

ПЕРЕДПЛАТА ЖУРНАЛУ • ІНДЕКС 22859

Видання "УкрЕлектро"

Періодичність – 2 номери на рік

Свідоцтво про державну реєстрацію:  
серія КВ, № 2079 від 16.07.1996 р.

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи  
до державного реєстру видавців, виготовлювачів  
і розповсюдуючих видавничих продукцій:  
серія ДК, № 5613 від 25.09.2017 р.

Суб'єкт у сфері друкованих медіа від 07.03.2024 р.  
Ідентифікатор медіа – R30-02923



ВИДАВЕЦЬ ТОВ "ЕТІН"

ДИРЕКТОР

Любим Мар'ян Орестович

РЕДАКТОР

Козенко Олександр Михайлович

Директор ТОВ "ПФ Донтелпром"

НАУКОВИЙ РЕДАКТОР

Буткевич Олександр Федотович, д.т.н.  
Професор. Головний науковий співробітник  
Інститут електродинаміки НАН України

ГОЛОВА РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ

Денисюк Сергій Петрович, д.т.н.  
Директор Інституту енергобезпеки  
та енергоменеджменту  
Професор. Кафедра електропостачання  
НТУУ "Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського"

ВИПУСКАЮЧИЙ РЕДАКТОР

Облаковен Сергій Вікторович  
Директор ТОВ "Амліс-Енерджи"  
Корпорація Амліс холдинг

ТЕХНІЧНИЙ РЕДАКТОР

Чижок Павліна Андріївна

ФОТОКОРЕСПОНДЕНТ

Зубова Ольга Віталіївна

АДРЕСА РЕДАКЦІЇ

ТОВ "ЕТІН"

03190, м. Київ, о/с № 15

[www.promelektro.com.ua](http://www.promelektro.com.ua)

[promelektro.etin@gmx.de](mailto:promelektro.etin@gmx.de)

[promelektro.etin@gmail.com](mailto:promelektro.etin@gmail.com)

+380 44 228 82 68

КОР. ПУНКТ м. ЗАПОРІЖЖЯ

ТОВ "ПФ Донтелпром"

69118, м. Запоріжжя,

вул. Автозаводська, 50, оф. 147

[kozhenko@zpp.ua](mailto:kozhenko@zpp.ua)

+380 50 470 18 38

ОРИГІНАЛ-МАКЕТ ТОВ "ДІА"

03032, м. Київ, вул. Васильківська, 45

[dia\\_1997@ukr.net](mailto:dia_1997@ukr.net)

+380 99 225 73 68

Рекомендовано до друку редакційною колегією,  
протокол № 1 від 27.05.2024 р.

Підписано до друку 28.05.2024 р.

Дата виходу номеру 31.05.2024 р.

Формат 60 × 84 <sup>1</sup>/<sub>8</sub> мм, друк. арк. – 10,7.

Обл. вид. арк. – 11,2.

© Промислова електроенергетика та електроніка • №1 • 2024

# 2024

№1

## ЗМІСТ

### 6 ЕЛЕКТРИЧНІ МЕРЕЖІ

- 6 Тончиловський Я., Штефаник Я.  
Вплив технології будівництва ЛЕП середньої напруги на надійність мереж
- 10 Тончиловський Я., Штефаник Я.  
Ключова роль ПНН СН в оцінці надійності розподільних мереж
- 15 Кобалевич Г., Штефаник Я.  
Тимчасова погіршена лінія електропередач на основі технології UMKW,  
як сучасне рішення в побудові мереж

### 22 ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ

- 22 Чорний Ю.А., Шестеренко В.Е.  
Особливості системного регулювання напруги силовими трансформаторами
- 26 Бедерак Я.С.  
Фазування силових трансформаторів напругою 6 (10)/0,4 кВ з групами з'єднання  
трикутник/зірка з нульовим виводом

### 32 ОБЛІК ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

- 32 Менько А.М.  
Про необхідність плати за електроенергію тільки за активним лічильником електроенергії
- 34 Михайлов В.П.  
Спільне технічне рішення компанії PCL (США) з управління якістю електроенергії та кібербезпеки  
на базі PQCube для підприємств та енергосистем

