



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **112369** (13) **C2**  
(51) МПК**H01F 30/12** (2006.01)**H02M 5/10** (2006.01)**H02J 3/26** (2006.01)ДЕРЖАВНА СЛУЖБА  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІ  
УКРАЇНИ**(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВІНАХІД****(21)** Номер заявки: **а 2015 01373****(22)** Дата подання заявки: **18.02.2015****(24)** Дата, з якої є чинними  
права на винахід: **25.08.2016****(41)** Публікація відомостей  
про заявку: **25.08.2015, Бюл.№ 16****(46)** Публікація відомостей  
про видачу патенту: **25.08.2016, Бюл.№ 16****(72)** Винахідник(и):**Музиченко Олександр Дмитрович (UA),  
Музиченко Оксана Олександрівна (UA),  
Музиченко Юрій Олександрович (UA)****(73)** Власник(и):**Музиченко Олександр Дмитрович,  
вул. Незалежності, 64, с. Літки, Броварський  
р-н, Київська обл., 07411 (UA),  
Музиченко Оксана Олександрівна,  
вул. Незалежності, 64, с. Літки, Броварський  
р-н, Київська обл., 07411 (UA),  
Музиченко Юрій Олександрович,  
вул. Незалежності, 26, кв. 125, м. Нетішин,  
Хмельницька обл., 30100 (UA)****(56)** Перелік документів, взятих до уваги  
експертизою:

UA 44488 A, 15.02.2002

US 20040119571 A1, 24.06.2004

US 5435455 A, 18.07.1995

US 6169674 B1, 02.01.2001

US 5416458 A, 16.05.1995

CN 2789901 Y, 21.06.2006

Костенко М.П., Пиотровский Л.М.

Электрические машины. В 2-х частях. Часть  
1. Машины постоянного тока.

Трансформаторы. Учебник для студентов

высш. техн. учеб. заведений. Изд. 3-е,  
перераб. Л.: Энергия, 1972, с. 394, 512-514.

KR 20070111430 A, 21.11.2007

**(54) ТРАНСФОРМАТОР АБО ДВА ТРАНСФОРМАТОРИ РОЗПОДІЛЬНОЇ МЕРЕЖІ****(57)** Реферат:

Трансформатор розподільної мережі належить до електроенергетики, який використовують для перетворення високовольтної напруги 6 кВ, 10 кВ, 35 кВ в низьковольтну напругу 230В/400В розподільної мережі загального користування. Трансформатор призначений для живлення нелінійних та лінійних як симетричних, так і несиметричних, зокрема, однофазних навантажень, приєднаних до мережі загального користування. У винаході узгоджені режими роботи трансформатора розподільної мережі з імпульсними струмами електроприймачів, що досягається суміщенням вторинних обмоток та магнітопроводу кожного трансформатора із стабілізатором фаз, а саме зміною схеми з'єднання обмоток та зміною конструкції котушок трансформатора. В трансформаторах передбачена компенсація магнітних полів розсіювання за допомогою: послідовного ввімкнення вторинних обмоток; заміною обмоток на паралельне з'єднання обмоток проводів меншого поперечного перерізу та поділом обмоток на декілька частин, розташованих за місцем компенсації полів розсіювання. Первинні обмотки одинарного трансформатора з'єднані за довільною схемою, а первинні обмотки двох припасованих

UA 112369 C2

трансформаторів за двома варіантами: перший - трикутник або зіг'заг, а другий - зірка або рівнобічний піврогач. За допомогою запропонованого винаходу досягають підвищення кратності компенсації струмів вищих гармонік прямої зворотної та нульової послідовності, зменшення встановленої потужності трансформатора розподільної мережі, зниження втрат електроенергії в трансформаторі і збільшення її пропускної здатності по потужності при масовому застосуванні нелінійних електроприймачів.

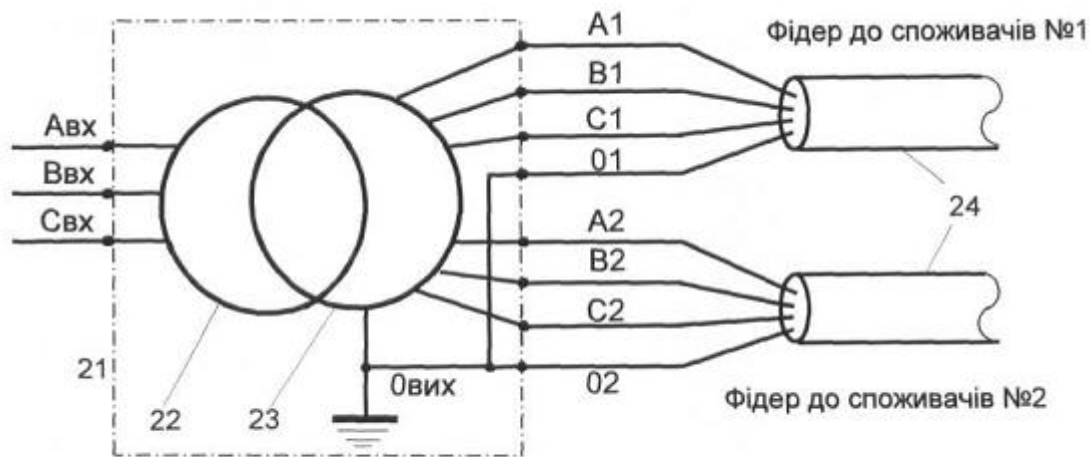


Fig. 3

Трансформатор розподільної мережі належить до електроенергетики. Трансформатор призначений для перетворення високовольтної напруги 6 кВ, 10 кВ, 35 кВ і більше в низьковольтну напругу 230 В/400 В. Трансформатор або два припасовані один до одного трансформатори застосовуються для живлення нелінійних навантажень у розподільній мережі загального користування. Трансформатор або об'єднання двох трансформаторів призначені для живлення лінійних та/або нелінійних навантажень, які генерують у розподільну мережу симетричні складові струмів вищих гармонік прямої, зворотної та нульової послідовностей, і тим погіршують якість електричної енергії та викликають значні втрати енергії у мережі загального користування. Зазначимо, що нелінійні приймачі електричної енергії у даний час набули масового поширення і становлять реальну загрозу для електроенергетики та розподільних мереж у майбутньому. Причина в тому, що, наприклад, навіть традиційно лінійні приймачі електричної енергії (електричні двигуни та лампочки розжарювання), на які розрахована розподільна мережа, починають масово замінюватись інверторними двигунами та діодними освітлювальними лампочками. Кількість і види нелінійних електроприймачів невпинно зростають. При збільшенні нелінійних приймачів розподільної мережі в її проводах збільшуються струми вищих гармонік, які умовно поділяють на симетричні складові прямої, зворотної та нульової послідовності [2, 8].

У даний час розподільна мережа перебуває під тиском нових та старих недоліків. Основними новими недоліками розподільної мережі є її нездатність забезпечити електропостачання великої кількості нелінійних навантажень. До числа основних старих недоліків розподільної мережі можна віднести:

- завищені втрати енергії у розподільних трансформаторах, виконаних за схемою зірка-зірка з нулем, від дії несиметричних струмів фазних навантажень та вищих гармонік; додаткові втрати енергії приводять до перегріву трансформаторів та виходу їх з ладу;
- завищені струми у проводах лінійних та нульової фаз існуючих розподільних мереж при нелінійних та несиметричних навантаженнях;
- зменшення пропускної здатності трансформаторів при збільшенні несиметричних струмів основної частоти та струмів вищих гармонік прямої, зворотної та нульової послідовності в розподільних трансформаторах, зокрема у зимовий період;
- зміщення потенціалу нульової фази відносно потенціалу землі, що призводить до погіршення протипожежної ситуації та погіршення техніки безпеки;
- поява перенапруги у розподільній мережі при фазних коротких замиканнях; при цьому фазна напруга на вводах будинків зростає з 220 вольт до 310-360 вольт, що призводить до виходу з ладу електрообладнання промислової, комунальної та соціальної сфери;
- при обриві проводу нульової фази виникають спонтанні зміни напруг у розподільній мережі від нуля до 380 вольт, що призводить до виходу з ладу квартирної електрообладнання та можливого самозагорання.

Через ці недоліки розподільна мережа у даний час є предметом прискіпливого дослідження, яке проводиться сорока країнами світу і має назву Smart Grid. Розробка трансформатора за даним патентом є неофіційною частиною програми Smart Grid.

Відомий трансформатор розподільної мережі [5], обмотки якого з'єднані за схемами Y/Y<sub>0</sub>. Трансформатор масово поширений у всіх країнах світу через простоту виконання. Недолік трансформатора: з ростом несиметричного, зокрема, однофазного навантаження якість електричної енергії споживачів зменшується, а втрати електричної енергії в указаному трансформаторі різко зростають.

Відомий трансформатор розподільної мережі [5], обмотки якого з'єднані за схемами трикутник-зірка  $(\Delta/\Delta)$ . При живленні однофазних нелінійних приймачів електричної енергії типу "енергозберігаюча електрична лампочка освітлення", або типу "комп'ютер" та інших подібних нелінійних приймачів, кількість яких невпинно зростає, у трансформаторі трикутник-зірка виникають струми, які викликають додаткові втрати електричної енергії в первинних обмотках трикутника трансформатора. Такі струми спричиняють втрати енергії та додаткове нагрівання трансформатора [2].

Відомий трансформатор розподільної мережі [6], у якого первинні обмотки ввімкнені у трикутник, а вторинні обмотки з'єднані за схемою лямбда ( $\lambda$ ). Конструкція обмоток трансформатора дозволила зменшити напругу на ізоляції між обмотками середнього стрижню трансформатора. Недолік трансформатора: підвищення напруги на ізоляції між проводами двох обмоток однієї котушки на 15 %.

Відомий трифазний трансформатор [8], у якому первинні обмотки ввімкнені у зірку, а вторинні обмотки з'єднані у симетричний зигзаг. Такий трансформатор знайшов широке застосування в електропостачанні промислових та сільських споживачів. Трансформатор має

зменшений приблизно у десять разів опір нульової послідовності. Автори на основі обробки статистичних даних, одержаних в результаті обстеження режимів підстанцій сільських мереж, показали, що струми нульової послідовності складають у середньому  $0,186 \cdot e^{j185^\circ}$  від струму прямої послідовності, прийнятого за 1,0. Це означає, що у реальних умовах експлуатації несиметричні навантаження трансформатора зменшили його пропускну здатність симетричних навантажень не менше ніж на 56 % розподільної мережі, тобто зі 100 % до 44 %, а при однофазному навантаженні зменшення пропускну здатності трансформатора досягає 67 %. У цьому полягає недолік трансформатора.

Відомий трансформатор розподільної мережі, виконаний за схемою зірка-зірка з нулем [9], у який внесена сьома (так звана симетруюча або узгоджуюча) обмотка, один вивід якої приєднаний до нейтралі вторинних обмоток, ввімкнених у зірку, а другий вивід сьомої обмотки приєднаний до затискача нульової фази трансформатора. Сьома обмотка намотана поверх трьох вторинних обмоток зірки. Сьома (узгоджуюча) обмотка трансформатора зменшує у 2-3 рази опір нульової послідовності трансформатора. Недолік трансформатора: встановлена потужність трансформатора на 16,7 % більша від трансформатора Y/Yo; підвищена реактивна потужність, яка споживається трансформатором через збільшення магнітних полів розсіювання між сьомою обмоткою та трьома обмотками зірки. Через це масо-габаритні його показники поступаються трансформаторам Y/Zo.

Відомий трансформатор розподільної мережі [7], у якому первинні обмотки ввімкнені у трикутник, а вторинні обмотки з'єднані у симетричний зіг'заг. Автори Менке та інші запатентували схему з'єднання вторинних обмоток, яка має вигляд зіг'загу. Основне призначення трансформатора полягає у взаємній компенсації струмів вищих гармонік, порядковий номер яких кратний трьом. Це дало можливість частково зменшити втрати енергії у трансформаторі, викликані нелінійними навантаженнями. Поява цього трансформатора показала повну неперспективність застосування трансформатора "зірка-зірка з нулем" та недосконалість трансформатора "трикутник-зірка". На даний час трансформатор Менке є одним із кращих трансформаторів розподільної мережі. Дійсно, виходи трансформаторів розподільних мереж у багатьох країнах перевантажені струмами вищих гармонік, що є наслідком масового застосування комп'ютерних технологій. У деяких випадках струм проводу нульової фази перевищує номінальне значення. У цьому випадку для відновлення пропускну потужності трансформатора, зниженою за рахунок вищих гармонік, кратних трьом, необхідне застосування трансформатора Менке. Недоліки трансформатора: зменшення пропускну потужності трансформатора при живленні симетричних та несиметричних, зокрема, однофазних навантажень; принципова неможливість компенсації вищих гармонік струмів прямої та зворотної послідовності.

Відоме з'єднання трансформаторів [15], яке складається з двох трансформаторів, первинні обмотки яких ввімкнені у зірку та трикутник, або у два нерівносторонні шестикутники, а вторинні обмотки виконані за схемами однакових гальванічно розв'язаних схем, у вигляді двох нерівносторонніх шестикутників; два трифазні виходи напруг, зсунутих між собою, по фазі на кут  $30^\circ$ . З'єднання трансформаторів має чотири виходи (по два з кожного трансформатора). Трифазні трипровідні виходи виконані без нульової фази. Трансформатори взаємно компенсують вищі гармоніки струмів прямої та зворотної послідовності. Недолік з'єднання двох припасованих один до одного трансформаторів: відсутність компенсації вищих гармонік струмів нульової послідовності та неповна компенсація вищих гармонік струмів прямої та зворотної послідовності.

