

ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ КОМПЛЕКСИ ТА СИСТЕМИ

УДК 621.317:621.313.3

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2022.62.041>**ГІБРИДНА СИСТЕМА ЖИВЛЕННЯ ОБМОТОК ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО СЕПАРАТОРА РОТОРНОГО ТИПУ ЗА НЕПОВНОЇ ВИЗНАЧЕНОСТІ ПАРАМЕТРІВ НАВАНТАЖЕННЯ****О.А. Зайченко**^{*}, канд. техн. наук, **О.М. Рижков**^{**}, докт. філ., **С.І. Гаврилюк**^{***}, канд. техн. наукІнститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна
e-mail: tems@ukr.net

Розглянуто особливості керування високоградієнтними електромагнітними роторними сепараторами. Приведено структурні схеми систем керування з нечіткими логічними контролерами процесом високоградієнтної електромагнітної сепарації. Запропоновано нову структурну схему гібридної системи керування електромагнітним сепаратором роторного типу, що об'єднує класичні та інтелектуальні методи керування. Показано на прикладі роторного електромагнітного сепаратора, що застосування гібридних методів керування дає змогу суттєво підвищити енергетичну ефективність в електротехнологіях із джерелами струму в силових колах за неповної визначеності параметрів системи. Бібл. 10, рис. 4.

Ключові слова: гібридна система автоматичного керування, нечіткий логічний контролер, високоградієнтний електромагнітний сепаратор роторного типу.

Вступ. У сучасних умовах інтеграції України в світові ринки виникає потреба в підвищенні енергетичної ефективності вітчизняного промислового обладнання, а саме в зменшенні енерговитрат на виробництво одиниці продукції та збільшенні технологічної ефективності, тобто в істотному підвищенні якості вихідної продукції та продуктивності обладнання, економічній ефективності, як наслідку вищезгаданого, що означає зниження собівартості продукції. Все це можливо завдяки інтелектуалізації керування електротехнічними комплексами, які є основою будь-якого технологічного процесу.

Технологічними процесами, в яких підвищення енергетичної ефективності дає найбільш суттєві результати, є електротехнології з джерелами струму в силових колах та електротехнічні комплекси з використанням частотнорегульованих електроприводів різних модифікацій. Попередні оцінки дають змогу стверджувати, що інтелектуалізація керування технологічними процесами зменшить енерговитрати до 5 % та підвищить продуктивність обладнання до 10–15 % [1–6]. У світовій промисловості, і зокрема в Україні, значне місце займають саме електротехнологічні комплекси, які використовують джерела струму в силових колах, і з першого погляду здається, що такі технології є застарілими. Вони спроектовані й виготовлені в другій половині 20-го століття, але до сьогодні успішно експлуатуються.

Найбільш поширеними й характерними електротехнологічними комплексами з джерелами струму в силових колах є такі, що використовують стабілізацію та регулювання основної електричної технологічної змінної – робочого струму. До таких комплексів відносяться насамперед комплекси з високоградієнтними електромагнітними сепараторами роторного типу, в яких основною технологічною змінною є струм в обмотках намагнічування. А також комплекси, що використовують стабілізацію та регулювання робочого струму в первинних або вторинних обмотках спеціальних трансформаторів із навантаженням, яке змінюється не лінійно або має на деяких ділянках динамічної робочої характеристики невизначений характер. До таких комплексів можна віднести установки з виробництва базальтових штапельних

супер тонких волокон, установки електрошлакового переплаву, установки з нанесення покриттів на полімерні плівки, установки з вирощування монокристалів кремнію, високотемпературні печі опору (вакуумні печі), гальванічні установки, електролізні установки в кольоровій металургії для отримання алюмінію, магнію, цинку, міді, нікелю, електролізні установки в хімічній промисловості для одержання хлору, водню, натрію, азотистих речовин.

Метою роботи є обґрунтування доцільності застосування гібридних методів керування в електротехнологіях із джерелами струму в силових колах на прикладі електромагнітного сепаратора роторного типу.