### 38 СВІТЛОТЕХНІКА

- 38 Шабашкін В.Г., Добровольський Ю.Г., Юр'єв В.Г.  
Прилади для вимірювання параметрів світлового середовища на основі  
фотометра Екстенсор-03

### 40 БЛИСКВКОЗАХИСТ ТА ЗАЗЕМЛЕННЯ

- 40 Лейбов С.Ю., Мрич С.В., Кожиха Д.Г., Руденко С.С.  
Розрахунок компонентів ризику для визначення рівня блискавкозахисту  
відкритих розподільних пристроїв надвисокої напруги

### 50 ЕЛЕКТРОБЕЗПЕКА ЕЛЕКТРОУСТАНОВОК

- 50 Менько А.М.  
• Щодо способів подолання деяких недоліків пристроїв захисного відключення  
в мережах до 1 кВ  
• Способи унеможливлення непрямого дотику людини до струмопровідних частин  
в мережі напругою до 1 кВ з допомогою упереджувачої дії захисту  
• Спосіб попередження пожежі при замиканні на землю в мережах до 1 кВ  
з допомогою дії пристроїв захисного відключення (ПЗВ)  
• Заходи зі зменшення вірогідності виникнення пожежі при короткому замиканні  
в мережах до 1 кВ  
• Заходи з підвищення електробезпеки в мережах напругою до 1 кВ при дотику людини  
до струмопровідних частин
- 55 Менько А.М., Тобісток С.С.  
• Селективний захист від однофазних замикань на землю у мережах  
напругою 6–35 кВ, що діє у разі торкання людини до струмопровідних частин  
• Про надійність електропостачання із захистом від однофазних замикань на землю  
без витримки часу в мережах 6–35 кВ

### 60 ВІДНОВЛЮВАНА ЕНЕРГЕТИКА

- 60 Кныш К.С.  
Вітроенергетика як рушій „зеленого“ відновлення та основа енергетичної безпеки
- 63 Ворущико А.С., Гай С.В.  
• Про режим генерації вітрових електростанцій  
• Про режим генерації фотоелектричних станцій

### 72 ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

- 72 Лаваровка С.О.  
До питання розробки та встановлення показників (критеріїв) енергетичної ефективності  
систем теплопостачання населених пунктів територіальних громад

### 80 НОРМАТИВНО-ПРАВОВА БАЗА

- 80 Ворущико А.С., Гай С.В.  
Місгорвід в Україні: нагальне завдання створення й удосконалення  
нормативної бази побудов та експлуатації
- 84 Карелін С.П.  
Енергоефективність систем водопостачання в розрізі впливу вимог ДБН В.2.5-74:2013  
„Водопостачання. Земліщні мережі та споруди“

За достовірність інформації та повноту відповідальність несуть автори та редакція.  
Редакція не несе відповідальності за зміст статей. Редакція зберігає за собою право редагувати і скорочувати зміст статей.  
Надійшли матеріали на перевірку. Передрук та використання матеріалів можливі тільки з письмового дозволу редакції.  
Не використовуйте анімації повільно, швидко навігація й записання відео.  
В офіційній використанні інформаційні матеріали фінансуються, установа, підприємство.  
Матеріали повільно записані, друкується на правах реклами.  
Прямий заход має рекламу, стрічку публікації не прийнято.

# ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ



Ю. А. Чорний,  
Д-р PhD, доцент



В. С. Шестеренко,  
Д-р PhD, професор

Навчально-науковий інженерно-технічний інститут імені академіка І. С. Гулого Національного університету харчових технологій



УДК 621.314

Надійшло  
Received 21.04.2024

## ОСОБЛИВОСТІ СИСТЕМОГО РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ СИЛОВИМИ ТРАНСФОРМАТОРАМИ

Регулювання напруги — метод підвищення ефективності систем електропостачання. Відхилення, коливання напруги є пріоритетним завданням при проектуванні систем електрозабезпечення. Збитки, зумовлені низькою якістю напруги, мають дві складові: електромагнітну та технологічну. Електромагнітна складова визначається зростанням витрат енергії та зменшенням терміну служби електрообладнання. Технологічна складова збитків зумовлена впливом якості напруги на продуктивність технологічних установок та на собівартість продукції. Технологічні збитки складають до 90–92% всіх збитків і вищезазначені в собівартості продукції. Енергетики замовчують це питання, технологи, як правило, не знають причини технологічних збитків. Запропоновано спосіб підвищення якості напруги. Це дає змогу виконати стабілізатори напруги будь-якого ступеня точності, засновані на принципі дискретного регулювання перемикачними відпадом трансформатора без розриву струму та спотворення кривої напруги.