Відомий трансформатор розподільної мережі [3, 4, 10, 15], у якому вторинні обмотки ввімкнені в один або декілька багатокутників, зокрема шестикутників. Їх вихідні затискачі з'єднані із виводами багатокутника. Трансформатор компенсує вищі гармоніки струмів прямої та зворотної послідовності. Недолік: трансформатор не компенсує вищі гармоніки струмів нульової послідовності.

Відомий трансформатор розподільної мережі [11-14, 16, 17, 18], який містить з'єднання вторинних обмоток у зіг'заг [1, фіг. 5'] або рогач [1, фіг. 6']. Такий трансформатор задовільно компенсує вищі гармоніки струмів прямої та зворотної послідовностей та незадовільно компенсує вищі гармоніки струмів нульової послідовності. Вторинні обмотки таких трансформаторів містять проміжні виводи обмоток, внаслідок чого обмотка поділена на дві частини, в яких протікають різні струми за величиною та фазою. Недолік: ці частини мають різну площу поперечного перерізу. Через це не виконуються умови компенсації радіальних та осьових складових магнітних полів розсіювання. В результаті знижується кратність компенсації вищих гармонік струмів нульової послідовності. Крім того, вторинні обмотки мають велику встановлену потужність 1,28-1,30.

Відомий трансформатор розподільної мережі - прототип [18, фіг. 17С], який містить з'єднання вторинних обмоток у зіг'заг та піврогач. Прототип містить три частини вихідних обмоток, кожна з яких по одній містить обмотки (1704А, 1704Е та 1704І), кожна з яких належить як з'єднанню обмоток у зіг'заг, так і з'єднанню обмоток у піврогач. Через це обмотки 1704А, 1704С, 1704D та 1704В мають різну площу поперечного перерізу і не можуть взаємно компенсувати радіальні та осьові складові магнітних полів розсіювання. Аналогічно не може бути досягнута компенсація магнітних полів розсіювання у з'єднанні обмоток 1704Е, 1704F, 1704G, 1704Н та у з'єднанні обмоток 1704І, 1704J, 1704K, 1704L

Недоліки прототипу

1. Недостатня кратність компенсації струмів вищих гармонік нульової послідовності, порядковий номер яких як кратний трьом, так і не кратний трьом, наприклад, виражений парним числом.

2. Незадовільна кратність компенсації струмів вищих гармонік прямої та зворотної послідовності, порядковий номер яких кратний  $6N \pm 1$ , де  $N$  - довільне ціле число.

3. Вплив магнітних полів розсіювання, які виникають в трансформаторах під дією струмів не тільки симетричних складових нульової послідовності, а і під дією гармонік, порядковий номер яких  $k$  рівний  $6N \pm 1$ , де  $N$  - ціле число.

4. Завищена встановлена потужність розподільного трансформатора, що потребує невиправданих витрат електротехнічної сталі та міді.

У зв'язку з указаними недоліками були поставлені наступні задачі.

1. Підвищити кратність компенсації вищих гармонік струмів нульової послідовності.

2. Забезпечити незалежність кратності компенсації вищих гармонік струмів нульової послідовності від порядкового номера гармоніки струму.

3. Підвищити кратність компенсації вищих гармонік струмів прямої та зворотної послідовностей, порядковий номер яких дорівнює  $6N \pm 1$ , де  $N$  - довільне ціле число.

4. Знизити втрати енергії в трансформаторах, обумовлені вищими гармоніками струмів прямої та зворотної послідовностей.

5. Знизити втрати енергії в трансформаторах, обумовлені вищими гармоніками струмів основної та вищих гармонік нульової послідовності.

6. Стабілізувати потенціал нульової фази відносно потенціалу землі, що приведе до покращення протипожежної ситуації та покращення техніки безпеки;

7. Збільшити К-фактор допустимих гармонік трансформатора розподільної мережі до 20-50.

Поставлені задачі вирішені шляхом узгодження імпульсного режиму споживання нелінійних електроприймачів із синусоїдним режимом роботи входу трансформатора розподільної мережі, а саме тим, що:

в трансформаторі або двох трансформаторах розподільної мережі, приєднаних первинними обмотками до високовольтної напруги 6 кВ-35 кВ, кожен з яких містить тристрижневий магнітопровід, на стрижнях якого розміщені первинні та вторинні обмотки з виводами, кожен трансформатор містить три вхідні затискачі лінійних фаз та вихідні затискачі, кількість вихідних затискачів кратна чотирьом, кількість четвірок вихідних затискачів рівна кількості трифазних чотирипровідних виходів трансформатора або двох трансформаторів розподільної мережі, кожен трифазний вихід може бути приєднаний до одного фідера, кожна четвірка вихідних затискачів складається із трьох вихідних затискачів лінійних фаз та одного вихідного затискача нульової фази, три вхідні затискачі лінійних фаз кожного трансформатора по одному приєднані до виводів первинних обмоток, кожен із трьох вихідних затискачів лінійних фаз по одному приєднаний до виводу вторинної обмотки, а кожен вихідний затискач нульової фази приєднаний до спільного вузла з'єднань частини вторинних обмоток (нейтралі), приєднаного до контуру заземлення,

первинні обмотки з'єднані за довільною схемою, а вторинні обмотки та магнітопровід кожного трансформатора суміщені із стабілізатором фаз,

вторинні обмотки кожного трансформатора разом з магнітопроводом виконані за умовами будови стабілізатора фаз, а саме: кількість намагнічуючих ампер-витків вторинних обмоток трансформатора дорівнює кількості розмагнічуючих ампер-витків вторинних обмоток кожного трифазного виходу для однофазних імпульсних або/та синусоїдних струмів навантаження, а взаємна компенсація осьових та радіальних складових магнітних полів розсіювання поза магнітопроводом забезпечена шляхом зближення або проникнення окремих проводів або груп проводів однієї вторинної обмотки у місця розташування окремих проводів або груп проводів інших вторинних обмоток.



Трансформатор містить два трифазні виходи, вторинна обмотка трансформатора має дві частини, кожна з яких приєднана до чотирьох вихідних затискачів одного виходу, обмотки першої частини ввімкнені у зигзаг, а обмотки другої частини ввімкнені за схемою нерівнобічного піврогача, причому у кожній із схем кожного однофазного виходу дві обмотки зигзагу суміщені з двома обмотками нерівнобічного піврогача, фазний кут між напругами однойменних фаз першого та другого виходу трифазних напруг складає  $15^\circ(\pi/12)$ .

Трансформатор містить три трифазні виходи, вторинна обмотка трансформатора має три частини, кожна з яких приєднана до чотирьох вихідних затискачів одного трифазного виходу, обмотки першої частини ввімкнені у зигзаг, обмотки другої та третьої частин ввімкнені за схемою нерівнобічного піврогача, причому у кожній із схем кожного однофазного виходу дві обмотки зигзагу суміщені з двома обмотками нерівнобічного піврогача.

Окремі проводи вторинних обмоток кожного трифазного виходу трансформатора намотані в окремих трьох котушках, кожна з яких розміщена на окремому стрижні магнітопроводу, причому провід однієї обмотки укладений упереміш та циклічно з проводами інших обмоток так, що кожен провід однієї обмотки оточений проводами інших обмоток.

Групи проводів вторинних обмоток одного трифазного виходу напруг трансформатора намотані в окремих трьох котушках, кожна з яких розміщена на окремому стрижні магнітопроводу упереміш і циклічно із групами проводів інших вихідних обмоток трансформатора.

Кожна вторинна обмотка принаймні одного трифазного виходу виконана у вигляді двох і більше паралельно ввімкнених обмоток, причому площа поперечного перерізу кожної із обмоток, ввімкненої у вказане паралельне з'єднання, зменшена, а кратність зменшення площі провідника дорівнює кількості паралельно з'єднаних обмоток меншого перерізу.

Принаймні одна вторинна обмотка принаймні одного трифазного виходу виконана у вигляді декількох послідовно ввімкнених обмоток, причому кратність зменшення кількості витків кожної із послідовно ввімкнених обмоток дорівнює кількості послідовних обмоток, а кожна з послідовно ввімкнених обмоток намотана на різних стрижнях.

У двох трансформаторах розподільної мережі, первинні обмотки яких приєднані до високовольтної мережі, первинна обмотка одного з трансформаторів ввімкнена у трикутник або зигзаг, а первинна обмотка другого з трансформаторів ввімкнена у зірку або рівнобічний піврогач.

Фазний кут між однойменними фазами трифазних виходів кожного з двох трансформаторів дорівнює  $15^\circ$  при загальній кількості виходів двох трансформаторів, рівній чотирьом, при цьому фазний кут між однойменними напругами першого та другого трифазних виходів складає  $15^\circ$ , між однойменними напругами першого та третього трифазних виходів складає  $30^\circ$ , і між однойменними напругами першого та четвертого трифазних виходів складає  $45^\circ$ .

Фазний кут між однойменними фазами трифазних виходів кожного з двох трансформаторів дорівнює  $10^\circ$  при загальній кількості виходів двох трансформаторів, рівній шести.

Фазний кут між однойменними фазами трифазних виходів кожного з двох трансформаторів дорівнює  $7,5^\circ$  при загальній кількості виходів двох трансформаторів, рівній восьми.

Фазний кут між однойменними фазами трифазних виходів кожного з двох трансформаторів дорівнює  $6^\circ$  при загальній кількості виходів двох трансформаторів, рівній десяти.

Фазний кут між однойменними фазами трифазних виходів кожного з двох трансформаторів дорівнює  $5^\circ$  при загальній кількості виходів двох трансформаторів, рівній дванадцяти.

Для пояснення суті винаходу на фіг. 1 - фіг. 18 дані відповідні креслення.

На фіг. 1 подана однолінійна блок-схема живлення нелінійних електроприймачів розподільної мережі за допомогою двох припасованих один до одного трансформаторів, обладнаних чотирма трифазними виходами.

На фіг. 2 показана однолінійна блок-схема живлення нелінійних електроприймачів розподільної мережі за допомогою одного трансформатора, обладнаного двома трифазними виходами.

На фіг. 3 дана блок-схема одного трансформатора, два трифазні виходи якого приєднані до фідерів для приєднання нелінійних електроприймачів.

На фіг. 4 подані принципові схеми варіантів виконання вторинних обмоток, ввімкнених за схемою рівнобічного піврогача.

На фіг. 5 показані принципові схеми варіантів виконання вторинних обмоток за схемою зигзаг.

На фіг. 6 подана принципова схема варіанта виконання первинних обмоток у трикутник та виконання двох частин вторинних обмоток трансформатора за схемою рівнобічного піврогача та зигзаг з нулем.

На фіг. 7 подана принципова схема варіанта виконання первинних обмоток у зірку та виконання вторинних обмоток трансформатора за схемами варіанта рівнобічного піврогача та зіг'загу з нулем.

5 На фіг. 8 дано топографічне зображення вторинних обмоток з двома трифазними виходами при послідовному з'єднанні обмоток фази та взаємній компенсації третіх, п'ятих та сьомих гармонік струму.

На фіг. 9 показане з'єднання вторинних обмоток з двома трифазними виходами при суміщенні двох обмоток зіг'загу зі схемою піврогача у кожній фазі для взаємної компенсації третіх, п'ятих та сьомих гармонік струму.

10 На фіг. 10 показане з'єднання вторинних обмоток з двома трифазними виходами при суміщенні двох обмоток схеми піврогача із обмотками зіг'загу у кожній фазі та взаємній компенсації третіх, п'ятих та сьомих гармонік струму.

На фіг. 11 подана конструкція вторинних обмоток схеми рівнобічного піврогача та зіг'загу із зближенням та взаємною проникністю проводів однієї обмотки з проводами двох інших обмоток, виконаних за схемою фіг. 6 та фіг. 8.

15 На фіг. 12 дано топографічне зображення вторинних обмоток з трьома трифазними виходами при послідовному з'єднанні обмоток фази та взаємній компенсації третіх, п'ятих, сьомих, одинадцятих, тринадцятих і т.і. гармонік струму.

20 На фіг. 13 дано топографічне зображення вторинних обмоток меншої встановленої потужності з трьома трифазними виходами при послідовному з'єднанні обмоток фази та взаємній компенсації третіх, п'ятих, сьомих, одинадцятих, тринадцятих, і т.і. гармонік струму (Схема "Півень").

25 На фіг. 14 дано топографічне зображення вторинних обмоток меншої встановленої потужності з трьома трифазними виходами при суміщенні трьох обмоток фази та взаємній компенсації третіх, п'ятих, сьомих, одинадцятих, тринадцятих, і т.і. гармонік струму (Схема "Худий півень").

30 На фіг. 15 дано топографічне зображення вторинних обмоток меншої встановленої потужності з трьома трифазними виходами при суміщенні шести обмоток фази та взаємній компенсації третіх, п'ятих, сьомих, одинадцятих, тринадцятих, і т.і. гармонік струму. (Схема "Худючий півень").

На фіг. 16 дано топографічне зображення вторинних обмоток меншої встановленої потужності з двома трифазними виходами при послідовному з'єднанні обмоток фази та взаємній компенсації третіх, одинадцятих, тринадцятих, і т.і. гармонік струму. (Схема "Півень").

35 На фіг. 17 дана схема вторинних обмоток меншої встановленої потужності з двома трифазними виходами при суміщенні однієї обмотки нерівнобічного піврогача з обмоткою зіг'загу у кожній фазі та взаємній компенсації третіх, одинадцятих, тринадцятих, і т.і. гармонік струму (Схема "Худий півень").

40 На фіг. 18 дана схема вторинних обмоток меншої встановленої потужності з двома трифазними виходами при суміщенні двох обмоток зіг'загу з однією обмоткою піврогача у кожній фазі та взаємній компенсації третіх, одинадцятих, тринадцятих, і т.і. гармонік струму (Схема "Худючий півень").

