ утворюють тісні

міжфазні електромагнітні зв'язки, які надають нові властивості СФ.

Перерозподіл струмів у колах із СФ. Розглянемо два випадки приєднання однофазного навантаження з струмом $I_n=1,0$ до фазної напруги $U_\phi=1,0$ живильного трансформатора Тж. У першому випадку СФ відсутній; у другому випадку СФ виконує перерозподіл струмів живильного трансформатора (рис. 4). Струми трансформатора Тж до приєднання СФ позначено як: IA_4, IB_4, IC_4 та IN_4 ; після приєднання СФ струми позначено так: IA_5, IB_5, IC_5 та IN_5 . Стабілізатор фаз перерозподілив струми у фазах трифазної мережі: у фазі *A* струм навантаження IA_4 змінився на IA_5 , при цьому він зменшився з 1,0 до $2/3$; у фазі *B* струм навантаження IB_4 був рівним нулеві і під дією СФ зменшився до IB_5 , що дорівнює $-1/3$; у фазі *C* струм навантаження IC_4 змінився на IC_5 , при цьому цей струм також зменшився з нуля до $-1/3$; у нульовій фазі струм IN_4 збільшився від мінус 1,0 до нуля (рис. 4). Цей перерозподіл

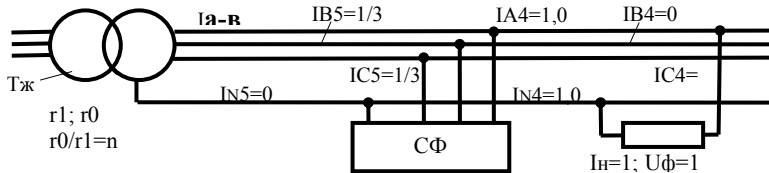


Рис. 4

струмів трансформатора Тж відбувся завдяки перекачуванню енергії потужностей ΔP_B та ΔP_C із фаз *B* та *C* у фазу *A* відповідно [5]

$$\Delta P_B = U_\phi \times (1 + \sqrt{3})/6; \quad (1)$$

$$\Delta P_C = U_\phi \times (1 - \sqrt{3})/6. \quad (2)$$

Такий перерозподіл потужності дав можливість зменшити до нуля модуль струму у нульовій фазі, а величину струму у фазі *A* зменшити на третину.

Другий приклад перерозподілу струмів мережі показаний на рис. 5. Не вдаючись у математичні викладки, відзначимо, що СФ1 при обриві проводу лінійної фази *A7* зменшує на 73% струми у лінійних фазах *B7* та *C7* (перетини *A6, B6, C6* та *A7, B7, C7*), а струм у нульовому проводі із трикратного перетворює у нульовий (*06, 07*), а СФ2 діє навпаки. Такий перерозподіл струмів захищає силові трансформатори від перегорання, тобто СФ локалізує надструми у межах лінії мережі, не допускаючи ці надструми до силових трансформаторів.

Третій приклад перерозподілу струмів мережі показаний на рис. 6.

При обриві проводу лінійної фази шестифазної мережі СФ3 та СФ4 захищають силові трансформатори від перегріву шляхом зменшення струмів трансформатора від 1,05 до 3,4 раз до рівня допустимих струмів (рис. 6, рис. 7). Тому перерозподіл струмів та обмеження надструмів силових трансформаторів є фундаментальною властивістю СФ.

Забезпечення неперервності електропостачання при обривах проводів лінії мережі. Ця властивість діє у трифазних чотирипровідних мережах та інших багатофазних мережах з кількістю фаз, більшою за три. На рис. 5, як приклад, показана лінія мережі, до входу *A6, B6, C6, 06* та виходу *A8, B8, C8, 08* якої приєднані стабілізатори фаз СФ1 та СФ2 відповідно [4,6,9]. За відсутності стабілізаторів фаз СФ1 та СФ2 при обриві проводу однієї з фаз лінії мережі настає перерва електропостачання з наступним тривалим повним відключення лінії. Але при приєднанні СФ1 та СФ2 такої перерви електропостачання не відбувається: мережа продовжує виконувати свої функції.