**Ключові слова:** система електропостачання, системний підхід, напруга, система керування, ресурс перемикача, відпадок трансформатора.

Ресурс більшості РПН силових трансформаторів 10000–15000 перемикачів. У разі автоматичного регулювання напруги число перемикачів сягає 30–40 за добу або 10950–14600 за рік. Ревізія контактів пристроїв повинна здійснюватися через 5000 перемикачів, тобто необхідно до 3 разів на рік робити ревізію перемикаючого пристрою. Цього не можна допускати ані за умовами надійності, а ні за рівнем трудових витрат. У цьому основні причини, що заважають широкому впровадженню та ефективному використанню автоматичного регулювання напруги. Необхідний ресурс, достатній для роботи пристроїв протягом 20–25 років складає порядку 200–250 тис. перемикачів з урахуванням тієї обставини, що із зменшенням струму комутації ресурс збільшується.

Пристрої РПН та окремі елементи їх мають задовольняти вимоги високої надійності з тим, щоб їх ремонт і ревізію можна було б суміщати з поточним ремонтом трансформатора, тобто не частіше 1 разу на рік. Проте більшість з перерахованих пристроїв має ряд конструктивних недоліків, що не відповідають вимогам надійності.

Одним із самих відповідальних вузлів РПН є перемикаючий пристрій, що визначає надійність роботи РПН та його ресурс до ревізії.

Аварійність трансформаторів через пошкодження перемикаючих пристроїв сягає до 66% загального числа пошкоджень трансформаторів. Більшість пристроїв РПН, що знаходяться в експлуатації, виконані з перемикаючими контактами у маслі. В ізоляційному трансформаторному маслі на контактах перемикаючих пристроїв утворюється поверхнева плівка, яка спричиняє підвищення опору в контактах,

а отже й обумовлює підвищений нагрів при протіканні струму навантаження. Підвищений нагрів і тривале утворення поверхневих плівок супроводжується розкладом масла й утворенням масляного нагару. Далі розвиваються процеси взаємодії масла з матеріалами контактів, що призводить до подальшого зростання електричного опору контактів, швидкого їх підгоряння та зносу, що скорочує термін служби контактів й обумовлює необхідність часті їх ревізії. Тому крім удосконалення конструкцій механічних контактних перемикаючих пристроїв, визначення оптимальних умов їх роботи, оптимальних величин силових зусиль, періодів і способів видалення поверхневих плівок, виникає необхідність у розробці та дослідженні нових принципів виконання перемикаючих пристроїв, принципово нових схем і конструктивних розв'язків, які б дозволили суттєво підвищити ресурс пристроїв, їх надійність, а також полегшити монтаж та експлуатацію. Цього можна досягти при використанні нових комутуючих пристроїв з примусовим гасінням дуги, а також напівпровідникових елементів, розміщених як у трансформаторі, так і поза ним.

Механічні перемикаючі пристрої мають конструюватися з урахуванням потужності трансформатора та його призначення, умов роботи, під якими розуміють потужність, що комутується перемикачем, частота перемикань, яка визначає інтенсивність спрацювання перемикача. Ресурс пристрою РПН має становити не менш як 500 тис. перемикань.