45 На фіг. 1 позначені: А1 - перша фаза першого трифазного (А1, В1, С1) виходу 5 першого трансформатора 1; 6 - другий трифазний вихід першого трансформатора 1; А2 - перша фаза першого трифазного виходу 9 другого трансформатора 8; 7 - шинопровід високої напруги, наприклад, 10 кВ; 2 - нелінійний електроприймач типу комп'ютера; 3 - нелінійний електроприймач типу двигуна, який живиться від трифазної мережі через перетворювач частоти; 4 - світлодіодна лампочка освітлювання; 9 - перший трифазний вихід другого трансформатора 8; 10 - другий трифазний вихід другого трансформатора 8; штрихові позначення - кількість проводів однолінійної схеми електропостачання; пунктирні лінії - пункти приєднання нелінійних приймачів 2, 3 та 4.

50 На фіг. 2 позначені: 11 - первинні обмотки трансформатора; 12 - вторинні обмотки трансформатора; А1 - перша фаза трифазного (А1, В1, С1) виходу 16 трансформатора; А2 - перша фаза трифазного (А2, В2, С2) виходу 20 трансформатора; 13 та 17 - нелінійні електроприймачі типу комп'ютера; 14 та 18 - нелінійні електроприймачі типу двигуна, який живиться від трифазної мережі через перетворювач частоти; 15 та 19 - світлодіодні лампочки освітлювання.

55 На фіг. 3 позначені: Авх., Ввх., Свх. - затискачі вхідних лінійних фаз трансформатора розподільчої мережі; А1, В1, С1 - затискачі вихідних лінійних фаз першого трифазного виходу; А2, В2, С2 - затискачі вихідних лінійних фаз другого трифазного виходу; Ових - затискач нульової фази трансформатора; О1 - затискач нульової фази першого трифазного виходу; О2 -



затискач нульової фази другого трифазного виходу; 21 - трансформатор; 22 - первинні обмотки трансформатора; 23 - вторинні обмотки трансформатора; 24 - фідери, приєднані до затискачів трифазних виходів трансформатора.

На фіг. 4, а позначені: 25-27 - обмотки фази А4 схеми з'єднання рівнобічного піврогача у першому варіанті виконання; 28-30 - обмотки фази В4 схеми з'єднання піврогача у першому варіанті виконання; 31-33 - обмотки фази С4 схеми з'єднання піврогача у першому варіанті виконання; 0 - спільна точка (нейтраль) з'єднань трьох обмоток; А4-С4 - зображення потенціалів фаз А4, В4 та С4 на комплексній площині.

На фіг. 4,б та фіг. 4, в позначені: ті ж самі обмотки 25-33, але у межах кожної фази з'єднані між собою у іншій послідовності. Решта позначень фіг. 4,б та фіг. 4в співпадає з позначеннями фіг. 4,а.

На фіг. 5,а позначені: А5, В5, С5 - зображення потенціалів фаз А5, В5 та С5 на комплексній площині; 34 та 37 - обмотки фази А5 схеми з'єднання у першому варіанті виконання; 35 та 36 - обмотки фази В5 схеми з'єднання зиг'заг у першому варіанті виконання; 38 та 39 - обмотки фази С5 схеми з'єднання зиг'заг у першому варіанті виконання.

На фіг. 5,б та фіг. 5,в позначені: ті ж самі обмотки 34-39, але у межах кожної фази з'єднані між собою у іншій послідовності; на фіг. 5,б схема набула назву "лямбда" (умовно несиметричний зиг'заг), а схема фіг. 5,в має назву зворотний зиг'заг. Решта позначень фіг. 5,б та фіг. 5,в співпадає з позначеннями фіг. 5,а.

На фіг. 6 позначені: 40-42 - первинні обмотки трансформатора, ввімкнені у трикутник; 43 - магнітопровід; 44 - перша частина вторинних обмоток трансформатора, ввімкнена у рівнобічний піврогач; 45 - друга частина вторинних обмоток трансформатора, ввімкнена у зиг'заг;  $\underline{U}(A1-0)$  та  $\underline{U}(A2-0)$  - вектори напруги на однойменних трифазних виходах;  $\alpha$  та  $\beta$  фазні кути систем трифазних напруг  $\underline{U}(A1-0)$  та  $\underline{U}(A2-0)$  першого та другого трифазного виходу відповідно; решта позначень фіг.6 співпадає з позначеннями фіг. 3.

На фіг. 7 позначені: 46-48 - первинні обмотки трансформатора, ввімкнені у зірку; 49 - магнітопровід; 50 - перша частина вторинних обмоток трансформатора, ввімкнена у рівнобічний піврогач; 51 - друга частина вторинних обмоток трансформатора, ввімкнена у зиг'заг; Свст - встановлена потужність вторинних обмоток; решта позначень фіг. 7 співпадає з позначеннями фіг. 3.

На фіг. 8 позначені: 56 та 58 - обмотки зиг'загу у фазі А1; 55 та 62 - обмотки зиг'загу у фазі В1; 61 та 65 - обмотки зиг'загу у фазі С1; 52-54 - обмотки рівнобічного піврогача у фазі А2; 57, 59, 63 - обмотки рівнобічного піврогача у фазі В2; 60, 64, 66 - обмотки рівнобічного піврогача у фазі С2; Свст - встановлена потужність (середня) вторинних обмоток заявленого трансформатора у порівнянні з встановленою потужністю зірки або трикутника; решта позначень фіг.8 співпадає з позначеннями фіг. 3.

На фіг. 9 позначені: 68, 70-72 - обмотки зиг'загу у фазі А1; 69, 74, 75 та 77 - обмотки зиг'загу у фазі В1; 76, 78-80 - обмотки зиг'загу у фазі С1; 67, 68, 70 - обмотки рівнобічного піврогача у фазі А2; 73, 74, 77 - обмотки рівнобічного піврогача у фазі В2; 76, 78, 81 - обмотки рівнобічного піврогача у фазі С2; решта позначень фіг. 9 співпадає з позначеннями фіг. 3 та фіг. 8.

На фіг. 10 позначені: 85, 86 та 89 - обмотки зиг'загу у фазі А1; 82, 87 та 90 - обмотки зиг'загу у фазі В1; 91, 92 та 95 - обмотки зиг'загу у фазі С1; 83, 84, 86 та 89 - обмотки рівнобічного піврогача у фазі А2; 87, 88, 90, 93 - обмотки рівнобічного піврогача у фазі В2; 91, 92, 94 та 96 - обмотки рівнобічного піврогача у фазі С2; решта позначень фіг. 10 співпадає з позначеннями фіг. 3 та фіг. 8.

На фіг. 11 позначені: 97 - магнітопровід; 98-100 - перший, другий та третій стрижень магнітопроводу; 101-103 - первинні високовольні обмотки трансформатора; ПР(А) - вторинні обмотки першого стрижня, які пов'язані з фазою А і виконані за схемою рівнобічного або нерівнобічного піврогача (ПР); ПР(В) - вторинні обмотки другого стрижня, які пов'язані з фазою В і виконані за схемою рівнобічного або нерівнобічного піврогача; ПР(С) - вторинні обмотки третього стрижня, які пов'язані з фазою С і виконані за схемою рівнобічного або нерівнобічного піврогача; зауважимо, що поняття та властивості рівнобічного піврогача відомі з 1905 року [1], а поняття та властивості нерівнобічного піврогача розроблені недостатньо; Z(А) - вторинні обмотки першого стрижня, які пов'язані з фазою А і виконані за схемою зиг'заг; Z(В) - вторинні обмотки другого стрижня, які пов'язані з фазою В і виконані за схемою зиг'заг; Z(С) - вторинні обмотки третього стрижня, які пов'язані з фазою С і виконані за схемою зиг'заг; 104, 106, 108, 110 - провідники або групи провідників обмотки 54 рівнобічного піврогача фіг. 8 фази А; 105 та 109 - провідники або групи провідників обмотки 57 рівнобічного піврогача фази В2 (фіг. 8); 107 та 111 - провідники або групи провідників обмотки 64 рівнобічного піврогача фази С2 (фіг. 8); 112, 114,

116,118 - провідники або групи провідників обмотки 62 рівнобічного піврогача фази В2 (фіг. 8); 113 та 117 - провідники або групи провідників обмотки 66 рівнобічного піврогача фази С2 (фіг. 8); 115 та 119 - провідники або групи провідників обмотки 53 рівнобічного піврогача фази А2 (фіг. 8); 120, 122, 124, 126 - провідники або групи провідників обмотки 60 рівнобічного піврогача фіг. 8 фази С2; 121 та 125 - провідники або групи провідників обмотки 52 рівнобічного піврогача фіг. 8 фази А2; 123 та 127 - провідники або групи провідників обмотки 63 рівнобічного піврогача фіг. 8 фази В2.

На фіг. 12 позначені: 128 - обмотки першого стрижня, які належать до фази А; 129 - обмотки першого стрижня, які належать до фази В; 130 - обмотки першого стрижня, які належать до фаз С; 131-133 - три послідовні з'єднання обмоток фаз С1, С2, С3; "Півень" - назва виду структури топографічного зображення схеми послідовних з'єднань вторинних обмоток трансформатора з декількома трифазними виходами; решта позначень фіг. 12 співпадає з позначеннями фіг. 3 та фіг. 8.

На фіг. 13 позначення співпадають з позначеннями фіг. 3, фіг. 8 та фіг. 12.

На фіг. 14 позначені: "Худий півень" - назва виду структури топографічного зображення схеми з'єднань вторинних обмоток трансформатора, у яких має місце суміщення однієї обмотки зигзагу та нерівнобічного піврогача на фазу; решта позначень фіг. 14 співпадає з позначеннями фіг. 3, фіг. 8 та фіг. 12.

На фіг. 15 позначені: "Худючий півень" - назва виду структури топографічного зображення схеми з'єднань вторинних обмоток трансформатора, у яких має місце суміщення двох обмоток зигзагу та нерівнобічного піврогача на фазу; решта позначень фіг. 15 співпадає з позначеннями фіг. 3, фіг. 8 та фіг. 12.

На фіг. 16 - фіг. 18 позначення співпадають з позначеннями фіг. 3, фіг. 8, фіг. 12 та фіг. 15.

Склад і будова. Трансформатор має два основні варіанти виготовлення. У першому з варіантів трансформатор має самостійне виконання (фіг. 2), а в другому варіанті трансформатор виконується у вигляді двох припасованих один до одного трансформаторів, кожен з яких має удвічі меншу потужність. Різниця між цими варіантами полягає у наступному: у другому варіанті виготовлення первинна обмотка першого трансформатора ввімкнена у трикутник (фіг. 6) або зигзаг, а первинна обмотка другого трансформатора ввімкнена у зірку (фіг. 7) або рівнобічний піврогач; у рівнобічному піврогачі співвідношення між кількостями витків обмоток рівне

$2:1:1; (1)$

за першим варіантом (при одинарному виготовленні) первинна обмотка трансформатора може мати довільне відоме з'єднання первинних обмоток (зірка, трикутник, зигзаг, лямбда, піврогач і т.і.). Друга особливість між цими основними варіантами полягає у різній будові схем виконання вторинних обмоток. У першому варіанті вторинні обмотки з'єднані між собою так, що всі трифазні виходи напруг утворюють  $n$  багатофазних напруг, фазний кут між якими рівний  $\alpha-\beta$ ,  $\alpha$  - фазний кут попереджуючої трифазної системи напруг трифазного виходу, а  $\beta$  - фазний кут відстаючої трифазної системи напруг трифазного виходу, а  $n=1, 2, 3, 4, 5, \dots, 12, \dots$  У другому варіанті вторинні обмотки з'єднуються так, що первинні обмотки першого трансформатора створюють  $n/2$  вихідних трифазних систем напруг з порядковими номерами 1, 2, 3, 4, 5, ...,  $n/2$ ; другу частину вихідних трифазних систем створюють вихідні обмотки другого трансформатора з порядковими номерами  $n/2+1, n/2+2, n/2+3, n/2+4, n/2+5, \dots, n$ . Вказане формування  $n$  трифазних виходів напруг трифазних виходів з допомогою двох трансформаторів знизило встановлену потужність трансформаторів і спростило технологію їх виготовлення.

В трансформаторі або двох трансформаторах розподільної мережі, приєднаних первинними обмотками до високовольтної напруги 6 кВ -110 кВ, кожен з яких містить тристрижневий магнітопровід, на стрижнях якого розміщені первинні 22 та вторинні 23 (фіг. 2) обмотки з виводами, кожен трансформатор містить три вхідні затискачі лінійних фаз Авх., Ввх., Свх. та вихідні затискачі А1, В1, С1, О1 та А2, В2, С2, О2, кількість яких кратна чотирьом; кількість четвірок вихідних затискачів рівна кількості трифазних чотирьопровідних виходів трансформатора або двох трансформаторів розподільної мережі; кожен вихід може бути приєднаним до одного фідера, кожна четвірка вихідних затискачів складається із трьох вихідних затискачів лінійних фаз та одного вихідного затискача нульової фази; три вхідні затискачі лінійних фаз кожного трансформатора по одному приєднані до виводів первинних обмоток, кожен із трьох вихідних затискачів лінійних фаз по одному приєднаний до виводу вторинної обмотки, а кожен вихідний затискач нульової фази приєднаний до спільного вузла з'єднань частини вторинних обмоток, приєданого до контуру заземлення (фіг. 1 - фіг. 3).

