

УДК 621.317:621.313.3

Волков Игорь Владимирович, д-р техн. наук, член-кор. НАН України, завідуючий відділом систем стабілізованого струму, Інститут електродинаміки НАН України, м. Київ, Україна, *пр. Перемоги, 56, м. Київ, Україна, 03680, тел. +38-044-456-20-51.*

Стяжкін Віталій Павлович, канд. техн. наук, старш. наук. співроб. відділу систем стабілізованого струму, Інститут електродинаміки НАН України, м. Київ, Україна, *пр. Перемоги, 56, м. Київ, Україна, 03680, тел. +38-044-456-42-48, E-mail: tems@ukr.net*

Зайченко Олег Анатолійович, провідний інженер відділу систем стабілізованого струму, Інститут електродинаміки НАН України, м. Київ, Україна, *пр. Перемоги, 56, м. Київ, Україна, 03680, тел. +38-044-456-42-48, E-mail: oleg_tems@ukr.net*

НЕЧІТКИЙ ЛОГІЧНИЙ КОНТРОЛЛЕР ЯКОСТІ КОНЦЕНТРАТУ СЕПАРАТОРА 6ЕРМ ПРИ ЖИВЛЕННІ ВІД РЕГУЛЯТОРІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Показано вплив параметрів високоградієнтної сепарації, величини продуктивності та магнітної індукції у робочих зазорах на вихід магнітного продукту та потужність споживання. Також приведені криві залежності величини магнітної індукції у робочих зонах від величини струмів у обмотках намагніченості сепаратора 6ЕРМ. Проведено синтез нечіткого логічного контролера якості концентрату за трьома критеріями: максимальна продуктивність, мінімальне енергоспоживання та мінімальний вплив на мережу живлення.

Ключові слова: нечіткий логічний контролер, електромагнітний сепаратор роторного типу, напівпровідниковий регулятор постійного струму, система автоматизованого управління

Волков Игорь Владимирович, д-р техн. наук, член-корр. НАН Украины, заведующий отделом систем стабилизированного тока, институт электродинамики НАН Украины, г. Киев, Украина. *пр. Победы, 56, г. Киев, Украина, 03680, тел. +38-044-456-20-51.*

Стяжкин Виталий Павлович, канд. техн. наук, ст. науч. сотр. отдела систем стабилизированного тока, институт электродинамики НАН Украины, г. Киев, Украина. *пр. Победы, 56, г. Киев, Украина, 03680, тел. +38-044-456-42-48, E-mail: tems@ukr.net*

Зайченко Олег Анатольевич, ведущий инженер отдела систем стабилизированного тока, институт электродинамики НАН Украины, г. Киев, Украина. *пр. Победы, 56, г. Киев, Украина, 03680, тел. +38-044-456-42-48, E-mail: oleg_tems@ukr.net*

НЕЧЕТКИЙ ЛОГИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЛЕР КАЧЕСТВА КОНЦЕНТРАТА СЕПАРАТОРА 6ЭРМ ПРИ ПИТАНИИ ОТ РЕГУЛЯТОРОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Показано влияние параметров высокоградиентной сепарации, величины производительности и магнитной индукции в рабочих зонах на выход магнитного продукта и потребляемую мощность. Также приведены кривые зависимости величины магнитной индукции в рабочих зонах от величины токов в обмотках намагничивания сепаратора 6ЭРМ. Проведен синтез нечеткого логического контроллера качества концентрата по трем критериям: максимальная производительность, минимальное энергопотребление и минимальное влияние на питающую сеть.

Ключевые слова: нечеткий логический контроллер, электромагнитный сепаратор роторного типа, полупроводниковый регулятор постоянного тока, система автоматизированного управления.