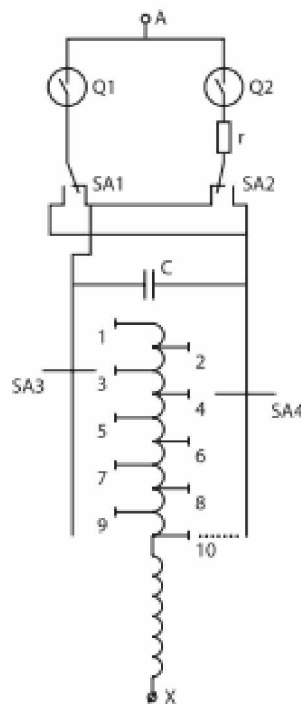


Рис. 1. Контактний перемикач відпайок трансформатора на основі вакуумних комутаційних камер Q1, Q2

Для випробувань на електричне спрацювання контактів передбачено 40 тис. перемикань для реакторних пристроїв і 50 тис. для пристроїв з активними струмообмежувальними резисторами. За міжнародними нормами МЕК рекомендується 20 тис. перемикань.

Перехід на випуск швидкодіючих перемикаючих пристроїв з активними струмообмежувальними резисторами дозволяє суттєво збільшити допустимі струми комутації і ресурс пристроїв. Слід зазначити, що за цим принципом виконані майже всі перемикаючі пристрої іноземних фірм. Така конструкція дозволяє задовольнити вказані вимоги до пристроїв РПН.

Подальшим удосконаленням контактної системи є застосування вакуумних дугогасильних камер у поєднанні зі швидкодіючим контактором [1, 2]. Завдяки такому сполученню, а також тому, що гасіння дуги здійснюється у вакуумних дугогасильних камерах, а не в маслі, дозволяє довести ресурс перемикаючого пристрою до 100 тис. перемикань під розрахунковим навантаженням. При цьому виключається необхідність заміни масла в порожнині контактора чи установці додаткових очисних пристроїв. Додатково це створює конструктивні зручності монтажу, оскільки конструктивно перемикаючий пристрій устатковується безпосередньо на активній частині трансформатора із зануренням (рис. 1).

Ресурс контакторів пристрою, що не розривають струм при перемиканнях, не менш як 500 тисяч. Перемикачі відпайок SA3, SA4 працюють тільки у разі відсутності струму крізь них. Розрив кола здійснюється вакуумними камерами Q1, Q2.

Припустимо, необхідно переключити трансформатор на відпайку 2. Перемикач SA4 знаходиться у знеструмленому стані й переводиться на відпайку 2. Вмикається камера Q2. Перемикач SA2 переводиться у праве положення і камера Q2 вмикається, а Q2 вмикається. SA1 переводиться у ліве положення і вмикається Q1. Трансформатор продовжує роботу на відпайці 2.

Застосування тиристорів для регулювання напруги виявляється економічно виправданим у разі необхідності досягнення великого числа (понад 300 тис.) перемикань за рік [4, 6]. Проте, завдяки високій надійності, можливості швидкої заміни блоків, бездугової та безрозривної комутації, застосування напівпровідників є доцільним на всіх типах перемикаючих пристроїв як існуючих, так і принципово нових. Тут можна вказати на два основні напрями у використанні тиристорів: перший — тиристори використовуються як силові комутуючі елементи, що замінюють механічні комутатори або ті, що використовуються разом з механічними комутаторами (гібридні комутуючі пристрої) для полегшення процесів комутації; другий — тиристори в силових колах, що використовуються для плавного регулювання напруги у діапазоні, що вимагається.

На схемі (рис. 2) зображена обмотка трансформатора з відпайками від неї [2, 4].

З'єднання обмоток зіркою здійснюється групою тиристорів шляхом подачі керуючого сигналу на їхні керуючі електроди. Кількість груп тиристорів дорівнює числу відпайок трансформатора. Комутація

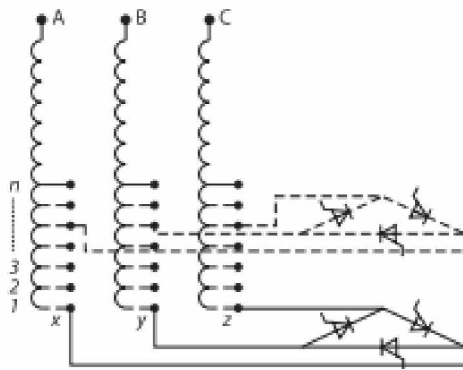


Рис. 2. Тиристорний комутатор відпайок трансформатора

струму при переході на сусідню відпайку може бути здійснена без розриву кола головного струму і без закорочування секції, що комутується. Для цього достатньо зняти сигнал з одного із тиристорів групи, що вмикається, подавши одночасно сигнал на відповідний тиристор групи, що вмикається. Аналогічно перемикається решта електронних вимикачів. Повне число тиристорів визначається виразом

$$N = 3n,$$

де:  $n$  — кількість відпайок в одній фазі трансформатора.