Вторинні обмотки трансформатора використовують різноманітні схеми з'єднань обмоток, основні з яких - піврогач та зигзаг. Піврогач - основна схема перетворювальної техніки для

трансформаторів нового покоління, а зиг'заг - його частковий (двообмотковий) випадок. Схема з'єднань обмоток рівнобічний піврогач має три варіанти виконання, показані на фіг. 4, а, б, в. У фазі А4 фіг.4,а обмотки 25-27 сполучені між собою у порядку 25-26-27. У фазі А4 фіг.4,б обмотки 25-27 сполучені між собою у порядку 26-27-25. У фазі А4 фіг. 4,в обмотки 25-27 сполучені між собою у порядку 26-25-27. Подібним чином вторинні обмотки з'єднані в інших фазах.

Схема з'єднань вторинних обмоток зиг'заг також має три основні варіанти з'єднань, показаних на фіг. 5, а, б, в. У фазі А5 фіг. 5,а обмотки 34 та 37 сполучені між собою у порядку 34-37. У фазі А5 фіг. 5,б обмотки 34 та 35 замінені на 37 та 34 відповідно і сполучені між собою у порядку 37-34. У фазах В5 та С5 фіг. 5,б обмотки 35 та 36, а також 38 та 39 замінені на обмотки 36 та 35, а також на обмотки 39 та 38 відповідно і сполучені між собою у порядку 36-35 та 39-38 відповідно.

Розташування обмоток на стрижнях магнітопроводу показане на фіг. 11. Первинні обмотки трансформатора, які показані на фіг. 6 та фіг. 7, розташовані на стрижнях магнітопроводу фіг. 11 і позначені числами 101-103. Первинні обмотки розташовані найближче до стрижнів. Перша частина вторинних обмоток зиг'загу 45 (фіг. 6) розташована на першому стрижні магнітопроводу і розміщена у котушці Z(A) (фіг. 11); друга частина вторинних обмоток зиг'загу 45 (фіг. 6) розташована на другому стрижні магнітопроводу і розміщена у котушці Z(B) (фіг. 11); третя частина вторинних обмоток зиг'загу 45 (фіг. 6) розташована на третьому стрижні магнітопроводу і розміщена у котушці Z(C) (фіг. 11). Перша частина вторинних обмоток, які з'єднані між собою у піврогач 44 (фіг. 6) і які з них розташовані на першому стрижні магнітопроводу, розміщені у котушці (у ряді, у шарі) ПР(А) (фіг. 11); друга частина вторинних обмоток, які з'єднані між собою у піврогач 44 (фіг. 6) і які з них розташовані на другому стрижні магнітопроводу, розміщені у котушці (у ряді, у шарі) ПР(В) (фіг. 11); третя частина вторинних обмоток, які з'єднані між собою у піврогач 44 (фіг. 6) і які з них розташовані на третьому стрижні магнітопроводу, розміщені у котушці (у ряді, у шарі) ПР(С) (фіг. 11).

Для кращого розуміння конструкції вторинних обмоток у котушках фіг. 11 принципову схему фіг. 3 приведемо до топографічного зображення, показаного на фіг. 8, на якому дані зображення обмоток зиг'загу (56, 58, 55, 62, 61, 65) та рівнобічного піврогача (52, 53, 54, 57, 63, 59, 60, 64, 66). Із пропорції (1) видно, що відношення чисел витків W обмоток рівнобічного піврогача задовольняють рівностям:

$$W_{54} : W_{52} : W_{53} = 2 : 1 : 1; (2)$$

$$W_{62} : W_{57} : W_{63} = 2 : 1 : 1; (3)$$

$$W_{60} : W_{66} : W_{64} = 2 : 1 : 1. (4)$$

Кожен із виразів (2)-(4) є першою необхідною умовою компенсації всіх вищих гармонік струмів нульової послідовності за допомогою вторинних обмоток, ввімкнених за схемою рівнобічний піврогач. У схемі з'єднань рівнобічного піврогача менші за кількість витків обмотки мають однакову кількість витків, тобто "рівні боки".

Поряд з умовами (2)-(4) обмотки схем зиг'загу та рівнобічного піврогача (фіг. 6 - фіг. 8) у з'єднаннях вторинних обмоток заявленого трансформатора використані схеми з'єднань зиг'заг та нерівнобічний піврогач (фіг. 9, фіг. 10, фіг. 12 - фіг. 18). У схемах нерівнобічного піврогача умови (2)-(4) не дотримуються.

У раніше заявлених патентах Левіна М.І. [11] та Тібо І. [18] вторинні обмотки трансформатора виконані за схемами зиг'заг та рогач, причому у вказаних патентах використане суміщення однієї із обмоток піврогача із обмоткою зиг'загу або суміщення двох піврогачів у рогач. В загальному плані таке суміщення оцінюється позитивно, якщо воно спрощує конструкцію котушок трансформатора, але таке суміщення дає одне ускладнення: з'являється проміжний вузол (точка розгалуження обмоток), наприклад вузол, який з'єднує обмотки 67, 68 та 71 (фіг. 9). Цей вузол з'являється всередині котушки і сполучає проводи з різними площами поперечного перерізу, що призводить до появи магнітних полів розсіювання і до втрати ефективності взаємної компенсації вищих гармонік струмів нульової послідовності.

Для компенсації магнітних полів розсіювання в трансформатор введені зміни:

- Зменшено кількість вузлів розгалуження вторинних обмоток трансформатора принаймні до одного на протязі частини кола від затискача вихідної лінійної фази, наприклад від затискача А1 до затискача нульової фази 01 (фіг. 14, фіг. 117 - схеми "Худий півень");

- Наближені проводи вихідних обмоток до допустимої відстані з врахуванням пробивного значення напруги ізоляції обмоточних проводів (фіг. 11);

- Введено взаємне проникнення проводів або груп проводів однієї обмотки у розташування проводів або груп проводів інших обмоток, розташованих на стрижні магнітопроводу (фіг. 8, фіг. 11, фіг. 12, фіг. 13);

- Застосовано послідовне з'єднання вторинних обмоток на протязі частини кола від затискача вихідної лінійної фази до точки нейтралі 0, з'єднаної з контуром заземлення (фіг. 8, фіг. 11, фіг. 12, фіг. 13, фіг. 16);

5 - Крайні виводи вихідних обмоток, які приєднані до затискача вихідної лінійної фази та нейтралі виконано двома проводами, зближеними між собою і звитими між собою, наприклад, у пушпул (на фігурах не показано);

- При суміщенні однієї обмотки зіг'загу з однією обмоткою піврогача застосовано поділ однієї обмотки на дві паралельно ввімкнені обмотки, площа поперечного перерізу кожної з яких зменшена удвічі;

10 - Застосовано суміщення двох обмоток зіг'загу з двома обмотками нерівнобічного піврогача (фіг. 9, фіг. 10, фіг. 15, фіг. 18);

- Застосовано поділ обмотки на декілька частин, кожна з яких намотана в різних місцях котушки для компенсації намагнічуючих ампер-витків та компенсації магнітних полів розсіювання;

15 - Введені нові схеми вторинних обмоток трансформатора: фіг. 6 - фіг. 10, фіг. 12 - фіг. 18;

- Змінена конструкція виготовлення трансформатора розподільної мережі з врахуванням взаємної компенсації вищих гармонік струмів прямої, зворотної та нульової послідовності: фіг. 11.

Робота трансформатора або двох трансформаторів розподільної мережі.

20 Корисність використання заявленого трансформатора полягає у компенсації вищих гармонік струмів прямої, зворотної та нульової послідовностей. Як зазначалось раніше, такі вищі гармоніки генерують нелінійні електроприймачі, кількість і різноманітність яких невинно зростає і становлять реальну загрозу для існуючого парку трансформаторів розподільної мережі.

25 Основними варіантами виконання є одинарне та парне виготовлення трансформаторів. На фіг. 2 показана однолінійна блок-схема живлення нелінійних електроприймачів розподільної мережі за допомогою одного одинарного трансформатора, обладнаного двома трифазними виходами. Робота трансформатора полягає у наступному. Нелінійні приймачі електричної енергії 13 (комп'ютери), 14 (двигуни з регульованою швидкістю) та 15 (освітлювальні лампочки)

30 приєднані до першого 16 та другого 20 фідерів трансформатора. Фідер 16 приєднаний до затискачів A1, B1 та C1 першого трифазного виходу вторинних обмоток 12 трансформатора розподільної мережі. Фідер 20 приєднаний до затискачів A2, B2 та C2 другого трифазного виходу вторинних обмоток 12 трансформатора розподільної мережі. Перший трифазний вихід трифазних напруг на затискачах A1, B1 та C1 формує фазні напруги  $U_{(A1-O)}$ ,  $U_{(B1-O)}$ ,  $U_{(C1-O)}$ ,

35 генеровані вторинною обмоткою 45, виконаною за схемою зіг'заг (фіг. 6):

$$U_{(A1-O)} = U(\phi) * e^{j(\omega t + 30^\circ)}; (5)$$

$$U_{(B1-O)} = U(\phi) * e^{j(\omega t - 120^\circ + 30^\circ)}; (6)$$

$$U_{(C1-O)} = U(\phi) * e^{j(\omega t - 240^\circ + 30^\circ)}. (7)$$

Другий трифазний вихід трифазних напруг на затискачах A2, B2 та C2 формує фазні напруги  $U_{(A2-O)}$ ,  $U_{(B2-O)}$ ,  $U_{(C2-O)}$ . генеровані вторинною обмоткою 44, виготовленою за схемою рівнобічний піврогач (фіг. 6):

$$U_{(A2-O)} = U(\phi) * e^{j(\omega t)}; (8)$$

$$U_{(B2-O)} = U(\phi) * e^{j(\omega t - 120^\circ)}; (9)$$

$$U_{(C2-O)} = U(\phi) * e^{j(\omega t - 240^\circ)}. (10)$$

45 Початковий кут відліку фазного кута напруги фази A зіг'загу 45 позначимо  $\alpha$ , а рівнобічного піврогача -  $\beta$ . Для спрощення запису покладемо  $\beta=0$  (фіг.6).

Щоб пояснити принцип компенсації вищих гармонік струмів нелінійних електроприймачів у вторинних обмотках трансформатора, звернемось до струму навантаження однофазного генератора змінного струму, який описується виразом на основній круговій частоті  $\omega$ , де  $\omega$  - кругова частота першої гармоніки напруги змінного струму;  $I(\omega)$  - вектор струму навантаження;  $\alpha$  - початковий фазний кут струму;  $I_1$  - амплітуда першої гармоніки струму.

$$I(\omega) = I_1 * e^{j(\omega t + \alpha)}; (11)$$

Якщо швидкість вала генератора розкрутити у  $k$  раз швидше, то вираз (11) запишемо у вигляді

55  $I(k\omega) = I_k * e^{j(k\omega t + k * \alpha)}; (12)$

де  $k$  - кратність збільшення частоти.

При одночасному генеруванні першої та  $k$ -ої гармоніки струму, наприклад, шляхом множення кількості пар полюсів, явище взаємної компенсації вищих гармонік струму доцільно розглядати при нерухомому (замороженому) куту  $\alpha$ . З цієї метою скористаємось топографічним методом дослідження електромагнітних кіл. Згідно з топографічним методом, при якому початок відліку фазних кутів переноситься у відносно нерухому систему координат, наприклад, в ротор генератора, швидкість обертання ротора стає нульовою. Фазний кут струму в обертовому роторі визначається при обертовій швидкості, яка є різницею між обертовою частотою вищої гармоніки  $k \cdot \omega$  та  $\omega$ . При цьому уявімо: ротор є нерухомим, а статор обертається з частотою  $\omega$ . Струм вищої гармоніки у колі ротора запишемо виходячи з (11) та (12)

$$I((k-1)\omega) = I_k \cdot e^{j((k-1)\omega t + (k-1)\alpha)}; \quad (13)$$

Виходячи з виразу (13), запишемо умову компенсації струмів вищих гармонік у нерухомому трансформаторі (роторі) розподільної мережі, а саме - у магнітних полях стрижня тристрижневого магнітопроводу,

$$I(k-1, \omega, \text{ПР}) \cdot e^{j((k-1)\omega t + (k-1)\alpha(\text{ПР}))} + I(k-1, \omega, Z) \cdot e^{j((k-1)\omega t + (k-1)\alpha(Z))} = 0. \quad (14)$$

З виразу (14) витікає перша умова взаємної компенсації струмів прямої послідовності вищих гармонік: амплітуди струмів вищих гармонік прямої послідовності у колах вторинних обмоток нерівнобічного піврогача повинні дорівнювати амплітудам струмів вищих гармонік прямої послідовності у колах вторинних обмоток зигзагу.

$$I(k-1, \omega, \text{ПР}) = I(k-1, \omega, Z). \quad (15)$$

Тому при проектуванні слід нелінійні електроприймачі рівномірно розподіляти між фідерами трансформатора розподільної мережі. Ступінь взаємної компенсації струмів вищих гармонік зворотно пропорційна різниці струмів вищих гармонік фідерів 16 та 20 (фіг. 2, фіг. 6).

Фазний кут зсуву трифазної системи напруг одного із трифазних фідерів, наприклад, 20 може бути довільним. Тому  $\alpha(\text{ПР})$  рівнобічного піврогача прирівнюємо до нуля.

$$\alpha(\text{ПР}) = 0.$$

Умова (14) взаємної компенсації струмів прямої послідовності вищих гармонік повинна бути справедливою при довільних значеннях  $t$ , зокрема при  $t=0$ . Враховуючи це та попереднє зауваження із (14) випливає:

$$.; \quad (16)$$

Після розв'язку (16) одержимо:

$$(k-1) \cdot \alpha(Z) = G \cdot \pi; \quad (17)$$

звідки

$$\alpha(Z) = G \cdot \pi / (k-1); \quad (18)$$

де:  $G$  - ціле довільне непарне число.

Вираз (18) є другою умовою взаємної компенсації струмів прямої послідовності вищих гармонік.