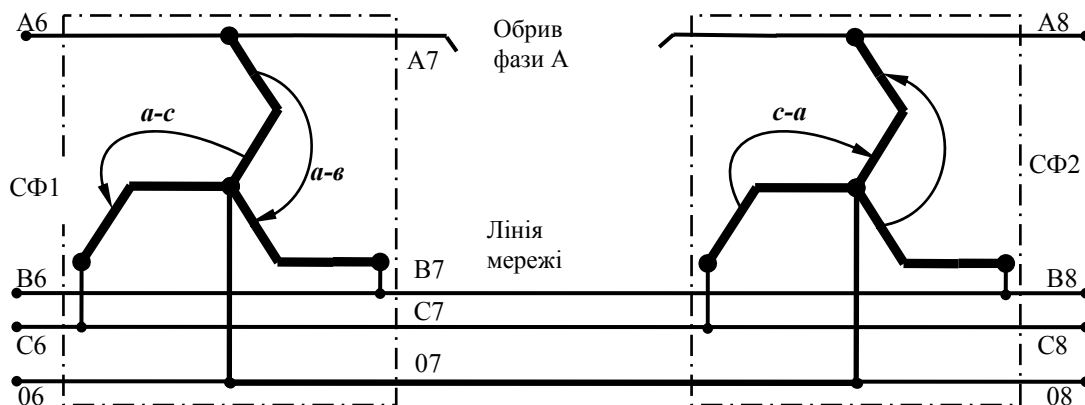


Рис. 5

На вході і на виході лінії мережі підтримується практично симетрична система напруг та струмів. Підвищення надійності електропостачання досягнуте таким чином. Після обриву однієї з фаз

лінії мережі, наприклад, фази *A* стабілізатор фаз СФ1 перетворює трифазну симетричну систему напруг та струмів на двофазну несиметричну систему напруг з фазними напругами

$$U(A7) = 0; U(B7) = U_{\phi} * e^{-j120^{\circ}}; U(C7) = U_{\phi} * e^{+j120^{\circ}} \quad (3)$$

та на двофазну систему з лінійними струмами

$$I(A7) = 0; I(B7) = \sqrt{3} * I_N * e^{-j150^{\circ}}; I(C7) = \sqrt{3} * I_N * e^{+j150^{\circ}}; I(O7) = 3 * I_N * e^{j0^{\circ}}, \quad (4)$$

де U_{ϕ} – модуль фазної напруги у симетричних системах напруг та струмів входу 6 СФ1 та виходу 8 СФ2, а також входу 7 та виходу несиметричної системи напруг та струмів; I_N – струм у лінійній фазі навантаження. Ці двофазні несиметричні системи напруг та струмів передаються вздовж лінії з обірваною фазою і доходять до другого стабілізатора фаз СФ2, який перетворює їх у симетричні системи напруг та струмів на виході лінії А8, В8, С8, О8. Це означає, що на вході А6, В6, С6, О6 та виході А8, В8, С8, О8 мають місце приблизно однакові симетричні системи напруг та струмів і цим досягнена неперервність електропостачання. У даний час обрив лінії призводить до перерви електроживлення, а при застосуванні СФ – ні. Підвищення надійності електропостачання досягається тим, що СФ перетворює трифазну систему напруг у двофазну і тим обминає місце обриву, а СФ2 відновлює трифазну систему. Застосування СФ призводить до заміни поняття «аварія при обриві проводу» на поняття «робочий режим при обриві проводу». При цьому виникають такі додаткові сприятливі режими:

- переключення лінії мережі від роботи трьома фазами до роботи двома фазами виконується параметрично і миттєво, оскільки робоче джерело замінюється (страхується) постійно працюючим паралельно ввімкненим резервним джерелом;
- при супутніх переключеннях не виникає погіршення якості електричної енергії;
- струми у електропередачі до лінії мережі і після лінії практично не змінюються за величиною та фазою, що не призводить до перегріву силових трансформаторів підстанцій, а також не спричинює перехідних, у тому числі високочастотних перехідних процесів;
- виникає можливість відстроченого ремонту лінії без перерви живлення;
- ввід у дію відновленого проводу фази відбувається без перехідних процесів.

