

УДК 621.317:621.313.3

И. В. Волков, д-р. техн. наук., чл.-корр. НАН Украины

В. П. Стяжкин, канд. техн. наук, О. А. Зайченко.

Институт электродинамики НАН Украины, г. Киев, Украина, E-mail: [tems@ukr.net](mailto:tems@ukr.net)

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ МАГНИТОСВЯЗАННЫХ ОБМОТОК НАМАГНИЧИВАНИЯ СЕПАРАТОРА 6ЭРМ ПРИ ПИТАНИИ ОТ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ РЕГУЛЯТОРОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

*Показано распределение магнитного потока в электромагнитном сепараторе роторного типа серии 6ЭРМ. Для управления величинами магнитной индукции на верхнем и нижнем ярусах, а также величиной соотношения между ними, построено питание обмоток намагничивания от двух отдельных регулируемых тиристорных источников постоянного тока. Построена математическая модель системы магнитосвязанных обмоток намагничивания сепаратора, в токовой системе координат.*

*Показано розподілення магнітного потоку у електромагнітному сепараторі роторного типу серії 6ЕРМ. Для керування величинами магнітної індукції на верхньому та нижньому ярусах, а також величиною співвідношення між ними, побудовано живлення обмоток намагнічування від двох різних регульованих тиристорних джерел постійного струму. Побудована математична модель системи магнітозв'язаних обмоток намагнічування сепаратора, у токовій системі координат.*

#### Введение

На горно-обогатительных комбинатах и фабриках в настоящее время к промышленному электрооборудованию предъявляются очень жесткие требования – обеспечить максимальные производительность и надежность оборудования при эффективном расходовании электрической энергии и минимальном негативном влиянии на питающую сеть.

В связи с этим, в течение последних 10 лет, коллективом научно-технического центра магнитной сепарации “Магнис” под руководством Улубабова Р.С. разработан, сконструирован и серийно изготавливается ряд новых высокопроизводительных электромагнитных сепараторов роторного типа 6ЭРМ [5-8]. Для построения современного промышленного комплекса магнитной сепарации, отвечающего вышеперечисленным требованиям, необходима система автоматического управления высокотехнологичным электромагнитным сепаратором 6ЭРМ, которая обеспечит максимальную эффективность работы.

В [1,2] 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 [3] приведены различные типы конструкций электромагнитных сепараторов роторного типа и рассмотрены электромагнитные и электромеханические процессы в сепараторах такого типа. Поэтому в рамках данной работы не будут подробно рассматриваться эти процессы.

Для построения адаптивной системы управления электромагнитным сепаратором необходимо знать точное поведение параметров системы, для этого необходима разработка математической модели. В [4] была предложена математическая модель системы регулируемый источник постоянного тока – электромагнитный сепаратор роторного типа. В предложенной математической модели основной координатой системы является величина магнитной силы, действующей на слабомагнитный материал в рабочем зазоре электромагнитного сепаратора. Такая модель сепараторной установки полезна для точного научного (физического) понимания всех электромагнитных процессов, протекающих в системе. Но с другой стороны, модель практически не применима для конструкторов электромагнитных сепараторов, поскольку главной координатой разработчиков является величина электромагнитной индукции в рабочей зоне сепаратора.

В ходе конструирования и испытания, экспериментальных образцов сепараторов 6ЭРМ была установлена зависимость между величиной электромагнитной индукции в рабочей зоне и величиной токов в обмотках намагничивания сепаратора, которые питаются от полупроводниковых регуляторов постоянного тока.

Поэтому для синтеза системы автоматического управления сепаратором бЭРМ необходимо разработать математическую модель системы магнитосвязанных обмоток намагничивания электромагнитного сепаратора при питании от полупроводниковых регуляторов постоянного тока.

**Электромагнитный сепаратор роторного типа бЭРМ.** Одним из самых технологически эффективных электромагнитных сепараторов роторного типа являются сепараторы серии бЭРМ. Сепараторы данной серии при оптимальном управлении параметрами системы, могут иметь как высокую производительность (до 150 т/час), так и высокую точность показателей обогащения (такие как величина извлечения магнитного продукта, содержание полезной составляющей в общей массе сепарируемой руды).

На рис. 1 приведен общий вид электромагнитного сепаратора роторного типа серии бЭРМ. Сепаратор 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).



Рис. 1

На рис. 2 приведена функциональная схема магнитной цепи электромагнитного сепаратора бЭРМ, где обозначены:

$\Phi_c, \Phi_v, \Phi_n$  – магнитные потоки (потокосцепления) в рабочих зазорах на скальпирующем ярусе, верхнем и нижнем ярусах соответственно;  $\omega_p$  – угловая скорость вращения ротора;  $K$  – кассеты (рабочие зоны);  $M$  – магнитопровод;  $OH1 - OH4$  – обмотки намагничивания;  $CP, BP, HP$  – скальпирующий, верхний и нижний ротор. На рис. 2 также показано распределение линий магнитных потоков магнитной цепи сепаратора.