Високоградієнтна магнітна сепарація на сьогодні є найбільш перспективною технологією збагачення слабомагнітних руд і розсіпів, а також глибокого очищення кварцових та інших пісків на гірничо-збагачувальних підприємствах. Найбільш вагомими результатами були досягнуті науково-технічним центром магнітної сепарації «МАГНІС» під керівництвом Р.С. Улубабова [7], який спільно з низкою вітчизняних інститутів та підприємств, зокрема й Інститутом електродинаміки НАН України, створили високопродуктивні роторні сепаратори для збагачення слабомагнітних руд [8]. На рис.1 зображено спрощену структурну схему технологічного процесу сепарації з роторним типом сепаратора.

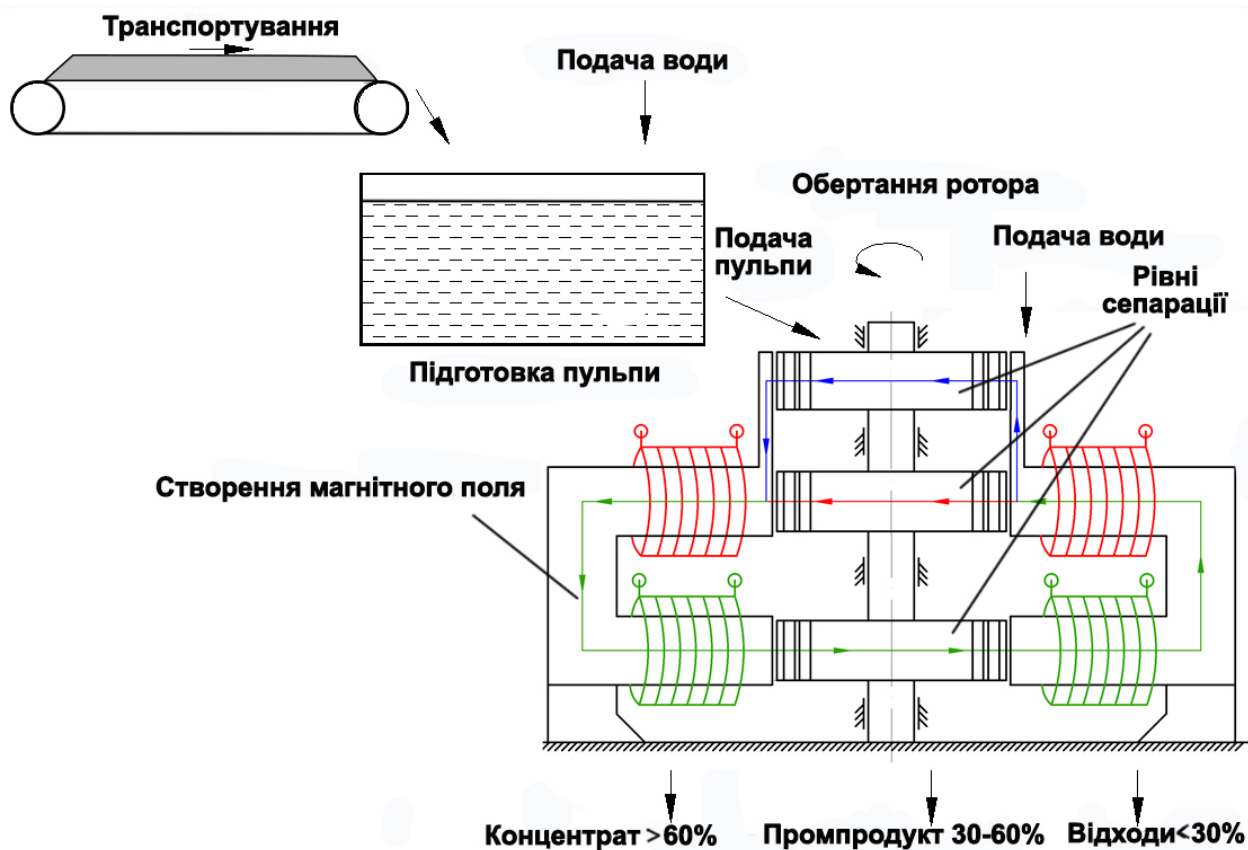


Рис. 1

У роботі [8] було проведено дослідження впливу технологічних параметрів сепарації, магнітної індукції в робочих зонах B і продуктивності сепаратора Q на величину вмісту корисної руди у вихідному магнітному продукті β . А також залежності впливу величини продуктивності на споживану потужність для різних величин магнітної індукції в робочих зонах сепаратора.