Другий приклад підвищення надійності та живучості електропередачі показаний на рис. 6, де зображена схема шестипровідної мережі, яка застосована для підвищення живучості роботи системи електропостачання при обриві фази. Ця схема забезпечує неперервність електропостачання при обриві одного, двох або трьох проводів шестипровідної шестифазної лінії. Така лінія практично зберігає пропускну здатність за потужністю з точністю до 1–2%. Схема мережі рис. 6 містить: стабілізатори фаз СФ3 та СФ4 у шестифазному виконанні, шестифазну лінію мережі А9, В9, С9, D9, E9, F9 – А10, В10, С10, D10, E10, F10; силові трансформатори Тж1–Тж4 дволанцюгової мережі з трифазними лініями Л-1 та Л-2. Умовою роботи такої лінії є зміна груп з'єднання первинних або вторинних обмоток Тж3 та Тж4 на 6 одиниць. Так, якщо Тж1 та Тж2 мають нульову групу, то Тж3 та Тж4 мусять мати шосту групу з'єднань обмоток трансформатора. При обриві проводу лінійної фази *A* шестифазна симетрична система напруги перетворюється у неповнофазну систему напруг, яка передається по лінії від СФ3 до СФ4, а СФ4 перетворює неповнофазну систему у симетричну шестифазну систему напруг, яка через трансформатори Тж2 та Тж4 неперервно живить споживачі попри обрив у лінії. Якщо б обрив проводу стався у незв'язаній дволанцюговій мережі, тобто при нез'єднаних лініях Л-1 та Л-2 та без СФ3 та СФ4, то прохідна потужність знизилася б на 50%. Але у зв'язаній дволанцюговій мережі (рис. 6) при обриві однієї фази прохідна потужність дорівнює 98%–99%. Оцінку кратності зменшення струму лінійної фази лінії мережі проводимо за допомогою коефіцієнту відводу струму $K_{\text{від}}(i, \text{Нобр})$ від трансформаторів

$$K_{\text{від}}(i, \text{Нобр}) = I_{\text{л}}(i, \text{Нобр}) / I_{\text{тр}}(i, \text{Нобр}), \quad (5)$$

де i – порядковий номер фази (*A, B, C, D, E, F*); Нобр – кількість обірваних фаз мережі ($\text{Нобр} (1, 2, 3)$).

На рис. 7 показана залежність кратності зменшення струму лінійної фази лінії мережі порівняно з струмом виходу та входу мережі. Одержані кратності зменшення струму фази лінії є достатніми для

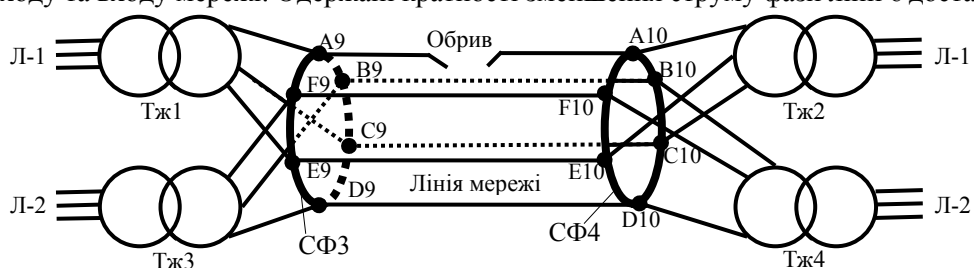


Рис. 6

захисту трансформаторів від надструмів, які виникають при обривах фаз. У даному разі СФ відновлюють не тільки якість напруг, а й пропускну здатність лінії.

