



УКРАЇНА

(19) UA (11) 97162 (13) C2

(51) МПК

H02J 3/26 (2006.01)

G05F 1/26 (2006.01)

G05F 1/14 (2006.01)

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ
УКРАЇНИ

ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВІНАХІД

(54) ЗАСТОСУВАННЯ ФІЛЬТРА СТРУМІВ НУЛЬОВОЇ ПОСЛІДОВНОСТІ ОСНОВНОЇ ТА ВИЩИХ ГАРМОНІК ЯК ПЕРЕТВОРЮВАЧА ПАРАМЕТРИЧНО ВРІВНОВАЖЕНИХ РЕЖИМІВ БАГАТОФАЗНИХ, НАПРЯКЛАД ТРИФАЗНИХ, НАПРУГ ТА СТРУМІВ

1

2

(21) а201001970

(22) 23.02.2010

(24) 10.01.2012

(46) 10.01.2012, Бюл.№ 1, 2012 р.

(72) МУЗИЧЕНКО ОЛЕКСАНДР ДМИТРОВИЧ, МУ-

ЗИЧЕНКО ЮРІЙ ОЛЕКСАНДРОВИЧ

(73) МУЗИЧЕНКО ОЛЕКСАНДР ДМИТРОВИЧ, МУ-

ЗИЧЕНКО ЮРІЙ ОЛЕКСАНДРОВИЧ

(56) US 4419619; 06.12.1983

US 4745352; 17.05.1988

US 4791348; 13.12.1998

US 5883503; 16.03.1999

US 6762594 B1; 13.07.2004

UA 44489 A; 05.02.2002

UA 82728 C2; 12.05.2008

RU 2303323 C1; 20.07.2007

SU 1001276; 28.02.1983

SU 805463; 15.02.1981

(57) 1. Застосування фільтра струмів нульової послідовності основної та вищих гармонік як параметричного перетворювача врівноважених режимів багатофазної, наприклад трифазної, системи напруг та струмів.

2. Застосування за п. 1, при якому вказаний фільтр застосовано для прямого перетворення параметрично врівноважених режимів, а саме для перетворення симетричної врівноваженої системи напруг та струмів у несиметричну врівноважену трифазну систему напруг та струмів, наприклад, з системою напруг "дві фази - нуль", вектори якої утворюють рівнобедрений трикутник з кутом при вершині $2\pi/3(120^\circ)$.

3. Застосування за п. 1, при якому вказаний фільтр застосовано для зворотного перетворення параметрично врівноважених режимів, а саме для перетворення несиметричної врівноваженої системи напруг та струмів, наприклад, з системою напруг "дві фази - нуль", вектори якої утворюють рівнобедрений трикутник з кутом при вершині $2\pi/3(120^\circ)$, у врівноважену симетричну трифазну систему напруг та струмів.

4. Застосування за п. 1, при якому вказаний фільтр застосовано у режимі переходу до параметричної генерації самовільно виникаючих напруги та струму в обірваному проводі багатофазної, наприклад трифазної, чотирипровідної системи.

5. Застосування за п. 1 або 3, при якому вказаний фільтр застосовано для зворотного перетворення параметрично врівноважених режимів при стабілізації напруг симетричного або несиметричного приймача електроенергії, а саме у процесі перемикання виводів автотрансформатора або трансформаторів багатофазної мережі.

6. Застосування за п. 1, при якому вказаний фільтр застосовано у системі, де перший такий фільтр слугує для зворотного перетворення параметрично врівноважених режимів при стабілізації напруг симетричного або несиметричного приймача електроенергії, а другий такий фільтр струмів нульової послідовності слугує для прямого перетворення параметрично врівноважених режимів при стабілізації напруг симетричного або несиметричного приймача електроенергії, а саме у процесі перемикання виводів автотрансформаторів або трансформаторів багатофазної мережі.

Застосування фільтра струмів нульової послідовності як параметричного перетворювача несиметричного режиму багатофазної системи та система для стабілізації напруг трифазної чотирипровідної мережі належать до електроенергетики та електротехніки. Параметричний перетворювач та система для стабілізації напруг призначені для зменшення провалів та посадок напруги

в проводах та трансформаторах розподільчої мережі, для зменшення втрат енергії та нагріву в трансформаторах, для заощадження електричної енергії і для підвищення надійності роботи та живучості мереж, наприклад, при обриві одного з проводів. Причинами вказаного обриву можуть бути: ожеледь, повалені дерева, ненадійне кріп-

(19) UA (11) 97162 (13) C2

лення, вібрація проводів, бурі, механічні пошкодження тощо.

За першим незалежним пунктом формули винаходу відоме застосування індуктивно-ємнісного перетворювача та перетворювача кількості фаз як параметричного перетворювача однофазного струму у трифазний для генерації струму та напруги у третій штучній фазі трифазного приймача [1-3]. Ці перетворювачі містять конденсатори, котушки індуктивності, напівпровідникові елементи та засоби керування. Недолік перетворювачів: зниження крутизни вольт-амперної характеристики на виході штучної фази; відсутність параметричного (зовні некерованого) виникнення генерації напруги у штучній фазі.

Найближчим аналогом (прототипом) до застосування фільтра струмів нульової послідовності як параметричного перетворювача несиметричного режиму багатофазної системи є відоме застосування трифазної машини змінного струму, наприклад, синхронного або асинхронного двигуна, приєднаного паралельно до затискачів трифазного приймача та до трифазної мережі, для параметричної генерації напруги та струму в обірваному проводі [4]. Відомо, що при обриві однієї з фаз працюючого трифазного двигуна на обірваній його фазі виникає напруга, яка за величиною близька до тієї напруги фази, яку вона мала перед обривом. При цьому застосуванні генерація напруги у штучній фазі виникає параметрично, причому вона виникає самовільно і у тій фазі, провід якої обірвано. Недолік параметричного перетворення прототипу: збільшення крутизни вольт-амперної характеристики на виході штучно утвореної фази; виникнення струмів зворотної послідовності, які викликають додаткові втрати енергії та додаткове нагрівання двигуна, низький коефіцієнт корисної дії вказаного двигуна у цьому режимі.

У зв'язку із вказаними недоліками була поставлена задача: зменшити крутизну вольт-амперної характеристики на виході штучної фази, зменшити додаткові втрати енергії, а також зменшити додаткове нагрівання живильного трансформатора при параметричному перетворенні багатофазної врівноваженої системи напруг та струмів.

Поставлена задача розв'язана шляхом застосування фільтра струмів нульової послідовності основної та вищих гармонік як параметричного врівноваженого перетворювача несиметричного режиму багатофазної, наприклад трифазної, системи напруг та струмів.

Вказаний фільтр застосовано для прямого перетворення несиметричного режиму, а саме, для перетворення симетричної врівноваженої системи напруг та струмів у несиметричну врівноважену трифазну систему напруг та струмів, наприклад, з системою напруг «дві фази - нуль», вектори якої утворюють рівнобедрений трикутник з кутом при вершині $2\pi/3$ (120°).

Вказаний фільтр застосовано також для зворотного перетворення несиметричного режиму, а саме для перетворення несиметричної врівноваженої системи напруг та струмів, наприклад, з системою напруг «дві фази - нуль», вектори якої утворюють рівнобедрений трикутник з кутом при

вершині $2\pi/3$ (120°), у врівноважену симетричну трифазну систему напруг та струмів.

Вказаний фільтр застосовано у режимі параметричного генератора самовільно виникаючих напруги та струму в обірваному проводі багатофазної, наприклад, трифазної чотирипровідної системи.