З огляду на складний взаємозв'язок показників збагачення руди та його енергетичних характеристик з технологічними параметрами сепаратора, нелінійний характер залежності магнітної індукції в робочій зоні сепаратора від величини струму намагнічування його обмоток і непрогнозовану поведінку величини магнітної проникності руди в умовах невизначеності й складності точного математичного опису стану об'єкта, зовнішнього середовища та ін-

ших факторів не видається можливим оптимальне керування технологічним процесом на основі класичних систем оптимального керування з детермінованими зворотними зв'язками.

Використання точних класичних методів регулювання магнітної індукції в робочих зонах сепараторів ускладнено насамперед малою достовірністю опису технологічного процесу через те, що видається досить складним точно описати всі його деталі, пов'язані із завантаженням матеріалів із різними властивостями, що відрізняються між собою в сотні разів. Крім того, необхідно також враховувати різні чинники збурення, які можуть бути викликані, наприклад, зміною напруги мережі живлення, старінням обмоток намагніченості, температурними коливаннями та іншим.

Реалізація оптимальних алгоритмів керування за нелінійної передавальної характеристики сепаратора шляхом використання регуляторів із лінійними безперервними пропорційно-інтегральними законами за відсутності повної та достовірної інформації про об'єкт регулювання призводить до ускладнення структури регулятора, його налагодження та експлуатації. Застосування лінійних регуляторів у системі електромагнітної сепарації з нестационарними режимами роботи призводить до нелінійної зміни параметрів регулювання, і виникає необхідність вирішення завдань визначення та багаторазового коригування коефіцієнтів керування. Тому рішення цього завдання вимагає створення такої системи регулювання, яка дала б змогу позбутися багаторазового коригування коефіцієнтів і забезпечити якість технологічного процесу незалежно від нелінійності параметрів регулювання й можливих флуктуацій зовнішніх факторів.

Тому було розроблено систему керування роторним сепаратором на основі нечіткої логіки, яка складається з контролера якості концентрату [9] та пропорційно-інтегрального контролера струму в обмотках [10]. На рис. 2 та рис. 3 приведено відповідні функціональні схеми. Нечіткий контролер якості концентрату забезпечує задану величину вмісту корисної складової руди в загальній масі β за максимальної продуктивності (Q_{max}), мінімального енергоспоживання (P_{min}) та мінімального впливу на мережу живлення (THD_{min}) залежно від заданого режиму роботи. На виході контролера маємо сигнали завдання продуктивності Q_3 , струмів верхнього $I_{вня}$ і нижнього $I_{зня}$ ярусів сепаратора. Таким чином, фактично керуючи величиною продуктивності Q (швидкістю подачі руди в систему сепарації) та величинами магнітної індукції верхнього $V_{вня}$ та нижнього $V_{зня}$ ярусів, досягаємо керування якістю вихідного концентрату.