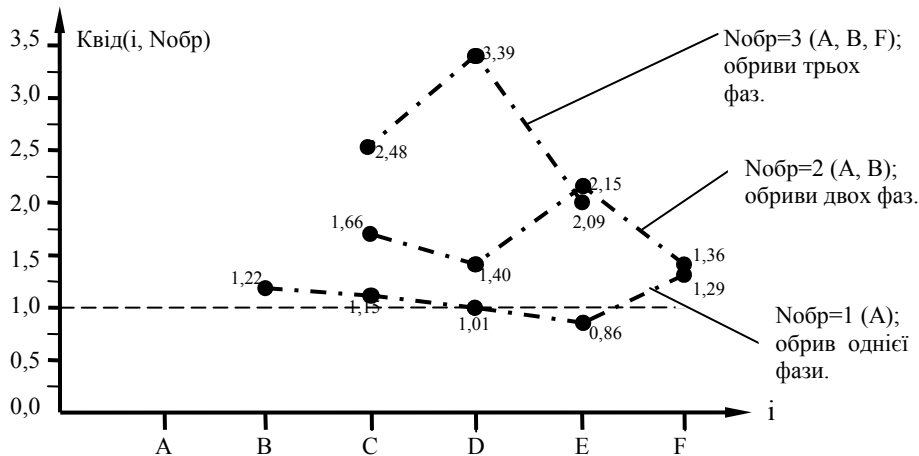


Рис. 7

При виникненні міжфазних коротких замикань або фазних замикань на землю відключається пара фаз або одна фаза на обох підстанціях за допомогою швидкодіючих однополюсних вимикачів, що переводить дволанцюгову лінію у неповнофазний режим, коли, як ми переконались, не настає перерва живлення споживачів. У кожному випадку обриву однієї або декількох фаз виникає втрата напруги та несиметрія напруг за зворотною послідовністю. На рис. 8 показана залежність коефіцієнту несиметрії напруг за зворотною послідовністю K_{2u} від потужності S навантаження шестифазної лінії виходу підстанції при проектному падінні напруги $\Delta U_{л} = 5\%$ у лінії у випадку обриву одного з проводів лінії. Коефіцієнт K_{2u} залежить від довжини лінії, тобто від падіння напруг у лінії $\Delta U_{л}$. Із рис. 8 видно, що застосування СФ3 та СФ4 дають можливість до 40% знижувати коефіцієнт несиметрії за зворотною послідовністю K_{2u} . Для зменшення удвічі K_{2u} та втрат напруги при обриві проводу лінії мережі між СФ3 та СФ4 до середини лінії приєднують додатковий СФ.

Отже облаштування ліній мережі стабілізаторами фаз дає можливість досягти неперервності електропостачання і тим, істотно, у десятки і більше разів, підвищити надійність електропостачання при аваріях.

Однофазний стабілізатор для симетричних двигунів, які живляться від неповнофазної трифазної системи. Як зазначалося вище, іноді у вигляді СФ може виступати його частина, яка включена у коло приймача, трансформатора або двигуна. Розглянемо приклад такого застосування СФ.

Відомі трипровідні лінії передачі, де один з трьох проводів виконує роль нульової фази, а два інші проводи – лінійної фази. Недоліком двофазної симетричної системи є необхідність узгодження ємності конденсаторних батарей та індуктивності дроселів із величиною та фазним кутом струмів трифазного двигуна. Таке узгодження викликає ряд труднощів. Найбільша трудність – автоматичне регулювання ємності конденсаторної батареї та індуктивності дроселя. Для усунення проблем з регулюванням конденсаторної батареї та дроселя запропоновано замінити трипровідну симетричну систему напруг на трипровідну несиметричну систему напруг з фазним кутом між напругами $2\pi/3$. При такій системі напруг можна досягти параметричного регулювання врівноваженості потужності двигуна та створити непульсуюче кругове магнітне поле у проміжку між статором та ротором.

