

**ПРОКОПЕНКО В. В.**, канд. техн. наук, доцент  
**ЗАКЛАДНИЙ О. О.**, канд. техн. наук, доцент  
**ГРЕБЕНЮК Т. В.**, канд. техн. наук, доцент  
Національний технічний університет України «КПІ імені Ігоря Сікорського»,  
м. Київ

## **ВИБІР МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ В ПРОМИСЛОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ**

***Анотація.** Регулювання напруги в мережі промислового підприємства дозволяє підвищити якість електроенергії та зменшити її втрати. Витрати, які йдуть на встановлення та обслуговування регулюючих пристроїв, виправдовують себе економією від поліпшення режимів напруг в електричних мережах і системах.*

***Ключові слова:** автоматичний регулятор напруги, динамічний компенсатор спотворень напруги, статичні компенсатори реактивної потужності.*

***Abstract.** Voltage regulation in an industrial network allows to improve the quality of electricity and reduce its losses. The costs involved in the installation and maintenance of control units are justified by the cost savings of improving the voltage regimes in electrical networks and systems.*

***Keywords:** automatic voltage regulator, dynamic voltage distortion compensator, static reactive power compensators.*

Одним з основних питань, що вирішуються як на стадії проектування, так і на стадії експлуатації систем промислового електропостачання, є питання про вибір методів і засобів регулювання напруги в промислових електричних мережах.

Кожному електричному споживачу для нормального функціонування необхідне забезпечення показників якості електроенергії. Якість електроенергії визначається сукупністю параметрів мережі, при яких електроприймачі можуть виконувати всі покладені на них функції.

Одним з основних показників якості електричної енергії є відхилення напруги.

При відхиленні напруги змінюється частота обертання електродвигунів (холодильники, компресори, насоси, кондиціонери та

ін.), що призводить до відхилення від нормального режиму їх роботи. При цьому зростає спожитий струм, внаслідок чого відбувається перегрів двигуна, швидке зношування ізоляції і вихід з ладу самого приймача електричної енергії. При тривалій роботі на напрузі  $0,9 \cdot U_{\text{ном}}$  термін служби двигуна знижується вдвічі. При значних відхиленнях напруги відбувається зрив технологічного процесу, підвищується ймовірність аварій. За рахунок регулювання напруги в мережі промислового підприємства можна не тільки підвищити якість електроенергії, але і скоротити її втрати. Витрати, які йдуть на встановлення та обслуговування регулюючих пристроїв, окупаються за рахунок поліпшення режимів напруги в електричних мережах і системах.

У цій роботі проводиться аналіз основних методів та засобів регулювання напруги в промислових електричних мережах. Розгляду підлягають автоматичний регулятор напруги на базі автотрансформатора (АТ), статичні компенсатори реактивної потужності, динамічний компенсатор спотворень напруги, паралельний активний фільтр.

Автоматичний регулятор напруги — електронний пристрій на основі автотрансформатора з обмотками, які перемикаються.

Для регулювання напруги в електричних мережах промислових підприємств з номінальною напругою 6 і 10 кВ, номінальним струмом до 500 А можна використовувати блоки автоматичного регулювання напруги (БАРН).

Установка БАРН дозволяє:

- збільшити пропускну здатність існуючих ліній для підключення нових споживачів [1];
- забезпечити якість електроенергії (в тому числі усунути несиметрію напруги);
- автоматично підтримувати рівень напруги в заданих межах (як при прямому, так і зворотному напрямку потоку потужності (реверсивний режим)).

Вольтододатковий АТ роблять на базі 1-фазного масляного автотрансформатора з загальною та послідовною обмотками. Послідовна обмотка може мати до 32 ступенів для регулювання напруги в діапазоні  $\pm 10\%$ . Регулювання здійснює перемикач ступенів. За рахунок конструкції АТ можна здійснювати регулювання під навантаженням. До складу БАРН може входити два або три АТ [1].

Напруга регулюється за рахунок геометричного додавання напруги загальної та послідовної обмоток, при цьому підвищення

або пониження рівня вихідної напруги відносно вхідного здійснюється зміною полярності послідовної обмотки.

Мікропроцесорна система контролю та управління вимірює напругу з боку навантаження і порівнює її із заданою, і якщо вони відрізняються, формується сигнал керування електроприводом, який переміщує перемикач на відповідний щабель для підвищення (або зниження) напруги [1].

