

УДК 621.318

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИСТЕМ ШКИВНЫХ СЕПАРАТОРОВ ЧАСТЬ 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ. РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЯ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ

М. В. Загирняк, В. М. Усатюк, А. П. Оксанич, В. П. Ляшенко, А. В. Никитина

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского

ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Полтавская обл., Украина, E-mail: mzagirn@kdu.edu.ua

Рассматривается проектирование электромагнитных систем шкивных сепараторов. На основе соотношений для необходимой силы извлечения (с учетом механических процессов при извлечении тел из сыпучей среды) получено аналитическое выражение, позволяющее рассчитывать исходный параметр на проектирование оптимальных аппаратов для данных условий эксплуатации, вида сепарируемого сыпучего материала, формы и магнитных свойств извлекаемой фракции. Сформулирована задача синтеза двухполюсной магнитной системы электромагнитных шкивов, заключающаяся в совместном рассмотрении распределения магнитного потока в стали магнитопровода и тепловыделения в намагничивающей обмотке с целью определения геометрических размеров элементов магнитной системы и параметров обмотки намагничивания. Эта задача, ввиду своей многовариантности, требует дополнения решением оптимизационной задачи выбора наилучшего варианта решения по некоторому критерию.

Ключевые слова: магнитные сепараторы, задача синтеза, извлекающая сила, электромагнит, магнитная цепь, показатели эффективности.

ПРОЕКТУВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ СИСТЕМ ШКІВНИХ СЕПАРАТОРІВ ЧАСТИНА 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ. РОЗВ'ЯЗОК РІВНЯННЯ МАГНІТНОГО ЛАНЦЮГА

М. В. Загирняк, В. М. Усатюк, А. П. Оксанич, В. П. Ляшенко, А. В. Нікітіна

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Полтавська обл., Україна, E-mail: mzagirn@kdu.edu.ua

Розглядається проектування електромагнітних систем шкивних сепараторів. На основі співвідношень для необхідної сили вилучення (з урахуванням механічних процесів при вилученні тіл із сыпкого середовища) отримано аналітичний вираз, що дозволяє розраховувати вихідний параметр на проектування оптимальних апаратів для даних умов експлуатації, виду сепарованого сыпкого матеріалу, форми і магнітних властивостей фракції, що вилучається. Сформульовано задачу синтезу двополусної магнітної системи електромагнітних шківів, яка полягає в спільному розгляді розподілу магнітного потоку в сталі магнітопроводу і тепловиділення в намагнічувальній обмотці з метою визначення геометричних розмірів елементів магнітної системи і параметрів обмотки намагнічування. Це завдання, зважаючи на свою багатоваріантність, вимагає доповнення розв'язанням оптимізаційної задачі вибору найкращого варіанту рішення за деяким критерієм.

Ключові слова: магнітні сепаратори, задача синтезу, сила витягу, електромагніт, магнітне коло, показники ефективності.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Характерной особенностью конструкций электромагнитных шкивных сепараторов является ограничение габаритных размеров шкива (его диаметра и ширины) стандартизованными габаритными размерами приводных барабанов ленточных конвейеров [1]. Поэтому проектирование электромагнитных шкивов заключается в расчете таких геометрических размеров магнитопровода и параметров обмотки намагничивания, которые бы, *во-первых*, вписывались в заданный габарит, *во-вторых*, удовлетворяли условию создания необходимой силы извлечения, что даст возможность электромагнитному шкиву работать в качестве как приводного барабана ленточного конвейера, так и в качестве магнитосепарирующего устройства, *в-третьих*, обеспечивали безаварийную работу сепаратора без перегрева обмотки намагничивания.

Такой расчет единичного варианта электромагнитной системы шкивного сепаратора представляет собой решение задачи синтеза рассматриваемой электромагнитной системы, которое, как известно [2–4], для электромагнитных устройств является не-

единственным. С учетом этого, непосредственное проектирование электромагнитных систем шкивных сепараторов связано с выбором из всех возможных решений названной задачи синтеза одного рационального решения, удовлетворяющего некоторому критерию.

В соответствии с изложенным целью данной работы является методика решения задачи синтеза двухполюсной электромагнитной системы шкивного сепаратора как самого распространенного типа электромагнитной системы отечественных магнитных шкивов и методика выбора рационального решения этой задачи.

Что же касается проектирования многополюсных систем электромагнитных шкивов, то основу такого проектирования может составить изложенная методика проектирования соответствующих двухполюсных электромагнитных систем.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Следует отметить, что в основу проектирования многополюсных систем электромагнитных шкивов может быть положена методика проектирования соответствующих двухполюсных электромагнитных систем.