Якщо підрахувати необхідну кількість тиристорів, наприклад для трансформаторів на 35 кВ потужністю до 6300 кВ·А  $n=±6+1=13$ , то дістанемо  $N=39$  шт.

Для трансформаторів на 110 кВ, кількість керуванних тиристорів збільшується до 57, причому треба врахувати, що визначене число тиристорів відповідає випадку, коли в плече трикутника вмикається тільки один тиристор. Знизити кількість напівпровідникових приладів можна використанням симетричних тиристорів як вимикачів, тобто напівпровідникових приладів діодного типу, які перепускають обидві півхвилі (позитивну та негативну) [1, 5]. Витрата тиристорів скоротиться на третину, бо схема їх вмикання дозволяє обійтися двома симисторами (рис. 3). Проте при цьому значно ускладнюється перехід з однієї секції на другу без розриву кола й закорочування комутуючої секції.

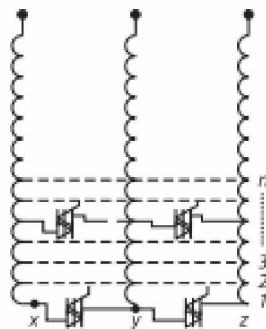


Рис. 3. Симисторний комутатор відпайок

Застосування напівпровідникових приладів дає змогу усунути низку недоліків механічного перемикаючого пристрою (невисоку швидкість, низький ресурс) і залишити основну його перевагу — синусоїдність форми кривої напруги. Можливість з допомогою напівпровідникових пристроїв здійснювати комутацію без спотворення синусоїди у момент переходу через нуль дозволяє усунути і такий істотний недолік механічних перемикачів — дискретність. Це дає змогу виконати стабілізатори напруги будь-якого ступеня точності, засновані на принципі дискретного регулювання перемиканням відпайок трансформатора без розриву струму та спотворення кривої напруги.

Досить цікавими є розробки гібридних комутуючих апаратів, що дозволяють об'єднати переваги механічних і напівпровідникових пристроїв, а також суттєво зменшити габарити [2, 4]. Гібридні пристрої дозволяють у разі виходу з ладу тиристорного блока роботу пристрою РПН як простого механічного. Тиристорний блок дозволяє практично звести нанівець руйнуючу дію електричної дуги під час комутації. Тиристири тут відіграють роль механічних синхронізаторів, забезпечуючи розмикання механічних контактів у момент переходу струму через нуль. Зображений на рис. 4 гібридний контакт складається з механічного силового контакту SA1, який проводить струм у стаціонарному режимі, відділювального контакту SA2 й тиристорного блока VS.

Процес комутації у такому контакторі розбивається на дві фази: вмикання та вимикання.

**1. Вмикання.** При розімкненому силовому контакті SA1 замикається відділювальний контакт SA2, і підключає тиристорну пару VS до мережі. Вмикаються тиристири й струм навантаження починає протікати по колу SA2-VS. Після цього замикається контакт SA1. Оскільки опір контактного переходу механічного контакту малий порівняно з опором тиристорного вимикача, відбувається природна комутація струму навантаження з тиристорного блока на механічний контакт. Причому керування тиристорів залишається ввімкненим.

**2. Вимкнення.** На рис. 4 показаний процес вимкнення індуктивного навантаження. Вимикаються контактор SA1 й автоматично з допомогою блок-контакта знімається керування з тиристорів, при першому переході струму через нуль струм наван-

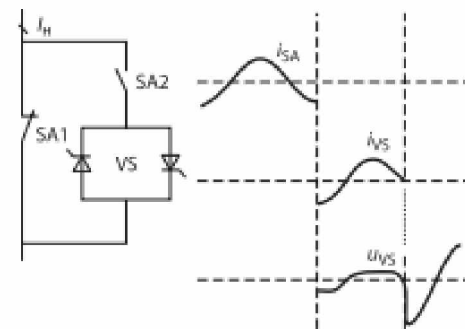


Рис. 4. Гібридний перемикач РПН

таження, звичайно, переривається тиристорним блоком VS. На рисунку зображений процес зміни струмів і напруг на механічному контакті й тиристорному блоці, а також напруг на механічному контакті й тиристорному блоці у процесі вимкнення навантаження.

