УДК 621.314
DOI https://doi.org/10.15589/znp2026.3(506).18

COMPARATIVE ANALYSIS OF DESIGN SOLUTIONS OF TRANSFORMER CONVERTERS OF THE NUMBER OF PHASE

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ КОНСТРУКТИВНИХ РІШЕНЬ ТРАНСФОРМАТОРНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЧИСЛА ФАЗ

Vitalii A. Mardziavko
mardzavko@mnau.edu.ua
ORCID: 0000-0001-7327-9215

В. А. Мардзявко,
асистент

Mykolaiv National Agrarian University, Mykolaiv
Миколаївський національний аграрний університет, м. Миколаїв

Abstract. *Purpose*. The purpose of this article is a comparative analysis of existing design solutions of transformer converters of the number of phases, determination of their main technical features, advantages and limitations, as well as establishment of characteristic areas of practical application of various methods of forming multiphase power supply systems. *Methodology*. The study was carried out on the basis of analysis and generalization of scientific and technical publications devoted to transformer conversion of the number of phases. Designs with different winding connection schemes, coil configurations and spatial structure of magnetic cores were considered. The comparative analysis was carried out according to such main characteristics as symmetry of output phases, compactness, possibility of voltage regulation, complexity of manufacture and scope of application. *Results*. The main design solutions of transformer converters for forming five-, six-, seven- and other multiphase systems were considered. It was established that designs with a series connection of coils are characterized by manufacturability and the possibility of scaling by the number of phases, while the use of special configurations of magnetic circuits allows to increase the symmetry of phase electromotive forces, reduce the leakage inductance or provide phase shift regulation. It was found that the complication of the design of the active part is accompanied by increased requirements for manufacturing accuracy and an increase in technological complexity. *Scientific novelty*. Based on the study of known scientific sources, a comparative analysis of various design solutions of transformer number of phase converters was performed according to the set of main technical characteristics. The features of the application of schemes with different configurations of windings and magnetic circuits were summarized and the characteristic advantages and limitations of each of the considered approaches were determined. *Practical significance*. The results obtained can be used when choosing the design of transformer number of phase converters for electric drives, rectifier units, industrial electrotechnical complexes and other multiphase power supply systems. The above comparison allows us to take into account the requirements for phase symmetry, compactness, control, manufacturability and operating conditions when choosing an appropriate design solution.
Key words: transformer phase number converter; multiphase system; transformer; magnetic core; winding; phase symmetry; phase shift; electromagnetic characteristics; design solution; electrical system.

Анотація. *Мета*. Метою даної статті є порівняльний аналіз існуючих конструктивних рішень трансформаторних перетворювачів числа фаз, визначення їх основних технічних особливостей, переваг та обмежень, а також встановлення характерних областей практичного застосування різних способів формування багатофазних систем електроживлення. *Методика*. Дослідження виконано на основі аналізу та узагальнення науково-технічних публікацій, присвячених трансформаторному перетворенню числа фаз. Розглянуто конструкції з різними схемами з'єднання обмоток, конфігураціями котушок та просторовою структурою магнітопроводів. Порівняльний аналіз проведено за такими основними характеристиками, як симетрія вихідних фаз, компактність, можливість регулювання напруги, складність виготовлення та область застосування. *Результати*. Розглянуто основні конструктивні рішення трансформаторних перетворювачів для формування п'яти-, шести-, семи- та інших багатофазних систем. Встановлено, що конструкції з послідовним з'єднанням котушок характеризуються технологічністю та можливістю масштабування за кількістю фаз, тоді як використання спеціальних конфігурацій магнітопроводів дозволяє підвищити симетрію фазних електрорушійних сил, зменшити індуктивність розсіювання або забезпечити регулювання фазового зсуву. Виявлено, що ускладнення конструкції активної частини супроводжується підвищенням вимог до точності виготовлення та збільшенням технологічної складності. *Наукова новизна*. На основі опрацювання відомих наукових джерел виконано порівняльний аналіз різ-

них конструктивних рішень трансформаторних перетворювачів числа фаз за сукупністю основних технічних характеристик. Узагальнено особливості застосування схем із різною конфігурацією обмоток та магнітопроводів і визначено характерні переваги та обмеження кожного з розглянутих підходів. *Практична значимість*. Отримані результати можуть бути використані під час вибору конструктивного виконання трансформаторних перетворювачів числа фаз для електроприводів, випрямляльних установок, промислових електротехнічних комплексів та інших багатофазних систем електроживлення. Наведене порівняння дозволяє враховувати вимоги до симетрії фаз, компактності, регулювання, технологічності виготовлення та умов експлуатації при виборі відповідного конструктивного рішення.

Ключові слова: трансформаторний перетворювач числа фаз; багатофазна система; трансформатор; магнітопровід; обмотка; симетрія фаз; фазовий зсув; електромагнітні характеристики; конструктивне рішення; електротехнічна система.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Сучасні дослідження в галузі перетворення електромагнітних систем трансформаторів активно розвиваються, особливо в контексті підвищення ефективності та надійності електроживлення багатополюсних машин та випрямляльних систем. Зростаючі вимоги до енергоефективності, компактності, електромагнітної сумісності та стабільності параметрів живлення зумовлюють необхідність переосмислення традиційних рішень, що ґрунтуються на класичних трифазних топологіях. Впровадження багатофазних систем живлення, зокрема шестифазних або дванадцятифазних, відкриває нові перспективи для оптимізації режимів роботи електротехнічних комплексів.

Одним з основних напрямів модернізації є застосування трансформаторних систем спеціальної конструкції, які здатні реалізувати перетворення вхідної фазної енергії у багатофазну форму з високим ступенем симетрії та мінімальним рівнем гармонічних спотворень. Серед таких рішень виступають використання однофазних триобмоткових або двообмоткових трансформаторів, схеми діаметрального, зіркового та інверсного з'єднання обмоток. Ці структури дозволяють реалізовувати не лише класичне перетворення частоти та фази, а й повині забезпечувати гнучке керування розподілом навантаження та зменшення електромагнітного випромінювання [1].