Принципова електрична схема БАРН має вигляд (рис. 1):

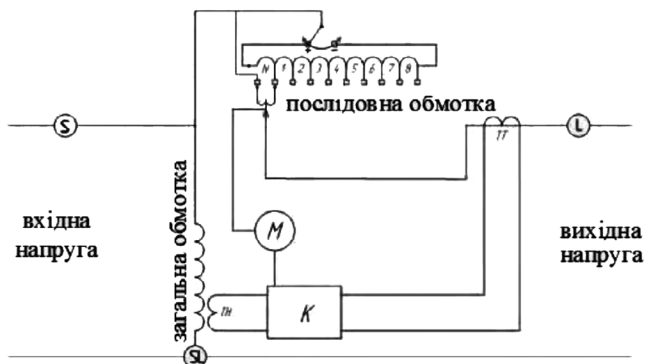


Рис. 1. Принципова електрична схема БАРН:

S – високовольтний ввід з боку джерела; L – високовольтний ввід з боку навантаження; SL – високовольтний ввід загальної точки, K – контролер системи управління, M – електропривод

Недоліком є те, що електропривод має кілька електричних виходів, які з'єднуються за допомогою окремих електричних ліній з відповідним регулятором напруги. Ці сполучні лінії необхідні у зв'язку з тим, що численна інформація, наприклад про поточний стан перемикача ступенів обмоток трансформатора, проводиться в електроприводі за допомогою електричних і електромеханічних засобів, а обробляється тільки в регуляторі напруги, що знаходиться на відстані.

Силова електроніка стрімко розвивається, тому основними перспективними пристроями компенсації провалів і спотворень напруги в теперішній час є пристрої статичної та динамічної компенсації відхилення напруги. На рис. 2 показана схема пристрою статичної компенсації реактивної потужності. Він має дворівневий перетворювач напруги (ПН), виконаний на основі IGBT транзисторів і паралельно включених діодів, і працює в режимі широтно-

імпульсної модуляції ШІМ; конденсаторні батареї  $C_d$  на стороні постійної напруги  $E_d$ , фазний реактор  $L_p$  і ширококутовий пасивний фільтр  $C_\phi, L_\phi, R_\phi$ , налаштований на придушення гармонік. [2]

Реактивна потужність пристрою, яку він може генерувати або споживати, приймається за  $Q_{ст}$  і реактивна потужність вузла навантаження  $Q_H$  може змінюватися в межах від  $Q_{max} = Q_H + Q_{ст}$  до  $Q_{min} = Q_H - Q_{ст}$ .

Для управління використовується генератор напруги з ШІМ, який створює три синусоїдальні моделюючі напруги, що утворюють трифазну систему.

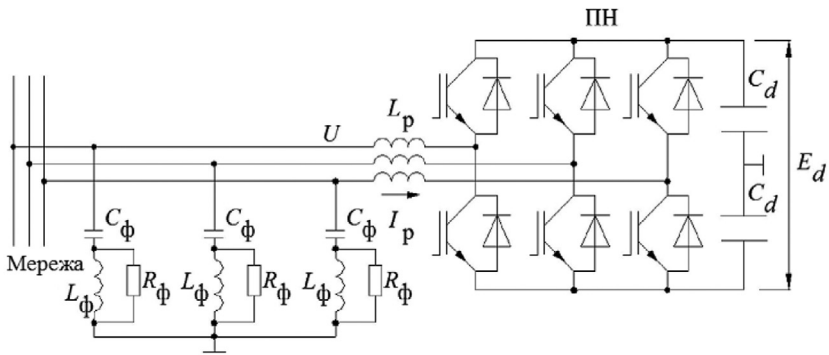


Рис. 2. Схема пристрою статичної компенсації реактивної потужності

Неодмінною умовою нормальної роботи перетворювача напруги є підтримання постійною напруги  $E_d$  на конденсаторній батареї  $C_d$ .

Управління транзисторами IGBT для кожної фази здійснюється незалежно – шляхом накладання напруги несучої частоти відповідної синусоїди напруги, що модулюється. При цьому в будь-який момент повинен бути включений лише один з двох транзисторів кожної фази [3].

Основні функції таких компенсаторів:

- придушення коливань напруги у вузлі навантаження за рахунок компенсації різкозмінної реактивної потужності  $Q_H$ ;
- регулювання напруги у вузлі навантаження шляхом зміни потоків реактивної потужності;
- усунення несиметрії напруг, викликаной нерівномірним розподілом реактивної потужності за фазами;

– підвищення стійкості вузла навантаження завдяки тому, що при відхиленні напруги пристрій працює в режимі джерела струму незалежно від напруги у вузлі навантаження [4].

Перевагою є висока експлуатаційна надійність, мала ймовірність виникнення резонансних явищ, обумовлених наявністю конденсаторних установок. Недоліком є реакція тільки на реактивну складову струму навантаження в процесі компенсації зазначених параметрів.