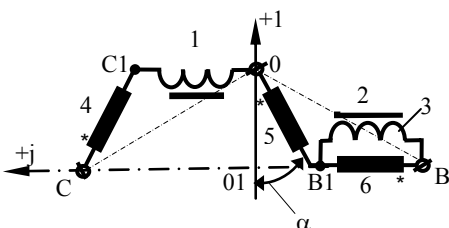


Рис. 9

Для досягнення цього ефекту необхідно облаштувати трифазний симетричний двигун змінного струму частиною стабілізатора фаз, вбудованою у двигун і виконаною у вигляді однофазного трансформатора з двома однаковими обмотками. Топографічне зображення одного з чотирьох варіантів виконання такого приводу «Ківш», який складається із двигуна та однофазного трансформатора, показано на рис. 9.

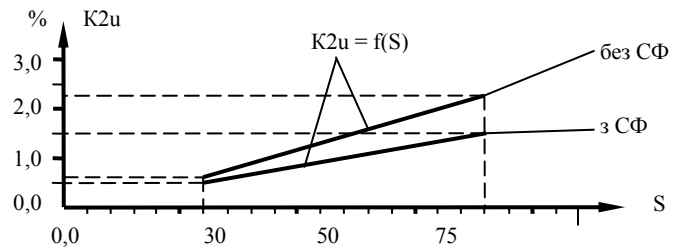


Рис. 8

Аналіз топографічного зображення (рис. 9) виводить нас до створення чотирьох приводів, три з яких дістали назви «Ківш», «Горб» та «Гора» відповідно до виду їхнього топографічного зображення. Принципова схема приводу «Ківш» показана на рис. 10. Двигун містить три обмотки 4, 5 та 6 статора. Однофазний трансформатор містить магнітопровід 2 і обмотки 1 та 3. Однофазний СФ підтримує симетричну систему напруг двигуна при довільній величині та фазному куті струму навантаження, а також забезпечує параметричне врівноваження за потужністю двигуна і мережі. Теоретичне доведення ґрунтується на теоремі:

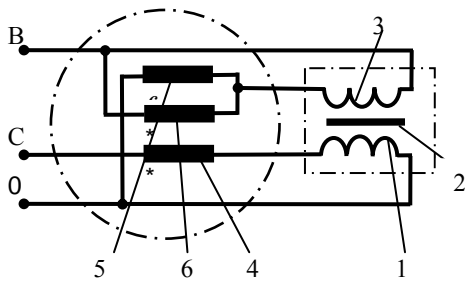


Рис. 10

«Якщо три опори навантаження, наприклад, фаз двигуна рівні за величиною та фазним кутом, а двигун, однофазний трансформатор та затискачі неповнофазної трифазної системи напруг ввімкнені між собою за схемою рис. 9, то система напруг на елементах навантаження, наприклад, на обмотках двигуна є завжди симетричною, тобто не містить симетричних складових зворотної та

нульової послідовностей». Дано:

$$U(0 - B) = U\phi * e^{j240^\circ}, \quad U(0 - C) = U\phi * e^{j120^\circ}. \quad (6)$$

Довести, що

$$|C - C1| = |0 - B1| = |B - B1|, \quad (7)$$

$$\text{де: } |C - C1| = U(|C - C1|); \quad |0 - B1| = U(|0 - B1|); \quad |B - B1| = U(|B - B1|) \quad (8)$$

за умови, що відрізки зображення, наприклад, $|C - C1|$ пропорційні величині напруги, наприклад, $U(|C - C1|)$ на них.

Доведення. Сума струмів у вузлі B1 дорівнює нулю, звідки

$$I(5) + I(6) = -I(3) = +I(1) = -I(4), \quad (9)$$

або

$$I(4) + I(5) + I(6) = 0. \quad (10)$$

Струми в фазах двигуна 4, 5 та 6, які мають однакові опори, пропорційні напругам, тобто

$$I_d = U_d / Z_d. \quad (11)$$

Пропорція (11) дає можливість замінити рівність струмів (10) на рівність напруг, пропорційних струмам. При цьому враховуємо, що напруги на обмотках 1 та 2 частини СФ однакові, оскільки ці обмотки мають однакову кількість витків. Визначимо струми в елементах 4, 5, 6.