У фільтрі кожен провідник або група провідників однієї обмотки оточені провідниками або групами провідників другої обмотки.

Обмотки вказаного фільтра ввімкнені за схемою зигзаг.

Обмотки вказаного фільтра ввімкнені за схемою лямбда.

Обмотки вказаного фільтра ввімкнені за схемою Скотта.

Обмотки вказаного фільтра ввімкнені за А-подібною схемою.

Фільтр виконаний на двох стрижнях тристрижневого магнітопроводу, причому на першому крайньому стрижні розміщені обмотки однофазного двообмоткового трансформатора, а на другому крайньому стрижні розміщені обмотки однофазного двообмоткового автотрансформатора, при цьому обмотки вказаних трансформатора та автотрансформатора мають однакову кількість витків.

Фільтр виконаний на трьох стрижнях тристрижневого магнітопроводу, на кожному стрижні якого розміщені перша та друга не зв'язані гальванічно обмотки, кількості витків яких відносяться як 3:1, причому перші обмотки ввімкнені між собою у зірку, промені якої приєднані до затискачів лінійних фаз, а другі обмотки ввімкнені між собою у відкритий трикутник, перший вивід якого приєднаний до спільної точки зірки, а другий вивід приєднаний до затискача нульової фази.

Як фільтр використаний автотрансформаторний або трансформаторний перетворювач кількості фаз, наприклад, трьох в дев'ять, причому перетворювач кількості фаз облаштований штучною нульовою фазою, наприклад, за допомогою трьох додаткових обмоток.

Фільтр утворений паралельним або послідовним суміщенням двох фільтрів струмів нульової послідовності, кожен з яких виконаний за пп. 6-12.

Для кращого розуміння суті винаходу за першим незалежним пунктом формули винаходу розглянемо креслення, подані на фіг. 1 - фіг. 4.

На фіг. 1 показана принципова схема прямого та зворотного параметричного перетворювача несиметричного режиму за відсутності обриву одного з проводів.

На фіг. 2 подана принципова схема прямого та зворотного параметричного перетворювача несиметричного режиму за наявності обриву проводу однієї фази.

На фіг. 3, а та б, подані топографічні зображення напруг та струмів входу та виходу фільтра струмів нульової послідовності при прямому параметричному перетворенні несиметричного режиму.

На фіг. 4, а та б, представлені топографічні зображення напруг та струмів входу та виходу фільтра струмів нульової послідовності при зворотно-

тному параметричному перетворенні несиметричного режиму.

На фіг. 1, а, позначено: А, В, С, 0 - виводи фільтра струмів нульової послідовності; А1, В1, С1, 01 - вхідні затискачі лінійних та нульової фаз відповідно першого параметричного перетворювача; А2, В2, С2, 02 - вихідні затискачі лінійних та нульової фаз відповідно другого параметричного перетворювача; А3, В3, С3, 03 - вихідні затискачі лінійних та нульової фаз відповідно першого параметричного перетворювача та вхідні затискачі лінійних та нульової фаз відповідно другого параметричного перетворювача; Іа, Ів, Іс - струми у проводах лінійних фаз А, В, С; Іn - струм у проводі нульової фази.

На фіг. 2 позначено: D - пункт обриву лінійної фази А3; решта позначень співпадає із позначеннями фіг. 1.

На фіг. 3, а, позначено: U1, U2, U0 - симетричні складові прямої, зворотної та нульової послідовностей відповідно трифазної чотирипровідної системи напруг; І1, І2, І0 - симетричні складові прямої, зворотної та нульової послідовностей відповідно трифазної чотирипровідної системи струмів; решта позначень співпадає із позначеннями фіг. 1.

На фіг. 3, б, позначення співпадають із позначеннями фіг. 1 та фіг. 3, а.

На фіг. 4, а та б, позначення співпадають із позначеннями фіг. 1 та фіг. 3, а.

Склад та будова параметричного перетворювача несиметричного режиму багатофазних систем. До складу параметричного перетворювача несиметричного режиму багатофазної, наприклад, трифазної систем напруг та струмів входять вхідні затискачі лінійних та нульової фаз, один фільтр струмів нульової послідовності та вихідні затискачі лінійних та нульової фаз. На фіг. 1 показані два застосування фільтра струмів нульової послідовності як параметричного перетворювача несиметричного режиму. Перше застосування ґрунтується на прямому параметричному перетворенні - перетворенні симетричного режиму багатофазної системи в несиметричний, а друге застосування ґрунтується на зворотному параметричному перетворенні - перетворенні несиметричного режиму багатофазної системи в симетричний. Відмінність фільтра струмів нульової послідовності 1, який має один комплект виводів, наприклад, А, В, С, 0 (фіг. 1), від параметричного перетворювача полягає в тому, що параметричний перетворювач несиметричного режиму багатофазної системи напруг та струмів має два комплекти виводів, один з яких, наприклад, А1, В1, С1, 01 - є комплектом вхідних затискачів параметричного перетворювача, а другий, наприклад, А3, В3, С3, 03 - є комплектом вихідних затискачів параметричного перетворювача. Обидва комплекти затискачів є взаємозамінними.

На фіг. 1 показана принципова схема прямого та зворотного параметричних перетворювачів несиметричного режиму за відсутності обриву одного з проводів. Перший фільтр струмів нульової послідовності 1 виконує роль прямого параметричного перетворювача, а другий фільтр струмів нульової послідовності 2 виконує роль зворотного парамет-

ричного перетворювача. Вхідними затискачами другого параметричного перетворювача є затискачі А3, В3, С3, 03, а вихідними затискачами є затискачі А2, В2, С2, 02. Струми параметричного перетворювача показані на фіг. 1. На фіг. 1 прямий та зворотний параметричні перетворювачі ввімкнені між собою послідовно: вихідні затискачі прямого параметричного перетворювача (А3, В3, С3, 03) є одночасно вхідними затискачами зворотного параметричного перетворювача.

На фіг. 2 подана та ж сама принципова схема прямого та зворотного параметричних перетворювачів несиметричних режимів за наявності обриву одного проводу у пункті D фази А3.

На фіг. 3, а та б, подані топографічні зображення напруг та струмів входу і виходу параметричного перетворювача при прямому перетворенні симетричного режиму у несиметричний режим.

На фіг. 4, а та б, представлені топографічні зображення напруг та струмів входу та виходу параметричного перетворювача несиметричного режиму при зворотному перетворенні несиметричного режиму у симетричний режим.

Для зменшення опору нульової послідовності фільтр влаштований так, що кожен провідник або група провідників однієї обмотки оточені провідниками або групами провідників другої обмотки. Це у десятки і сотні раз зменшує магнітні поля розсіювання. Кількість обмоток та схеми їх з'єднання у фільтрі можуть бути виконані за однією із наведених нижче конструкцій: за схемою зигзаг; за схемою лямбда; за схемою Скотта; за А-подібною схемою; за схемою двообмоткових трансформатора та автотрансформатора, обладнаних обмотками з однаковою кількістю витків; за схемою поєднання обмоток зірки з обмотками відкритого трикутника; за схемою поєднання перетворювача кількості фаз зі штучною нульовою фазою; або за схемами комбінації паралельного або послідовного суміщення двох фільтрів нульової послідовності, кожен з яких виконаний за вищевказаними схемами.