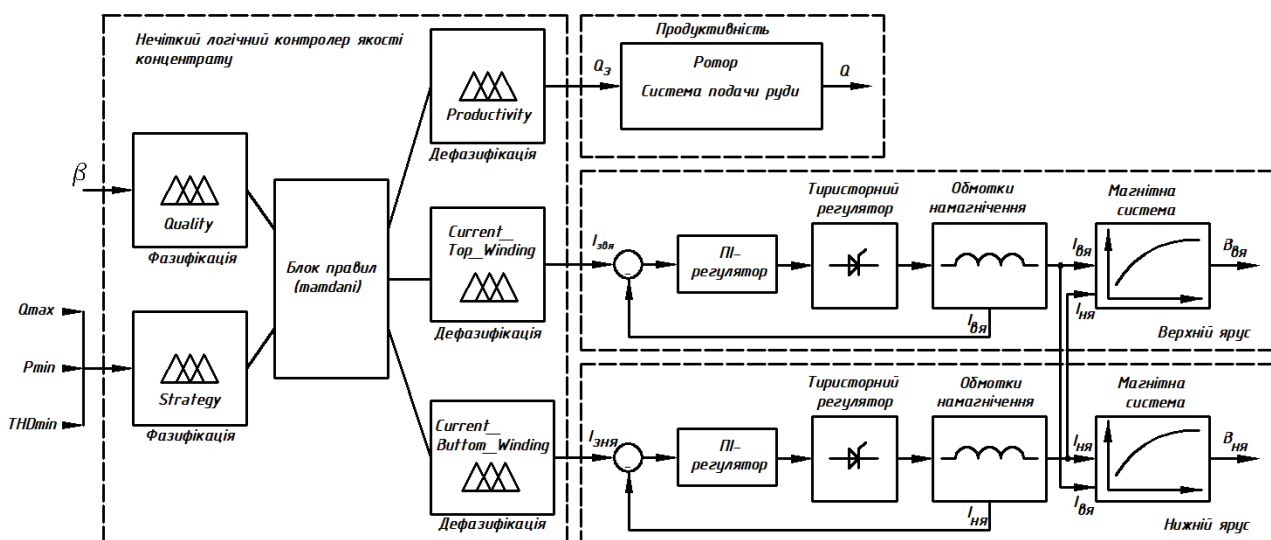


Рис. 2

Нечіткий пропорційно-інтегральний контролер струму в обмотках намагнічування електромагнітного сепаратора завдяки тому, що, окрім основного контуру регулювання за відхиленням, введено додаткові контури регулювання величини струму та швидкості його

зміни, забезпечує бажану якість перехідних процесів, задану точність в усталених режимах та швидкість реакції системи в аварійних режимах.

Розроблені в Інституті електродинаміки НАН України та виготовлені на підприємстві «Науково-технічна фірма «ТЕМС» регулятори постійного струму з системою керування на основі нечіткої логіки були впроваджені науково-технічним центром магнітної сепарації «МАГНІС» у складі електромагнітних сепараторів роторного типу «МАГНІС ЕРМ» на низці гірничо-збагачувальних комбінатів та копалень України, Казахстану та інших країн. Регулятори з гібридним керуванням довели свою ефективність. Так, в енергозберігаючому режимі використання розроблений метод дає змогу забезпечити якість вихідного концентрату на рівні $\beta=52\%$, зменшивши водночас енергоспоживання в 2,7 рази, а наприклад, за аварійного режиму тривалість зупинки системи значно скорочується порівняно зі штатним режимом. Так, тривалість перехідного процесу напруги зменшується в 15 разів, а струму – в 7,5 рази.

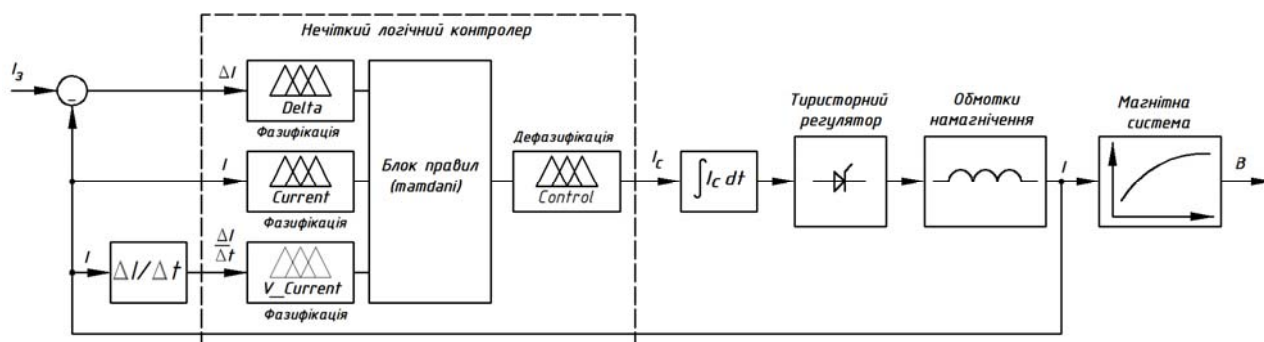


Рис. 3

Як ми бачимо, найважливішим завданням під час розробки сучасних технічних засобів автоматичного керування технологічними процесами є підвищення ефективності керування технологічними об'єктами. Водночас підвищенню оперативності керування та якості регулювання перешкоджають два основних чинники: нестабільність параметрів об'єкта керування в процесі роботи та вимоги до якості регулювання, які постійно змінюються. Для вирішення таких завдань керування можна застосувати інтелектуалізовані гібридні системи, що дають змогу одночасно використовувати переваги традиційних засобів керування й методів штучного інтелекту. Інтелектуалізована гібридна система керування, що розглядається в роботі, визначається законом трансформації, за якого нова структура знань системи породжується на базі попередньої.

