

складності. Важливою структурною одиницею є технологічний модуль, що складається зі стаціонарного та рухомих блоків, відповідальних за формоутворюючі рухи. Саме він є основою для формування матриць можливих компоновок фрезерних верстатів.

Побудова матриць горизонтальних та вертикальних компоновок дозволяє отримати всі можливі структурні варіанти розміщення блоків (О, Х, Y, Z), а кількість таких варіантів, з урахуванням орієнтації шпинделя, сягає 48. Поділ компоновок за структурними та конструктивними ознаками дає можливість виділити базові типи (Е, F, G, Q — для малих верстатів, та I, K, L — для великих). Кожен тип визначається особливостями розташування стаціонарного блока, напрямками переміщень та вимогами до вертикальних рухів. Методика побудови узагальнених структурних формул дозволяє формалізувати кожен тип та полегшує їх застосування у проектуванні.

Важливою складовою оптимізації є метод перетину множин структурних умов. Узагальнені формули умов М1–М5 (вплив маси, точність, динаміка, завантаження, уніфікація) дозволяють математично відбирати лише ті компоновки, що відповідають конкретним технологічним вимогам. Додатковим важливим аспектом є забезпечення динамічної стійкості та жорсткості системи за рахунок правильного розподілу мас, мінімізації консольних переміщень та зменшення впливу власних коливань. Компоновки, у яких рухомі маси розташовані по обидві сторони від стаціонарного блока, демонструють кращі показники точності на високих швидкостях різання, що є важливим для сучасних верстатів з числовим програмним керуванням. Також суттєвий вплив на якість обробки має правильне розміщення блоку аксіального переміщення шпинделя, яке забезпечує мінімальні похибки при температурних деформаціях.

Таким чином, застосування структурно-модульного підходу в проектуванні компоновок верстатів забезпечує системність вибору рішень, дозволяє обґрунтовано порівнювати альтернативи та формувати оптимальну компоновку з урахуванням жорсткості, точності, технологічної гнучкості та експлуатаційних вимог. Метод перетину множин структурних ознак є ефективним інструментом для створення раціональних конструкцій сучасних фрезерних та свердлильних верстатів.

УДК 621.313

В.Б. Савків, к.т.н., доцент, І.П. Федорів, В.В. Довжанин, Я.М. Довжанин
(Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна)

УДОСКОНАЛЕННЯ АЛГОРИТМІВ КЕРУВАННЯ ТИРИСТОРНИМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ НАСОСНИХ СТАНЦІЙ

V.B. Savkiv, Ph.D., Assoc. Prof., I.P. Fedoriv, V.V. Dovzhanyn, Ya.M. Dovzhanyn
**IMPROVEMENT OF ALGORITHMS FOR CONTROLLING THYRISTOR ELECTRIC
DRIVES OF PUMPING STATIONS**

Енергетична ефективність роботи потужних насосних станцій (продуктивністю десятки тисяч м³/добу) значною мірою визначається надійністю електроприводів насосних агрегатів. Для двигунів потужністю 500 кВт і вище, особливо синхронного типу, критичним елементом є система керування збудженням. Сучасні тенденції вимагають переходу від аналогових регуляторів до цифрових систем, здатних забезпечити не лише стабілізацію напруги, а й оптимізацію реактивної потужності ($\cos\phi$), безударний пуск та інтеграцію в єдину систему автоматизованого диспетчерського керування (SCADA).

Існуючі аналогові системи керування часто не забезпечують необхідної швидкодії при аварійних збуреннях та не дозволяють інтегрувати агрегат у SCADA-систему підприємства. Метою даної роботи є аналіз структури та вдосконалення алгоритмів функціонування тиристорної системи збудження (ТСЗ) для насосних агрегатів.

Розглянута система базується на принципах підпорядкованого регулювання координат електроприводу і складається з функціональних модулів, що реалізують як силову комутацію, так і логічну обробку сигналів.

Система керування реалізована за блочно-модульним принципом і складається з чотирьох функціонально незалежних вузлів, взаємодія яких забезпечує повний цикл керування синхронною машиною.

Блок автоматичного регулювання (блок А) - формує закон керування струмом збудження в функції параметрів статора (напруги, струму) для підтримки заданого коефіцієнта потужності.

Блок логіки, обмеження та захисту (блок Б) - виконує функції арбітра, визначаючи пріоритетність сигналів керування (ручний/автоматичний/аварійний) та реалізує захисні алгоритми.

Фазоімпульсний перетворювач (блок В) - безпосередньо формує імпульси відмикання тиристорів, перетворюючи аналоговий сигнал керування у фазовий кут α .

Блок живлення та синхронізації (блок Г) - забезпечує гальванічну розв'язку та формування опорної напруги.

Керування силовими тиристорами здійснюється через суматор сигналів, куди надходять команди від автоматичного регулятора (блок А) або від потенціометра ручного задавання через перемикач режимів. В основу роботи покладено фазовий метод керування випрямлячем.

Регульовальна характеристика системи має інверсний характер:

$$I_f = f(U_{кер}) = K \cos(\alpha_0 + k U_{кер})$$

Згідно з алгоритмом роботи блоку В, збільшення керуючої напруги призводить до збільшення кута фазового зсуву імпульсів α . Оскільки вихідна напруга випрямляча пропорційна $\cos \alpha$, збільшення кута призводить до зниження напруги збудження і, відповідно, до зменшення струму ротора. Ця особливість вимагає інвертування сигналу в контурі зворотного зв'язку регулятора.