Volkov Igor Vladymyrovych, Ph. D., Cor. Mem. of the NAS of Ukraine, head of the Department of stabilized current systems, The Institute of electrodynamicics of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine. *prospekt Peremogy, 56, Kyiv, Ukraine, 03680, tel. +38-044-456-20-51.*

Stiazhkin Vitaly Pavlovich, Ph. D., senior researcher of the Department of stabilized current systems, The Institute of electrodynamicics of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine. *prospect Peremogy, 56, Kyiv, Ukraine, 03680, tel. +38-044-456-42-48, E-mail: tems@ukr.net*

Zaichenko Oleg Anatolievich, principal engineer of the Department of stabilized current systems, The Institute of electrodynamicics of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine. *prospekt Peremogy, 56, Kyiv, Ukraine, 03680, tel. +38-044-456-42-48, E-mail: oleg_tems@ukr.net*

CONCENTRATES QUALITY FUZZY LOGIC CONTROLLER FOR THE 6ERM SEPARATOR, THE MAGNETIZATION WINDINGS OF WHICH SUPPLIED BY DC REGULATORS

The high-gradient magnetic separation parameters influence is illustrated, the productivity and magnet induction in work space, influence to the output concentrate quality and to the power consumption. Also the magnet inductions in the work spaces – currents in the magnetization windings surfaces for the 6ERM separator are illustrated. The output concentrates quality fuzzy logic controller synthesis has been made. There are three criterions where used,

maximum productivity criterion, minimum power consumption criterion and minimum supply-line voltage distortion criterion.

Keywords: fuzzy logic controller, rotor type electromagnet separator, semiconductor dc regulator, automation control system

Введение

В настоящее время к промышленному электрооборудованию предъявляются очень жесткие требования - обеспечение максимальной производительности и надежности оборудования при эффективном расходовании электрической энергии и минимальном негативном влиянии на питающую сеть. В частности, это касается и нового оборудования, поставляемого на горно-обогатительные комбинаты и фабрики.

В последние годы в Украине был разработан новый электромагнитный высокопроизводительный сепаратор роторного типа БЭРМ [1–3]. Для обеспечения его максимально эффективной работы, отвечающей всем современным требованиям, необходима разработка системы автоматизированного управления параметрами электромагнитной сепарации.

В [4,5] предложено построение автоматизированной системы регулирования с адаптивным управлением электромагнитными сепараторами роторного типа на базе полупроводниковых регуляторов постоянного тока, а также показаны пути повышения эффективности (технологической, энергетической, экономической) сепараторной установки при применении таких систем.

В [6] приведены различные типы конструкций электромагнитных сепараторов роторного типа и рассмотрены электромагнитные и электромеханические процессы в сепараторах такого типа.

Для построения эффективной системы управления электромагнитным сепаратором необходимо знать точное поведение параметров системы, для этого необходима разработка математической модели. В связи с этим в [7] была предложена математическая модель системы регулируемый источник постоянного тока – электромагнитный сепаратор роторного типа, главной координатой которой является величина магнитной силы, действующей на слабомагнитный материал в рабочем зазоре электромагнитного сепаратора. А в [8] представлена математическая модель магнитосвязанных обмоток намагничивания сепаратора БЭРМ при питании от полупроводниковых регуляторов постоянного тока в токовой системе координат.

Сложный взаимосвязанный характер зависимостей показателей обогащения от параметров сепаратора, сложный нелинейный характер изменения электромагнитных параметров (координат) сепаратора, непрогнозируемое изменение величины магнитной проницаемости руды, и все это в условиях неопределенности и сложности точного описания состояния объекта, внешней среды и других факторов не позволяют четко детерминировать классическими методами построение оптимальной системы управления технологическим процессом сепарации. Построение системы управления параметрами высокоградиентной электромагнитной сепарации возможно на основе нечеткой логики и позволяет обеспечить оптимальный режим работы сепаратора.

Применение нечеткой логики связано с тем, что точное математическое описание магнитных сепараторов роторного типа БЭРМ выполнить сложно, поэтому разработка математических моделей в [7, 8] была проведена с теми или иными допущениями. Использование классических методов регулирования величиной магнитной индукции в рабочих зонах сепараторов не дает высокой достоверности описания технологического процесса, так как очень сложно точно описать все физические процессы, происходящие в рабочих зонах сепаратора, которые могут загружаться материалом с различными магнитными свойствами (магнитной проницаемостью), отличающимися по абсолютным величинам в сотни раз.

Применение нечеткой логики позволяет гибко и относительно просто сформировать систему регулирования магнитной индукции сепаратора, допускает использование неопределенных входных данных и обработку неопределенностей, может решить

противоречивые задачи сепарации, объединяет опыт экспертных систем сепарации, может базироваться на известных классических законах регулирования (П, ПИ, ПИД) и является более устойчивым методом управления к изменению системных параметров.