Умови (15) та (18) дають можливість одержати повну компенсацію струмів вищих гармонік прямої послідовності. При частковому порушенні умов (15) та (18) має місце часткова взаємна компенсація струмів вищих гармонік прямої послідовності.

Описаним вище чином можна вивести умови взаємної компенсації струмів вищих гармонік зворотної послідовності:

$$(k+1, \omega, \text{ПР}) = I(k+1, \omega, Z); \quad (19)$$

$$\alpha(Z) = G \cdot \pi / (k+1); \quad (20)$$

де:  $I(k+1, \omega, \text{ПР})$  та  $I(k+1, \omega, Z)$  амплітуди струмів зворотної послідовності вищих гармонік нелінійних електроприймачів у фідерах 16 та 20, які прямують у кола вторинних обмоток трансформатора (нерівнобічного піврогача та зигзагу).

У таблиці 1 наведені значення кратності взаємної компенсації (подавлення) вищих гармонік прямої, зворотної та нульової послідовностей з порядковим номером  $k$ .

Таблиця 1

Номер $k$	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25
Кратність подавлення	$\geq 10$	$> 10$	$> 10$	$\geq 10$	1	1	$\geq 10$	$> 10$	$> 10$	$\geq 10$	1	1

На фіг. 2 показана однолінійна блок-схема живлення нелінійних електроприймачів розподільної мережі за допомогою одиночного трансформатора, обладнаного двома трифазними виходами. Схема з'єднання затисків вихідних фаз трансформатора з проводами

фідерів показана на фіг. 3. На фіг. 6 подана принципова схема варіанта виконання з'єднань первинних обмоток у трикутник та виконання двох частин вторинних обмоток трансформатора за схемою рівнобічний піврогач та зіг'заг з нулем. На фіг. 7 подана принципова схема варіанта виконання з'єднань первинних обмоток у зірку та виконання двох частин вторинних обмоток трансформатора за видозміненою схемою рівнобічного піврогача та схемою зіг'загу з нулем. Як це вказано на фіг. 6, фазний кут між однойменними фазами вихідних трифазних систем напруг двох виходів складає  $30^\circ$  ( $\alpha(Z)=30^\circ$ ). Підставимо значення  $\alpha(Z)$  в (18) та (20). Одержимо значення порядкових номерів  $k$  вищих гармонік струмів прямої та зворотної послідовностей, які взаємно компенсуються у вторинних обмотках трансформатора (фіг. 6 та фіг. 7). Значення  $k$  та кратність заглушення помістимо в таблицю 1. За даними таблиці 1 для значення  $\alpha(Z)=30^\circ$  встановлюємо, що схеми з'єднань вторинних обмоток трансформатора, показані на фіг. 6 та фіг. 7, придатні для повної компенсації струмів вищих гармонік прямої та зворотної послідовностей, порядкові номери яких рівні 3, 5 та 7, 17 та 19, 29 та 31, і т.і. Ще раз підкреслимо, що умови, описані виразами (15) та (18)-(20), є умовами повного заглушення вищих гармонік.

У випадку, коли умови (15) та (19) співпадають, а умови (18) та (20) не співпадають, має місце часткова взаємна компенсація струмів вищих гармонік прямої та зворотної послідовностей. Наприклад, якщо нелінійні приймачі електричної енергії, приєднані до фідерів 16 та 20 (фіг. 2) генерують вищі гармоніки струмів восьмої гармоніки прямої послідовності, то на вході розподільного трансформатора має місце чотирикратне їх заглушення, що цілком достатньо для запитів практики. Звідси висновок про те, що можливості взаємної компенсації вищих гармонік струмів значно вищі, ніж ті можливості, які впливають із виразів (15) та (18)-(20).

Але вказані можливості істотно розширені за рахунок того, що кожна із схем з'єднань частин (наприклад частин 44 та 45 фіг. 6) вторинних обмоток трансформатора більш ефективно виконують функції взаємної компенсації вищих гармонік струмів нульової послідовності при компенсації магнітних полів розсіювання. Так кожен частину вторинних обмоток, які входять до складу схем фіг. 6, фіг. 7, фіг. 8 - фіг. 10, фіг. 12 - фіг. 18, слід розглядати як окремі компенсатори струмів нульової послідовності. Здебільшого їх робота описана у патентах [1-18] і не потребує доповнень за винятком зниження встановленої потужності компенсаторів струмів нульової послідовності.

На фіг. 6 - фіг. 10, фіг. 12 - фіг. 18 вказані значення встановленої потужності  $S_{вст.}$  запропонованих вторинних обмоток трансформатора. Трансформатори, виконані за фіг. 6 - фіг. 8, фіг. 12, мають однакові встановлені потужності з відомими трансформаторами, але мають кращу кратність заглушення гармонік струмів нульової послідовності. А решта вказаних трансформаторів мають істотно менші значення встановленої потужності, що свідчить про менші витрати електротехнічної сталі та міді на 1 кВА потужності.

На фіг. 11 показана конструкція котушок трансформатора розподільної мережі з компенсацією магнітних полів розсіювання. Котушки первинних обмоток 101-103 виконані без врахування шкідливої дії магнітних полів розсіювання, оскільки взаємна компенсація струмів вищих гармонік відбувається у вторинних обмотках та стрижнях магнітопроводу трансформатора. У першій котушці первинних обмоток ПР(А) розміщені проводи або групи проводів 104-111 трьох обмоток, які по одній входять до трьох піврогачів. Ці проводи (або їх групи), які належать до однієї обмотки, намотані упереміш та циклічно із проводами (або їх групами) інших обмоток. Котушка ПР(А) містить обмотки 54 (фаза А2), 57 (фаза В2) та 64 (фаза С2) (фіг. 8), проводи яких або їх груп на фіг. 11 позначені числами 104-111. На другому стрижні 99 магнітопроводу розміщена котушка ПР(В). На ній намотані упереміш і циклічно провідники (або їх групи) обмоток 59 (фаза В2), 66 (фаза С2) та 53 (фаза А2) (фіг. 8), проводи яких або їх груп на фіг. 11 позначені числами 112-119. На третьому стрижні 100 магнітопроводу (фіг. 11) розміщена котушка ПР(С). На ній намотані упереміш і циклічно провідники (або їх групи) обмоток 60 (фаза С2), 52 (фаза А2) та 63 (фаза В2) (фіг. 8), проводи яких або їх груп на фіг. 11 позначені числами 120-127. Вказаний спосіб розташування провідників різних обмоток упереміш та циклічно забезпечує зближення та проникність провідників однієї обмотки у інші обмотки і навпаки. Подібна циклічність укладки проводів різних обмоток забезпечує не тільки взаємну компенсацію осьових та радіальних складових магнітних полів розсіювання, а і дозволяє автоматизувати процес намотки котушок трансформатора.

На першому, другому та третьому стрижнях магнітопроводу трансформатора розміщені по одній котушці Z(A), Z(B), Z(C) (фіг. 11), в яких намотані вторинні обмотки зіг'загу: на першому стрижні 101 у котушці Z(A) намотані обмотки 58 та 65 зіг'загу (фіг. 8); на другому стрижні 102 у котушці Z(B) намотані обмотки 56 та 62 зіг'загу (фіг. 8); на третьому стрижні 103 у котушці Z(C)

намотані обмотки 55 та 61 зиг'загу (фіг. 8). Як і у випадку піврогача, так і у випадку зиг'загу взаємна компенсація магнітних полів розсіювання досягається зближенням обмоток зиг'загу та взаємним проникненням проводів однієї з обмоток усередину розташування проводів другої обмотки.

На фіг. 8 дано топографічне зображення вторинних обмоток з двома трифазними виходами при послідовному з'єднанні обмоток фази (без суміщення обмоток). Схема взаємно компенсує треті, п'яті та сьомі гармоніки струму. Схема фіг. 8 має найбільший ступінь взаємної компенсації магнітних полів, викликаних струмами вищих гармонік прямої, зворотної та нульової послідовностей. Вторинні обмотки фіг. 8 які мають встановлену потужність  $S_{вст.}$ , рівну 1,24.

На фіг. 9 показане топографічне зображення вторинних обмоток трансформатора з двома трифазними виходами, у якому дві обмотки зиг'загу суміщені із двома обмотками схеми нерівнобічного піврогача у кожній фазі для взаємної компенсації п'ятих та сьомих гармонік струму. На фіг. 10 подано топографічне зображення вторинних обмоток трансформатора з двома трифазними виходами, у якому дві обмотки схеми піврогача суміщені із двома обмотками зиг'загу у кожній фазі для взаємної компенсації п'ятих та сьомих гармонік струму.

Схеми фіг. 8 - фіг. 10 є варіантами виконання вторинних обмоток трансформатора, здатного компенсувати гармоніки струмів, а саме: 3-ю, 5-ту, 7-му, 9-ту, 15-ту, і т.і. За допомогою цих схем принципово не можна компенсувати струми 11-ої гармоніки зворотної послідовності та 13-ої гармоніки прямої послідовності. Решту струмів вищих гармонік за допомогою таких схем можна компенсувати лише частково, але істотно. Так, кратність компенсації 8-их гармонік струмів зворотної послідовності рівна 1,4, а кратність компенсації 8-их гармонік струмів прямої послідовності рівна 4.

Розглянемо топографічні зображення вторинних обмоток, приведених на фіг. 12 - фіг. 15. Ці схеми обмоток мають три трифазні виходи з фазним кутом  $20^\circ$  між сусідніми вихідними однойменними напругами. На фіг. 12 у схемі вторинних обмоток застосовано три варіанти схем піврогача: рівнобічний піврогач та два нерівнобічних піврогачі; схема містить послідовні з'єднання обмоток (від затискача лінійної вихідної фази до затискача нульової фази). Таке виконання є зручним при конструюванні котушки обмоток на кожному стрижні, автоматизувати намотку вторинних обмоток, а також компенсувати магнітні потоки розсіювання струмів вищих гармонік.

На фіг. 13 дана схема, вторинні обмотки якої складаються із обмоток зиг'загу та із двох нерівнобічних піврогачів. Структура схем фіг. 12 та фіг. 13 не містить суміщень обмоток зиг'загу та піврогача (структури обмоток - "Півень"). Встановлена потужність схеми фіг. 13 на 1,7 % менша від встановленої потужності схеми фіг. 12.

На фіг. 14 дано топографічне зображення вторинних обмоток також з трьома трифазними виходами. Схема обмоток фіг. 14 (структура "Худий півень") містить суміщення однієї обмотки зиг'загу з двома обмотками двох нерівнобічних піврогачів. Структури обмоток фіг. 13 та фіг. 14 мають однакову встановлену потужність 1, 26.

На фіг. 15 подана схема, основна відмінність якої полягає у суміщенні двох обмоток зиг'загу з двома обмотками кожного з двох нерівнобічних піврогачів, що дає можливість спростити конструкції котушок вторинних обмоток трансформатора та покращити ступінь компенсації магнітних полів розсіювання.

Корисність схем вторинних обмоток, поданих на фіг. 12 - фіг. 15, полягає у широкому спектрі взаємної компенсації струмів вищих гармонік. Кути зсуву трифазних напруг трифазних виходів рівні  $\pm 20^\circ$ . У таблиці 2 показана залежність кратності компенсації (заглушення) струмів вищих гармонік від порядкового номера к вищих гармонік при умовах (15), (18)-(20). У цьому випадку необхідно до трансформатора розподільчої мережі приєднати три фідери з майже однаковими нелінійними електроприймачами.

Таблиця 2

Номер к	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25
Кратність заглушення	$\geq 10$	$> 10$	$> 10$	$\geq 10$	$> 10$	$> 10$	$\geq 10$	1	1	$\geq 10$	$> 10$	$> 10$

На фіг. 16 - фіг. 18 у топографічному зображенні показані схеми вторинних обмоток трансформаторів з двома трифазними виходами. Кути зсуву трифазних напруг трифазних виходів рівні  $15^\circ$ . В одиночному застосуванні такий трансформатор не використовується. Два такі припасовані трансформатори приєднані первинними обмотками до високовольтної мережі 7, наприклад, 10 кВ (фіг. 1). У цих трансформаторах первинна обмотка першого

трансформатора ввімкнена у трикутник, а первинна обмотка другого трансформатора ввімкнена у зірку. Заявлені схеми вторинних обмоток фіг. 16-фіг. 18 трансформатора мають найменшу встановлену потужність  $S_{вст}$ , яка не перевищує 1,22, що лише на 5,6 % більша встановленої потужності зіг'загу.

Структура схеми вторинної обмотки трансформатора, показаної на фіг. 16 (структура "Півень") не має вузлів розгалуження обмоток; у кожній фазі обмотки між собою з'єднані послідовно у межах від затискача лінійної фази до затискача нейтралі.

Структура схеми вторинної обмотки трансформатора, показаної на фіг. 17 (структура "Худий Півень") має один вузол розгалуження обмоток, тобто у кожній фазі вторинних обмоток одна із обмоток нерівнобічного піврогача суміщена з однією з обмоток зіг'загу.

Структура схеми вторинної обмотки трансформатора, показаної на фіг. 18 (структура "Худючий Півень") має один вузол розгалуження обмоток, а у кожній фазі вторинних обмоток дві обмотки зіг'загу суміщені із двома обмотками нерівнобічного піврогача.

При використанні вторинних обмоток у з'єднанні двох трансформаторів (фіг. 1) до затискачів двох трансформаторів слід приєднати чотири фідери 5, 6 та 9, 10 з рівномірно розподіленими між ними нелінійними електроприймачами. Фазний кут зсуву однойменних найближчих фаз трифазних напруг трифазних виходів рівний:

- між першою та другою фазами -  $15^\circ$ ;
- між першою та третьою фазами -  $30^\circ$ ;
- між першою та четвертою фазами -  $45^\circ$ .