Таким чином, гібридну систему необхідно розглядати як систему обробки та взаємодії даних, що складається з двох рівнів. Перший рівень представлений традиційним формально-логічним мисленням і заснований на методах класичної теорії керування. На другому рівні використовується нечітке моделювання, яке формує керування на основі нечіткої логіки з метою отримання якісного керуючого впливу на об'єкт за зміни його параметрів і дає нагоду разом з отриманими результатами першого рівня досліджувати різні аспекти невизначеності. Дворівневе позиціонування дає змогу розглядати загальну структуру системи обробки даних з різних поглядів, водночас взаємодія елементів (компонентів) структури носить не тільки механічний або електричний характер, а й інформаційний, що є важливим атрибутом сучасних організаційно-технічних систем. Аналіз розробок гібридних систем керування дає змогу зробити висновок про те, що застосовані в межах гібридних систем моделі реалізуються окремо залежно від поставленої мети. Зокрема, гібридна система, заснована на спільному використанні класичного і нечіткого регуляторів, зображена у вигляді блок-схеми на рис. 4.

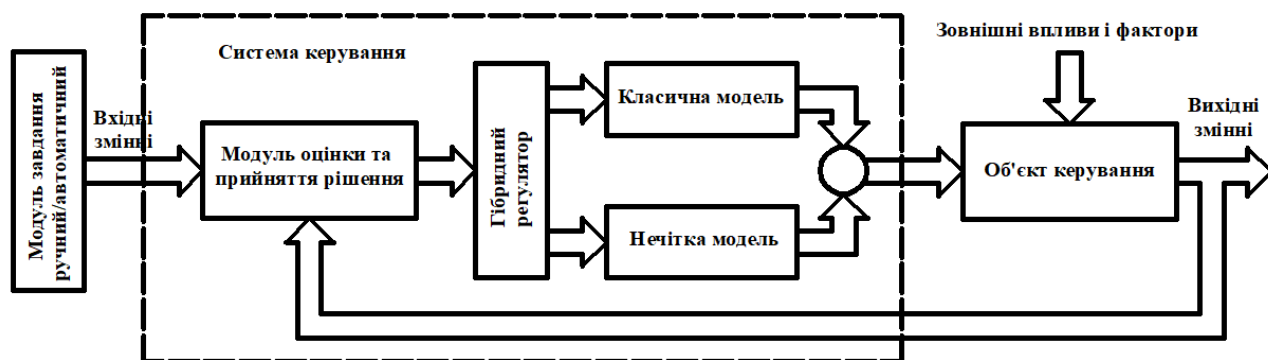


Рис. 4

Запропонована інтелектуалізація керування технологічними процесами сприяє підвищенню енергетичної й технологічної ефективності вітчизняного промислового обладнання. У розглянутому технологічному процесі високоградієнтної магнітної сепарації раніше застосовувалися лише аналогові або цифрові пропорційно-інтегрально-диференціальні регулятори, налаштовані на оптимальне керування об'єктом за конкретних умов, які не змінюються. Використання таких регуляторів за неповної визначеності технічних параметрів робочих середовищ не відповідає сучасним вимогам. Для точного проведення процесу керування існує необхідність оперативних змін коефіцієнтів налагодження пропорційно-інтегрально-диференціального регулятора, які пов'язані зі змінами параметрів технологічного навантаження, зі змінами складу та якості сировини в технологічному процесі, зі старінням та зношуванням обладнання, зі змінами параметрів навколишнього середовища. Окрім цього, необхідна відсутність перерегулювання, що призводить опосередковано до економії енергії.

З огляду на це основними вимогами до регуляторів є самовизначення типу об'єкта, автоматичний вибір і корекція параметрів регулювання в процесі роботи та мінімальний час реакції на зміни режимів роботи. Таким чином, питання застосування ефективних методів регулювання на підставі детермінованого опису стану об'єктів регулювання та застосування принципів адаптивного керування (за якого забезпечується оптимальне регулювання при невідомій і непередбачено змінній математичній моделі об'єкта) стає актуальним.