Пристрій динамічної компенсації спотворень напруги (ДКСН) є однією з найбільш сучасних розробок в області компенсації відхилення напруги. Схема ДКСН представлена на рис. 3 [5].

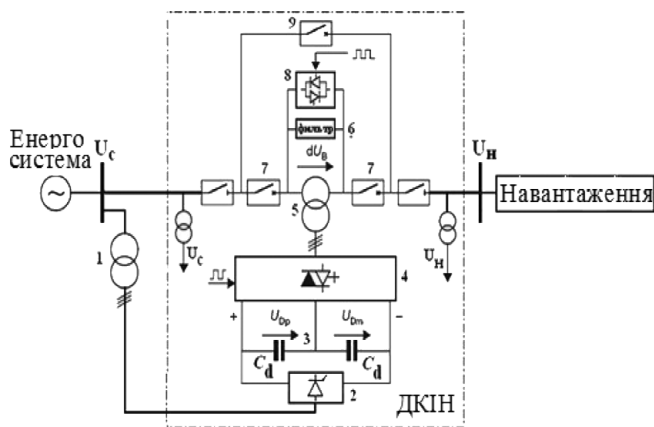


Рис. 3. Функціональна схема ДКСН:

1 – вихідний трансформатор; 2 – тиристорний керований випрямляч; 3 – акумулюючі конденсатори; 4 – керований інвертор; 5 – вольтододатковий трансформатор; 6 – фільтр вищих гармонійних складових напруги; 7 – вимикачі; 8 – захисний пристрій ДКСН; 9 – байпасний вимикач;  $U_c$  – напруга енергосистеми;  $U_n$  – напруга на навантаженні;  $U_{Dp}$  – позитивне напруга постійного струму;  $U_{Dm}$  – негативна напруга постійного струму;  $dU_U$  – напруга компенсації відхилення

Динамічний компенсатор являє собою перетворювач напруги з пофазним управлінням на основі повністю керованих випрямлячів, який підключається до мережі живлення споживача і через вольтододатковий трансформатор перерозподіляє потужності таким чином, щоб добавка напруги на вторинній обмотці повністю компенсувала відхилення напруги. Переваги: висока надійність,

малі експлуатаційні витрати, час реакції 1–2 мс, захист від усіх видів КЗ [5]. Недоліки: відсутність блоку синхронізації напруги добавки з напругою мережі [6,7].

До економічних засобів регулювання напруги можуть бути віднесені активні силові фільтри, які дають можливість усунути спотворення трифазної мережі, що викликані нелінійними навантаженнями промислових підприємств, а так компенсувати споживання реактивної потужності. Активні фільтри виділяють основну гармоніку напруги, яка є опорним сигналом для системи управління і формують заданий струм, який порівнюється з реальним струмом нелінійного навантаження. Гармонійні складові, які наводяться нелінійними навантаженнями компенсуються струмом інвертора, що генерується за допомогою сигналу неузгодженості. Одним і тим же перетворювачем гармоніки всіх порядків компенсуються одночасно. Активні силові фільтри можуть бути включені послідовно або паралельно з мережею. Послідовне включення фільтра застосовується в основному для високовольтних приводів [8].

Структура паралельного активного фільтра (ПАФ) представлена на рис. 4. ПАФ складається з трьох основних частин: силової частини, системи управління та накопичувального елемента. Силова частина виконується у вигляді реверсивного інвертора і вихідного згладжувального пасивного фільтра або реакторів.

Реверсивний інвертор виконується на базі IGBT транзисторів ( $k_1, k_2, \dots, k_6$ ), які шунтуються діодами, необхідними для випрямлення спожитого змінного струму з метою заряду накопичувального елемента  $C_\phi$  і має дві основні функції: генерування компенсаційного струму в мережу і заряд накопичувального елемента для підтримки на ньому заданого значення напруги.

Вихідний фільтр виконує функцію зниження пульсацій генерованого в мережу струму. Інвертор працює в режимі ШІМ, і його вихідний струм має пилкоподібну форму кривої, яку необхідно згладжувати вихідним RLC-фільтром.

До складу системи управління входить мікропроцесор обробки даних або спеціальний програмований контролер, датчики струму і напруги, формувач імпульсів, підсилювальний пристрій для перетворення сигналів управління низького рівня в керуючі сигнали силових елементів інвертора [8].

Переваги: є найкращим засобом підвищення якості електроживлення при наявності в мережі спотворених гармонік струму, викликаних нелінійними навантаженнями.