Особливе значення багатофазні системи набувають у контексті живлення потужних випрямляльних установок, таких як тягові перетворювачі, промислові електропечі, приводи великої потужності та джерела живлення постійного струму. Застосування шестифазного живлення в таких системах дозволяє суттєво зменшити амплітуду струмів вищих гармонік, знизити пульсації на виході випрямляча, що, у свою чергу, позитивно впливає на довговічність обладнання та якість електроенергії [2].

Крім того, розвиток силової електроніки, широке впровадження напівпровідникових ключових елементів та інтелектуальних систем керування підсилюють потребу в нових трансформаторних конфігураціях, здатних працювати в умовах швидкозмінних навантажень, імпульсних режимів та високих струмових навантажень. У цьому контексті дослідження схем перетворення трансформаторних систем набувають виняткової актуальності, адже дозволяють не лише підвищити енергоефективність, а й забезпечити стійкість роботи у всьому діапазоні робочих умов.

Незважаючи на значну кількість досліджень у сфері багатофазних трансформаторних систем, більшість із них присвячена окремим конструктивним рішенням або специфічним схемам з'єднання обмоток. При цьому відсутній комплексний аналіз сучасних методів перетворення числа фаз із позицій електромагнітної ефективності, технологічної складності реалізації, якості електроенергії та перспектив їх практичного застосування. Це обумовлює необхідність систематизації існуючих підходів та визначення найбільш перспективних напрямів розвитку багатофазних трансформаторних систем.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Традиційна трифазна система передачі електроенергії, попри десятиліття використання, дедалі частіше не відповідає сучасним вимогам енергетики – особливо в умовах зростаючого попиту, обмежень на розширення смуг відведення. У відповідь на це галузь активно розвиває альтернативні рішення на основі трансформаторів – як для передачі електроенергії (шестифазні системи), так і для перетворення числа фаз у системах електропостачання (перетворювачі 1→3 та 3→6).

Шестифазна система передачі є однією з найбільш перспективних альтернатив: завдяки рівномірному розподілу фазових векторів вона дозволяє збільшити передану потужність до 73 % без розширення смуги відведення [3], одночасно знижуючи коронний ефект, рівень шуму та електромагнітні перешкоди [4]. Це особливо актуально для регіонів з обмеженими земельними ресурсами, де розширення існуючих ліній економічно чи фізично неможливе.

Паралельно зростає практична потреба в перетворювачах фаз на основі трансформаторів – від побутових перетворювачів однофазної мережі у трифазну для живлення асинхронних двигунів у малому виробництві та сільському господарстві, до промислових перетворювачів трифазної системи у шестифазну для

випрямлячів, електроприводів великої потужності, електротранспорту та безперебійних джерел живлення [5]. Таке розмаїття задач – від побутового використання малої потужності до промислових систем з високими вимогами до симетрії та якості електроенергії – свідчить, що жодне з існуючих рішень не є універсальним для всіх умов експлуатації.

Водночас аналіз наукових публікацій свідчить [3–6], що існуючі підходи до перетворення числа фаз суттєво відрізняються як за конструктивним виконанням, так і за електромагнітними характеристиками, а порівняльні дослідження, які об'єднували б ці підходи в межах єдиного аналізу, є нечисленними. Це ускладнює обґрунтований вибір оптимального рішення для конкретних умов експлуатації та визначає актуальність дослідження й порівняльного аналізу конструктивних рішень трансформаторних перетворювачів фаз, виконаного в цій роботі.

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Незважаючи на значну кількість наукових досліджень, присвячених трансформаторному перетворенню числа фаз, існуючі конструктивні рішення та способи формування багатофазних систем переважно розглядаються в окремих публікаціях, що не забезпечує достатньої оглядовості та цілісного уявлення про їх конструктивні особливості. У науковій літературі недостатньо представлені роботи, в яких різні способи перетворення числа фаз розглядалися б одночасно з позицій особливостей конструкції магнітопроводу та обмоток, симетрії вихідних фаз, компактності, можливості регулювання та складності виготовлення.

Таким чином, невирішеним залишається питання розширення оглядовості існуючих конструктивних рішень трансформаторних перетворювачів числа фаз та їх порівняння за основними технічними характеристиками. Це зумовлює доцільність проведення порівняльного аналізу відомих конструкцій з метою виявлення їх основних переваг, обмежень та найбільш характерних областей практичного застосування.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою даного дослідження є дослідження та аналіз існуючих конструктивних рішень трансформаторних перетворювачів фаз, а також порівняльна оцінка їхніх технічних характеристик для визначення переваг, обмежень та області застосування кожного з розглянутих підходів.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Об'єктом дослідження є трансформаторні перетворювачі числа фаз, що використовуються для формування багатофазних систем електроживлення на основі трифазної системи, з різними конструкціями магнітопроводу, обмоток та схемами їх з'єднання.

Предметом дослідження є конструктивні особливості та технічні характеристики трансформаторних перетворювачів числа фаз, зокрема симетрія вихідних фаз, компактність конструкції, можливість регулювання напруги, складність виготовлення та характерні області практичного застосування різних конструктивних рішень.

Методи дослідження включають аналіз і узагальнення науково-технічних публікацій, порівняльний аналіз відомих схем трансформаторного перетворення числа фаз, зіставлення конструктивних особливостей магнітопроводів та обмоток, а також аналіз наведених у літературних джерелах результатів моделювання та експериментальних досліджень.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Одним із пріоритетних напрямків у сфері сучасної електротехніки є вдосконалення методів перетворення електроенергії за допомогою трансформаторів, зокрема шляхом застосування спеціалізованих схем з'єднання обмоток. Ці інженерні рішення спрямовані на підвищення ефективності, стабільності та якості електроживлення у системах з високими вимогами до надійності та зменшення електромагнітних спотворень.