$$I(5) = U\phi * e^{j\alpha} * (1 / (2 * Z_d * \cos\alpha)); \quad (12)$$

$$I(4) = U\phi * e^{j(180^\circ - \alpha)} * (1 / (2 * Z_d * \cos\alpha)); \quad (13)$$

$$I(6) = U\phi * e^{-j90^\circ} * (1 / (2 * Z_d * \cos\alpha)) * (\sqrt{3} * \cos\alpha - \sin\alpha). \quad (14)$$

Після підстановки (12)–(14) в (7) маємо рівняння (15)

$$3 * \sin\alpha - \sqrt{3} * \cos\alpha = 0. \quad (15)$$

Розв'язок (15) дає одне найменше значення α , а саме

$$\alpha = \pi/6. \quad (16)$$

Якщо $\alpha = \pi/6$, то трикутник 0-B-B1 – рівнобедрений з рівними кутами 0 та B при основі. У такому трикутнику

$$|0 - B1| = |B - B1|. \quad (17)$$

Фігура C-C1-0-B1 є рівнобедреною трапецією, у якій $|C - C1| = |0 - B1|$. (18)

У сукупності (17) та (18) підтверджують справедливість (7), що і треба було довести.

Струми у фазах двигуна дорівнюють

$$I(5) = U\phi * e^{j(30^\circ - \varphi_d)} / (\sqrt{3} * Z_d), \quad (19)$$

$$I(6) = U\phi * e^{j(-90^\circ - \varphi_d)} / (\sqrt{3} * Z_d); \quad (20)$$

$$I(4) = U\phi * e^{j(150^\circ - \varphi_d)} / (\sqrt{3} * Z_d), \quad (21)$$

де $\varphi_d = \arg(Z_d)$.

У процесі експлуатації симетрія напруг двигуна не залежить від величини навантаження двигуна або фазного кута його струмів, оскільки Z_d та φ_d входять у (19) – (21) як коефіцієнти.

Експериментальні випробування підтвердили справедливість теореми і симетрію напруг статорних обмоток двигуна, з'єднаних з трансформатором та мережею за схемою «Ківш» (рис. 10), при довільному навантаженні двигуна. Пускові характеристики двигуна не відрізняються від пуску двигуна при живленні від трифазної симетричної системи напруг.

Якщо уважно поглянути на топографічне зображення рис. 9, можна помітити схожість зображення з накресленням фільтрів струмів нульової послідовності, виконаних за схемами зиг-заг та лямбда. Отже частина СФ, вставлена у коло двигуна, є третиною одного з фільтрів струмів нульової послідовності. Аналогічним чином були використані дві третини СФ як для синтезу, так і для аналізу властивостей електричних кіл.

Система «дві фази – нуль» за допомогою частини або повної схеми фільтру струмів нульової послідовності може бути перетворена у симетричну трифазну систему. Зиг-заг містить шість обмоток, які можуть бути розташовані по дві на трьох окремих однофазних трансформаторах з однаковими обмотками. У даному разі ефект перетворення системи «дві фази – нуль» у симетричну трифазну систему одержано за допомогою частини одного однофазного трансформатора, тобто шляхом використання третини стабілізатора фаз. Перетворення «дві фази – нуль» у симетричну систему може бути виконане без СФ, наприклад, за допомогою двох гілок L та C елементів, але при цьому необхідно вводити електронне слідування за параметрами навантаження і регулювати L та C.

Висновки.

1. Запропоновано стабілізатор потенціалів фаз у багатофазних колах, скорочено названий стабілізатором фаз (СФ), аналогом якого є пристрій гарантованого живлення. Стабілізатор фаз виконано на основі автотрансформаторів та трансформаторів, які мають тісний електромагнітний зв'язок між фазами для перекачки енергії між фазами. СФ – параметричний пристрій. Фізична сутність СФ – посилення зв'язку між фазами електричної мережі аналогічно до дії ободу, бандажу або колеса, які зв'язують між собою фази багатофазного кола.