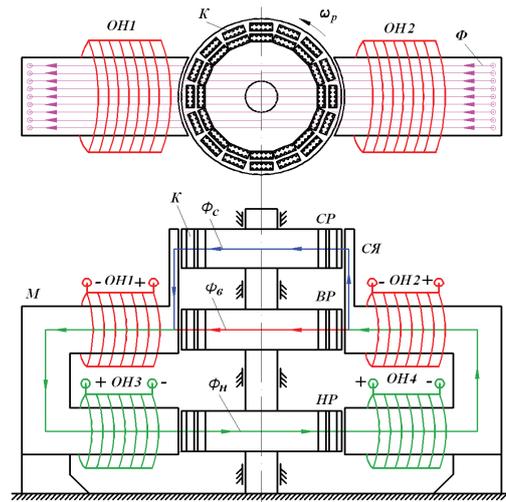


Рис. 2

**Питание обмоток намагничивания сепаратора.** Питание обмоток намагничивания верхнего и нижнего ярусов электромагнитного сепаратора бЭРМ осуществляется от двух отдельных тиристорных полупроводниковых регуляторов постоянного тока. Такое раздельное питание, дает возможность построения оптимальной системы управления магнитными параметрами. Благодаря чему, в зависимости от поставленной технологической задачи, управление осуществляется не только величиной магнитной индукции в рабочих зонах на верхнем и нижнем ярусе сепаратора, но и величиной соотношения между ними.

На рис. 3 приведена функциональная схема питания обмоток намагничивания сепаратора бЭРМ. На схеме обозначены:  $P_v, P_n$  – полупроводниковые регуляторы постоянного тока для питания обмоток намагничивания верхнего и нижнего ярусов;  $U_{зв}, U_{зн}$  – напряжение задания (управления) на входе регуляторов;  $U_v, U_n$  – значения выпрямленного напряжения на выходе регуляторов;  $I_v, I_n$  – значения выпрямленного тока в обмотках намагничивания;

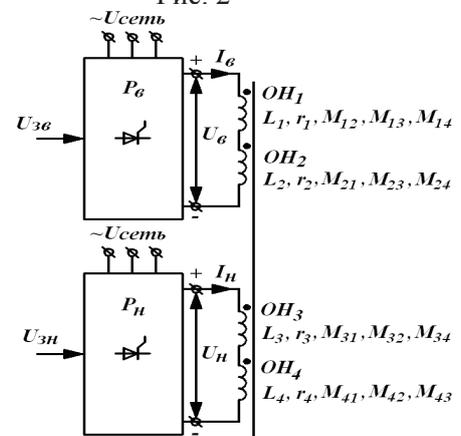


Рис. 3

$L_1, L_2, L_3, L_4$  – значения собственных индуктивностей обмоток намагничивания;  $r_1, r_2, r_3, r_4$  –

значения активных сопротивлений обмоток намагничивания;  $M_{12}, M_{13}, M_{14}$  – значения взаимной индуктивности первой обмотке намагничивания, возникающие вследствие магнитной связи с остальными обмотками;  $M_{21}, M_{23}, M_{24}$  – значения взаимной индуктивности во второй обмотке;  $M_{31}, M_{32}, M_{34}$  – значения взаимной индуктивности в третьей обмотке;  $M_{41}, M_{42}, M_{43}$  – значения взаимной индуктивности в четвертой обмотке.

#### Математическая модель магнитосвязанных обмоток намагничивания сепаратора.

Учитывая вышесказанное, для обеспечения управления величинами магнитной индукции в рабочих зонах сепаратора, достаточно построение системы управления значениями постоянных выпрямленных токов питания обмоток намагничивания. Таким образом, основными координатами математической модели системы магнитосвязанных обмоток намагничивания электромагнитного сепаратора, будем считать величины токов питания обмоток. Для чего, в полупроводниковых регуляторах постоянного тока вводится внутренняя обратная связь по току. Введя пропорционально-интегральный закон управления по току, полупроводниковые регуляторы фактически являются управляемыми регуляторами (стабилизаторами) постоянного тока.