Застосування спеціальних з'єднань обмоток дає змогу отримувати багатофазні вихідні сигнали, що значно розширює функціональні можливості трансформаторів у сучасних енергетичних системах. Зокрема, такі схеми забезпечують рівномірний фазовий зсув, що дозволяє досягти кращої симетрії у навантаженні, мінімізувати гармонічні спотворення та знизити втрати енергії при перетворенні.

Крім електричних переваг, правильно спроєктовані конфігурації обмоток дозволяють оптимізувати теплові та магнітні характеристики трансформатора, що позитивно впливає на його експлуатаційні параметри та довговічність. У результаті, спеціалізовані схеми з'єднання стають ключовим елементом в розробці трансформаторів для живлення високоточних електронних систем, електроприводів та промислових конверторів.

Тому сучасні дослідження дедалі частіше зосереджуються на аналізі конфігурацій схем з'єднань обмоток, як на перспективному засобі підвищення технологічного рівня електроенергетичних систем.

В роботі [6] представлена нова схема трансформаторного з'єднання, що дозволяє перетворити стандартну трифазну систему електропостачання в п'ятифазну. Запропонована конструкція трансформатора базується на трьох осердях, кожне з яких має одну первинну та до трьох вторинних обмоток, рис. 1.

Векторні розрахунки та точно підібрані коефіцієнти трансформації забезпечують створення п'яти вихідних фаз з рівномірним фазовим зсувом 72° [6]. Вхідні обмотки можуть бути з'єднані у зірку або

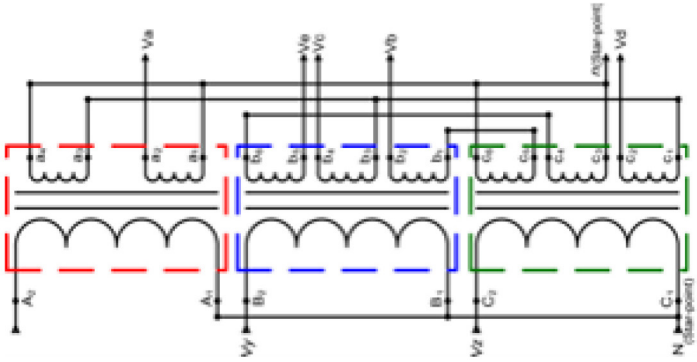


Рис. 1. Пропоноване розташування обмоток трансформатора (зірка-зірка) [6]

трикутник, а вихідні – у зірку, це забезпечує гнучкість налаштування під різні інженерні потреби.

В роботах [7, 8] було проведено моделювання і аналіз трифазного-п'ятифазного трансформатора, де система фазного перетворення була побудована з трьох багатообмоткових трансформаторів, кожен з яких має одну первинну та кілька вторинних обмоток. Дослідження здійснювались із застосуванням п'ятифазного асинхронного двигуна. Зафіксовані показники свідчать про правильну передачу енергії: при вході 220 В (пік) та струмі 3,75 А (пік) на виході фіксувались значення 218 В (пік) і струм 1,6 А, що пояснюється перерозподілом навантаження між п'ятьма фазами. Спостерігалось також зменшення коефіцієнта потужності – з 0,39 до 0,33 [9]. Автори вказують на ключову умову ефективної роботи – необхідність балансу вхідного трифазного живлення, оскільки навіть незначна його розбалансованість одразу впливає на якість вихідних п'ятифазних сигналів. Було проведено численні випробування з використанням як симуляцій, так і натурного експерименту, які підтвердили працездатність і надійність схеми. Також відзначено потенціал масштабування цієї технології до інших непарних багатофазних конфігурацій (7, 11 фаз і т.д.).

В роботах [8, 9] розглядається модель трансформаторного перетворювача числа фаз (ТПФ), що призначений для роботи у складі багатофазних електротехнічних систем – таких як електроприводи, інвертори, системи передачі електроенергії. Основною метою дослідження була розробка простої, технологічної конструкції ТПФ із послідовним з'єднанням катушок кожної фази вторинної обмотки, що забезпечує симетричну багатофазну систему електрорушійних сил (ЕРС). На відміну від попередньо згадених рішень [6–8], де формування багатофазної напруги досягається складними схемами з'єднання обмоток, запропонована модель використовує послідовне з'єднання з точно розрахованою кількістю витків у кожній катушці. При цьому допускаються як позитивні, так і негативні значення кількості витків, що дозволяє формувати ЕРС у фазі або протифазі для забезпечення електромагнітної симетрії, рис. 2 [10].

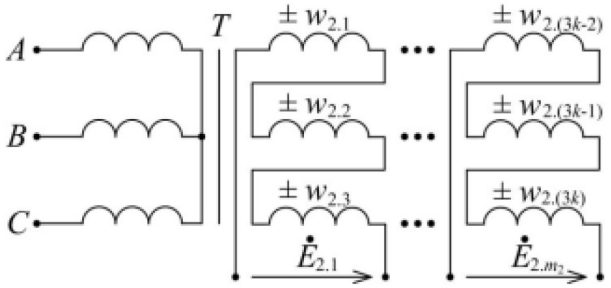


Рис. 2. Схема зєднання обмоток трифазно-багатофазного ТПФ: w_2 – кількість витків кожної котушки; m_2 – кількість фаз [9]

Рис. 2 демонструє принципову схему з'єднання катушок вторинної обмотки багатофазного трансформатора. У цій конфігурації котушки кожної фази з'єднані послідовно, що дозволяє формувати багатофазну симетричну систему ЕРС при мінімальній складності конструкції. Особливість цієї схеми полягає у тому, що значення витків можуть бути як позитивними, так і негативними. Котушки з від'ємним числом витків створюють ЕРС у протифазі, що забезпечується за допомогою зміни напрямку намотування або спеціального маркування. Це дозволяє реалізувати симетричну багатофазну систему без складних міжфазних з'єднань. Схема легко масштабується: для збільшення кількості фаз потрібно лише додати котушки на кожен з трьох стрижнів магнітопроводу, використовуючи провід однакового типу. Це робить обмотку технологічною, доступною у виробництві та надійною в експлуатації.