Влияние параметров высокоградиентной сепарации на выход магнитного продукта

Электромагнитный сепаратор роторного типа 6ЭРМ имеет два основных рабочих яруса, на которых происходит процесс выделения слабомагнитных частиц высокоградиентным магнитным полем (до 1.4 Тл), создаваемым обмотками намагничивания, и скальпирующий ярус, на котором происходит предварительное выделение из общего потока сильномагнитных частиц слабомагнитным полем (около 0.2 Тл). В [8] была приведена подробная конструкция сепаратора и рассмотрены электромагнитные процессы при питании обмоток намагничивания сепаратора от регуляторов постоянного тока.

На рис. 1 приведена функциональная схема магнитной цепи электромагнитного сепаратора 6ЭРМ, где обозначены:

$\Phi_c, \Phi_\theta, \Phi_n$ – магнитные потоки (потокосцепления) в рабочих зазорах на скальпирующем ярусе, верхнем и нижнем ярусах соответственно;

ω_p – угловая скорость вращения ротора;

K – кассеты (рабочие зоны);

M – магнитопровод;

$OH1-OH2$ – обмотки намагничивания;

CP, BP, HP – скальпирующий, верхний и нижний ротор.

На рис. 1 также приведены графики зависимости величины магнитной индукции от токов в обмотках намагниченности верхнего, нижнего и скальпирующего ярусов $B = f(I)$.

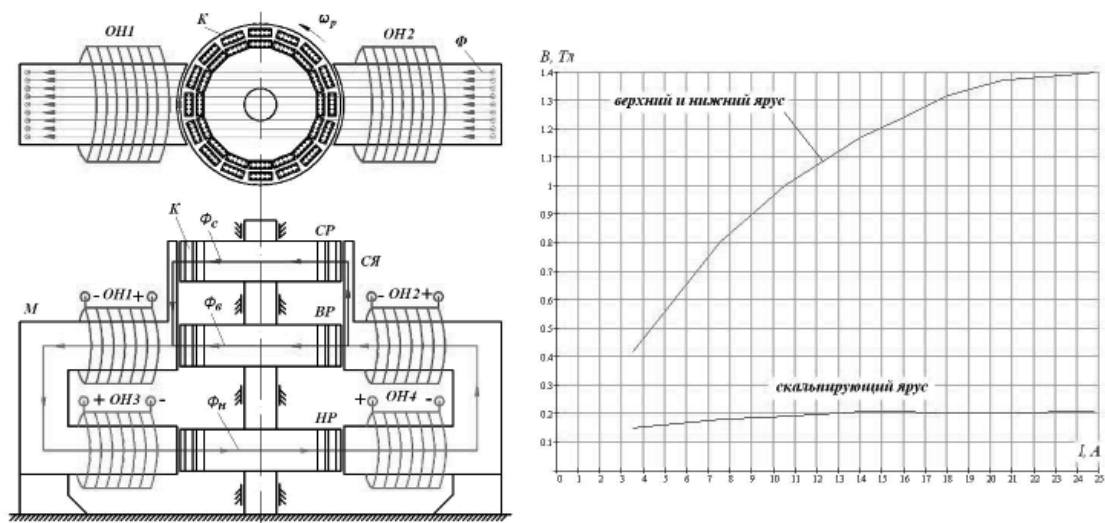


Рис. 1 Функциональная схема и кривые $B = f(I)$ сепаратора 6ЭРМ

Одним из главных показателей качества обогащения высокоградиентной магнитной сепарации является величина β – содержание полезного компонента (извлекаемой руды) в выходном магнитном продукте. Величина β измеряются в % и вычисляется:

$$\beta = \frac{m_{ПР}}{m} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где $m_{ПР}$ – масса полезной руды содержащейся в выходном магнитном продукте;

m – общая масса выходного магнитного продукта.

Содержание полезного компонента в выходном магнитном продукте зависит от технологических параметров, таких как величина средней магнитной индукции в рабочих зонах сепаратора B [Тл], и величина производительности сепаратора Q [т/час].

На рис. 2 приведены графики в виде поверхностей, иллюстрирующих влияние параметров сепарации, величины магнитной индукции в рабочих зонах и производительности на величину содержания полезной руды в выходном магнитном продукте $\beta = f(B, Q)$, а также влияние параметров сепарации на потребляемую мощность $P = f(B, Q)$.