2. Стабілізатор фаз здійснює параметричне перекачування електричної енергії між фазами багатофазних електричних кіл, що збагачує його численними властивостями, дякуючи яким він знайшов застосування при перемиканні фідерів, у регулюванні та стабілізації напруг трифазної мережі, у захисті трифазних мереж від високовольтних, у тому числі грозових імпульсів напруг, у створенні нових засобів генерування, передачі та електромеханічного перетворення енергії.

3. Стабілізатор фаз дозволив створити ряд методів та засобів принципово неперервного електропостачання споживачів при обриві частини проводів лінії мережі або їхньому короткому замиканні. СФ дає можливість відстроченого ремонту лінії мережі для відновлення фаз лінії, а також для вводу відновленої лінії мережі у дію без перехідних процесів. Ці методи та засоби розроблені паралельно до програми Smart Grid, не дублюють відомі методики та технологічні засоби, стосуються різних областей підвищення надійності електропередач, але мають спільну кінцеву мету – підвищення надійності електропостачання.

1. *Воропай Н.И.* Интеллектуальные электроэнергетические системы: концепция, состояние, перспективы // Автоматизация и ИТ в энергетике. – 2011. – № 3 (20). (www.transform.ru).
2. *Ефимов Е.Н., Тимашиова Л.В., Ясинская Н.В., Батяев С.Ю.* Оценка повреждаемости воздушных линий электропередачи напряжением 110 кВ-750 кВ в 1997-2007 гг. в России // Четвертая Российская научно-практическая конференция с международным участием. ЛЭП 2010. Линии передачи. – Новосибирск, 2010.
3. *Музиченко О.Д.* Основи топографічного методу дослідження електричних кіл (Топографічне зображення та його застосування) / Препрінт-168 ІЕД АН УССР. – Київ, 1978. – 47 с.
4. *Музиченко О.Д., Музиченко Ю.О.* Застосування фільтру струмів нульової послідовності як параметричного перетворювача параметрично врівноважених режимів багатофазних, наприклад, трифазних напруг та струмів / Патент України на винахід № 97162. МПК G05F 1/26. Опубліковано 10.01.2012, Бюл. №1.
5. *Музиченко Ю.О., Музиченко О.Д.* Засіб електропостачання відповідальних приймачів електричної енергії / Патент України № 98683. МПК H02P 1/24. Опубліковано 11.06.2012. Бюл. №11.
6. *Музиченко Ю.О., Музиченко О.Д.* Застосування потужного автотрансформаторного або трансформаторного фільтру струмів нульової послідовності як стабілізатора потенціалів лінійних та/або нульової фаз / Патент України на винахід № 101763, МПК H02J 3/26. Опубліковано 25.04.2013 Бюл. № 8.
7. *Стогній Б.С., Кириленко О.В., Денисюк С.П.* Интеллектуальні електричні мережі електроенергетичних систем та їхнє технологічне забезпечення // Технічна електродинаміка. – 2010. – №6. – С. 44-50.
8. *Kelly J., Rose G.R., Nechas R.* Illinois Electricity System. Guiding principles and policy framework // Galvin electricity initiative. – 2010. – July 15.
9. *Menke W.W., Croft F.B., Nay J.J.* Power distribution transformer for non-linear loads / Patent US No 5416458, H02F 33/00. 16.05.1995.
10. *Yeager K.* Powering the Digital Age. NAE Website. National academy engineering 2003.

УДК: 621.314; 621.311; 621.313

СТАБИЛИЗАТОР ФАЗ И ЕГО СВОЙСТВА

А.Д.Музыченко¹, докт.техн.наук., Ю.А.Музыченко²

¹ – ул. Независимости, 64, с. Литки, Броварской район, Киевская область, 07411, Украина,

² – ТОВ «Сетевые технологии»,

а/я 132, пр-т. Курчатова, 2, Нетишин, Хмельницькая обл.

e-mail: nettech@ukr.net

Для увеличения живучести электрических сетей предложено использовать стабилизатор фаз. Описано электромагнитное устройство, разработанное на основе выявления и исследования новых свойств фильтра токов нулевой последовательности. Устройство названо стабилизатором потенциалов фаз (сокращенно – стабилизатор фаз) и предназначено для устранения эксплуатационных нарушений качества электроснабжения (многофазные электрические цепи, сети и машины переменного тока). Дано определение понятия «Стабилизатор фаз». Установлено, что треть или две трети фильтра токов нулевой последовательности проявляют свойства стабилизатора фаз. Библи. 10, рис. 10.