Вимкнення струму відбулося на другому переході струму через нуль після вимкнення контакту SA1 (при першому переході ще не було знято керування з тиристорів). Отже, весь процес комутації займе не більше півперіоду. Якщо врахувати, що тиристори можуть короткочасно витримувати значні перевантаження за струмом, то їхня потужність у цих пристроях суттєво менша за потужність, що необхідна для повної заміни механічного контакту. Підвищені вимоги до напівпровідникових приладів тут ставляться тільки у відношенні динамічних характеристик (швидкості зростання струму та напруги), також імпульсних навантажень. Це задача вибору технічних параметрів приладів і, в першу чергу, часу відновлення вільних носіїв, яка визначає допустимі величини похідних струму та напруги комутації. Найдоцільніше з'єднання механічних і напівпровідникових пристроїв з можливістю розділу функцій з тим, щоб забезпечити високу надійність роботи пристрою протягом тривалого часу із забезпеченням високої якості електроенергії та гнучкості керування.

На рис. 5 зображена принципова схема тиристорно-контакторного перемикаючого пристрою [1, 2, 4, 6]. Блок тиристорів підключається паралельно розмикаючим контактам і після їх розмикання перериває струм навантаження. Ця схема має один блок тиристорів на фазу, що вигідно відрізняє її від інших спеціальних пристроїв регулювання напруги як дискретної, так і безперервної дії.

Додаткові затрати на тиристорний блок і деякі конструктивні зміни у пристрої окуповуються цілим рядом переваг: можливістю одержання необмеже-

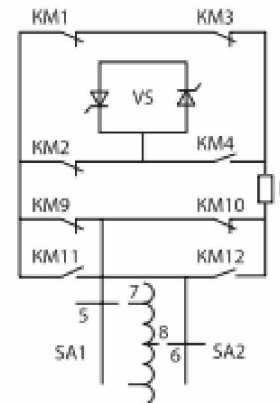


Рис. 5. Тиристорно-контакторний РПН

ного терміну служби контактних систем, який визначається механічною довговічністю виробу, відсутністю забруднення масла та інших деталей, а також конструктивне виконання перемикача поза баком трансформатора, що дозволяє здійснювати ревізії пристрою без зливу масла та суттєво скоротити трудовитрати на обслуговування [1, 2, 5, 6].

## ВИСНОВКИ

Перед авторами не стоїть задача реклами конкретних пристроїв відомих фірм. Застосування напівпровідникових приладів дозволяє усунути ряд недоліків механічного перемикаючого пристрою (невисоку швидкість, низький ресурс) і залишити основну його перевагу — синусоїдність форми кривої напруги. Можливість з допомогою напівпровідникових пристроїв здійснювати комутацію без спотворення синусоїди у момент переходу через нуль дозволяє усунути і такий суттєвий недолік, як перехідні процеси з появою імпульсів напруги.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Шестеренко В.Є. Системи електроживлення та електропостачання промислових підприємств. Вінниця: Нова Книга, 2011. 656 с.
2. Шестеренко В.Є. Оптимізація систем електроживлення промислових підприємств. Київ: ЧП "Глана", 2001. 214 с.
3. Шестеренко В.Є. Електропостачання промислових підприємств. Київ, 2013. 424 с.
4. Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів. Затверджено наказом Міністерства палива та енергетики України від 25.10.2006.
5. Шестеренко В.Є. Проектування систем електропостачання. К.: ПП "К", 2017. 436 с.
6. Omid Alizadeh Mousavi, Rachid Cherkaoui (2019), Investigation of P-V and V-Q based optimization methods for voltage and reactive power analysis. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 63, pp. 769–778.