Для забезпечення стійкої комутації тиристорів критично важливою є точна синхронізація з мережею живлення. У розробленій системі синхронізуюча напруга формується в блоці живлення таким чином, що вона має фазовий зсув у 30° відносно вторинної напруги силового трансформатора. Це дозволяє компенсувати апаратні затримки у формувачах імпульсів та забезпечити симетрію фаз.

Специфіка насосного навантаження вимагає особливого підходу до захистів. Система реалізує багаторівневий захист.

Захист від перевантаження (обмеження струму ротора), реалізовано як залежну характеристику витримки часу. Давач струму ротора побудовано на базі трьох трансформаторів струму Т2...Т4, включених у вторинне коло Т1, сигнал з яких випрямляється діодним мостом. При перевищенні уставки струму система не просто відключає двигун, а спочатку намагається зменшити струм збудження, збільшуючи кут α . Час спрацювання захисту зворотно пропорційний кратності перевантаження ($t \sim 1/I^2$), що дозволяє використовувати теплову ємність обмоток для короточасних форсувань.

Випадіння з синхронізму є найбільш небезпечним режимом. Алгоритм захисту від асинхронного ходу базується на контролі змінного струму в колі збудження. При асинхронному ході в обмотці ротора індукуються ЕРС ковзання, що викликає протікання змінного струму через пусковий опір. Цей струм фіксується герконовим реле, яке подає сигнал на аварійне відключення або ресинхронізацію.

При відключенні агрегату система автоматично переводиться в інверторний режим ($90^\circ < \alpha < 150^\circ$). Енергія, накопичена в індуктивності обмотки збудження, рекуперується в мережу, що забезпечує швидку зупинку електромагнітних процесів та захищає ізоляцію ротора від перенапруг.

Пуск потужного синхронного двигуна насоса є складним електромеханічним процесом. Реалізовано комбінований алгоритм керування пуском: пуск по струму; реакторний пуск; пуск у функції ковзання.

При пуску по струму контроль здійснюється трансформатором у колі статора. Поки пусковий струм перевищує уставку, подача імпульсів збудження блокується, двигун розганяється як асинхронний.

При реакторному пуску, для зниження просадок напруги використовується введення реактора в коло статора. подача збудження відбувається з фіксованою витримкою часу після шунтування реактора.

Пуск у функції ковзання - це найбільш досконалий метод. Система вимірює частоту ЕРС, наведену в роторі. Збудження подається лише в момент, коли ковзання з низується до критичного значення (вхід у підсинхронну зону), що гарантує успішне втягування в синхронізм без значних механічних ударів на валу насоса.

Розроблений алгоритм керування передбачає циклічне опитування стану датчиків. Після ініціалізації та успішного проходження самодіагностики ("Тестування системи"), мікроконтролер перевіряє наявність напруги на силовому трансформаторі. Далі відбувається активація попередніх підсилювачів та подача відмикаючих імпульсів на тиристори.

В процесі роботи безперервно аналізується сигнал від датчика струму ротора: при виявленні струмів короткого замикання відбувається миттєве блокування імпульсів блоку В та подача команди на вимикач, оминаючи режим інвертування.

Отже, запропонована структура системи керування тиристорним збуджувачем дозволяє реалізувати енергоефективні режими роботи синхронних двигунів насосних станцій. Використання фазового методу керування в поєднанні з алгоритмами захисту від асинхронного ходу та функцією інвертування забезпечує високу живучість обладнання. Подальший розвиток системи вбачається в інтеграції мікропроцесорних контролерів для реалізації цифрового обміну даними з АСУ ТП станції.

УДК 681.518

В.Б. Савків, к.т.н., доцент, І.П. Федорів, В.М. Скицько, М.О. Федчук

(Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна)

АВТОМАТИЗОВАНИЙ КОМПЛЕКС КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ ТІСЛОВИХ ЗАГОТОВОК У ТІСЛОРІЗДІЛЮВАЧАХ

V.B. Savkiv, Ph.D., Assoc. Prof., I.P. Fedoriv, V.M. Skytsko, M.O. Fedchuk

**AUTOMATED COMPLEX FOR CONTROLLING DOUGH PARAMETERS IN DOUGH
DIVIDER**

Сучасне хлібопекарське виробництво вимагає безпрецедентної стабільності якості продукції. Це вимагає відмови від застарілих та схильних до дрейфу аналогових методів вимірювання на користь високоточних цифрових рішень. Метою даного дослідження є інтеграція комплексу автоматизованого контролю параметрів тістових заготовок (температури, тиску, рівня) з передовими технологіями комп'ютерного зору та глибокого навчання для забезпечення повного, простежуваного та гнучкого процесу відбракування.

Для забезпечення надійності та гігієнічності контролю використовуються сенсори індустриального класу, розроблені спеціально для харчової промисловості, з дотриманням найвищих стандартів санітарної обробки.

Вимірювання температури, критичного параметра для реології тіста, здійснюється за допомогою платинових термометрів опору (RTD) типу Pt1000. RTD-давачі забезпечують