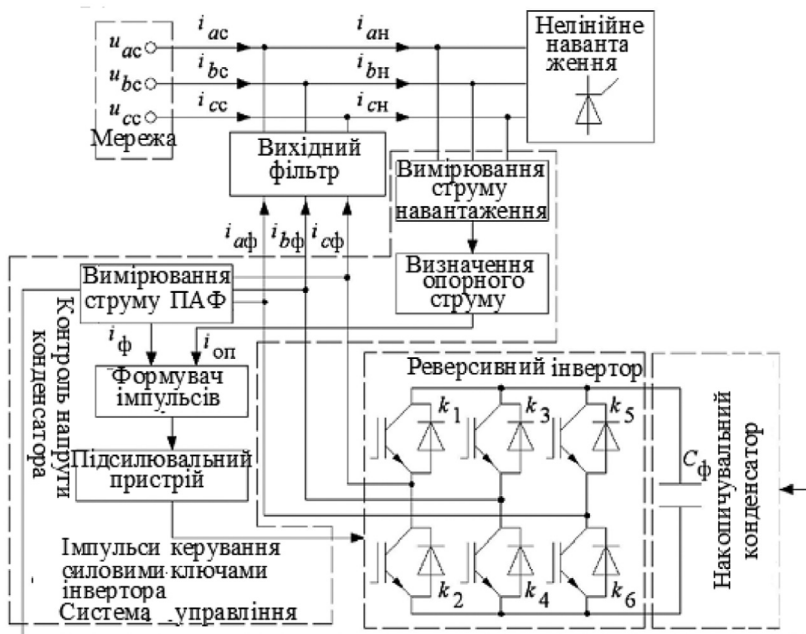


Рис. 4. Структура ПАФ

Недоліки: обмежений спектр компенсації, який визначається кількістю і якістю використовуваних в блоці фільтрації аналогових гармонійних фільтрів і перетворювачем на IGBT-транзисторах; і може бути налаштований на компенсацію гармонік тільки нижче 25-ї.

**Висновок.** Отримані результати свідчать про те, що завданням регулювання напруги на промислових підприємствах є забезпечення якості електроенергії, яка відповідає встановленим нормам, задовольняє економічну спільну роботу електричних мереж енергосистеми і електроприймачів і пов'язаних з ними механізмів, забезпечення необхідного запасу стійкості енергосистеми, відповідності рівня напруги значенням, допустимим для обладнання електричних станцій і мереж.

### Література

1. Блоки автоматического регулирования напряжения 6–10 кВ на номинальные токи 50–600 А на базе автотрансформаторов: информационный буклет / ЗАО «ЧЭМЗ». – Чебоксары: ЗАО «ЧЭМЗ», 2013. – 19 с.

2. Вагин Г. Я. К вопросу о применении на предприятиях регулирующих и стабилизирующих устройств / Г. Я. Вагин, А. А. Севостьянов // Промышленная энергетика. — 1998. — № 1. — С. 50–51.
3. Вагин Г. Я. О необходимости более широкого применения средств местного регулирования напряжения в промышленных электросетях / Г. Я. Вагин, В. С. Орлов // Промышленная энергетика. — 1992. — № 2. — С. 32–36.
4. Гамазин С. П. Динамические компенсаторы искажений напряжений напряжения как способ повышения эффективности работы потребителей при нарушениях электроснабжения / С. П. Гамазин, В. М. Пупин, Ю. В. Марков // Главный энергетик. — 2006. — № 6. — С. 22–29.
5. Ивакин В. Н. Электропередачи и вставки постоянного тока и статические тиристорные компенсаторы / В. Н. Ивакин, Н. Г. Сысоева, В. В. Худяков. — М.: Энергоатомиздат, 1993. — 335 с.
6. Поляков В. Е. Система гарантированного электроснабжения энергетических объектов сырьевого комплекса / В. Е. Поляков // IX Международная конференция «Новые идеи в науках о земле»: сб. статей. / РГГРУ. — М., 2009. — С. 248.
7. Шевчук А. П. Применение теорий нечеткой логики при компенсации высших гармоник активным фильтром / А. П. Шевчук // Записки Горного института. — 2009. — Том 182. — С. 137–140.
8. Cañizares C.A. STATCOM Modeling for Voltage and Angle Stability Studies / C.A. Cañizares, M. Pozzi, S. Corsi, E. Uzunovic // International Journal of Electrical Power and Energy Systems. — 2003. — № 6. — С. 431–441.

***Інформація про авторів:***

Прокопенко Володимир Васильович.

E-mail: progrek@gmail.com

Закладний Олег Олександрович.

E-mail: zakladniy@gmail.com

Гребенюк Тетяна Володимирівна.

E-mail: t.hrebeniuk07@gmail.com