На рис. 1 показаны геометрические размеры, определяющие рассматриваемую конструкцию электромагнитного шкива: D – наружный диаметр; Z_2 – габаритная ширина; Z – суммарная ширина полюсов и межполюсного зазора; δ – межполюсный зазор; D_c – диаметр сердечника магнитопровода; d_1, d_2 – толщина полюсного наконечника соответственно по внутренней (со стороны межполюсного зазора) и внешней кромкам полюсного диска; b_1, b_2 – наибольшая и наименьшая ширина полюсного диска; Z_m – ширина шкива по магнитопроводу; b – ширина обмоточного окна; a – высота обмоточного окна; T_p – ширина «теплового полюса»; Δ_1 – толщина изоляции между сердечником и намагничивающей обмоткой; Δ_2 – толщина изоляционного промежутка между намагничивающей обмоткой и внутренней расточкой полюсов (обычно заполняется кварцзаливочной массой); Δ_3 – толщина изоляции между намагничивающей обмоткой и боковыми поверхностями «теплового полюса» или полюсного диска; a_k, b_k – соответственно высота и ширина намотки намагничивающей катушки.

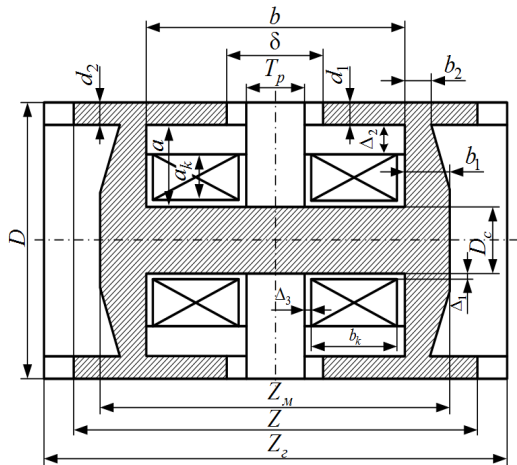


Рисунок 1 – Основные геометрические размеры двухполюсного электромагнитного шкива с «тепловым полюсом»

Если проектируется новый электромагнитный шкив, предназначенный для сепарации конкретного вида сыпучего материала (уголь, горелая формовочная земля и т.д.), транспортируемого ленточным конвейером с заданной шириной ленты, то для этого шкива указанные размеры не могут быть произвольными. Прежде всего, произвольным не может быть диаметр шкива D . Определение численного значения этого размера (как диаметра приводного барабана) представляет собой один из этапов расчета ленточного конвейера [6,7] и в случае проектирования магнитных шкивных сепараторов численное значение D должно быть задано. Не может быть произвольной также и ширина шкива Z_2 , которая как длина обечайки барабана ленточного конвейера

определяется шириной конвейерной ленты (табл. 1).

При этом численные значения размеров D и Z_2 определяют исходные габаритные размеры шкивного магнитного сепаратора. Все остальные его размеры должны быть такими, чтобы при соответствующих параметрах намагничивающей обмотки спроектированный шкив обеспечивал надежное извлечение ферромагнитного металла из сыпучего материала.

Таблица 1 – Длина обечайки барабана ленточного конвейера по ГОСТ 22644–77

Ширина ленты, мм	Длина обечайки барабана, мм	Ширина ленты, мм	Длина обечайки барабана, мм
300	400	1600	1900*
400	500	1800	2000
500	600		2100*
650	750	2000	2200
800	950		2300*
1000	1150	2250	2550
1200	1400	2500	2800
1400	1600	2750	3000
1600	1800	3050	3300

* Размеры относятся к передвижным конвейерам для карьеров

Указанное условие может быть выполнено, если при проектировании электромагнитного шкива будет удовлетворено следующее требование: магнитное поле спроектированного шкивного сепаратора должно обеспечивать необходимое значение извлекающей силы, зависящее от гранулометрического состава, формы и магнитных свойств разделяемых фракций. Действительно, пусть заданы: вид сепарируемого материала (песок, уголь и т.п.); его параметры (в данном случае основной параметр – это угол естественного откоса); характер извлекаемых ферромагнитных включений (форма и размеры, которые определяют массу извлекаемого тела и коэффициент γ сопротивления извлечению); линейная скорость ленты конвейера, транспортирующего сепарируемый сыпучий материал; толщина h_m слоя сыпучего материала на ленте конвейера (вместе с линейной скоростью и шириной ленты определяет производительность конвейера); толщина h_l транспортной ленты; диаметр шкива $D = 2R$. Тогда, согласно нашим исследованиям, надежное извлечение ферромагнитных включений из сепарируемого сыпучего материала будет обеспечено, если электромагнитный шкив создает посередине межполюсного зазора на расстоянии $Y_0 = h_0 + h_l$ от полюсов необходимую силу F_{mn} , численное значение которой определяется формулой:

$$F_{mn} = \frac{2}{\pi} \frac{K_0 m \gamma V_l}{c_b} \left[1 - \left(\frac{R + h_l}{R + h_l + h_0} \right)^{c_b} \right], \quad (1)$$

причем, поскольку в сепарируемом сыпучем материале могут попадаться ферромагнитные тела различной формы и размеров, для которых сила $F_{ми}$ – различна, то при непосредственном численном расчете необходимо, очевидно, учитывать лишь максимальное значение $F_{ми}$ для всех заданных извлекаемых тел.