Робота параметричного перетворювача виконується так. Вхідні затискачі першого параметричного перетворювача приєднують до трифазної мережі, а вихідні затискачі другого параметричного перетворювача приєднують до трифазного приймача. Проаналізуємо роботу параметричного перетворювача в двох режимах. У першому режимі (фіг. 1), при якому обрив фази А3 відсутній, має місце симетричний врівноважений режим роботи у всіх трьох ділянках мережі від вхідних затискачів А1, В1, С1, 01 першого параметричного перетворювача до вихідних затискачів А2, В2, С2, 02 другого параметричного перетворювача. У цьому випадку фільтри струмів нульової послідовності 1 та 2 знаходяться в пасивному стані (холостому ході). Величини струмів та їх фазні кути у першому режимі зазначені на фіг. 1.

У другому режимі (фіг. 2) симетричний врівноважений режим роботи лише на двох ділянках мережі: на першій ділянці від вхідних затискачів А1, В1, С1, 01 першого параметричного перетворювача до пункту приєднання виводів А, В, С, 0 першого фільтра струмів нульової послідовності 1

до мережі; та на третій ділянці, а саме, від пункту приєднання до розподільчої мережі виводів А, В, С, 0 другого фільтра струмів нульової послідовності 2 до вихідних затискачів А2, В2, С2, 02 другого параметричного перетворювача. На третій ділянці мережі, яка з двох боків обмежена пунктами приєднання виводів першого 1 та другого 2 фільтрів нульової послідовності, має місце різко несиметричний режим напруг та струмів, який обумовлений обривом проводу лінійної фази А3. Величини струмів та їх фазні кути у другому режимі зазначені на фіг. 2.

Для наочності розгляду електромагнітних процесів, які відбуваються у параметричних перетворювачах, на фіг. 3 та фіг. 4 подані топографічні зображення вхідних та вихідних напруг та струмів при прямому та зворотному перетворенні несиметричних режимів трифазної мережі, блок-схема якої показана на фіг. 2.

Для спрощення аналізу припустимо, що проводи мережі та фільтри струмів нульової послідовності виконані ідеальними, тобто в них відсутні втрати та магнітні поля розсіювання. Крім того, покладемо, що вищі гармоніки напруг та струмів відсутні.

З врахуванням вказаних спрощень можна показати, що у будь-якій багатофазній системі напруг та струмів врівноважений режим має місце при умові, що активна та реактивна потужності багатофазної мережі є постійними величинами, незалежними від часу, тобто

$$P(t) = \text{const} \neq f(t). \quad (1)$$

Фізичне пояснення умови (1) зводиться до того, що при якісній передачі енергії синхронні та асинхронні машини не повинні мати пульсуючих механічних моментів та потужностей на валу машин змінного струму. Пульсуюча потужність $N(t)$ при параметричному врівноваженні режиму у математичному вигляді може бути записана так:

$$N(t) = 3U_1^*I_2 + 3U_2^*I_1 + U_0^*I_0 = 0, \quad (2)$$

де: U_1, U_2, U_0 - симетричні складові у векторній формі багатофазних напруг прямої, зворотної та нульової послідовностей відповідно; I_1, I_2, I_0 - симетричні складові у векторній формі багатофазних струмів прямої, зворотної та нульової послідовностей відповідно.

На фіг. 1 та фіг. 2 наведені дані струмів I_a, I_b, I_c та I_0 , одержані шляхом розрахунку електромагнітних процесів в параметричних перетворювачах при прямому та зворотному перетвореннях несиметричних режимів.

Вектори напруг та струмів на вхідних та вихідних затискачах при прямому перетворенні у параметричному перетворювачі несиметричного режиму вказані на фіг. 3, а та б. Розташування векторів напруг та струмів на топографічному зображенні, показаному фіг. 3, а, характерне для симетричної врівноваженої системи напруг та струмів. Показані на фіг. 3, а, струми та напруги мають місце на вхідних затискачах А1, В1, С1, 01 першого параметричного перетворювача. На фіг. 3, б, зображені вектори струмів та напруг, одержаних після першого параметричного перетворення на затискачах А3, В3, С3, 03 у випадку обриву проводу у фазі А. За даними напруг та струмів фіг. 2 першого перет-

ворювача на фіг. 3, а та б, наведені дані про обчислені величини симетричних складових напруг та струмів. Підстановка величин симетричних складових напруг та струмів із фіг. 3, а, та фіг. 3, б, у (2) дає два значення пульсуючої потужності $N_1(t)$ $N_2(t)$ відповідно на вхідних та вихідних затискачах першого параметричного перетворювача, тобто на першій і другій ділянках мережі.

$$N_1(t) = 0. \quad (3)$$

$$N_2(t) = 0. \quad (4)$$

Одержані рівності (3) та (4) можуть бути одержані також як сума добутоків векторів пофазних напруг та лінійних струмів.

Підстановка величин симетричних складових напруг та струмів із фіг. 4, а, та фіг. 4, б, в (2) також дає два значення пульсуючої потужності $N_2(t)$ $N_3(t)$ відповідно на вхідних та вихідних затискачах другого параметричного перетворювача, тобто на другій та третій ділянках мережі.

$$N_2(t) = 0. \quad (5)$$

$$N_3(t) = 0. \quad (6)$$

Із одержаних рівностей (3)-(6) випливає перша властивість параметричного перетворення, яка свідчать про те, що навіть при різкій зміні ступеня несиметрії напруг та струмів на другій ділянці мережі, викликаний обривом лінійного проводу, на всіх трьох ділянках мережі має місце врівноважений режим. Оцінка ступеня несиметрії може бути проведена за симетричними складовими, наведеними на фіг. 3, б, та фіг. 4, а. Коефіцієнт несиметрії напруг при параметричному перетворенні за зворотною послідовністю рівний 50 %; коефіцієнт несиметрії напруг за нульовою послідовністю рівний 50 %; коефіцієнт несиметрії струмів за нульовою послідовністю рівний 100 %.

Друга властивість параметричного перетворення полягає у тому, що при зміні величини або фазних кутів струмів приймача стабільність параметричного врівноваження не порушується.

Третя властивість параметричного перетворення полягає у тому, що при параметричному врівноваженні провід однієї з лінійних фаз мережі може бути відімкнений, наприклад, для його ремонту або заміни. При цьому режим приймача може не відчувати обрив одного з проводів мережі. Ця властивість відкриває можливість одержання гарантованого живлення в обхід обірваному проводу.

Аналітичні та лабораторні дослідження підтвердили вище наведені властивості фільтра струмів нульової послідовності, застосованого як параметричного перетворювача несиметричного врівноваженого режиму багатофазних систем напруг та струмів.

Вище вказані властивості параметричного перетворення мають місце не тільки у трифазних мережах з проводом нульової фази, але і в інших багатофазних мережах, наприклад, шестифазних, які на даний час є перспективними.

Винахід може бути використаний: для перемикавання низьковольтних та високовольтних мереж без знеструмлення відповідальних приймачів і енергорайонів; для стабілізації та зустрічного ре-

гулювання напруги мережі; для зменшення втрат енергії та нагріву трансформаторів; для підвищення надійності роботи та живучості мереж, наприклад, при обриві одного з проводів.

За другим незалежним пунктом формули виходу відома система для стабілізації напруг [5-11], яка містить: розподільчу мережу, автотрансформатор з обмотками, устаткованими виводами; механічні або електромеханічні ключі; блоки керування. Недоліки системи: недостатній коефіцієнт стабілізації, який не перевищує 2-3; коливання вхідної напруги входу системи у тому ж масштабі передаються у вихідну напругу; у системі, виконаній за [5-9,11], у момент перемикання вихідна напруга зменшується до нуля і це може привести до збою у роботі приймача електроенергії.