У статті також описано створення експериментального зразка трифазно-семифазного ТПФ на базі серійного трансформатора, де в обмотках використано 77 витків на кожному стрижні з рівномірним розподілом по фазах. Вторинна обмотка з'єднана за схемою зірки з нульовим виводом. Отримані технічні характеристики (потужність 100 ВА, напруга 220/5,86 В, струм 0,226/2,44 А, частота 50 Гц) підтверджують

працездатність та ефективність запропонованої конструкції.

Порівняно з п'ятифазними системами, ТПФ забезпечують більш рівномірний розподіл струмів між фазами та менший рівень пульсацій після випрямлення. Разом з тим збільшення кількості фаз істотно ускладнює конструкцію вторинної обмотки, підвищує вимоги до точності намотування та збільшує вартість виготовлення.

Таким чином, модель трансформаторного перетворювача числа фаз, яка описана в статті, підтверджує дослідження в області застосування спеціалізованих схем з'єднання обмоток для реалізації з надійністю електромагнітної роботи.

Також в роботі [10] розглядається конструкція трансформатора, який виконує перетворення трифазної системи у п'ятифазну, при цьому використовує три стрижні магнітопроводу, що є типовими для стандартних трифазних трансформаторів. Головна мета полягає в застосуванні багатострижневого трансформатора, де на кожному стрижні намотано по одній первинній і кілька вторинних катушок. Первинна обмотка ідентична типовому трифазному трансформатору й під'єднана зіркою а на другій п'ять вторинних катушок. Така схема дозволяє реалізувати п'ятифазну вихідну систему при живленні від стандартної трифазної мереж, рис. 3.

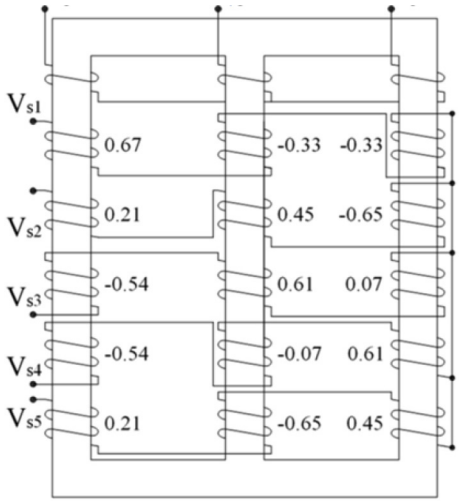


Рис. 3. Конфігурація обмотки конструкції ТПФ [10]

Первинна обмотка трансформатора складається з трьох однакових катушок по 198 витків, з'єднаних за схемою «зірка». Вторинна обмотка утворює п'ятифазну систему з нерівномірною кількістю витків у фазах (від 242 до 264 витків), проте розбіжність не перевищує 4,5 %, що дозволяє зберегти електричну симетрію. Важливою особливостю такого рішення є можливість оптимізації обмоток шляхом спільного використання катушок для кількох фаз, що дозволяє знизити витрати міді та спростити електричні з'єднання. Використання класичного трьохстрижневого магнітопроводу, уніфікованої первинної обмотки та ретельно оптимізованої вторинної обмотки дозволяє отримати надійний пристрій для перетворення фаз, придатний для застосування в системах з нестандартною кількістю фаз, де важлива електрична симетрія, стабільність і компактність.

На відміну від попередніх інноваційним методом постає конструкція ТПФ в роботі [11], в основу якої лежить шестифазний магнітний сердечник, який призначений для ефективного керування фазовими кутами напруг у трифазних енергосистемах. Його головна особливість полягає у використанні одного шестифазного сердечника замість традиційних двох окремих трифазних трансформаторів (рис. 4), такий підхід дозволяє значно зменшити габарити, масу, втрати та вартість пристрою.

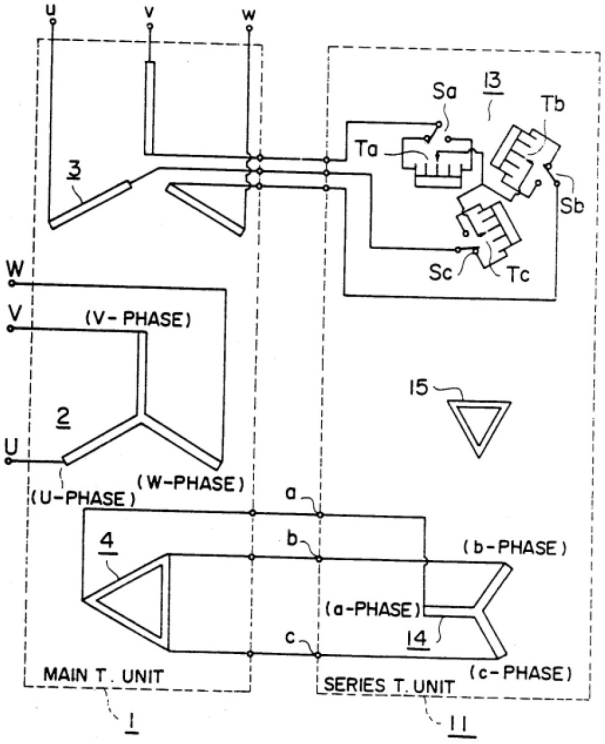


Рис. 4. Схема з'єднання фаз у трифазній системі з перемиканням обмоток запропонованої конструкція ТПФ [11]

Магнітопровід трансформатора складається з шести незалежних магнітних ланцюгів. Дві групи обмоток – головна та послідовна – розташовані відповідно на непарних (1, 3, 5) і парних (2, 4, 6) магнітних ланцюгах. Спеціальне розміщення і напрямки намотування фаз (зокрема, *V* та *b* – у протилежному напрямку до інших) дозволяють сформувати основні магнітні потоки зі зсувом 60°, а міжфазні диференціальні потоки – зі зсувом 30°. Це конструктивне рішення зменшує величину диференціальних потоків майже вдвічі, що дає змогу суттєво зменшити поперечні перерізи міжфазних частин сердечника.