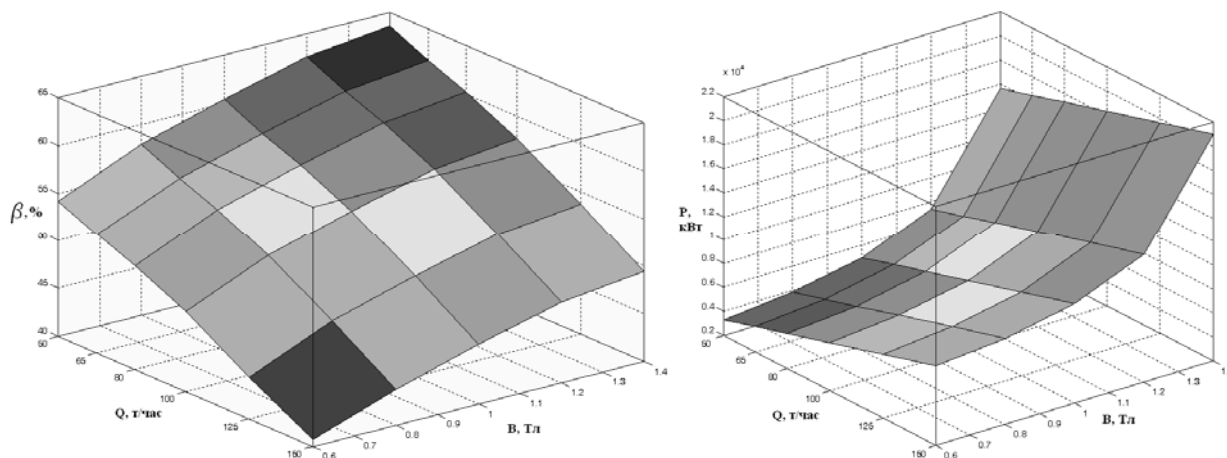


Рис. 2 Поверхности влияния параметров сепарации $\beta = f(B, Q)$ и $P = f(B, Q)$

Синтез нечеткого логического контроллера качества концентрата

Учитывая то, что задачей электромагнитной сепараторной установки является получение концентрата необходимого качества, главной задачей системы управления является обеспечение заданного значения величины содержания полезной составляющей в выходном магнитном продукте β . Как было показано выше, этого можно достичь управлением величиной магнитной индукции в рабочих зонах сепаратора или изменением производительности. Синтез нечеткого логического контроллера производится по трем критериям - обеспечение заданного качества концентрата с **минимальными затратами электрической энергии**, обеспечение заданного качества концентрата с **максимальной производительностью** и обеспечение заданного качества концентрата с **максимальными энергетическими показателями**. Под максимальными энергетическими показателями подразумевается режим работы с минимальным влиянием на питающую сеть, т.е. с минимальным значением коэффициента суммарных нелинейных искажений напряжения и тока сети (THD).

Структурная схема нечеткого логического контроллера качества концентрата представлена на рис. 3. Нечеткий логический контроллер качества концентрата по трем критериям содержит базу знаний, на основе которой контроллер формирует решение управления. Задав, таким образом, необходимое значение качества концентрата β и выбрав необходимый режим работы ($Q_{max} / P_{min} / THD_{min}$), контроллер на основе базы знаний принимает решение и формирует необходимые значения сигналов управления – производительностью Q , токами в обмотках намагничивания верхнего и нижнего ярусов I_B, I_H и величиной магнитной индукции в рабочих зонах B_B, B_H . Кроме базы знаний нечеткий контроллер содержит лингвистические переменные: две входные – Quality (качество), Strategy (критерий) и три выходных – Productivity (производительность), Current_Top_Winding (ток верхних обмоток), Current_Bottom_Winding (ток нижних обмоток).