Відома система для стабілізації напруг [12-14], яка містить розподільчу мережу, три конденсаторні батареї або три дроселі та три зустрічно ввімкнені пари тиристорів. Зміни кутів ввімкнення тиристорів по фазах виконує мікроконтролер або спеціалізована ЕОМ, керована вхідними напругами. Система призначена для компенсації флікери (миготіння освітлювальних ламп). Недолік системи: недостатня швидкодія; швидкі коливання вхідної напруги частотою 5-25 Гц у тому ж масштабі передаються у вихідну напругу, що не позбавляє від флікери на вищих частотах інфранизького діапазону.

Відома система для стабілізації напруг [15,16], яка містить розподільчу мережу, вольтодобавляючий трансформатор (бустер-трансформатор) та напівпровідникові вентиля, керовані блоком керування. Недолік системи: порівняно велика встановлена потужність елементів, зниження надійності роботи стабілізаторів, викликані різким збільшенням напівпровідникових елементів пристрою.

Найближчим аналогом (прототипом) до системи для стабілізації напруг, яка заявляється, є система стабілізації напруг, яка містить живильний трансформатор, розподільчу мережу та три однофазні стабілізатори напруги, виконані на двох тристрижневих трансформаторах, один з яких є вольтодобавляючим трансформатором [17]. Одночасно зі стабілізацією напруг система виконує роль стабілізатора реактивної потужності.

Недоліки прототипу: взаємний вплив одного стабілізатора фазної напруги на стабільність роботи двох інших однофазних стабілізаторів фазної напруги через взаємні зв'язки між складовими прямої, зворотної та нульової послідовності напруг; недостатня швидкодія, яка проявляється у тому, що швидкі коливання вхідної напруги частотою 5-25 Гц у тому ж масштабі передаються у вихідну напругу, що негативно впливає на флікер та на роботу приймачів.

У зв'язку зі вказаними недоліками прототипу була поставлена задача: зменшити коливання вихідних напруг пристрою; зменшити втрати енергії у мережі та живильному трифазному трансформаторі; зменшити максимальний струм у лінійних проводах живильної мережі; зменшити напруги та струми нульової послідовності основної та вищих гармонік на вході стабілізаторів; забезпечити неперервність живлення однофазних та трифазних

приймачів енергії при обриві проводу однієї з фаз мережі; зменшити перехідні процеси у колах керування однофазних стабілізаторів напруги.

Поставлена задача розв'язана шляхом застосування фільтра струмів нульової послідовності основної та вищих гармонік як параметричного перетворювача несиметричного режиму врівноваженої трифазної системи напруг та струмів, а саме тим, що:

до системи для стабілізації напруг трифазної чотирипровідної мережі, яка містить живильний трансформатор, низьковольтну чотирипровідну мережу та принаймні один однофазний стабілізатор напруги, причому вказані трансформатор, мережа та принаймні один стабілізатор напруги між собою з'єднані послідовно, додано перший фільтр струмів нульової послідовності, виводи лінійних та нульової фаз якого приєднані до вказаної мережі у пункті приєднання до неї входів принаймні одного однофазного стабілізатора напруги.

До системи для стабілізації напруг трифазної чотирипровідної мережі додано другий фільтр струмів нульової послідовності, виводи якого приєднані до вхідних затискачів вказаної мережі.

До системи для стабілізації напруг трифазної чотирипровідної мережі додано провід, який ввімкнений паралельно до проводу нульової фази вказаної мережі і який додатково сполучає виводи нульових фаз першого та другого фільтрів струмів нульової послідовності.

Для кращого розуміння суті винаходу слід розглянути креслення, представлені на фіг. 5 - фіг. 9.

На фіг. 5 показана блок-схема системи для стабілізації напруги однієї фази.

На фіг. 6 показана блок-схема системи для стабілізації напруги у двох фазах.

На фіг. 7 показана блок-схема системи для стабілізації напруги у трьох фазах.

На фіг. 8 показана блок-схема системи стабілізації напруги у трьох фазах для параметричного зниження коливань фазних напруг у приймачах електричної енергії.

На фіг. 9, а та б, подані осцилограми фазної напруг та лінійного струму мережі при живленні нелінійних приймачів електричної енергії, наприклад, комп'ютерів.

На фіг. 5 позначено: A_4 , B_4 , C_4 - вхідні затискачі лінійних фаз з високовольтного боку живильного трансформатора 6, наприклад, 10 кВ; 3 та 7 - умовно винесені поза трансформатор опори лінійної та нульової фази живильного трансформатора 6 з низьковольтного боку; A_5 , B_5 , C_5 , O_5 - вхідні затискачі мережі; 4 - однофазний стабілізатор напруги; 8 - фільтр струмів нульової послідовності; A_6 та O_6 - вихідні затискачі стабілізатора напруги; 5 - приймач електричної енергії; решта позначень співпадає із позначеннями фіг. 1.

На фіг. 6 позначено: A_7 , B_7 , C_7 - вхідні затискачі лінійних фаз з високовольтного боку живильного трансформатора 12, наприклад, 10/0,4 кВ; 9 та 13 - умовно винесені поза трансформатор опори лінійної та нульової фази живильного трансформатора 12 з низьковольтного боку; A_8 , B_8 , C_8 , O_8 - вхідні затискачі мережі; 10 та 11 - однофазні стабілізатори напруги; 14 - фільтр струмів нульової послідов-

ності; A_9 , B_9 та O_9 - вихідні затискачі двох стабілізаторів напруги; 15 та 16 - однофазні приймачі стабілізаторів напруги; решта позначень співпадає із позначеннями фіг. 1.

На фіг. 7 позначено: A_{10} , B_{10} , C_{10} - вхідні затискачі лінійних фаз з високовольтного боку живильного трансформатора 21, наприклад, 10/0,4 кВ; 17 та 22 - опори лінійної та нульової фази живильного трансформатора 21 з низьковольтного боку; A_{11} , B_{11} , C_{11} , O_{11} - вхідні затискачі мережі; 18, 19 та 20 - однофазні стабілізатори напруги; 23 - фільтр струмів нульової послідовності; A_{12} , B_{12} , C_{12} та O_{12} - вихідні затискачі стабілізаторів напруги; 24, 25 та 26 - однофазні приймачі; решта позначень співпадає із позначеннями фіг. 1.

На фіг. 8 позначено: A_{13} , B_{13} , C_{13} - вхідні затискачі живильного трансформатора; A_{14} , B_{14} , C_{14} , O_{14} - вихідні затискачі стабілізаторів напруги; 30, 31 та 32 - однофазні стабілізатори напруги; 33 - другий фільтр струмів нульової послідовності; 35 - перший фільтр струмів нульової послідовності; 36-38 - однофазні приймачі; 28 та 29 - пункти приєднання фільтрів струмів нульової послідовності до входу та виходу трифазної чотирипровідної мережі; D - пункт обриву проводу фази A; 34 - провід, який ввімкнений паралельно до проводу нульової фази розподільчої мережі і додатково сполучає виводи нульових фаз першого 35 та другого 33 фільтрів струмів нульової послідовності; решта позначень співпадає із позначеннями фіг. 1. Затискачі нульової фази мережі на вході та виході мережі позначені як O_{140} та O_{14} відповідно.

На фіг. 9, а, позначено: u та t - осі ординат та абсцис; $u_a(t)$ - крива залежності фазної напруги у фазі A від часу t ; 39 - падіння напруги у фазі A, викликане імпульсом струму приймача.