Електрична схема трансформатора включає Y-з'єднані первинну і вторинну обмотки головного блоку, Δ-з'єднану третинну обмотку, яка живить обмотку збудження послідовного блоку, а також фазорегулюючу обмотку, яка додає регульовану напругу до вихідної. Напруги E_a, E_b, E_c, індуковані в послідовному блоці, додаються до вторинних напруг головного блоку, формуючи вихідні E_u, E_v, E_w. Кут фазового зсуву цих напруг точно регулюється за допомогою перемикачів. Фізична структура трансформатора розроблена для оптимізації простору: корпус має наскрізні отвори для проходження магнітного потоку, а міжфазні частини сердечника є спільними для сусідніх контурів. Це дає змогу зменшити втрати і габарити без зниження ефективності. Таким чином, запропонований трансформатор вирішує основні проблеми класичних фазозсувних конструкцій і є перспективним рішенням для сучасних енергетичних систем, де потрібне гнучке фазове регулювання з мінімальними втратами.

Таким чином видно, що усі розглянуті методи перетворення трифазного живлення в багатофазні системи ґрунтуються на цілеспрямованій і ретельно проєктованій зміні конфігурації обмоток трансформаторів. Саме інженерне моделювання схеми з'єднання, визначення кількості витків, напрямку їх намотування, послідовності розташування котушок у магнітопроводі, а також вибір способу взаємодії між фазами – формують базову платформу для отримання якісних багатофазних електричних сигналів із заданими характеристиками. Ключовою особливістю таких підходів є те, що модифікація обмотувальної частини трансформатора стає основним регулятором фазової структури системи, без необхідності в складних зовнішніх електронних схемах.

Попри високу ефективність запропонованих методів, проведене дослідження виявило низку недосконалостей, які обмежують їхнє повноцінне впровадження в широкомасштабні енергетичні системи. По-перше, недостатньо досліджено вплив гармонічних спотворень на вихідну напругу, які можуть спричиняти додаткові втрати, перегрів та негативно впливати на роботу споживачів. По-друге, потребує подальшого дослідження температурна стабільність обмоток і магнітопроводу, особливо в умовах збільшення кількості обмоток та можливого локального перегріву. По-третє, коефіцієнт потужності експериментальних моделей становить 0,32–0,39, що свідчить про значну реактивну складову та необхідність розроблення засобів її компенсації. Крім того, недостатньо вивчено поведінку систем при тривалій експлуатації, а також відсутня достатня стандартизація та технологічна уніфікація конструкцій, що ускладнює їх серійне виробництво та підвищує вартість виготовлення.

Виявлені особливості розглянутих конструктивних підходів визначають доцільність подальшого вдосконалення трансформаторних перетворювачів. Перспективним напрямком є оптимізація активної частини трансформаторного перетворювача, де основну увагу доцільно приділити узгодженому вибору геометричних і електромагнітних параметрів магнітопроводу та обмоток, їх просторового розміщення і основних розмірів активної частини. Такий підхід спрямований на зниження втрат та індуктивності розсіювання, покращення симетрії фазних ЕРС, а також підвищення енергетичної ефективності та стабільності роботи трансформаторного перетворювача.

Так, в статті [12] досліджено конструктивно-технологічні шляхи підвищення технічного рівня спеціальних трансформаторів і трансформаторних перетворювачів (ТП), які використовуються в системах силового електрообладнання. Основна увага приділена проблемам електромагнітної сумісності (ЕМС), удосконаленню масогабаритних характеристик та зниженню втрат на вищі гармоніки в умовах нелінійного навантаження.

Ключовим технічним рішенням автори вважають застосування просторової структури активної частини з паралельними твірними поверхнями стрижнів і обмоткових вікон. У статті запропоновано три основні інженерно-конструктивні підходи до перетворення числа фаз в трансформаторних перетворювачах.

Перший спосіб (рис. 5) передбачає використання зсуву фаз магнітного потоку у трьохстрижневих ЕМС із розміщенням вторинних обмоток на ярмах, а первинних – на стрижнях. Така конструкція забезпечує фазове зміщення ЕРС, необхідне для формування багатофазних систем. Особливо доцільним це рішення є для зварювальних трансформаторів, хоча має недолік у вигляді підвищеного магнітного розсіювання.

Другий спосіб (див. рис. 6) полягає в додаванні до трьох основних стрижнів ще трьох проміжних, на яких симетрично розміщуються вторинні обмотки.

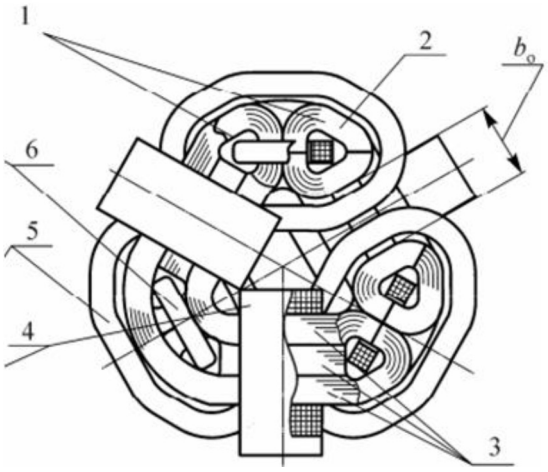


Рис. 5. Вид активної частини трансформаторного перетворювача числа фаз з регулюванням напруги поперечним підмагнічуванням: 1 – стрижень; 2 – елемент стрижня; 3 – складове ярмо; 4 – котушка навантажувальної обмотки; 5 – котушка мережевої обмотки; 6 – котушка обмотки управління [12]