Выходной координатой математической модели являются значения постоянного тока на выходе регуляторов  $I_e, I_h$ , входной координатой является значение напряжения управления на входе регуляторов  $U_{3e}, U_{3h}$ . Запишем уравнение электрического баланса по законам Кирхгофа, для системы магнитосвязанных обмоток намагничивания:

$$\begin{cases} U_e = I_e \cdot r_1 + L_1 \cdot \frac{dI_e}{dt} + M_{12} \cdot \frac{dI_e}{dt} + M_{13} \cdot \frac{dI_h}{dt} + M_{14} \cdot \frac{dI_h}{dt} + \\ + I_e \cdot r_2 + L_2 \cdot \frac{dI_e}{dt} + M_{21} \cdot \frac{dI_e}{dt} + M_{23} \cdot \frac{dI_e}{dt} + M_{24} \cdot \frac{dI_e}{dt}; \\ U_h = I_h \cdot r_3 + L_3 \cdot \frac{dI_h}{dt} + M_{31} \cdot \frac{dI_e}{dt} + M_{32} \cdot \frac{dI_e}{dt} + M_{34} \cdot \frac{dI_h}{dt} + \\ + I_h \cdot r_4 + L_4 \cdot \frac{dI_h}{dt} + M_{41} \cdot \frac{dI_e}{dt} + M_{42} \cdot \frac{dI_e}{dt} + M_{43} \cdot \frac{dI_h}{dt}; \end{cases} \quad (1)$$

Учитывая то, что  $M_{12} = M_{21}, M_{13} = M_{31}, M_{14} = M_{41}, M_{23} = M_{32}, M_{24} = M_{42}, M_{34} = M_{43}$ , систему уравнений (1) запишем в следующем виде:

$$\begin{cases} U_e = [r_1 + r_2] \cdot I_e + [L_1 + L_2 + 2 \cdot M_{12}] \cdot \frac{dI_e}{dt} + [M_{13} + M_{14} + M_{23} + M_{24}] \cdot \frac{dI_h}{dt}; \\ U_h = [r_3 + r_4] \cdot I_h + [L_3 + L_4 + 2 \cdot M_{34}] \cdot \frac{dI_h}{dt} + [M_{13} + M_{14} + M_{23} + M_{24}] \cdot \frac{dI_e}{dt}; \end{cases} \quad (2)$$

Разделив первое уравнение системы (2) на  $[r_1 + r_2]$ , а второе на  $[r_3 + r_4]$ , система принимает следующий вид:

$$\begin{cases} I_e + \frac{[L_1 + L_2 + 2 \cdot M_{12}]}{[r_1 + r_2]} \cdot \frac{dI_e}{dt} + \frac{[M_{13} + M_{14} + M_{23} + M_{24}]}{[r_1 + r_2]} \cdot \frac{dI_h}{dt} = \frac{1}{[r_1 + r_2]} \cdot U_e; \\ I_h + \frac{[L_3 + L_4 + 2 \cdot M_{34}]}{[r_3 + r_4]} \cdot \frac{dI_h}{dt} + \frac{[M_{13} + M_{14} + M_{23} + M_{24}]}{[r_3 + r_4]} \cdot \frac{dI_e}{dt} = \frac{1}{[r_3 + r_4]} \cdot U_h; \end{cases} \quad (3)$$

В системе уравнений (3) постоянные времени, значения, которых связаны с параметрами обмоток намагничивания, определяются следующим образом:

$$T_1 = \frac{[L_1 + L_2 + 2 \cdot M_{12}]}{[r_1 + r_2]}, T_2 = \frac{[M_{13} + M_{14} + M_{23} + M_{24}]}{[r_1 + r_2]},$$

$$T_3 = \frac{[L_3 + L_4 + 2 \cdot M_{34}]}{[r_3 + r_4]}, T_4 = \frac{[M_{13} + M_{14} + M_{23} + M_{24}]}{[r_3 + r_4]},$$
(4)

А величины коэффициентов усиления, связанных со значениями активных сопротивлений обмоток, в свою очередь определяются:

$$K_1 = \frac{1}{[r_1 + r_2]}, K_2 = \frac{1}{[r_3 + r_4]},$$
(5)

Значения взаимоиндуктивностей вычисляются:

$$M_{12} = K_{св12} \cdot \sqrt{L_1 \cdot L_2}, M_{13} = K_{св13} \cdot \sqrt{L_1 \cdot L_3}, M_{14} = K_{св14} \cdot \sqrt{L_1 \cdot L_4},$$

$$M_{23} = K_{св23} \cdot \sqrt{L_2 \cdot L_3}, M_{24} = K_{св24} \cdot \sqrt{L_2 \cdot L_4}, M_{34} = K_{св34} \cdot \sqrt{L_3 \cdot L_4},$$
(6)

где  $K_{св12}, K_{св13}, K_{св14}, K_{св23}, K_{св24}, K_{св34}$  – коэффициенты магнитной связи между соответствующими обмотками намагниченности, значения которых определяются взаимным геометрическим расположением обмоток.