Ключевые слова: стабилизатор фаз, фильтр токов нулевой последовательности, стабилизация потенциалов, качество электрической энергии, сеть, двигатель, перенос энергии между фазами, совмещение, обрыв фазы, надежность, живучесть.

PHASE STABILIZER AND ITS PROPERTIES

O.D.Muzychenko¹, Yu.O.Muzychenko²

¹ – Nezalezhnosti, 64, Litky, Brovarskyi raion, Kyivska oblast, 07411, Ukraine,

² – TOV «Merezhevi tekhnologii»,

p/o 132, Kurchatova str., 2, Netyshyn, Khmelnytskyi region, Ukraine,

e-mail: nettech@ukr.net

To increase the survivability of electric networks is proposed to use a stabilizer phases. Describes the electromagnetic device developed based on the identification and investigation of new properties of the filter zero sequence currents. The device is called a stabilizer potentials of the phases (abbreviated - stabilizer phase) and is designed to address the operational power quality disturbances (multiphase circuits, network and machine ac). A definition of the term "stabilization phase." Found that one-third or two-thirds of the filter zero sequence currents exhibit properties stabilizer phases. References 10, figures 10.

Key words: stabilizer phase, filter zero sequence currents, the stabilization potential, quality of electric power supply, motor, energy transfer between phases, combining, phase, reliability, survivability.

1. Voropai N.I. Intelligent power systems: concept, status, prospects // Avtomatizatsiia i IT v enerhetike. – 2011. – № 3 (20), (Rus) (www.transform.ru).
2. Efimov E.N., Timashova L.V., Yasinskaia N.V., Batiaev S.Yu. Evaluation of damage to overhead power lines 110 kV–750 kV in 1997–2007 in Russia // Fourth Russian scientific-practical. Conf. with international participation. LEP 2010. Transmission line. – Novosibirsk, 2010. (Rus)
3. Muzychenko O.D. Fundamentals of topographic research method circuits (topographic image and its application) / Preprint-168 IED USSR Akademii Nauk. – Kyiv, 1978. – 47 p. (Ukr)
4. Muzychenko O.D., Muzychenko Yu.A. Apply filter zero sequence currents as parametric transducer parametric multiphase even-tempered regimes, such as three-phase voltages and currents / Patent Ukrainy № 97162. IPC G05F 1/26. Published 10.01.2012. – Bull. № 1. (Ukr)
5. Muzychenko Yu.O., Muzychenko O.D. Medium power responsible receivers electricity. / Patent Ukrainy № 98683. IPC N02R 1/24, published 11/06/2012. – Bull. № 11. (Ukr)
6. Muzychenko Yu.O., Muzychenko O.D. Application autotransformer powerful filter or transformer zero sequence currents as stabilizer potentials of linear and/or zero phases / Patent Ukrainy № 101763. IPC N02J 3/26, published 25/04/2013. – Bull. № 8. (Ukr)
7. Stognii B.S., Kyrylenko O.V., Denysiuk S.P. Smart grids, power systems and their technological support. // Tekhnichna elektrodynamika. – 2010. – № 6. – Pp. 44-50. (Ukr)
8. Kelly J., Rose G.R., Nechas R. Illinois Electricity System. Guiding principles and policy framework // Galvin electricity initiative. – 2010, July 15.
9. Menke W.W., Croft F.B., Nay J.J. Power distribution transformer for non-linear loads / Patent US No 5416458, H02F 33/00. 16.05.1995.
10. Yeager K. Powering the Digital Age. NAE Website. National academy engineering, 2003.

Надійшла 08.01.2013

Остаточний варіант 03.07.2013