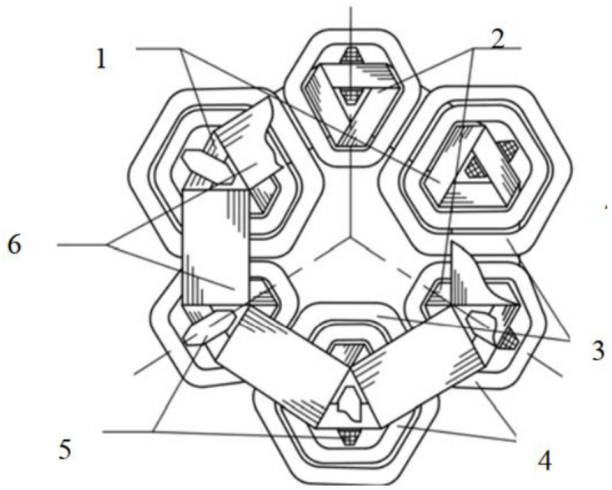


Рис. 6. Схеми активної частини фазних ЕРС трансформаторного перетворювача числа фаз: 1 – мережевий стрижень; 2 – проміжний стрижень; 3 – котушка мережевої обмотки; 4 – котушка навантажувальної обмотки; 5 – котушка обмотки керування; 6 – ярмо [12]

Це дозволяє формувати, наприклад, 12-фазну систему без необхідності регулювання напруги. Таке конструктивне рішення знижує індуктивність розсіювання і покращує симетрію системи, що є особливо корисним для перетворювачів великої потужності.

Третій спосіб (див. рис. 7) ґрунтується на застосуванні осьових ЕМС із обертовим магнітним полем, створюваним шляхом відповідного розміщення концентрованих або розподілених котушок. Залежно від конфігурації стрижнів і обмоток можна отримати співвідношення фаз m_1/m_2 = 3/2, 3/6 тощо. Основною перевагою цього способу є висока симетрія ЕРС незалежно від навантаження, що особливо цінно у випадках відсутності нульового проводу або при нерівномірному навантаженні.

Усі три підходи до перетворення числа фаз базуються на конструктивному виконанні структури активної частини трансформатора, що визначає просторову організацію стрижнів, ярм і обмоток.

За результатами порівняльного аналізу тексту статті [12], встановлено, що кожен із розглянутих конструктивних способів трансформаторного перетворення числа фаз характеризується певним співвідношенням технічних переваг і обмежень: перший спосіб, що ґрунтується на використанні ярм, має помірну симетрію ЕРС, середню компактність і складність виготовлення, але забезпечує можливість регулювання напруги шляхом поперечного підмагнічування, що визначає доцільність його застосування у зварювальних трансформаторах та побутових перетворювачах; другий спосіб, із використанням проміжних стрижнів, забезпечує вищу симетрію фазних ЕРС та сприятливіші характеристики щодо якості електроенергії, проте характеризується збільшенням кількості конструктивних елементів і складності виготовлення, що обмежує його застосування переважно потужними агрегатами без регулювання напруги; третій спосіб, заснований на формуванні обертового магнітного поля, забезпечує найвищу симетрію ЕРС, незалежну від навантаження, високу компактність за оптимального вибору кількості стрижнів та найкращі показники якості електроенергії за умови правильного фазування, однак потребує найвищої точності конструктивного виконання та технології виготовлення.

Таким чином, вибір конструктивного рішення для трансформаторного перетворювача фаз має базуватись на конкретних вимогах до застосування: чи то гнучкість і компактність, чи то стабільність і симетрія, чи можливість керованого регулювання. Застосування одного з трьох методів дозволяє ефективно формувати багатофазні системи живлення з покращеними енергетичними характеристиками та високою електромагнітною сумісністю.

Однак наведене порівняння охоплює лише три конструктивні підходи до реалізації трансформаторних перетворювачів числа фаз на основі багатострижневих магнітопроводів. Для повнішого аналізу розглянемо в єдиному порівнянні всі розглянуті у статті рішення – шестифазні системи передачі, перетворювачі 3→6, а також п'яти- і семифазні трансформаторні перетворювачі числа фаз, табл. 1.

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Наведена узагальнена таблиця дозволяє порівняти всі розглянуті конструктивні рішення за єдиними

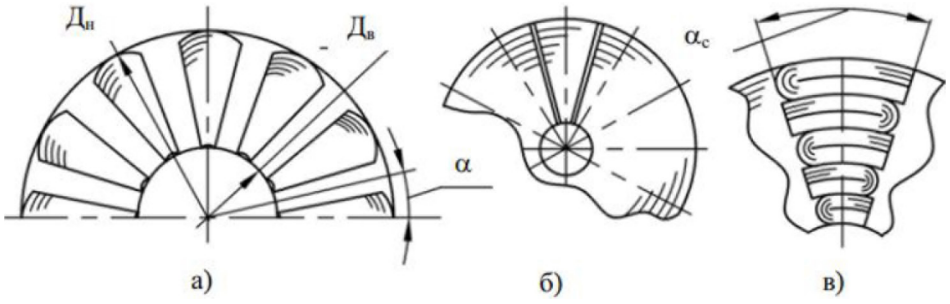


Рис. 7. Аксіальний стиковий магнітопровід (а) зі стрижнями з крученої розрізної заготовки (б) або коаксіальних розрізних опресованих елементів (в) [12]

Таблиця 1. Узагальнена порівняльна оцінка конструктивних рішень трансформаторних перетворювачів фаз