Будь-який технологічний процес можна розділити на дві частини (стадії) - розробка математичної моделі та синтез системи керування. Для частини технологічного процесу, в якому операції керування електротехнічним комплексом характеризуються великими постійними часу, доцільно формування класичної моделі об'єкта керування та синтез системи безперервного керування. Для іншої частини технологічного процесу, в якому операції керування електротехнічним комплексом характеризуються малими постійними часу або мають невизначений характер зміни параметрів, доцільно формування нечіткої моделі об'єкта керування та синтез системи адаптивного (інтелектуального) керування. У розглянутому випадку технологічного процесу високоградієнтної магнітної сепарації можна чітко виділити підсистему керування обмотками намагнічування та систему керування електротехнічним комплексом вищого рівня. Таким чином, гібридна інтелектуальна система керування повним технологічним процесом містить в собі класичну та нечітку моделі об'єкта керування.

Створення системи інтелектуального керування електротехнічними комплексами включає розроблення математичних моделей, стратегій, методів, синтез та виготовлення систем і засобів керування, потребує спеціальних і загальних знань, які враховують існуючі взаємозв'язки між електричними, магнітними, технологічними параметрами (змінними) та формують бази знань про ці взаємозв'язки на основі експериментальних та розрахункових досліджень за неповної визначеності технологічних характеристик.

Висновки. На прикладі технологічного процесу високоградієнтної електромагнітної сепарації показано, що застосування гібридних методів керування дає змогу суттєво підвищити енергетичну ефективність в електротехнологіях із джерелами струму в силових колах за неповної визначеності параметрів системи. Так, впровадження регуляторів із гібридним керуванням в установках з електромагнітними роторними сепараторами дає змогу забезпечити

якість вихідного концентрату на рівні $\beta=52\%$, зменшивши водночас енергоспоживання в 2,7 раза, а за аварійного режиму тривалість зупинки системи порівняно зі штатним режимом зменшується в 15 разів, а струму – в 7,5 раза. Використання нової структурної схеми гібридної системи керування електротехнічними комплексами з джерелами струму в силових колах та з частотнорегульованими електроприводами в майбутніх розробках дає змогу об'єднати переваги класичних та інтелектуальних методів.

Фінансується за державною науково-дослідною темою «Розробити засоби та алгоритми керування напругою, струмом і частотою в гібридних системах живлення електротехнологічних установок при неповній визначеності параметрів навантаження» («База-П9»), державний реєстраційний номер 0122U001808.

1. Щерба А.А., Кирик В.В. Системи з нечіткою логікою регулювання електроенергетичних режимів. Київ: Інститут електродинаміки НАН України, Видавництво «Лазурит-Поліграф», 2011. 330 с.
2. Кирик В.В. Математичний апарат штучного інтелекту в електроенергетичних системах. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Видавництво «Політехніка», 2019. 224 с.
3. Burian S.O., Kiselychuk O.I., Pushkar M.V., Reshetnik V.S., Zemlianukhina H.Y. Energy-efficient control of pump units based on neural-network parameter observer. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2020. No 1. Pp. 71–77. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.01.071>
4. Стяжкін В.П., Подейко П.П. Повышение качества регулирования в системе регулируемый источник тока – установка электрошлакового переплава. *Технічна електродинаміка*. Тематичний випуск «Силова електроніка та енергоефективність». 2011. Частина 2. С. 287–292.
5. Стяжкін В.П., Подейко П.П. Оптимальное управление электротехнологической установкой по производству базальтового супертонкого волокна. *Силовая электроника та енергоефективність*. Вісник НТУ «ХПІ». 2015. Випуск 12 (1121). С. 124–127.
6. Подейко П.П. Система автоматичного керування електротермічними установками на основі нейро-нечіткої логіки в умовах неповної визначеності технічних характеристик: дис. на пошук вченого ступеня канд. техн. наук: 05.09.03 / Інститут електродинаміки НАН України. Київ. 2019. 177 с.
7. Улубабов Р.С. В.И. Кармазин и развитие в Украине современного сепараторостроения для магнитного обогащения слабромагнитных руд. *Збагачення корисних копалин*. *Наук.-техн. зб.* 2012. № 48(89). С. 13–23.
8. Зайченко О.А. Оптимальное управление в системе полупроводниковый регулятор тока – электромагнитный сепаратор роторного типа: дис. на пошук вченого ступеня канд. техн. наук: 05.09.03 / Інститут електродинаміки НАН України. Київ. 2015. 204 с.
9. Волков И.В., Стяжкін В.П., Зайченко О.А. Нечеткий логический контроллер качества концентрата сепаратора 6ЭРМ при питании от регуляторов постоянного тока. *Энергосбережение, энергетика, энергоаудит*. Харьков. 2014. Т.1. № 9 (128). С. 84–91.
10. Стяжкін В.П., Зайченко О.А. Пропорционально-интегральный нечеткий логический контроллер тока обмоток намагничивания сепаратора 6ЭРМ. *Технічна електродинаміка*. 2015. № 2. С. 38–44. http://techned.org.ua/2015_2/st5.pdf