У таблиці 3 показана залежність кратності компенсації (заглушення) струмів вищих гармонік від порядкового номера к вищих гармонік при умовах (15) та (18)-(20) для двох паралельно ввімкнених трансформаторів, вторинні обмотки яких виготовлені за схемами фіг. 16 - фіг. 18, причому первинні обмотки першого з двох трансформаторів сполучені між собою за схемою трикутника або зіг'зага, а первинні обмотки другого трансформатора з'єднані за схемою зірки або рівнобічного піврогача.

Таблиця 3

Номер к	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25
Кратність заглушення	$\geq 10$	$> 10$	$> 10$	$\geq 10$	$> 10$	$> 10$	$\geq 10$	$> 10$	$> 10$	$\geq 10$	$> 10$	$> 10$

Як видно з таблиць 1, 2 та 3, кількість гармонік струму, які заглушує заявлений трансформатор розподільчої мережі залежить від кількості трифазних виходів напруг і кількості фідерів, приєднаних до трансформатора. В таблицях 1-3 наведені дані про спроможність заглушення вищих к-их гармонік до 25-ої гармоніки струму включно. Кожна з таблиць може бути продовжена і можна показати, що цикли заглушення вищих гармонік струмів прямої і зворотної послідовності можна продовжити до соті гармоніки і вище. Порядковий номер к гармонік струму прямої та зворотної послідовностей визначається з виразу

$$k=6N \pm 1, (21)$$

де N - довільне ціле число. Гармоніки струму прямої послідовності здебільшого визначають за виразом  $k=6N+1$ , а порядковий номер гармонік струму зворотної послідовності здебільшого визначають за виразом  $k=6N-1$ . У більшості випадків вказані правила підтверджуються, але не завжди. У загальному випадку кожні три к-і гармоніки струмів у фазах розподільної мережі можуть бути прямої, зворотної та/або нульової послідовності. При цьому к може бути як непарним, так парним числом.

Спектр струмів в існуючих розподільчої мережі можна оцінити за допомогою К-фактора ( $K_f$ ), який визначається з виразу

$$K_f = \frac{\sum_{k=1}^{\infty} (I_k \cdot k)^2}{\sum_{k=1}^{\infty} (I_k)^2}, (22)$$

де  $I_k$  - струм вищої гармоніки, порядковий номер якої рівний k. Більш як 15 років тому вищі гармоніки струмів розподільної мережі та окремих електроприймачів почали оцінювати К-фактором у межах від 1 до 20 (1, 4, 7, 13, 20). Для розуміння приблизного спектра струмів при  $K_f$  рівному 20, наведемо приклад спектра струму, який відповідає К-фактору, рівному 20. Цей спектр наведено у таблиці 4 за даним стандарту США "ANSI/IEEE C57.110". Уданий час, як показали наші вимірювання, спектр струмів вищих гармонік зміщується в область вищих гармонік, наприклад, гармонік 3



Таблиця 4

к	1	3	5	7	9	11	13	15
Ik, %	50	50	65	25	20	4	3	3

частотами 550-2450 Гц, що свідчить про тенденцію збільшення К-фактора до 20-50, що приводить до перегляду способів проектування трансформаторів розподільних мереж. Цим новим вимогам відповідають трансформатори запропоновані у даному патенті.

Заявлені трансформатори мають здатність не тільки знижувати опори нульової послідовності трансформатора струмам вищих гармонік не менш ніж у 8-12 разів, а і зменшувати струми у найбільш навантажених фазах, особливо при живленні однофазних навантажень (до 33 %). Це дає можливість зменшити втрати активної енергії до 7,5 разу.

Скорочення втрат енергії має місце також при живленні нелінійних навантажень від заявлених трансформаторів в результаті взаємної компенсації струмів вищих гармонік. Попередні результати вказують на можливість у декілька разів зменшити втрати енергії і позбутись додаткового нагріву магнітопроводу та бака трансформатора, що дозволяє зберегти пропускну здатність трансформатора по потужності.

У даному патенті особлива роль надається трансформаторам, які живлять множину однотипних нелінійних навантажень, наприклад, пристроїв для зарядки акумуляторних батарей. При загальній кількості виходів двох трансформаторів, рівній шести фазний кут між однойменними фазами трифазних виходів кожного з двох трансформаторів дорівнює 10°. При загальній кількості виходів двох трансформаторів, рівній восьми фазний кут між однойменними фазами трифазних виходів кожного з двох трансформаторів дорівнює 7,5°. При загальній кількості виходів двох трансформаторів, рівній десяти фазний кут між однойменними фазами трифазних виходів кожного з двох трансформаторів дорівнює 6°. При загальній кількості виходів двох трансформаторів, рівній дванадцяти фазний кут між однойменними фазами трифазних виходів кожного з двох трансформаторів дорівнює 5°.

Область використання - розподільні мережі загального і спеціального користування.

Джерела інформації:

1. Compagnie Generale D'electricite de Crell. Systeme d'enroulement pour transformateurs et bobines a courant triphase. Патент Франції № 352129, XII.5, 1905.

2. Rudenberg R. Transient performance of electric power system. New York-Toronto-London. 1950. Розділ 49, фіг. 632 та фіг. 633.

3. Патент Угорщини № 184986, H02M 7/02. Публікований 1987. Установка для випрямлення трифазної напруги з двома трансформаторами.

4. Zhou D., Guskov N.N., Skibinski G.L. Twelve-phase transformer configuration. Патент США № 6,198,647. МПК H02M 5/06. Публіковано 2001.

5. Электротехнический справочник. Т.1. Под ред. Грудинского. М., "Энергия", 1975, С.381.

6. Музиченко Ю.О., Музиченко О.Д. Трансформатор розподільчої трифазної мережі. Патент України на винахід № 44488, МПК H01F 30/12, публіковано 15.02.2002, Бюл. № 2.

7. Menke W.W., Croft F.B., Nay J.J. Power distribution transformer for non-linear loads.

Патент США № 5416458, МПК H01F 33/00, публіковано 16.05.1995.

8. Левин М.С., Лещинская Т.Б. Анализ несимметричных режимов сельских сетей 0,38 кВ //Электричество. - 1999. - № 5. - С. 18-22.

9. Трансформаторы типа ТМ, ТМГ со специальным встроенным симметрирующим устройством, Республика Беларусь. metz.by/publication/library//36.html.

10. Levin M.I. Phase shifting transformer or autotransformer. Patent USA No 5543771. H01F 33/00, 6.08.1996.

11. Levin M.I. Phase shifting transformer with low zero phase sequence impedance. Patent USA No 5801610. H01F 33/00, 1.08.1998.

12. Пентегов И.В., Волков И.В., Levin M.I. Устройства для подавления высших гармоник тока. //Технічна електродинаміка. Проблеми сучасної електротехніки. - Частина 1. - Київ. - 2002. - С. 13-22.

13. Музиченко Ю.О., Музиченко О.Д., Фільтр вищих гармонік струмів трифазної мережі (варіанти). Патент України на винахід № 74671. МПК H02M 1/12, H02M 7/53, H02n 7/08, Публ. 16.01.2006 Бюл. № 1.

14. Музиченко Ю.О., Музиченко О.Д., Фільтр струмів вищих гармонік трифазної мережі (варіанти). Патент України на винахід № 74703. МПК H01F 30/12; H02M 7/53, H02H 7/08,. Публ. 16.01.2006 Бюл. № 1.

5 15. Owen D.W. Transformer, system and method to control harmonic distortion. Patent USA No 6169674. МПК H02M 5/10; H02M 7/17; 7/12; 5/02; 363/64 007/00. Публ. 2.01.2001

16. Kammeter J.B. Harmonic cancellation system, Patent USA No 5343080. МПК H01F 27/38; 30/14; 27/34; H02J 3/01; 307/105. Публ. 30.08.1994.

17. Kammeter J.B. Harmonic cancellation system, Patent USA No 5434455. МПК H02J 3/01; 307/105. Публ. 30.08.1994.

10 18. Thibault Y., Boudrias J.-G., Broullete S., Pregent G. Field-adjustable phase shifting transformer. Патент США № 6930578, МПК H01F 30/12, публіковано 16.08.2005.

19.Музиченко О.Д., Музиченко Ю.О., Стабілізатор фаз багатофазної трифазної системи. Патент України на винахід № 107054. МПК H02M 1/12, H02M 7/08, H02J 3/00, H02F 30/12. Публ. 10.11.2014 Бюл. 21.

15 20. Музиченко О.Д., Музиченко Ю.О., Стабілізатор фаз та його властивості. //Технічна електродинаміка. - Наукова думка. - Київ. – 2014 - № 1. - С.57-66

#### ФОРМУЛА ВІНАХОДУ

20 1. Трансформатор або два трансформатори розподільної мережі, що приєднані первинними обмотками до високовольтної напруги 6 кВ - 35 кВ, кожен з яких містить тристрижневий магнітопровід, на стрижнях якого розміщені первинні та вторинні обмотки з виводами, кожен трансформатор містить три вхідні затискачі лінійних фаз та вихідні затискачі, кількість вихідних затискачів кратна чотирьом, кількість четвірок вихідних затискачів рівна кількості трифазних  
25 чотирипровідних виходів трансформатора або двох трансформаторів розподільної мережі, кожен трифазний вихід може бути приєднаний до одного фідера, кожна четвірка вихідних затискачів складається із трьох вихідних затискачів лінійних фаз та одного вихідного затискача нульової фази, три вхідні затискачі лінійних фаз кожного трансформатора по одному приєднані до виводів первинних обмоток, кожен із трьох вихідних затискачів лінійних фаз по одному  
30 приєднаний до виводу вторинної обмотки, а кожен вихідний затискач нульової фази приєднаний до спільного вузла з'єднань частини вторинних обмоток (нейтралі), приєднаного до контуру заземлення, який **відрізняється** тим, що первинні обмотки з'єднані за довільною схемою, а вторинні обмотки та магнітопровід кожного трансформатора суміщені із стабілізатором фаз, вторинні обмотки кожного трансформатора разом з магнітопроводом виконані за умовами  
35 будови стабілізатора фаз, а саме: кількість намагнічуючих ампер-витків вторинних обмоток трансформатора дорівнює кількості розмагнічуючих ампер-витків вторинних обмоток кожного трифазного виходу для однофазних імпульсних або/та синусоїдних струмів навантаження, а взаємна компенсація осьових та радіальних складових магнітних полів розсіювання поза магнітопроводом забезпечена шляхом зближення або проникнення окремих проводів або груп  
40 проводів однієї вторинної обмотки у місця розташування окремих проводів або груп проводів інших вторинних обмоток.

2. Трансформатор за п. 1, який **відрізняється** тим, що у кожній фазі принаймні одного трифазного виходу (напруг) трансформатора вторинні обмотки між собою з'єднані послідовно, при цьому одна фаза одного трифазного виходу гальванічно зв'язана із будь-якою іншою фазою  
45 довільного трифазного виходу у точці нейтралі.

3. Трансформатор за будь-яким з пп. 1 або 2, який **відрізняється** тим, що трансформатор містить два трифазні виходи, вторинна обмотка трансформатора має дві частини, кожна з яких приєднана до чотирьох вихідних затискачів одного виходу, обмотки першої частини ввімкнені у  
50 зигзаг, а обмотки другої частини ввімкнені за схемою рівнобічного піврогача, при цьому фазний кут між напругами однойменних фаз першого та другого трифазних виходів трансформатора складає  $30^\circ$  ( $\pi/6$ ), а обмотки у кожній із схем кожного однофазного виходу між собою з'єднані послідовно.

4. Трансформатор за будь-яким з пп. 1 або 2, який **відрізняється** тим, що трансформатор містить два трифазні виходи, вторинна обмотка трансформатора має дві частини, кожна з яких  
55 приєднана до чотирьох вихідних затискачів, обмотки першої частини вторинних обмоток ввімкнені у зигзаг, а обмотки другої частини ввімкнені за схемою нерівнобічного піврогача, фазний кут між напругами однойменних фаз першого та другого виходу трифазних напруг складає  $\pm 20^\circ$  ( $\pm \pi/9$ ), а обмотки у кожній із схем кожного однофазного виходу обмотки між собою з'єднані послідовно.



піврогача, причому у кожній із схем кожного однофазного виходу дві обмотки зигзагу суміщені з двома обмотками нерівнобічного піврогача.

15. Трансформатор за будь-яким з пп. 1-14, який **відрізняється** тим, що окремі проводи вторинних обмоток кожного трифазного виходу трансформатора намотані в окремих трьох котушках, кожна з яких розміщена на окремому стрижні магнітопроводу, причому провід однієї обмотки укладений упереміш та циклічно з проводами інших обмоток так, що кожен провід однієї обмотки оточений проводами інших обмоток.

16. Трансформатор за будь-яким з пп. 1-14, який **відрізняється** тим, що групи проводів вторинних обмоток одного трифазного виходу напруг трансформатора намотані в окремих трьох котушках, кожна з яких розміщена на окремому стрижні магнітопроводу упереміш і циклічно із групами проводів інших вихідних обмоток трансформатора.

17. Трансформатор за будь-яким з пп. 1-16, який **відрізняється** тим, що кожна вторинна обмотка принаймні одного трифазного виходу виконана у вигляді двох і більше паралельно ввімкнених обмоток, причому площа поперечного перерізу кожної із обмоток, ввімкненої у вказане паралельне з'єднання, зменшена, а кратність зменшення площі провідника дорівнює кількості паралельно з'єднаних обмоток меншого перерізу.

18. Трансформатор за пп. будь-яким з 1-17, який **відрізняється** тим, що принаймні одна вторинна обмотка принаймні одного трифазного виходу виконана у вигляді декількох послідовно ввімкнених обмоток, причому кратність зменшення кількості витків кожної із послідовно ввімкнених обмоток дорівнює кількості послідовних обмоток, а кожна з послідовно ввімкнених обмоток намотана на різних стрижнях.

