

Академік НАН України Г. Г. Півняк, О. С. Бешта, В. С. Хілов

Розвиток методу активної послідовної корекції з використанням нечіткого керування в системах регулювання електроприводами складних електромеханічних установок

Using the method of active successive correction and the ideas of fuzzy control theory, we find the additional contour correcting regulators which suppress the influence of elastic properties of a transmission on the control system dynamics.

Постановка проблеми і зв'язок з науковими і практичними задачами. Технічним стандартом привідних систем з підвищеними вимогами до статичних і динамічних режимів керування є загальнопромислові приводи з активною корекцією і двоконтурними системами регулювання по каналах частоти обертання і збудження як двигунів постійного, так і змінного струмів [1, 2].

Технологія керування складними динамічними об'єктами на основі автоматизованих електроприводів постійного і змінного струмів з послідовною корекцією характеристик займає важливе місце в сучасному підході до оптимізації динамічних режимів роботи машин і установок [3, 4]. Характерною для таких систем є наявність тиристорного випрямляча для приводу постійного струму і транзисторного автономного інвертора напруги з широтно-імпульсною модуляцією для приводу змінного струму, а також спеціальних трансмісій, які передають обертовий момент від двигуна до робочого органа. При цьому маси і пружності окремих ланок механічної системи можуть бути зосередженими і розподіленими (бурові верстати, екскаватори, стрічкові конвеєри, піднімальні установки тощо [5]). Такі об'єкти керування мають низькі характеристичні частоти. Привідні системи постійного струму через інерційності тиристорного перетворювача і якоря двигуна є фільтрами низької частоти з високою добротністю і смугою пропускання до 50 рад/с. Привідні системи змінного струму через меншу механічну інерцію ротора двигуна і більшу частоту комутації широтно-імпульсного модулятора мають смугу пропускання до 200 рад/с. Тому при модернізації електроприводу шляхом заміни привідної системи постійного струму на систему змінного струму істотно змінюється динаміка роботи всієї електромеханічної установки [6].

Мета досліджень. На основі використання методу активної послідовної корекції й ідей нечіткого керування знайдемо додаткові контурні коригувальні регулятори, що пригнічують вплив пружних властивостей трансмісії на динаміку системи регулювання.

Матеріал досліджень. Додаткові динамічні ланки, зумовлені наявністю пружних властивостей трансмісії, описуються дрібно-раціональними функціями з високими ступенями [7, 8]. Характеристичні частоти додаткових передатних функцій можуть виявитися менше частоти зрізу відповідного (оптимізованого за стандартними критеріями) контура керування і потрапляють у смугу пропускання. Узагальнена структурна схема об'єкта керування в цьому випадку містить передатні функції компенсованої частини об'єкта керування ($W_{okn}(p)$) і передатні функції некомпенсованої частини об'єкта керування ($W_{onn}(p)$), зумовлені пружними властивостями трансмісії.

У досліджуваних привідних системах контур регулювання кожного параметра (координати) містить, як правило, не тільки одну “велику” сталу часу, що компенсується дією регулятора, але і дрібно-раціональну функцію із сталими часу, які цілком порівнюються з “великою”. Це значно ускладнює синтез системи і не дозволяє застосовувати однотипні алгоритми керування, які використовуються в загальнопромисловому приводі.

Об’єкт керування структурно розподілений на дві ланки — компенсовану і некомпенсовану класичним регулятором. Компенсована частина вибирається у вигляді динамічної ланки не вище другого порядку з однією явно вираженою “великою” постійною часу. Процеси в контурі добре корегуються класичним регулятором з ПД — характеристикою або похідними від цієї характеристики (ПІ, ПД, П, І).

Закони керування досліджуваними приводами визначаються технологічними особливостями з урахуванням накладених обмежень на параметри електричної і механічної частин привідної системи. Обмеження накладаються на параметри потоку механічної енергії, величини прискорень і ривків, що допускаються трансмісією, перевантажувальну здатність двигуна, його припустимий рівень нагрівання і т. д. Ці фактори у сукупності з видом збурення визначають припустимі закони зміни всіх координат системи приводу. Класичні алгоритми функціонування регуляторів визначаються шляхом послідовної корекції динамічних характеристик кожного контура, починаючи від найбільш швидкодіючого — внутрішнього $m = 1$, до зовнішнього контура $m = n$ з мінімальною швидкодією. Під оптимізацією розуміється зведення динамічних параметрів замкнутого контура у відповідності до обмежень, що накладаються, на якість перехідного процесу.

Узагальнена передатна функція об’єкта оптимізованого контура при зроблених припущеннях зводиться до вигляду

$$W_{on}(p) = W_{okn}(p)W_{onn}(p) = \frac{2\xi'_n T'_n p + 1}{T_n^2 p^2 + 2\xi_n T_n p + 1} \frac{\sum a_{mn} p^m}{\sum b_{mn} p^m},$$

де T_n, T'_n — сталі часу; ξ_n, ξ'_n — коефіцієнти демпфування; a_{mn}, b_{mn} — коефіцієнти поліномів.