На фіг. 9, б, позначено: i та t - осі ординат та абсцис; $i_a(t)$ - крива залежності лінійного струму у фазі A від часу t ; 40 - імпульс струму у фазі A.

Склад та будова системи для стабілізації напруг трифазної чотирипровідної мережі. Вказана система містить: живильний трансформатор 6 низьковольтної мережі, обладнаний вхідними затискачами A_4 , B_4 , C_4 з високовольтного боку та вихідними затискачами A_5 , B_5 , C_5 , O_5 з низьковольтного боку (фіг. 5); трифазну чотирипровідну мережу, вхід якої приєднаний до затискачів A_5 , B_5 , C_5 , O_5 низьковольтного боку живильного трансформатора; фільтр струмів нульової послідовності 8; система містить принаймні один однофазний стабілізатор напруги 4, вхід якого приєднаний до виходу вказаної мережі та виводів фільтра струмів нульової послідовності 8. Принаймні один приймач 5 електроенергії, приєднаний до вихідних затискачів A_6 та O_6 стабілізатора напруги. Внутрішні опори 3 лінійних фаз A_5 , B_5 , C_5 трансформатора 6 для наочності винесені із зображення трансформатора і умовно показані у вигляді самостійного елемента. Внутрішній опір 7 нульової фази O_5 трансформатора 6 для наочності теж винесений із зображення трансформатора 6 і теж умовно показаний у вигляді самостійного елемента.

На фіг. 6 показана блок-схема системи для стабілізації напруги у двох фазах однофазних

приймачів. Відмінність системи, показаної на фіг. 6, від даної на фіг. 5 полягає у додатковому однофазному стабілізаторі напруги 11 та однофазному приймачі 15. Трансформатор 12, наприклад, 10/0,4 кВ входом приєднаний до затискачів A_7 , B_7 , C_7 високовольтної мережі. Вихідні затискачі A_8 , B_8 , C_8 , O_8 трансформатора приєднані до низьковольтної трифазної чотирипровідної мережі. Виводи A, B, C, O фільтра 14 нульової послідовності приєднані до виходу вказаної низьковольтної мережі та до входів двох однофазних стабілізаторів напруги 10 та 11, виходи яких через вихідні затискачі A_9 , B_9 , O_9 приєднані до однофазних електроприймачів 15 та 16. Опори лінійних фаз 9 та нульової фази 13 винесені із зображення трансформатора 12.

На фіг. 7 показана блок-схема системи для стабілізації напруги у трьох фазах. Вказана система містить три однофазні стабілізатори напруги 18-20, до яких приєднані три однофазні приймачі 24, 25 та 26. Трансформатор 21 приєднаний до затискачів A_{10} , B_{10} , C_{10} високовольтної мережі. Вихідні затискачі A_{11} , B_{11} , C_{11} , O_{11} трансформатора 21 приєднані до входу низьковольтної трифазної чотирипровідної мережі. Виводи A, B, C, O фільтра нульової послідовності 23 приєднані до виходу вказаної низьковольтної мережі та до входів трьох однофазних стабілізаторів напруги 18, 19 та 20, виходи яких через вихідні затискачі A_{12} , B_{12} , C_{12} та O_{12} приєднані до трьох однофазних електроприймачів 24, 25 та 26. Опори лінійних фаз 17 та нульової фази 22 винесені із зображення трансформатора 21.

На фіг. 8 показана блок-схема системи стабілізації напруги у трьох фазах, яка знижує коливання фазних напруг у приймачах електричної енергії. Система містить трансформатор 27, трифазну чотирипровідну мережу, перший 35 та другий 33 фільтри струмів нульової послідовності та однофазні стабілізатори напруги 30-32. Другий фільтр струмів нульової послідовності 33 приєднаний до входу трифазної чотирипровідної мережі. Перший фільтр струмів нульової послідовності 35 приєднаний до виходу вказаної мережі та до входів однофазних стабілізаторів напруги 30-32, які через вихідні затискачі A_{14} , B_{14} , C_{14} та O_{14} приєднані до однофазних приймачів 36-38. Мережа містить провід 34, який ввімкнений паралельно до проводу нульової фази O_{140} - O_{14} вказаної мережі і який додатково сполучає виводи нульових фаз першого 35 та другого 33 фільтрів струмів нульової послідовності.

Робота системи для стабілізації напруг трифазної чотирипровідної мережі полягає у наступному. Високовольтну напругу, наприклад, 10 кВ подають на вхідні затискачі A_4 , B_4 , C_4 трансформатора 6 (фіг. 5). Напруга з вихідних затискачів A_5 , B_5 , C_5 , O_5 трансформатора 6 подається в низьковольтну мережу, наприклад, 0,4 кВ до принаймні одного стабілізатора напруги 4. До вихідних затискачів A_6 та O_6 стабілізатора напруги приєднано приймач електричної енергії 5. Фільтр струмів нульової послідовності приєднаний виводами A, B, C та O до виходу низьковольтної мережі.

Система стабілізації напруг має такі корисні властивості (фіг. 5):

- Зменшення струму на одну третину у проводі максимально завантаженої лінійної фази мережі.
- Різде зменшення у декілька разів струму у проводі нульової фази мережі.
- Заощадження витрат потужності у трансформаторі та мережі при несиметрії струмів основної гармоніки.
- Заощадження витрат потужності у трансформаторі та мережі при струмах вищих гармонік.
- зменшення коливань та посадок фазних напруг низьковольтної мережі при накидах несиметричних навантажень.

Розглянемо ці властивості більш детально. На фіг. 5 наведені вхідні струми стабілізатора напруг 4. Вхідні струми I_a та I_0 стабілізатора напруги 4 рівні у відносних одиницях 1,0. При цьому струми на виході мережі у інших двох лінійних фазах В та С дорівнюють нулю.

Основна корисна властивість параметричного перетворення фільтра струмів нульової послідовності полягає у тому, що фільтр 8 вловлює струм

проводу нульової фази і розподіляє його між проводами лінійних фаз мережі. На фіг. 5 записані струми на виході мережі і перед фільтром нульової послідовності. Порівняємо струми мережі до і після пункту приєднання виводів А, В, С, 0 фільтра струмів нульової послідовності:

- Струм у проводі лінійної фази А зменшився на третину і рівний $2/3$.
- Струм у проводі лінійної В збільшився на третину і рівний $1/3$.
- Струм у проводі лінійної С збільшився на третину і рівний $1/3$.
- Струм у проводі нульової фази 0 зменшився у багато разів і приблизно рівний нулю.

З наведеного випливає висновок про те, що фільтр струмів нульової послідовності не тільки виконує функцію фільтра, але й одночасно істотно і параметрично перетворює величини струмів трифазної мережі.

Запишемо пофазні струми мережі у вигляді таблиці 1.