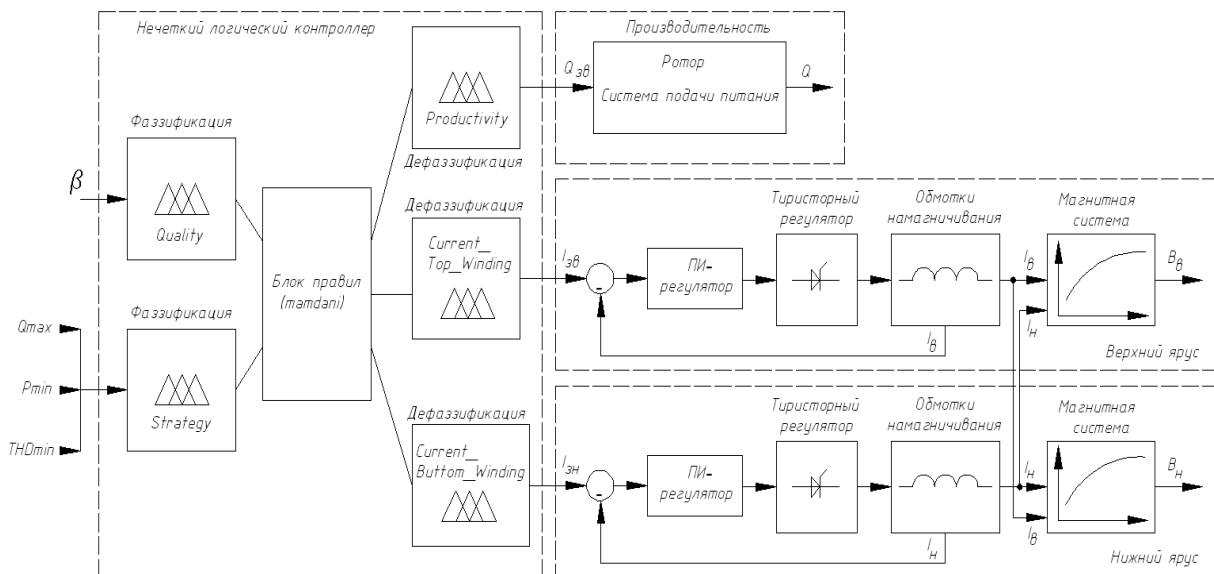


Рис. 3 Структурная схема НЛК качества концентрата

Границы области переменных базовых физических переменных: β – от 40 до 64 %, Q – от 50 до 150 т/час, I_B, I_H – от 5.5 до 25 А. Режим работы (Operating Mode) представлен как физическая величина от 0 до 1, где число “0” соответствует режиму работы с максимальной производительностью, число “0.5” соответствует режиму работы с минимальным энергопотреблением, а число “1” режиму работы с минимальным значением коэффициента THD.

На выделенных диапазонах реальных величин выделяются нечеткие множества (переменные), устанавливается их количество, присваиваются им названия и вводятся ограничения в виде функций принадлежности, исходя из мотивации качества управления.

Для входной лингвистической переменной Quality установлены нечеткие переменные с термами: VR (Very Rough), R (Rough), L (Low), N (Normal), G (Good), VG (Very Good), H (High), VH (Very High).

Для входной переменной Strategy: Productiveness, Energysaving, Energyefficiency.

Для выходной переменной Productivity: VL (Very Low), L (Low), N (Normal), H (High), MH (More High), VH (Very High).

Для выходных переменных Current_Top_Winding и Current_Bottom_Winding: VL (Very Low), L (Low), N (Normal), H (High), VH (Very High).

Терм-множество входных лингвистических переменных записывается в виде:

$$\begin{cases} \text{Quality} = \{VR, R, L, N, G, VG, H, VH\}, \\ \text{Strategy} = \{\text{Productiveness, Energysaving, Energyefficiency}\}. \end{cases} \quad (2)$$

Терм-множество выходных лингвистических переменных записывается в виде:

$$\begin{cases} \text{Productivity} = \{VL, L, N, H, MH, VH\}, \\ \text{Current_Top_Winding} = \{VL, L, N, H, VH\}, \\ \text{Current_Bottom_Winding} = \{VL, L, N, H, VH\}. \end{cases} \quad (3)$$

Границы диапазонов входных и выходных нечетких переменных и графические формы их функций принадлежности представлено на рис. 4.