Конструкція	Симетрія фаз	Компактність	Регулювання напруги	Складність виготовлення	Застосування	Основні переваги
ТПФ 3 → 5, зірка-зірка, три осердя (рис. 1)	висока (72°)	середня	немає	середня	п'ятифазний асинхронний двигун	Рівномірний фазовий зсув, відносно проста конструкція, можливість формування симетричної п'ятифазної системи
ТПФ з послідовним з'єднанням котушок (рис. 2), масштабується до 7, 11 фаз	висока	середня	немає	зростає зі збільшенням числа фаз	масштабовані багатофазні системи	Технологічність, масштабованість, формування симетричної багатофазної системи без складних міжфазних з'єднань
ТПФ 3→5, спільні котушки на 3 стрижнях (рис. 3)	висока (±4,5 %)	висока	немає	середня	компактні системи з нестандартною кількістю фаз	Компактність, зменшення витрат міді, спрощення електричних з'єднань, збереження симетрії фаз
ТПФ на шестифазному сердечнику (рис. 4)	висока	найвища	є (перемикачами)	висока	гнучке фазове регулювання	Зменшення габаритів і маси, регулювання фазового зсуву, зменшення диференціальних магнітних потоків
Спосіб 1 – зсув фаз магнітного потоку, ярма (рис. 5)	помірна	середня	є (поперечне підмагнічування)	середня	зварювальні трансформатори, побутові ПТ	Можливість регулювання напруги, конструктивна відносна простота
Спосіб 2 – проміжні стрижні (рис. 6)	висока	нижча	відсутня/ обмежена	вища	потужні агрегати без регулювання	Зниження індуктивності розсіювання, покращення симетрії фазних ЕРС, придатність для великої потужності
Спосіб 3 – осьові ЕМС, обертове поле (рис. 7)	дуже висока, незалежна від навантаження	висока при оптимальній к-сті стрижнів	залежить від схеми	найвища	енергетика, промисловість, високі навантаження	Висока симетрія ЕРС, електромагнітна рівновага, можливість формування різних багатофазних систем

показниками – симетрією вихідних фаз, компактністю, можливістю регулювання напруги, складністю виготовлення та областю застосування, – що узагальнює результати проведеного аналізу. Аналіз методів перетворення трифазного електроживлення в багатофазні системи свідчить, що ефективність роботи трансформаторних перетворювачів значною мірою залежить не лише від конфігурації обмоток, а й від просторової структури активної частини трансформатора. У той час як обмотувальні методи дозволяють швидко реалізувати багатофазні виходи з мінімальними конструктивними змінами, конструктивно-технологічні підходи, забезпечують глибшу інтеграцію просторової симетрії та електромагнітної рівноваги.

Впровадження нових схем із поперечним підмагнічуванням, багатострижневими магнітопроводами та аксіальними конфігураціями розширює функціональні можливості ТП і відкриває перспективи для побудови високонадійних, енергетично ефективних і гнучко керованих систем. З урахуванням поточних тенденцій розвитку автоматизованого електроприводу, ВДЕ, транспортних платформ та високоточної промислової електроніки, доцільним є подальше дослідження гібридних схем, що поєднують переваги конфігураційних та конструктивних методів, із урахуванням динамічних режимів, гармонічних спотворень, термічної стабільності та довговічності елементів. Також, метод зміни структури активної частини є оптимальним для високотехнологічних енергетичних систем, де критично важливі стабільність, ЕМС і якість струму, тоді як методи конфігурації обмоток підходять для адаптивних, економічно чутливих і легко масштабованих систем, таких як електроприводи та новітні привідні пристрої.

ВИСНОВКИ

У роботі проведено порівняльний аналіз конструктивних рішень трансформаторних перетворювачів числа фаз. Розглянуто основні способи формування багатофазних систем за рахунок схем з'єднання обмоток, конфігурації котушок і конструкції магнітопроводу.

Встановлено, що конструктивні рішення ТПФ суттєво відрізняються за симетрією вихідних фаз, компактністю, складністю виготовлення та можливістю регулювання параметрів. Конструкції з послідовним з'єднанням котушок забезпечують формування систем із різною кількістю фаз, тоді як спеціальні конструкції магнітопроводів дають можливість підвищити симетрію вихідних електрорушійних сил і розширити функціональні можливості перетворювачів.

Показано, що найбільш прості конструктивні рішення доцільно застосовувати у випадках, коли основними вимогами є технологічність і формування заданої кількості фаз. Більш складні багатострижневі та аксіальні конструкції доцільні для систем, у яких пріоритетними є висока симетрія фаз, зменшення електромагнітних втрат або можливість регулювання параметрів.

Узагальнене порівняння показало, що вибір конструкції ТПФ повинен здійснюватися з урахуванням кількості вихідних фаз, вимог до симетрії, потужності, габаритів, можливості регулювання та технологічності виготовлення. Універсальної конструкції, яка одночасно забезпечує найкращі характеристики за всіма критеріями, не визначено.

Інформація про використання штучного інтелекту. Під час підготовки статті інструменти штучного інтелекту використовувалися виключно для мовного редагування, перевірки граматики, перекладу або інших допоміжних завдань, без використання згенерованих ними об'єктів як результатів академічної діяльності.