В итоге система уравнений (3) принимает следующий вид:

$$\begin{cases} I_{\epsilon} + T_1 \cdot \frac{dI_{\epsilon}}{dt} + T_2 \cdot \frac{dI_{\eta}}{dt} = K_1 \cdot U_{\epsilon}; \\ I_{\eta} + T_3 \cdot \frac{dI_{\eta}}{dt} + T_4 \cdot \frac{dI_{\epsilon}}{dt} = K_2 \cdot U_{\eta}; \end{cases}$$
(7)

Или в операторной форме Лапласа система уравнений (7) имеет вид:

$$\begin{cases} I_{\epsilon} + T_1 \cdot p \cdot I_{\epsilon} + T_2 \cdot p \cdot I_{\eta} = K_1 \cdot U_{\epsilon}; \\ I_{\eta} + T_3 \cdot p \cdot I_{\eta} + T_4 \cdot p \cdot I_{\epsilon} = K_2 \cdot U_{\eta}; \end{cases}$$
(8)

Система дифференциальных уравнений (8) представляет собою математическую модель системы магнитосвязанных обмоток намагничивания электромагнитного сепаратора роторного типа БЭРМ, при питании обмоток от полупроводниковых тиристорных преобразователей.

На рис. 4 приведена структурная схема математической модели. Тиристорные преобразователи, в свою очередь, являются управляемыми стабилизаторами постоянного тока в обмотках намагниченности.

### Выводы

Определены основные координаты системы управления электромагнитным сепаратором – величины токов в обмотках намагничивания верхнего и нижнего ярусов. На основании выбранных основных координат, разработана математическая модель системы магнитосвязанных обмоток намагничивания верхнего и нижнего ярусов сепаратора роторного типа серии БЭРМ, при питании от разных тиристорных регуляторов постоянного тока.

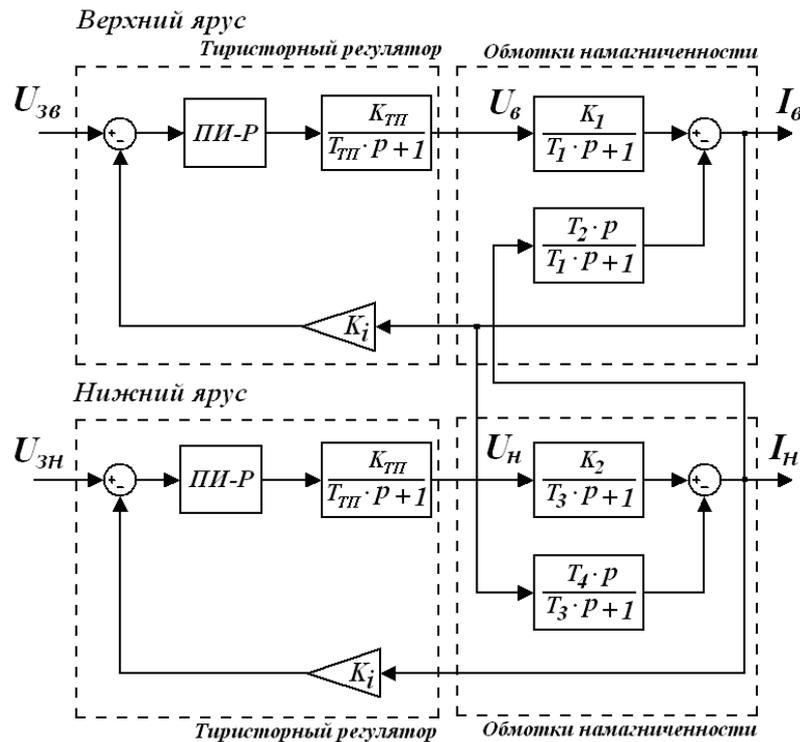


Рис. 4

#### Список литературы

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. Потураев В. Н., Туркенич А. М., Улубабов Р. С. и др. Исследование низкоинтенсивной подачи питания и пластин с наклонными выступами, предназначенных для магнитных сепараторов // Обогащение полезных ископаемых. – К.: Техника, 1986. – Вып. 36. – С. 121–127.
7. 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.
8. Улубабов Р.С., Туркенич А.М. Увеличение ширины зазоров между пластинами роторных магнитных сепараторов // Горный журнал. – 1986. – № 5. – С. 40–41.

**MATHEMATICAL MODEL OF SYSTEM MAGNETICALLY COUPLED WINDINGS OF  
MAGNETIZING OF SEPARATOR OF 6ERM AT FEED FROM SEMICONDUCTOR  
REGULATORS OF DIRECT-CURRENT**

I. V. Volkov, V. P. Stiazhkin, O. A. Zaychenko

*Magnet flux distribution in rotor type electromagnetic separator 6ERM series is illustrated. There are two separated regulated thyristor DC source supplies for the magnetization windings where constructed, for the magnetic induction control at the highest and lower stages, and also for its ratio control. The mathematical model of the magnetization windings, that magnetically binding together, in the current coordinates system, is constructed.*