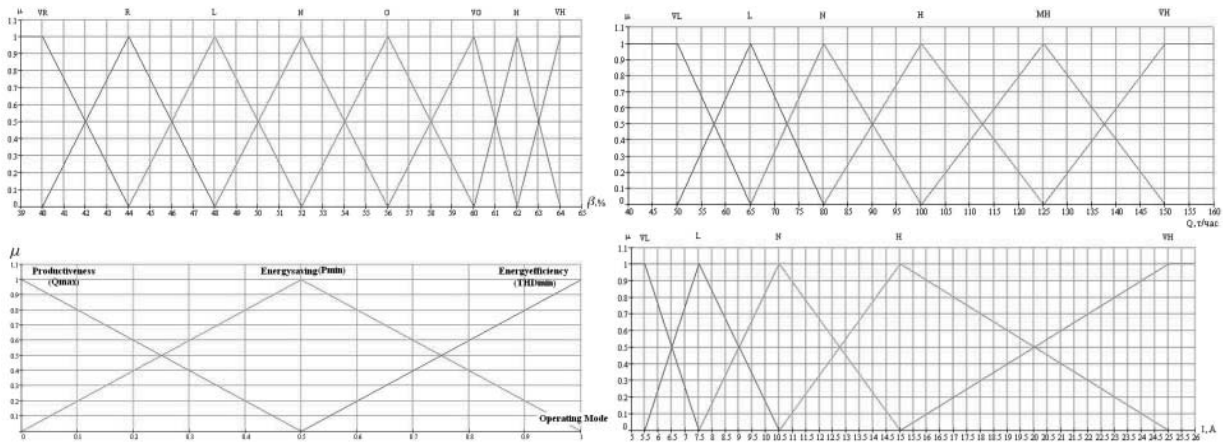


Рис. 4. Нечеткие переменные НЛК

В таблице приведена база знаний нечеткого логического контроллера, составленная на основе входных и выходных переменных по критериям обеспечения необходимого качества концентрата с максимальной производительностью, с минимальными затратами электрической энергии, и необходимого качества концентрата с максимальными энергетическими показателями. База правил контроллера качества концентрата реализована всего лишь 24-мя простыми логическими правилами.

Таблица

База правил НЛК качества концентрата

Quality	V R	R	L	N	G	V G	H	V H
Productiveness (Максимальная производительность)								
Productivity	V H	V H	V H	M H	H	N	L	V L
Current_Top_Winding	V L	L	N	N	N	H	V H	V H
Current_Bottom_Winding	V L	L	N	N	N	H	V H	V H
Energysaving (Минимальное энергопотребление)								
Productivity	V H	M H	H	L	V L	V L	V L	V L
Current_Top_Winding	V L	VL	V L	VL	V L	N	H	V H
Current_Bottom_Winding	V L	VL	V L	VL	V L	N	H	V H
Energyefficiency (Максимальные энергетические показатели)								
Productivity	V H	V H	V H	M H	H	N	L	V L
Current_Top_Winding	V L	L	H	H	H	V H	V H	V H
Current_Bottom_Winding	V L	L	H	H	H	V H	V H	V H

Представление входных и выходных нечетких переменных на диапазонах базовых физических переменных и определение правил их соотношений является одним из важных

этапов при синтезе нечеткого контроллера. Проектируемый нечеткий контроллер не должен быть достаточно громоздким, с большим числом правил, так как увеличение количества правил и термов, приводит к чрезмерному увеличению вычислений, и структура системы значительно усложняется.

База правил нечеткого логического контроллера качества концентрата определяет логику его работы и составлена по графикам зависимостей параметров магнитной сепарации, а также, по данным исследований режимов работы системы. Так, логика принятия решения выдачи сигнала управления по критерию максимальной производительности, производится с учетом характеристик $\beta = f(Q, B)$ и $B = f(I)$, по критерию минимального энергопотребления учитываются зависимости $P_{\Sigma} = f(Q, B)$ и $B = f(I)$. По критерию максимальной энергетической эффективности, контроллер переводит систему в режим работы с минимальным значением коэффициента суммарных нелинейных искажений напряжения питающей сети THD.

Формирование нечеткого логического выходного сигнала производится на основе алгоритма Mamdani, который широко применяется в системах с нелинейным поведением параметров и невозможности точного математического описания системы, когда правила сформулированы экспертом, на этапе принятия логического решения используется метод MIN-MAX, а дефаззификацию проводим методом центра тяжести COG.

В результате моделирования процесса управления по алгоритму Мамдани получено передаточные характеристики нечеткого логического контроллера качества концентрата. На рис. 5 приведена поверхность зависимости выходной переменной Productivity от входных переменных Quality и Strategy, и поверхность зависимости выходной переменной Current_Top_Winding/Current_Bottom_Winding от входных переменных Quality и Strategy.