Таблиця 1

Струми по фазах	Струми у мережі та у трансформаторі	
	Без фільтра СНП	З фільтром СНП
I_a	1,0	$2/3$
I_b	0,0	$1/3$
I_c	0,0	$1/3$
I_N	1,0	0

Одержаній зміні струмів дамо оцінку. За критерій оцінки приймемо втрати ΔP у вторинних (низьковольтних) обмотках трансформатора. При оцінці винесений активний опір лінійної фази R_L трансформатора приймемо за 1,0, а активний опір нейтралі R_N трансформатора приймемо у залежності від схеми ввімкнення обмоток; для трансформатора Y/Y_0 - $R_n=3,0$; для трансформатора Δ/Y_0 - $R_n=1,0$; для трансформатора Δ/Z_0 - $R_n=1,15$; для трансформатора Δ/λ_0 - $R_n=1,15$. Втрати потужності у трансформаторі розраховуємо за виразом,

де:

$$\Delta P = (I_a)^2 R_a + (I_b)^2 R_b + (I_c)^2 R_c + (I_N)^2 R_N, (1)$$

$$R_a = R_b = R_c = R_L. (2)$$

Відносні втрати потужності ΔP в трансформаторі у залежності від схеми з'єднання обмоток

подані у таблиці 2. Ефективність застосування фільтра краще оцінювати по кратності зменшення втрат в трансформаторі, яка дорівнює відношенню втрат у трансформаторі до і після застосування фільтра. Із таблиці 2 видно, що втрати потужності в обмотках та магнітопроводі трансформатора при схемі з'єднання Y/Y_0 без застосування фільтра є найбільшими і рівними 4,0. При застосуванні фільтра струмів нульової послідовності втрати зменшуються до $2/3 = 0,67$. Кратність зменшення втрат дорівнює 6,0. Кратність зменшення втрат у трансформаторі Δ/Y_0 рівна 3,0, а у трансформаторах Δ/Z_0 та Δ/λ_0 дорівнює 2,8. При застосуванні трансформаторів з більш перспективними конструкціями обмоток кратність зменшення втрат потужності в трансформаторах зменшується до 2,6-3,0.

Таблиця 2

Тип з'єднання обмоток	Відносні втрати потужності у вторинних обмотках, магнітопроводі та баку		Кратність зменшення втрат
	Без фільтра СНП	З фільтром СНП	
Y/Y_0	4,0	$2/3$	6,0
Δ/Y_0	2,0	$2/3$	3,0
Δ/Z_0	2,155	0,77	2,8
Δ/λ_0	2,155	0,77	2,8

У варіанті приєднання двох стабілізаторів напруги до різних фаз мережі (фіг. 6) вище поданим чином можуть бути розраховані дані таблиці 3, де

вказані відносні втрати потужності в трансформаторі та обчислена кратність зменшення втрат.

Таблиця 3

Тип з'єднання обмоток	Відносні втрати потужності у вторинних обмотках, магнітопроводі та баку		Кратність зменшення втрат
	Без фільтра СНП	З фільтром СНП	
Y/Yo	5,0	5/3	3,0
Δ/Yo	3,0	5/3	1,8
Δ/Zo	3,155	1,925	1,64
Δ/λo	3,155	1,925	1,64

У варіанті приєднання трьох стабілізаторів напруги до різних фаз мережі (фіг. 7) розраховані дані вміщені у таблиці 4, де вказані відносні втрати потужності в трансформаторі та обчислена кратність зменшення втрат. Аналіз процесів у

системі стабілізації показав, що при однакових навантаженнях приймачів 24-26 кратність зменшення дорівнює нулю. Але такий режим є мало ймовірним, тому в розрахунок прийняте відношення потужностей приймачів рівне 0,5:1:1.

Таблиця 4

Тип з'єднання обмоток	Відносні втрати потужності у вторинних обмотках		Кратність зменшення втрат
	Без фільтра СНП	З фільтром СНП	
Y/Yo	3,75	1,83	2,05
Δ/Yo	2,75	1,83	1,50
Δ/Zo	3,18	2,12	1,50
Δ/λ0	3,18	2,12	1,50

Отже практично у всіх режимах застосування системи для стабілізації напруг мережі не тільки заощаджується електрична енергія від 1,5 до 6,0 разів, але й зменшується у стільки ж разів нагрівання живильного трансформатора, а отже збільшується пропускна потужність трансформатора.

Розглянемо властивість системи стабілізації заощаджувати витрати енергії у трансформаторі та мережі при струмах вищих гармонік. До тепер систему стабілізації розглядали як лінійну систему, навантажену лінійними приймачами. Але у даний час лінійні приймачі активно замінюються нелінійними. Типовим представником нелінійного приймача є комп'ютер, який споживає імпульсний струм від мережі загального користування. Форма кривої струму комп'ютера, приєданого між вихідними фазами стабілізатора напруги (фіг. 5), показана на фіг. 9, б. Із кривої $i_a(t)$ видно, що комп'ютер споживає імпульсний струм. Розклад імпульсного струму в ряд Фур'є показує, що нелінійний приймач генерує через стабілізатор напруги в трифазну мережу у загальному випадку як непарні, так і парні вищі гармоніки струмів. Ці гармоніки, по перше, викликають додаткові втрати енергії у трансформаторі, а, по друге, істотно знижують вихідну напругу трансформатора. Причиною зниження вихідної напруги трансформатора є імпульсний струм приймача. На фіг. 9, а показана форма кривої напруги $u_a(t)$ на виході трансформатора. Із фіг. 9, а, видно, що у момент проходження імпульсу 40 у миттєвому значенні напруги з'являється імпульсна посадка (просадка) напруги 39. Імпульсна посадка напруги відбувається за час 2-3 мілісекунди. Однією з причин імпульсної посадки напруги є десятикратний опір нульової послідовності трансформатора помножений на число, яке вказує на порядковий номер

гармоніки струму. Величина імпульсної посадки напруги 39 складає від 0 до 10-15 %. Фільтр нульової послідовності перехоплює імпульси струму і не допускає їх до трансформатора, через що посадка 39 зникає, а форма кривої напруги відновлюється до синусоїдної. Через відновлення синусоїдної форми фазна напруга виходу трансформатора збільшується на 1-5 %. Останнє є першою причиною збільшення споживаної потужності приймачів при приєднанні до мережі фільтра струмів нульової послідовності. Другою причиною збільшення споживаної потужності приймачів є зменшення напруги нульової послідовності основної гармоніки. Зменшення напруги нульової послідовності основної гармоніки є зміною усталеного стану електричного кола, а такі зміни завжди супроводжуються збільшенням потужності споживання некерованих (нестабілізованих) приймачів. Напруга нульової послідовності U_0 визначається формулою Кенелі

$$U_0 = \frac{\sum_{k=1}^3 (U_k \cdot Y_k)}{\sum_{k=1}^3 Y_k + Y_0} \quad (7)$$

де: U_k та Y_k - вектор фазної напруги мережі та провідність опору однофазного приймача у комплексній формі приймача у фазі k ; Y_0 - провідність нульової фази мережі.

Приріст потужності ΔS при зменшенні напруги нульової послідовності U_0 до нульового значення визначається з виразу (8) і дорівнює

$$\Delta S = (U_0)^2 \left(\sum_{k=1}^3 Y_k + Y_0 \right) \quad (8)$$

Приріст потужності ΔS - комплексна величина і складається з активної ΔP та реактивної ΔQ потужності

$$\Delta S = \Delta P + j \Delta Q \quad (9)$$

Приріст активної потужності ΔP є завжди додатною величиною при вказаному зменшенні напруги нульової послідовності U_0 до нульового значення. Саме цей факт стримував впровадження фільтрів нульової послідовності у промисловості та комунальному секторі при некерованій (нестабілізованій) напрузі приймачів. Цей недолік подолано завдяки поєднання дії фільтра струмів нульової послідовності та дії стабілізаторів напруги, ввімкнених після вказаного фільтра відповідно до даного винаходу. Стабілізатор напруги зменшує приріст напруги і не приводить до приросту потужності.