REFERENCES

[1] Alahmad, A., Kacar, F., & Uzunogl, C. P. (2024). Optimum design of an 18-pulse phase shifting autotransformer rectifier to improve the power quality of cascaded H-bridge motor driver. *Elektronika ir Elektrotechnika*. https://doi.org/10.5755/j02.eie.35126

[2] Zhang, Y., Gao, J., Huang, W., Zheng, H., & Zang, S. (2026). Research on Y-structure phase-shifting transformer with magnetic yoke balance. *Transactions of China Electrotechnical Society, 41*(1), 276–288. https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.242234

[3] Faried, S. O., & Sidhu, T. S. (2000). A new method for fault analysis of six-phase transmission systems. *Electric Power Systems Research, 53*(3), 157–163. https://doi.org/10.1016/S0378-7796(99)00057-7

[4] Koley, E., Verma, K., & Ghosh, S. (2015). An improved fault detection classification and location scheme based on wavelet transform and artificial neural network for six phase transmission line using single end data only. *SpringerPlus, 4*. https://doi.org/10.1186/s40064-015-1342-7

[5] Li, Q., Li, Y., Rowland, S., Hu, J., Cotton, I., & Jiang, X. (2022). Audible noise evaluation for six-phase overhead lines transformed from existing three-phase double circuit infrastructures with uprated voltages. *High Voltage*. https://doi.org/10.1049/hve2.12246

[6] Iqbal, A., Moinuddin, S., Khan, M. R., Ahmed, S. M., & Abu-Rub, H. (2010). A novel three-phase to five-phase transformation using a special transformer connection. *IEEE Transactions on Power Delivery, 25*(3), 1637–1644. https://doi.org/10.1109/TPWRD.2010.2042307

[7] Chen, X. (2003). Three-phase/six-phase conversion autotransformers. *IEEE Transactions on Power Delivery, 18*(4), 1554–1561. https://doi.org/10.1109/TPWRD.2002.807461

[8] Khan, M. R., Alammari, R., Moinoddin, S., & Iqbal, A. (2014). Modelling and analysis of a three-phase to five-phase transformer. *International Journal of Emerging Electric Power Systems, 15*(4), 401–410. https://doi.org/10.1515/ijeeps-2012-0062

[9] Vimalakeerthy, D., Al-Ahinai, I. S., Al-Hiai, N. N., & Al-Tobi, A. H. (2017). Comparison of special transformer connections in three phase to five phase transformation. *International Journal for Scientific Research & Development, 5*(5), 271–273.

[10] Khelafi, A., Djebli, A., Touhami, O., & Ibtiouen, R. (2023). Design and modelling of three-to-five phase three-limbed transformer. *IET Electric Power Applications, 17*(4). https://doi.org/10.1049/elp2.12292

[11] Sokai, K., & Ishii, K. (1991). *Phase-shifting transformer with a six-phase core* (U.S. Patent No. 5,003,277). Mitsubishi Denki Kabushiki Kaisha.

[12] Stavynskyi, A. A., Avdieieva, O. A., Stavynskyi, R. A., Tsyhanov, O. M., & Sadovyi, O. S. (2023). Proiektni modeli strukturnoho syntezu transformatoriv i reaktoriv [Design models for the structural synthesis of transformers and reactors]. Mykolaiv National Agrarian University. https://dspace.mnau.edu.ua/jspui/handle/123456789/16347 [in Ukrainian].

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

[1] Alahmad, A., Kacar, F., & Uzunogl, C. P. (2024). Optimum design of an 18-pulse phase shifting autotransformer rectifier to improve the power quality of cascaded H-bridge motor driver. *Elektronika ir Elektrotechnika*. https://doi.org/10.5755/j02.eie.35126

[2] Zhang, Y., Gao, J., Huang, W., Zheng, H., & Zang, S. (2026). Research on Y-structure phase-shifting transformer with magnetic yoke balance. *Transactions of China Electrotechnical Society, 41*(1), 276–288. https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.242234

[3] Faried, S. O., & Sidhu, T. S. (2000). A new method for fault analysis of six-phase transmission systems. *Electric Power Systems Research, 53*(3), 157–163. https://doi.org/10.1016/S0378-7796(99)00057-7

[4] Koley, E., Verma, K., & Ghosh, S. (2015). An improved fault detection classification and location scheme based on wavelet transform and artificial neural network for six phase transmission line using single end data only. *SpringerPlus, 4*. https://doi.org/10.1186/s40064-015-1342-7

[5] Li, Q., Li, Y., Rowland, S., Hu, J., Cotton, I., & Jiang, X. (2022). Audible noise evaluation for six-phase overhead lines transformed from existing three-phase double circuit infrastructures with uprated voltages. *High Voltage*. https://doi.org/10.1049/hve2.12246

[6] Iqbal, A., Moinuddin, S., Khan, M. R., Ahmed, S. M., & Abu-Rub, H. (2010). A novel three-phase to five-phase transformation using a special transformer connection. *IEEE Transactions on Power Delivery, 25*(3), 1637–1644. https://doi.org/10.1109/TPWRD.2010.2042307

[7] Chen, X. (2003). Three-phase/six-phase conversion autotransformers. *IEEE Transactions on Power Delivery, 18*(4), 1554–1561. https://doi.org/10.1109/TPWRD.2002.807461

[8] Khan, M. R., Alammari, R., Moinoddin, S., & Iqbal, A. (2014). Modelling and analysis of a three-phase to five-phase transformer. *International Journal of Emerging Electric Power Systems, 15*(4), 401–410. https://doi.org/10.1515/ijeeps-2012-0062

[9] Vimalakeerthy, D., Al-Ahinai, I. S., Al-Hiai, N. N., & Al-Tobi, A. H. (2017). Comparison of special transformer connections in three phase to five phase transformation. *International Journal for Scientific Research & Development, 5*(5), 271–273.

[10] Khelafi, A., Djebli, A., Touhami, O., & Ibtiouen, R. (2023). Design and modelling of three-to-five phase three-limbed transformer. *IET Electric Power Applications, 17*(4). https://doi.org/10.1049/elp2.12292

[11] Sokai, K., & Ishii, K. (1991). *Phase-shifting transformer with a six-phase core* (U.S. Patent No. 5,003,277). Mitsubishi Denki Kabushiki Kaisha.

[12] Ставинський, А. А., Авдєєва, О. А., Ставинський, Р. А., Циганов, О. М., & Садовий, О. С. (2023). Проєктні моделі структурного синтезу трансформаторів і реакторів. Миколаївський національний аграрний університет. https://dspace.mnau.edu.ua/jspui/handle/123456789/16347

© Мардзявко В. А.

Дата першого надходження статті до видання: 13.08.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 08.09.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 02.11.2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)