19. Трансформатор за п. 1, який **відрізняється** тим, що у двох трансформаторах розподільної мережі, первинні обмотки яких приєднані до високовольтної мережі, первинна обмотка одного з трансформаторів ввімкнена у трикутник або зигзаг, а первинна обмотка другого з трансформаторів ввімкнена у зірку або рівнобічний піврогач.

20. Трансформатор за будь-яким з пп. 1 або 19, який **відрізняється** тим, що фазний кут між однойменними фазами трифазних виходів кожного з двох трансформаторів дорівнює  $15^\circ$  при загальній кількості виходів двох трансформаторів, рівній чотирьом, при цьому фазний кут між однойменними напругами першого та другого трифазних виходів складає  $15^\circ$ , між однойменними напругами першого та третього трифазних виходів складає  $30^\circ$ , і між однойменними напругами першого та четвертого трифазних виходів складає  $45^\circ$ .

21. Трансформатор за будь-яким з пп. 1 або 19, який **відрізняється** тим, що фазний кут між однойменними фазами трифазних виходів кожного з двох трансформаторів дорівнює  $10^\circ$  при загальній кількості виходів двох трансформаторів, рівній шести.

22. Трансформатор за будь-яким з пп. 1 або 19, який **відрізняється** тим, що фазний кут між однойменними фазами трифазних виходів кожного з двох трансформаторів дорівнює  $7,5^\circ$  при загальній кількості виходів двох трансформаторів, рівній восьми.

23. Трансформатор за будь-яким з пп. 1 або 19, який **відрізняється** тим, що фазний кут між однойменними фазами трифазних виходів кожного з двох трансформаторів дорівнює  $6^\circ$  при загальній кількості виходів двох трансформаторів, рівній десяти.

24. Трансформатор за будь-яким з пп. 1 або 19, який **відрізняється** тим, що фазний кут між однойменними фазами трифазних виходів кожного з двох трансформаторів дорівнює  $5^\circ$  при загальній кількості виходів двох трансформаторів, рівній дванадцяти.

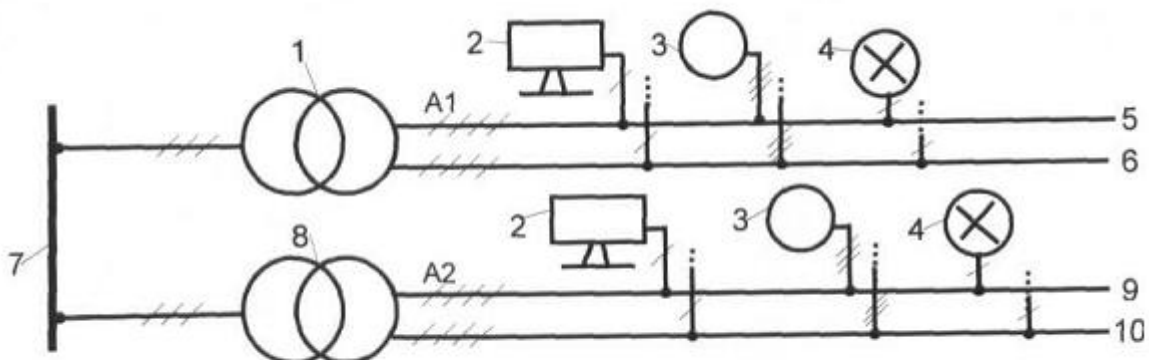


Fig. 1

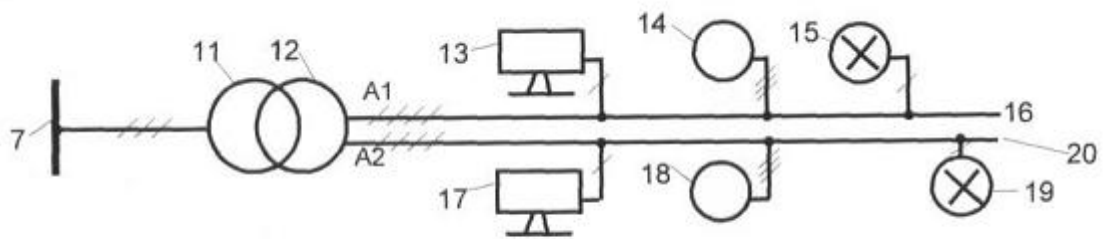


Fig. 2

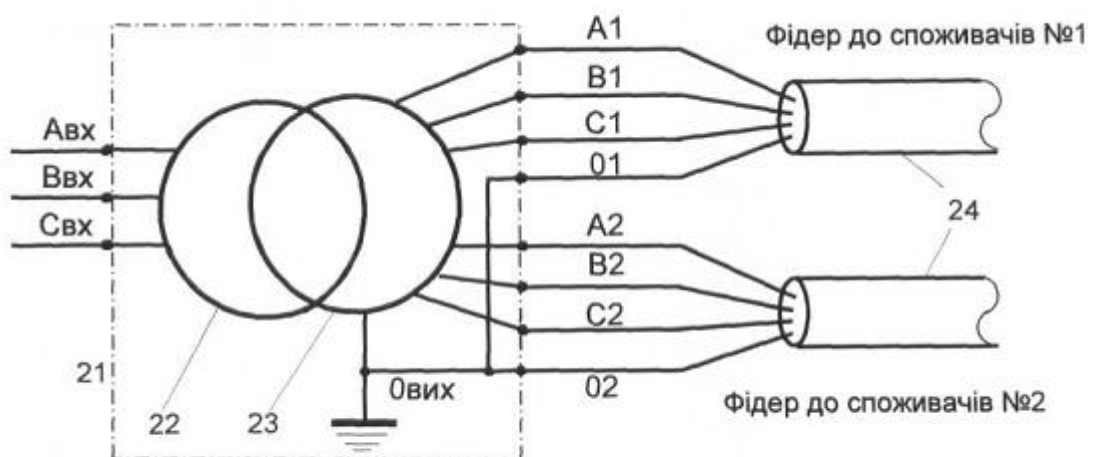


Fig. 3

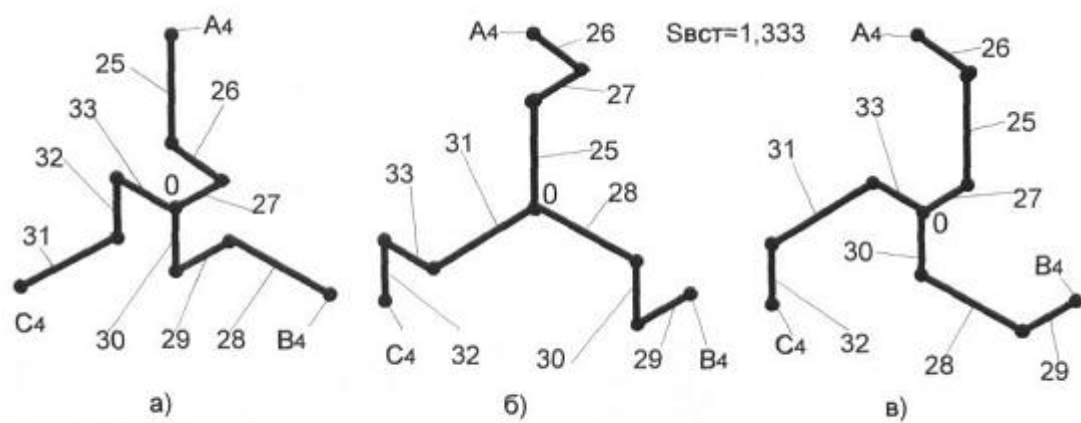
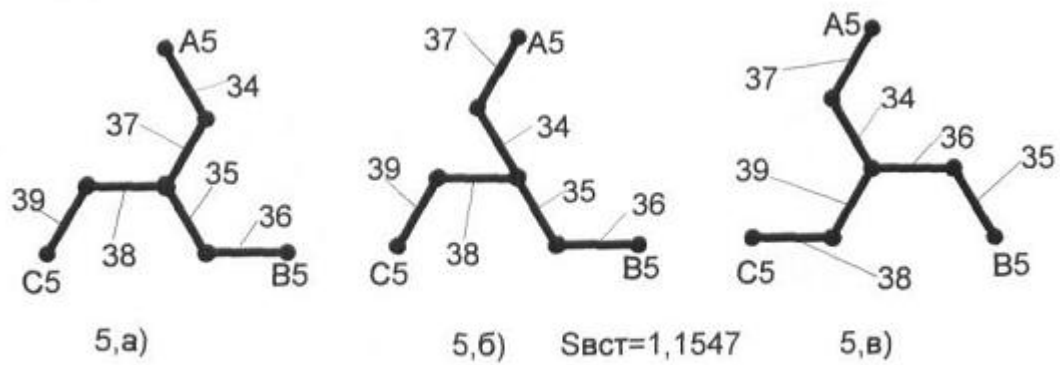
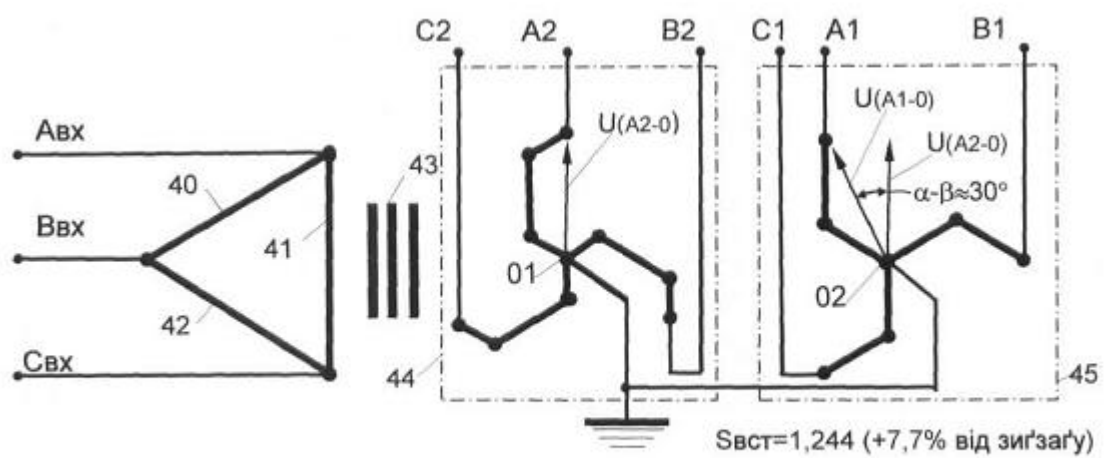