Перейдемо до розгляду властивості системи стабілізувати коливання та посадки фазних напруг низьковольтної мережі при різкій зміні несиметричних навантажень. Посадку напруги ΔU_a можна визначити як суму посадок прямої, зворотної та нульової послідовностей, наприклад, у фазі A системи стабілізації, показаній на фіг. 5.

$$\Delta U_a = \Delta U_1 + \Delta U_2 + \Delta U_0. \quad (10)$$

Кожен доданок із (10) визначається із рівностей

$$\Delta U_1 = I_1 \cdot Z_0 + I_2 \cdot Z_2 + I_0 \cdot Z_1, \quad (11)$$

$$\Delta U_2 = I_1 \cdot Z_1 + I_2 \cdot Z_0 + I_0 \cdot Z_2, \quad (12)$$

$$\Delta U_0 = I_1 \cdot Z_2 + I_2 \cdot Z_1 + I_0 \cdot Z_0. \quad (13)$$

Для системи стабілізації, показаної на фіг. 5, визначимо відносні струми прямої I_1 , зворотної I_2 та нульової I_0 послідовностей при відсутності фільтра струмів нульової послідовності.

$$I_1 = 1/3; I_2 = 1/3; I_0 = 1/3. \quad (14)$$

Струми цих же послідовностей визначимо для системи стабілізації за наявності вказаного фільтра.

$$I_{1\phi} = 1/3; I_{2\phi} = 1/3; I_{0\phi} = 0. \quad (15)$$

Для трансформатора Y/Y_0 , наприклад, ТМ 400 кВА із довідкових даних визначимо відносні опори прямої Z_1 , зворотної Z_2 та нульової послідовності Z_0 .

$$Z_1 = Z_2 = 1,0; Z_0 = 8,8. \quad (16)$$

Після підстановки (15) та (16) в (10)-(14) знайдемо відносне падіння напруг у трансформаторі Y/Y_0 без застосування фільтра

$$\Delta U_a = 10,8. \quad (17)$$

Після підстановки (8) та (9) в (10)-(13) та (15) знайдемо відносне падіння напруг у трансформаторі Y/Y_0 при застосуванні фільтра згідно з заявленою системою стабілізації

$$\Delta U_{a\phi} = 3,0. \quad (18)$$

Коефіцієнт стабілізації, який досягнутий за рахунок застосування фільтра струмів нульової послідовності, визначається як частка від ділення (17) на (18) і дорівнює 3,6. Одержаний результат справедливий для систем стабілізації, показаних на фіг. 1, фіг. 2, фіг. 5 - фіг. 8.

Зупинимось на властивості системи стабілізації параметрично відновлювати напругу в обірваному проводі мережі. На фіг. 8 показаний випадок обриву проводу лінійної фази A у пункті D. Завдяки властивості параметричного перетворення несиметричного режиму напруга на виводі A фільтра 35 відновлюється майже до номіналь-

ного попереднього значення при коротких та середніх довжинах лінії мережі. Швидкість відновлення цієї напруги становить декілька десятків наносекунд. Тому неперервність живлення забезпечується параметрично при обриві проводу однієї з фаз, включаючи нульову фазу.

У варіанті виконання до системи стабілізації додано додатковий фільтр струмів нульової послідовності 33, який дає змогу відновити напругу у проводі обірваної фази порівняно довгої лінії мережі (до 1 км і більше). При менших площах поперечного перерізу та ще довгих лініях мережі доцільно посилити провід нульової фази додатковим провідником 34, вставленим між виводами нульових фаз фільтрів струмів нульової послідовності. Отже, заявлена система стабілізації забезпечує неперервність живлення однофазних та трифазних приймачів енергії при обриві проводу однієї з фаз мережі.

Серед інших властивостей системи слід відзначити зниження опорів мережі у пункті приєднання приймача, що зменшує амплітуди напруг та струмів у перехідних процесах як у колах мережі, так і у колах керування однофазних стабілізаторів напруги, що покращує умови експлуатації вказаних стабілізаторів напруги.

Параметричний перетворювач та система для стабілізації напруг призначені для зменшення провалів та посадок напруги в проводах та трансформаторах розподільчої мережі, для зменшення втрат енергії та нагріву в трансформаторах, для заощадження електричної енергії та для підвищення надійності роботи і живучості мереж, наприклад, при обриві одного з проводів.

Перелік посилань.

1. Мильох А.Н., Кубышин Е., Волков И.В. Индуктивно-емкостные преобразователи источников напряжения в источник тока. - К.: Наукова думка, 1964. - 304 с.

2. Музиченко О.Д. Живлення стабілізаторів струму від багатофазних несиметричних систем напруг. //Доповіді АН УРСР.- 1970. - № 5. - С. 739-742.

3. Бамдас А.М., Кулинич В.А., Шапиро С.В. Статические электромагнитные преобразователи частоты и числа фаз. М.-Л.:Госэнергоиздат, 1961, с. 208 (С. 105-149).

4. Гаврилюк В.О., Красовський Є.П., Шаповаленко О.Г., Едельштейн Є.Л. Теорія електричного приводу. - К.: Вища школа, 1974, с. 255 (С.144-146).

5. McGuire T.B. Switching AC voltage regulator. Патент США № 4745352, G05F 1/26. Публіковано 17.05.1988.

6. McGuire T.B., Holmes CM. Switching AC voltage regulator. Патент США № 4791348, G05F 1/26. Публіковано 13.12.1988.

7. Lace M.A. Voltage compensator system. Патент США № 5883503, G05F 1/24. Публіковано 16.03.1999.

8. Yeh S.-T., Ho L.-H., Hsu Y.-L. Voltage regulating circuit for uninterruptible power supply. Патент США № 7405544, G05F 1/26. Публіковано 29.07.2008.

9. Hauer H. Limiting ring current in short circuits between adjacent partial winding by increasing leakage impedance. Патент США № 6762594, G05F 1/14 . Публіковано 13.07.2004.

10. Jindrick J.A., Hurley J.R., Gilker C, Nohria N.K., Baranowski J.A., Dolnik T.G. Microprocessor controlled voltage regulating transformer. Патент США № 4419619, G05F 1/20. Публіковано 06.12.1983.

11. Andrei R.G. Three-phase autotransformer with two tap changers for ratio and phase-angle control. Патент США №6011381, G05F 1/14 . Публіковано 04.01.2000.

12. Brennen M.B., Gyudyi L. Voltage regulator and flicker compensator. Патент США № 4234842, H02J 3/18 . Публіковано 18.11.1980.

13. Ma T.L.W., Stratton B.A. Control system and method for voltage stabilization in electric power

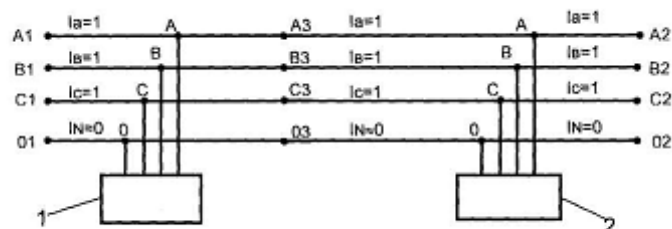
system. Патент США № 6573691, G05F 5/00. Публіковано 03.06.2003.

14. Comwell M.J., Dudte CP. Shifting reference values to account for voltage sag. Патент США №7613043, G11C 16/04. Публіковано 03.11.2009.