В останньому рівнянні динамічна ланка $W_{okn}(p)$ відповідає ланкам, дія яких компенсується класичним регулятором. Друга динамічна ланка $W_{onn}(p)$ представлена дрібно-раціональним виразом, дія якої через складність алгоритму компенсації не може бути подавлена класичним ПД-регулятором. Якщо віднести сталі часу дрібно-раціональних передатних функцій до малих некомпенсованих сталих часу контура регулювання, то його швидкодія істотно зменшиться. Ця обставина негативно позначиться на швидкодії всієї системи керування. Вибором малої некомпенсованої постійної часу оптимізованого контура керування визначається припустима межа швидкодії контура.

Для пригнічення пружних коливань трансмісії можна вмикати додаткові регулюючі ланки паралельно основним регуляторам (розподілені додаткові класичні регулятори) або перерахувати дію паралельних додаткових регуляторів на вхід напівпровідникового перетворювача — вихід регулятора струму (зосереджений додатковий класичний регулятор). Останнє переважніше, оскільки коригувальний вплив подається на самий швидкодіючий контур.

Алгоритми роботи регуляторів при такому способі пригнічення коливальних процесів у системі керування, визначаємо в такий спосіб. Для компенсації додаткових передатних функцій послідовно класичному регулятору вмикається додатковий регулятор з передатною функцією

$$W_n(p) = \frac{\sum b_{mn} p^m}{\sum a_{mn} p^m}$$

або паралельно кожному основному класичному регулятору необхідно вмикати додатковий регулятор з передатною функцією

$$W'_n(p) = \frac{1}{p\sigma_n W_{okn}(p)} \frac{\sum (b_{mn} - a_{mn})p^m}{\sum a_{nm}p^m},$$

де σ_n — сумарна мала постійна часу контура керування.

Якщо звести дії всіх додаткових регуляторів на вихід внутрішнього регулятора, то замість n приєднаних паралельно кожному регулятору можемо отримати еквівалентний регулятор, що має передатну функцію вигляду

$$W''_n(p) = \frac{1}{p\sigma_n W_{okn}(p)} \frac{\sum (b_{mn} - a_{mn})p^m}{\sum a_{nm}p^m} \prod_{k=n-1}^1 \left(\frac{1}{p\sigma_k W_{okk}(p)} \frac{\sum b_{nk}p^n}{\sum a_{nk}p^n} \right).$$

Він охоплює паралельно класичні регулятори. Але при цьому алгоритм роботи одного регулятора стає більш складним, ніж алгоритм роботи кожного регулятора окремо.

Всі алгоритми корекції динамічних процесів містять похідні не нижче другого ступеня від сигналу неузгодженості, що при наявності шумів негативно вплине на працездатність такої компенсації. Крім того, зміна параметрів об'єкта керування приводить до нестабільності характеристичних частот додаткових динамічних ланок, тому можливе настроювання алгоритмів корекції тільки в одній робочій точці контурів. Зміна кількості приєднаних мас приводить не до компенсації пружних коливань додатковими коригувальними ланками, а до збільшеної коливальності системи керування. Тому алгоритми корекції динаміки повинні мати властивості адаптації до змінних параметрів об'єкта керування.

У зв'язку з викладеним вирішуємо проблему компенсації пружних коливань у системах регулювання з послідовною корекцією шляхом застосування принципів нечіткого керування складними об'єктами, до яких відносимо й електроприводи при наявності пружних зв'язків у трансмісії. Це дозволяє зберігати відомі переваги систем з послідовною корекцією динамічних параметрів [9].

Підхід на основі теорії нечітких множин має характерні відмінні риси: на додаток до числових змінних використовуються нечіткі величини, так звані лінгвістичні змінні. Прості відносини між змінними описуються за допомогою нечітких висловлень. Складні відносини описуються нечіткими алгоритмами [10]. Такий підхід дає наближені, але в той же час ефективні способи описання поведінки складних систем.

Для збереження переваг систем керування з активною послідовною корекцією паралельно з класичними регуляторами вмикаємо нечіткий регулятор, функції якого полягають в пригніченні коливань, що виникають у системі керування через пружні коливання в трансмісії (рис. 1).

Для пригнічення пружних коливань трансмісії в контурах керування передбачаємо не тільки сигнал, пропорційний неузгодженості між завданням і дійсним значенням контрольованої величини, а також швидкість зміни й інтеграл від відзначеної неузгодженості, що відповідає нечіткому регулятору з динамічною ПД-характеристикою. Структура нечіткого регулятора передбачає вибір вхідних функцій належності, правила обробки термів, перетворення вихідного сигналу.

Синтез нечіткого регулятора раціонально робити в два етапи. На першому етапі робимо вибір кількості функцій належності на основі кластерного аналізу вектора вхідного сигналу

розраховується між вихідними об'єктами (рядками матриці D), а також від цих об'єктів до прототипу кластерів. У розглянутому випадку координати прототипів заздалегідь невідомі — вони знаходяться одночасно з розбивкою даних на кластери.

Для знаходження кількості кластерів використовуємо метод субтрактивної кластеризації, алгоритм роботи якого викладено в [11].