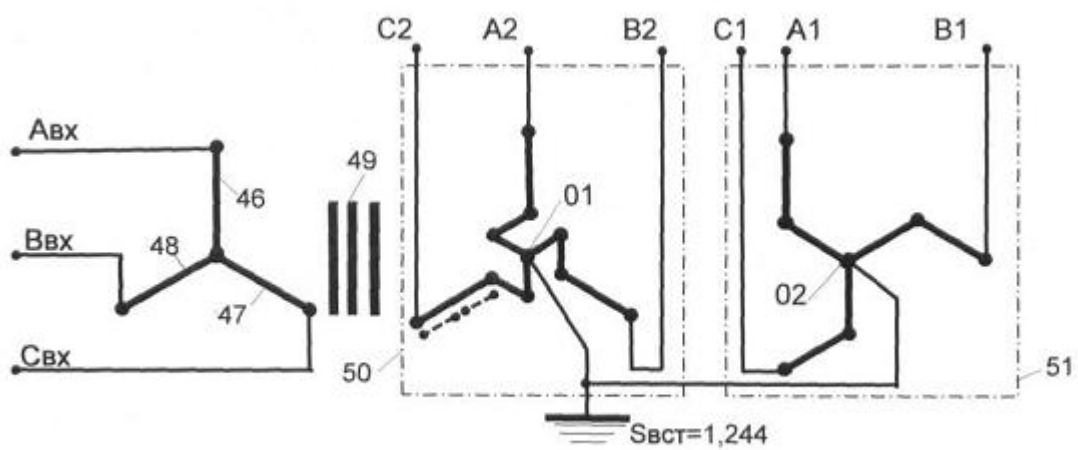
Fig. 4



Фиг. 5



Фиг. 6



Фиг. 7

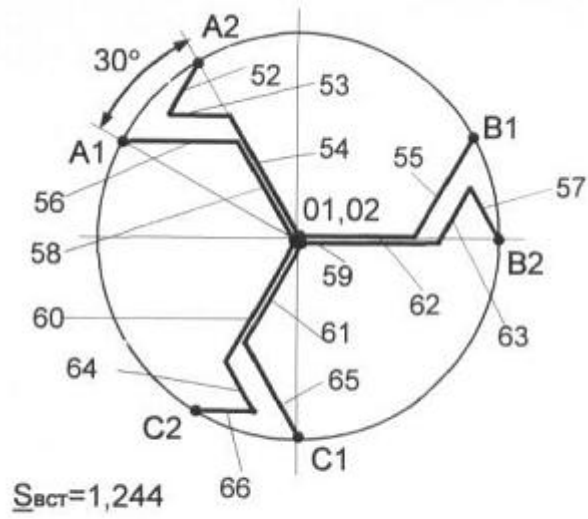


Fig. 8

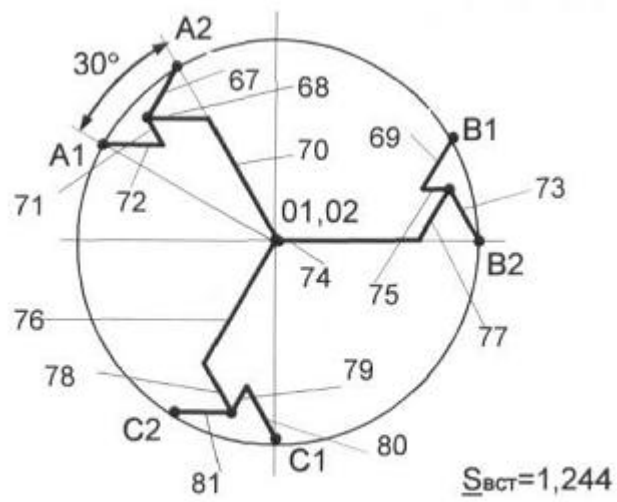


Fig. 9

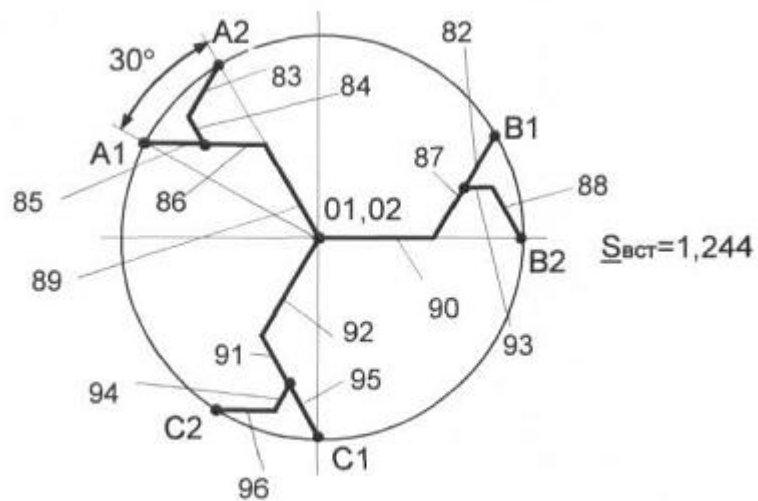


Fig. 10

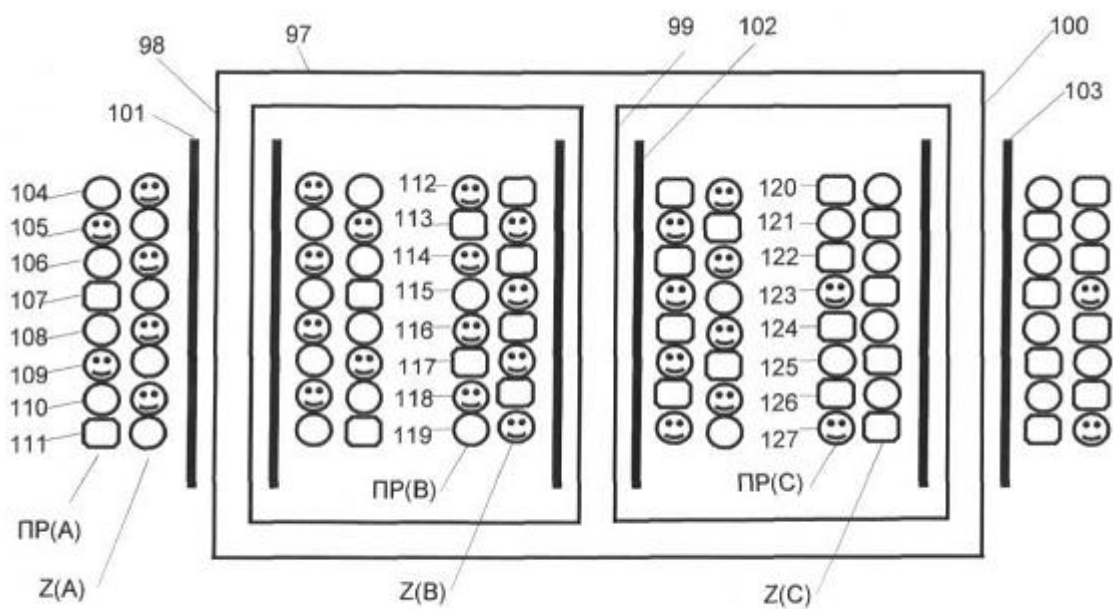


Fig. 11



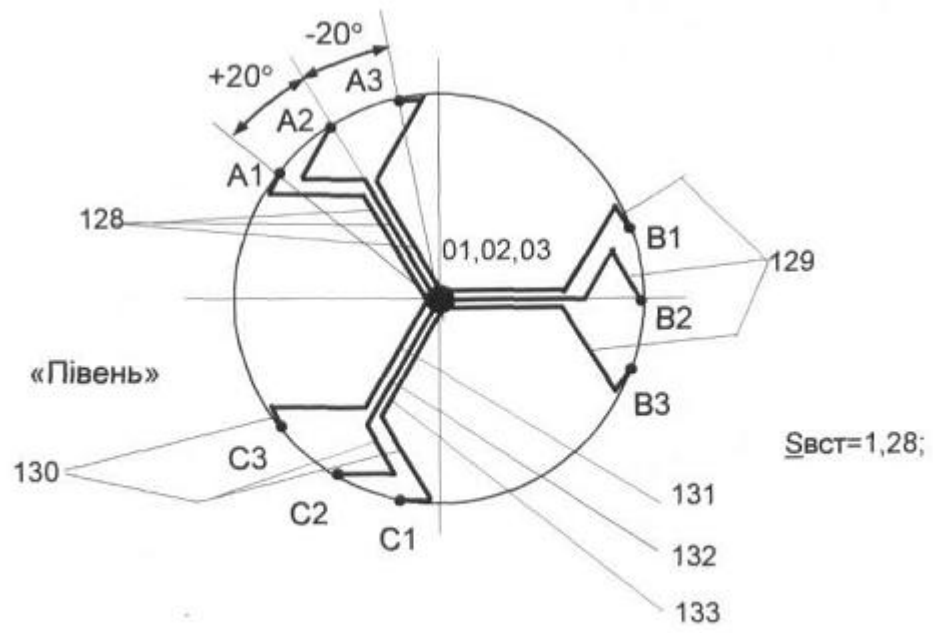


Fig. 12

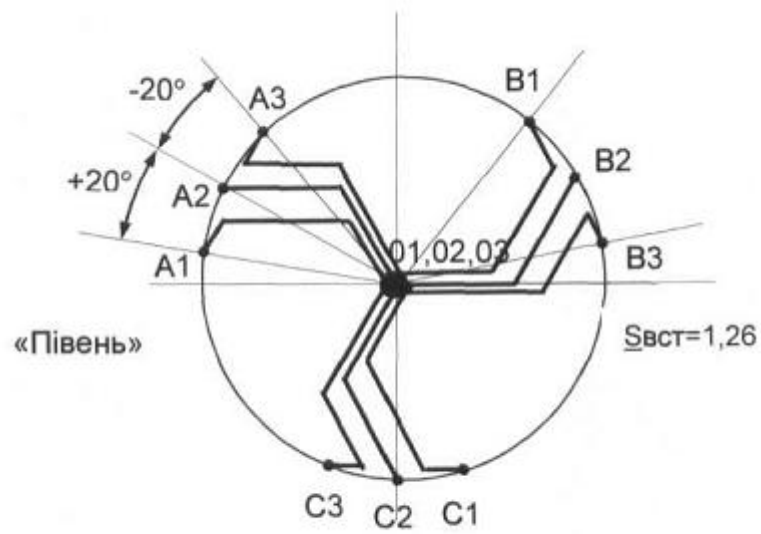


Fig. 13

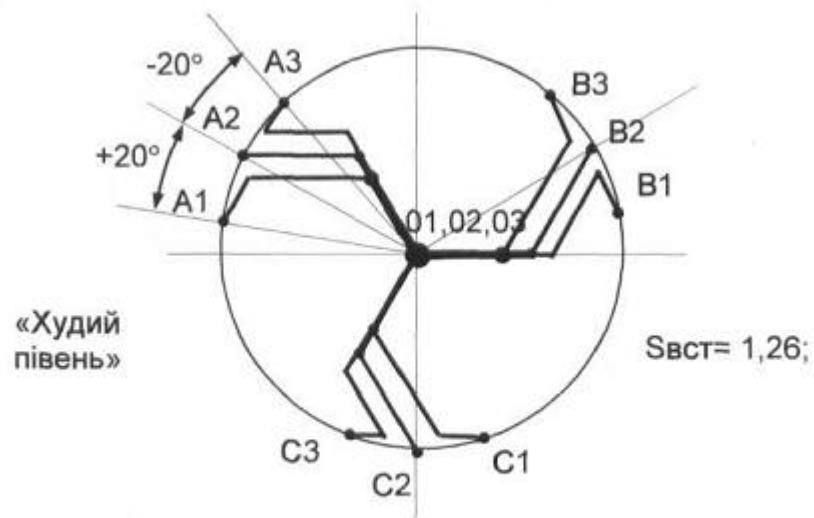


Fig. 14

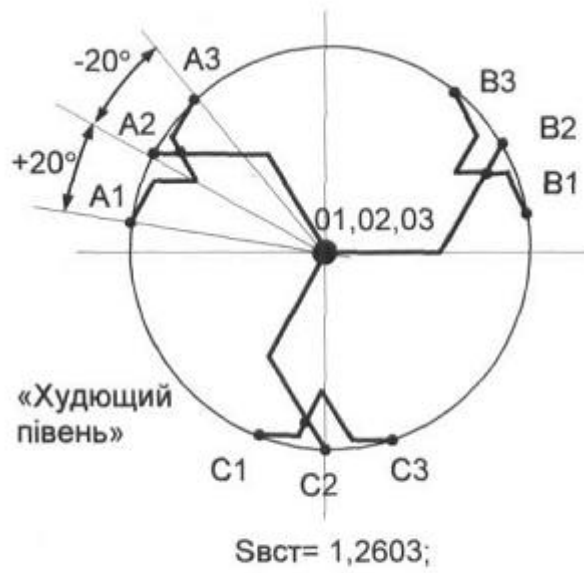


Fig. 15

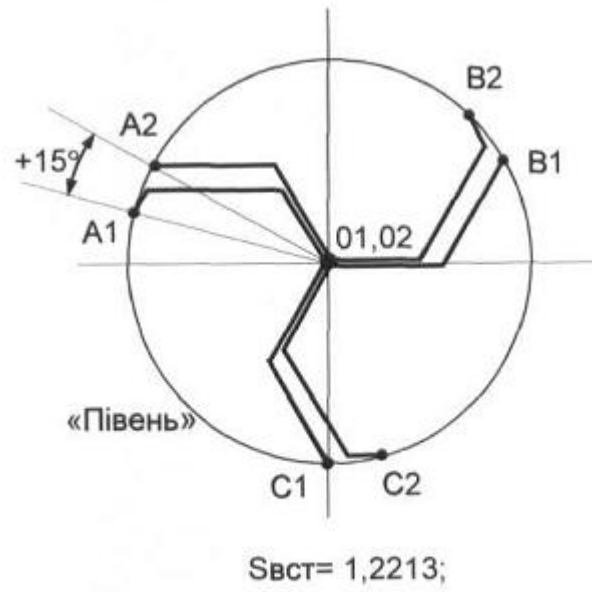


Fig. 16

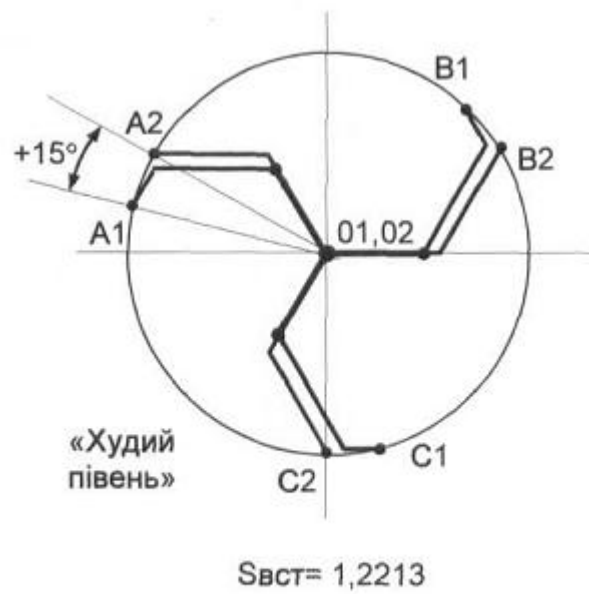


Fig. 17

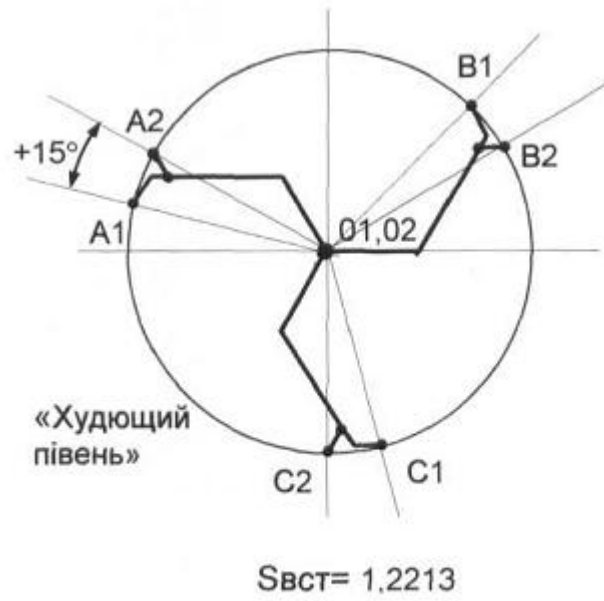


Fig. 18

---

Комп'ютерна верстка Д. Шеверун

---

Державна служба інтелектуальної власності України, вул. Василя Липківського, 45, м. Київ, МСП, 03680, Україна

---

ДП "Український інститут інтелектуальної власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601