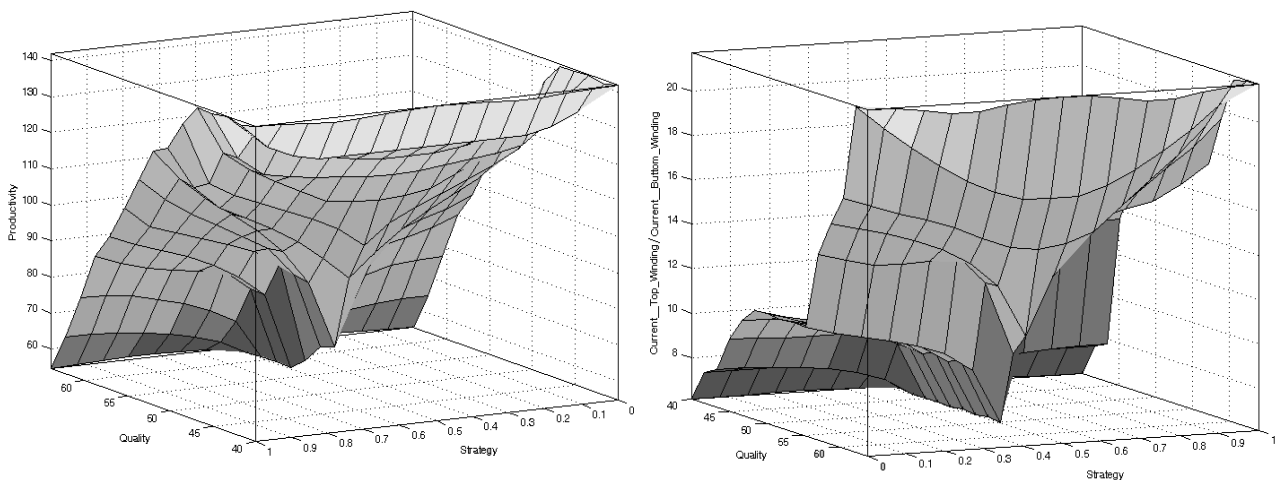


Рис. 5. Передаточные характеристики НЛК

Выводы

Синтезированный нечеткий логический контроллер качества концентрата предназначен для управления электромагнитным сепаратором роторного типа БЭРМ, обмотки намагничивания которого запитаны от регуляторов постоянного тока.

База знаний контроллера составлена по характеристикам влияния параметров высокоградиентной сепарации, с учетом различных режимов работы системы по трем критериям: максимальная производительность, максимальное энергосбережение и максимальная энергоэффективность

Решение управления нечеткого логического контроллера формируется в зависимости от выбранного значения величины качества выходного продукта (концентрата) и заданного критерия управления.

Список использованной литературы

1. Мостипан Л. Ф., Дементьев В. В., Улубабов Р. С., Левченко К. А. Особенности обогащения бурожелезняковых оолитовых руд на высокоградиентном сепараторе // Збагачення корисних копалин. – Дніпропетровськ: НГАУ. – 2001. – Вип. 13(54). – С. 78–83.
2. Туркенич А. М., Улубабов Р. С. Повышение эффективности работы роторных магнитных сепараторов за счет формирования пленочного течения пульпы по стенкам ферромагнитных пластин // Обогащение полезных ископаемых. – Киев: Техника, 1985. – Вып. 35. – С. 35–41.
3. Улубабов Р. С., Туркенич А. М. Увеличение ширины зазоров между пластинами роторных магнитных сепараторов // Горный журнал. – 1986. – № 5. – С. 40–41.
4. Волков И. В., Стяжкин В. П., Зайченко О. А. Полупроводниковые регуляторы постоянного тока для установок электромагнитной сепарации. // Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України. Збірник наукових праць. – К.: 2008. – № 20. – С. 57.
5. Волков И. В., Стяжкин В. П., Зайченко О. А. Повышение эффективности электромагнитных сепараторов роторного типа в автоматизированной системе регулирования тока с адаптивным управлением. // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск. Силова електроніка та енергоефективність. Частина 5. – К.: 2009. – С. 106–108.
6. Волков И. В., Стяжкин В. П., Зайченко О. А. Электромагнитные процессы в сепараторах роторного типа при питании обмоток намагничивания от регулируемого источника постоянного тока. // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск. Силова електроніка та енергоефективність. Частина 1. – К.: 2010. – С. 71–76.
7. Волков И. В., Стяжкин В. П., Зайченко О. А. Математическая модель системы регулируемый источник постоянного тока – электромагнитный сепаратор роторного типа. // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск. Силова електроніка та енергоефективність. Частина 2. – К.: 2011. – С. 283–286.
8. Волков И. В., Стяжкин В. П., Зайченко О. А. Математическая модель системы магнитосвязанных обмоток намагничивания сепаратора 6ЭРМ при питании от полупроводниковых регуляторов постоянного тока. // ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ · ЭНЕРГЕТИКА · ЭНЕРГОАУДИТ. Специальный выпуск. Т. 2. – № 8 (114) – Х.: 2013. – С. 208–213.