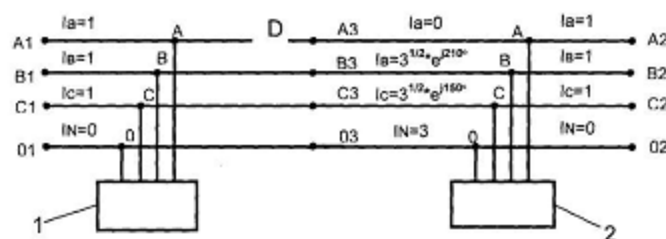
15. Hommond P. Hybrid tap-changing transformers with full range of control and high resolution. Патент США №6472851, G05F 1/16 . Публіковано 29.10.2002.

16. James M.S. FC voltage regulator. Патент США № 6020726, G05F 1/10. Публіковано 01.02.2000.

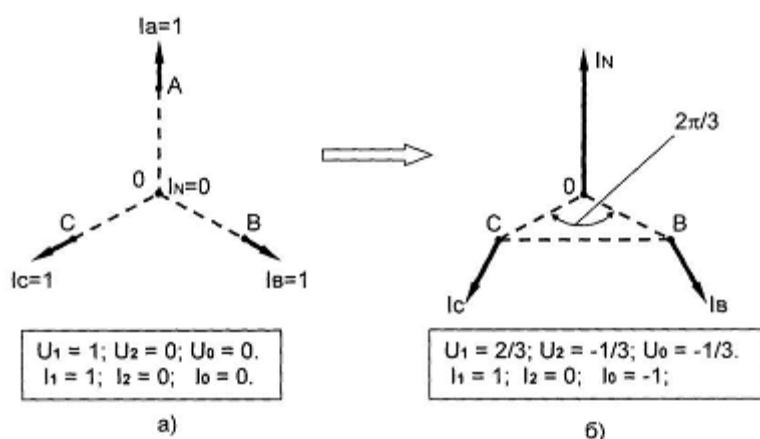
17. Bilger H., Ravot J.-F. Three-phase transformer with in phase regulating winding for the regulation of phase voltages. Патент США № 597761, H01F 30/12. Публіковано 02.11.1999.



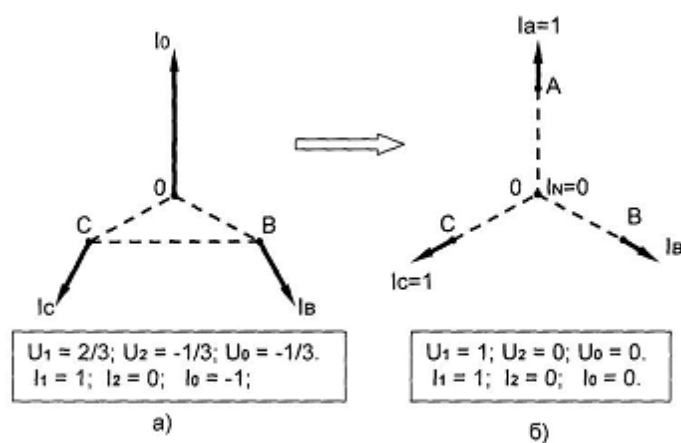
Фиг. 1



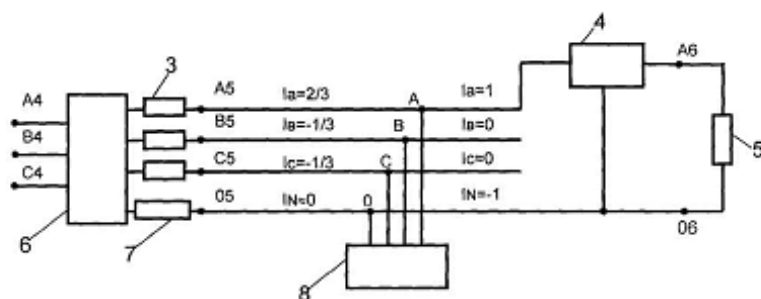
Фиг. 2



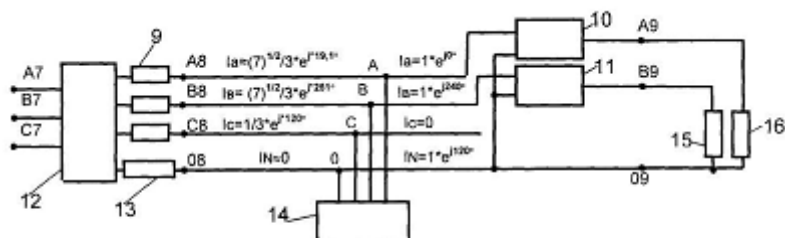
Фиг. 3



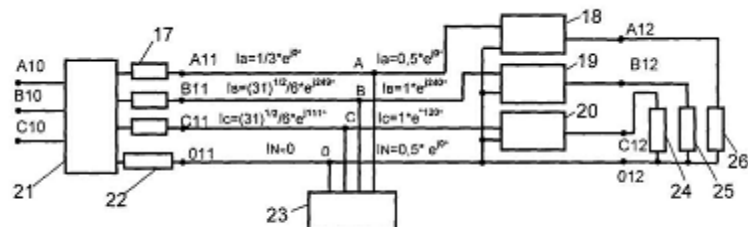
Фиг. 4



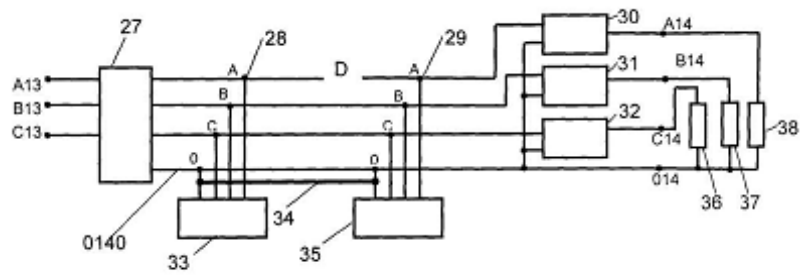
Фиг. 5



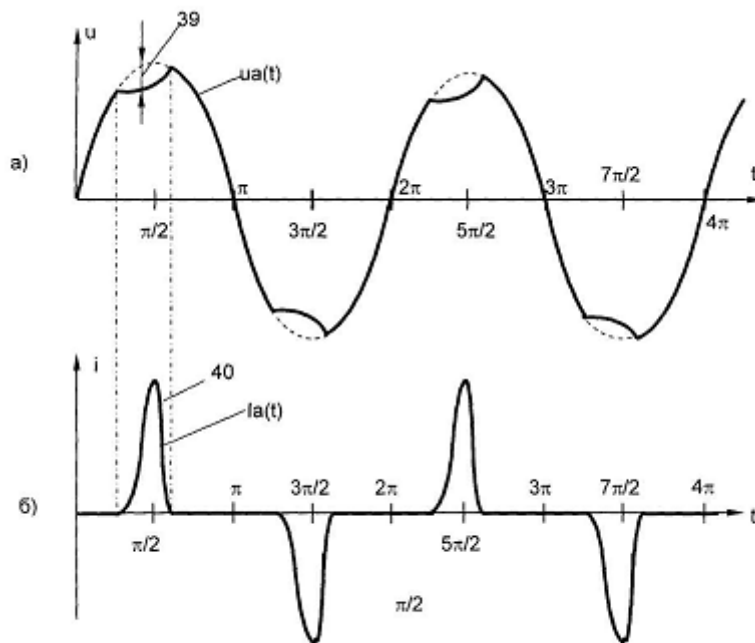
Фиг. 6



Фиг. 7



Фиг. 8



Фиг. 9