Визначившись з кількістю кластерів для вхідних змінних, переходимо до другого етапу синтезу нечіткого регулятора, для чого використовуємо можливості навчання нейронних штучних мереж з метою знаходження вихідних функцій належності і взаємного розташування як вхідних, так і вихідних функцій належності.

База правил знаходиться за вихідними функціями належностей з використанням апарату гібридних мереж, у яких висновки робляться на основі нечіткої логіки, але відповідні функції належності налагоджуються на підставі алгоритмів нейронних мереж [12]. Такі системи навчання використовують множину вхідних і вихідних значень і розподіляють функції належності відповідно до вектора даних D . Параметри функцій належності змінюються відповідно до наданих для навчання сигналів. Для навчання взяті алгоритми зворотного поширення [13], а також комбінація цих алгоритмів з методом оцінки найменших квадратів. Ці алгоритми дозволяють ефективно навчатися нейро-нечіткому регулятору від набору даних на його вході і виході.

Таким чином, проведені дослідження дозволили виявити такі закономірності.

1. Ефективне пригнічення дії динамічних ланок, зумовлених впливом трансмісії в системах з активною послідовною корекцією, можливе шляхом застосування поряд із класичними регуляторами додаткових нечітких регуляторів.

2. Нечіткі коригуючі регулятори вводяться в ті контури керування, де власні частоти додаткових ланок виявляються менше частоти зрізу контура.

3. Кількість функцій належності нечіткого регулятора визначається на основі кластерного аналізу матриці спостережень вхідних сигналів, а база правил знаходиться шляхом використання апарату нейронних гібридних мереж, у яких висновки робляться на основі нечіткої логіки, а відповідні функції належності налагоджуються на підставі алгоритмів нейронних мереж.

4. В алгоритмах роботи нечіткого коригувального регулятора струму і швидкості досить обмежитися двома складовими — пропорційною і диференціальною, оскільки змінна складова від інтеграла неузгодженості повторює із зсувом на 180° диференціальну складову.

5. Аналіз перехідних процесів свідчить про те, що включення нечіткого регулятора паралельно класичному приводить не тільки до збільшення швидкодії контурів, але і до збільшення перерегулювання порівняно з настроюванням на модульний оптимум. Крім збільшення перерегулювання, спостерігається збільшення коливальності. Для усунення цих негативних явищ збільшується коефіцієнт настроювання контура від значення $a = 2$, що повинно бути для модульного оптимуму, до значення $a = 3$, що зменшує швидкодію системи керування практично до значення настроювання на модульний оптимум. Одночасно істотно зменшується перерегулювання і коливальність контура керування до значень, менших, ніж при настроюванні на модульний оптимум.

1. *Управление* вентилями электроприводами постоянного тока / Е. Д. Лебедев, В. Е. Неймарк, М. Я. Пистрак, О. В. Слежановский. – Москва: Энергия, 1970. – 200 с.
2. *Системы* подчиненного регулирования электроприводов переменного тока с вентилями преобразователями частоты / О. В. Слежановский, Л. Х. Дацковский, И. С. Кузнецов и др. – Москва: Энергоатомиздат, 1983. – 256 с.

3. *Хилов В. С., Бешта А. С., Заика В. Т.* Опыт применения частотно-управляемых приводов в буровых станках карьеров Украины // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2004. – № 10. – С. 285–289.
4. *Pivnyak G., Beshta A., Khilov V.* AC drive system for actuator's power control. XIII Intern. Symp. on Theoretical Electrical Engineering ISTET'05. – Lviv, 2005. – P. 368–370.
5. *Хилов В. С., Плахотник В. В.* Оценка собственных частот буровой штанги при нестационарных режимах // Сб. научн. тр. НГУ. – 2004. – 4, № 19. – С. 145–150.
6. *Хилов В. С.* Изменение динамики привода вращателя бурового станка при применении приводной системы переменного тока // Вестн. КТУ. Разработка рудных месторождений. – 2006. – № 1(90). – С. 180–184.
7. *Привідна система спусково-підйомних операцій бурового верстату / Г.Г. Півняк, О.С. Бешта, В.С. Хилов, В.С. Федорейко // Вісн. Нац. техн. ун-ту "Харківський політехнічний інститут". – 2005. – № 45. – С. 223–225.*
8. *Khilov V.* Application of computer-aided drives in new generation boring rigs for open pit's in Ukraine // Наук. вісник НГУ. – 2006. – № 5. – С. 72–76.
9. *Терехов В. М.* Алгоритмы фаззи-регуляторов в электротехнических системах // Электричество. – 2001. – № 12. – С. 55–63.
10. *Заде Л.* Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенного решения. – Москва: Мир, 1976. – 165 с.
11. *Yager R., Filev D.* Essentials of fuzzy modelling and control. – New York: Wiley, 1984. – 387 p.
12. *Леоненков А. В.* Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. – Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2003. – 736 с.
13. *Медведев В. С., Потемкин В. Г.* Нейронные сети MATLAB 6. – Москва: ДИАЛОГ-МИФИ, 2002. – 496 с.

*Національний гірничий університет,
Дніпропетровськ*

Надійшло до редакції 25.09.2006