References

1. Mostipan, L. F., Dementiev, V. V., Ulubabov, R. S., Levchenko, K. A. (2001), Attributes of the brown iron ore oolitic dressing on the high-gradient separator [Osobennosti obogashcheniya burozheleznyakovyih oolitovyih rud na vyisokogradientnom separatore], *Mineral dressing*, Dnepropetrovsk, NMAU, No. 13(54), P. 78–83.
2. Turkenich, A. M., Ulubabov, R. S. (1985), Rotor type magnet separators performance increase by the membranous crushed-ore flow throughout ferromagnetic plates [Povyishenie effektivnosti raboty rotornyih magnitnyih separatorov za schet formirovaniya plenochnogo techeniya pulpyi po stenkam ferromagnitnyih plastyin], *Mineral dressing*, Kyiv, Tehnika, No. 35, P. 35–41.
3. Ulubabov, R. S., Turkenich, A. M. (1986), Air-gap increasing between plates of the rotor type magnet separators [Uvelichenie shyrinyi zazorov mezhdru platinami rotornyih magnitnyih separatorov], *Mining journal*, No. 5, P. 40–41.
4. Volkov, I. V., Stiazhkin, V. P., Zaichenko, O. A. (2008), Semiconductor dc regulators for the electromagnet separation machines [Poluprovodnikovye regulatoryi postoyannogo toka dlya ustanovok elektromagnitnoy separatsii], *the works of the Institute of electroynamics of the National Academy of Science Ukraine, the scientific articles collection*, No. 20, P. 57.
5. Volkov, I. V., Stiazhkin, V. P., Zaichenko, O. A. (2009), Rotor type electromagnet separators performance increase by the current regulated automation system with adaptive control [Povyishenie effektivnosti elektromagnitnyih separatorov rotornogo tipa v avtomatizirovannoy sisteme regulirovaniya toka s adaptivnym upravleniem], *Technical electroynamics. Power electronics and Energy Efficiency*, Kyiv, No. 5, P. 106–108.
6. Volkov, I. V., Stiazhkin, V. P., Zaichenko, O. A. (2010), Electromagnet processes in the rotor type separators with magnetization windings supplied by regulated dc current source [Electromagnitnyie protsesy v separatorah rotornogo tipa pri pitanii obmotok namagnichevaniya ot reguliruемого istochnika postoyannogo toka], *Technical electroynamics. Subject edition. Power electronics and Energy Efficiency*, Kyiv, No. 1, P. 71–76.
7. Volkov, I. V., Stiazhkin, V. P., Zaichenko, O. A. (2011), The mathematical model of the operated dc source – rotor type electromagnet separator system [Matematicheskaya model sistemyi reguliruemyi istochnik postoyannogo toka – elektromagnitnyi separator rotornogo tipa], *Technical electroynamics. Subject edition. Power electronics and Energy Efficiency*, Kyiv, No. 2, P. 283–286.
8. Volkov, I. V., Stiazhkin, V. P., Zaichenko, O. A. (2013), The mathematical model of the magnet coupled magnetization windings supplied by the semiconductor dc regulators of the 6ERM separator [Matematicheskaya model sistemyi magnitosv'yazannyih obmotok namagnichivaniya separatora 6ERM pri pitanii ot poluprovodnikovyih reguliatorov postoyannogo toka], *Energy Saving. Power engineering. Energy audit*. Kharkov, B. 2, No. 8 (114), P. 208–213.

Поступила в редакцию 20.07 2014 г.