HYBRID POWER SUPPLY SYSTEM OF ROTOR-TYPE ELECTROMAGNETIC SEPARATOR WINDINGS WITH INCOMPLETE DETERMINATION OF LOAD PARAMETERS

O.A. Zaichenko, O.M. Ryzhkov, S.I. Gavryluk

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine
e-mail: tems@ukr.net

Features of control of high-gradient electromagnetic rotary separators are considered. Structural diagrams of control systems with fuzzy logic controllers of the process of high-gradient electromagnetic separation are given. A new block diagram of a hybrid control system for a rotary-type electromagnetic separator combining classical and intelligent control methods has been proposed. The example of a rotary electromagnetic separator shows that hybrid control methods can significantly increase energy efficiency in electrical technologies with current sources in power circuits with an incomplete definition of system parameters. Ref. 10, fig. 4.

Keywords: hybrid automatic control system, fuzzy logic controller, high-gradient rotor-type electromagnetic separator.

1. Shcherba A.A., Kirik V.V. Systems with fuzzy logic of regulation of electric energy modes of operation. Kyiv: Institute of electrodynamics of the NAS of Ukraine, «Lazuryt-Poligraf», 2011. 330 p. (Ukr)
2. Kirik V.V. Mathematical apparatus of artificial intelligence in electric power systems. Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, «Politehnika», 2019. 224 p. (Ukr)

3. Burian S.O., Kiselychnyk O.I., Pushkar M.V., Reshetnik V.S., Zemlianukhina H.Y. Energy-efficient control of pump units based on neural-network parameter observer. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2020. No 1. Pp. 71–77. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.01.071>
4. Stiazhkin V., Podeiko P. Improving the quality of regulation in the system regulated current source - electroslag remelting installation. *Tekhnichna elektrodynamika. Thematic issue*. 2011. Part 2. Pp. 287–292. (Rus)
5. Stiazhkin V., Podeiko P. Optimal control of an electrotechnological installation for the production of superfine basalt fiber. Power electronics and energy efficiency. *Visyk NTU “KHPI”*. 2015. Part 12 (1121). Pp. 124–127. (Rus)
6. Podeiko P.P. System of automatic control of electrothermal installations based on neuro-fuzzy logic in the conditions of incomplete determination of technological characteristics: diss. for degree of cand. tech. sci.: 05.09.03 / Institute of electrodynamics of the NAS of Ukraine. Kyiv. 2019. 177 p. (Ukr)
7. Ulubabov R. V.I. Karmazin and the development in Ukraine of modern separator construction for magnetic enrichment of low-magnetic ores. *Zbagachennia korysnyh kopalyn*. 2012. No 48 (89). Pp. 13–23. (Rus)
8. Zaichenko O. Optimal control in the semiconductor current regulator – rotor type electromagnet separator system: diss. for degree of cand. tech. sci.: 05.09.03 / Institute of electrodynamics of the NAS of Ukraine. Kyiv. 2015. 204 p. (Rus)
9. Volkov I., Stiazhkin V., Zaichenko O. Fuzzy logic controller of the concentrates quality for the 6ERM separator, the magnetization windings of wich supplied by dc regulators. *Energoberezhnie, Energetika, Energoaudit*. 2014. Vol.1. No 9. Pp. 84–91. (Rus)
10. Stiazhkin V., Zaichenko O. Propotional-integral fuzzy logic controller of the magnetization windings current of the 6ERM separator. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2015. No 2. Pp. 38-44. (Rus) http://techned.org.ua/2015_2/st5.pdf

Надійшла: 22.06.2022

Received: 04.07.2022

Submitted: 22.06.2022

Accepted: 04.07.2022