Отметим, что необходимая сила извлечения $F_{ми}$, как пондеромоторная сила магнитного поля выражается через параметры поля шкива (напряженность поля и ее градиент). Поэтому, учитывая функциональную связь напряженности поля шкива с МДС намагничивающей обмотки, вместо силы $F_{ми}$ удобно рассматривать приведенную (к μ_0, χ_T) удельную (на единицу объема извлекаемого тела V_T) необходимую силу извлечения. Она определяется выражением

$$(H_0 grad H_0)_н = F_{ми} / (\mu_0 \chi_T V_T). \quad (2)$$

Соответственно этому, вместо максимального значения $F_{ми}$ должно рассматриваться максимальное значение приведенного удельного параметра силы извлечения $(H_0 grad H_0)_н$, которое может быть представлено в виде

$$(H_0 grad H_0)_{нм} = k_{нт} \rho_{\phi} g / (\mu_0 \chi_T), \quad (3)$$

где $k_{нт} = F_{ми} / (mg)$ – максимальное для всех извлекаемых тел отношение, показывающее, во сколько раз необходимая сила извлечения, рассчитанная по формуле (1), больше веса извлекаемого тела массой m , плотность ферромагнитного материала которого равна ρ_{ϕ} .

Таким образом, общая задача по проектированию электромагнитных шкивных сепараторов может быть сформулирована следующим образом: для заданных габаритных размеров D и Z_c определение геометрических размеров электромагнитной системы шкива и электротехнических параметров обмотки намагничивания, обеспечивающих на расстоянии Y_0 от поверхности полюсов посередине межполюсного зазора создание такого магнитного поля, произведение напряженности и градиента напряженности которого численно равно значению, рассчитанному по формуле (3).

В работе приводится общая методика решения сформулированной задачи – задачи синтеза электромагнитной системы шкивного сепаратора. Эта методика основывается на учете всех физических процессов, происходящих при работе электромагнитного шкива в качестве сепарационного устройства: кроме механических процессов при извлечении ферромагнитных тел из сыпучей сепарируемой среды, учет которых позволил получить исходный параметр на проектирование $(H_0 grad H_0)_{нм}$, при решении задачи синтеза учтены также распределение магнитного потока по стали магнитопровода электромагнитной системы шкива (это распределение

выражено ниже в виде соответствующего уравнения магнитной цепи) и тепловыделение в намагничивающей обмотке, вызванное джоулевыми потерями под действием электрического тока.

Решение указанной задачи синтеза заключается в совместном рассмотрении названных процессов (распределения магнитного потока и тепловыделения), дающих необходимые уравнения для связи искомых параметров электромагнитной системы шкива.

При этом, как уже отмечалось выше, ввиду многовариантности решения задачи синтеза электромагнитной системы шкивного сепаратора, его проектирование должно быть дополнено решением оптимизационной задачи выбора по некоторому критерию рационального варианта решения задачи синтеза. В силу значительного объема материалов исследований изложение их результатов будет проведено по частям в серии статей. В настоящей статье рассматривается вывод и итерационное решение уравнения магнитной цепи для двухполюсного электромагнитного шкива.

Уравнение магнитной цепи. Вывод уравнения. Пусть между полюсами электромагнитного шкива создана разность магнитных потенциалов U_m . Тогда полный магнитный поток, возбужденный электромагнитной системой шкива,

$$\Phi_{\Sigma} = \Lambda_{\Sigma} U_m, \quad (4)$$

где Λ_{Σ} – полная магнитная проводимость суммарного магнитного потока Φ_{Σ} , зависящая от геометрии шкива.

Этот полный магнитный поток, прежде чем распределиться в межполюсном пространстве электромагнитной системы шкива, проходит по цилиндрическому сердечнику магнитопровода этой системы, создавая в нем магнитное поле с индукцией B_c , которая согласно определению магнитного потока может быть рассчитана по формуле

$$B_c = \Phi_{\Sigma} / (\pi D_c^2 / 4), \quad (5)$$

где $\pi D_c^2 / 4$ – площадь сечения цилиндрического сердечника магнитопровода шкива.

Как следует из результатов исследований магнитного поля электромагнитных шкивов, для наиболее полного использования магнитных свойств стали магнитопровода необходимо, чтобы индукция магнитного поля в сердечнике соответствовала средненасыщенному состоянию намагничивания. Для литейных сталей, применяемых при изготовлении отливок магнитопроводов электромагнитных шкивов, средненасыщенное состояние намагничивания достигается при индукции магнитного поля в стали $B_{cp} \approx 1,5$ Тл [8]. Поэтому, согласно уравнению (4), наилучшие условия средненасыщенного состояния стали магнитопровода шкива достигаются тогда, когда диаметр сердечника удовлетворяет равенству

$$D_c = 2 \sqrt{(\Lambda_{\Sigma} U_m) / (\pi B_{cp})}, \quad (6)$$

при получении которого из формулы (5) учтено соотношение (3).

С целью преобразования равенства (6) к виду, удобному для практического применения, учтем, что магнитный поток Φ_{Σ} , а следовательно, и разность магнитных потенциалов U_m должны быть такими, чтобы магнитное поле шкивного сепаратора имело посередине межполюсного зазора на расстоянии Y_0 от поверхности полюсов $(H_0 grad H_0) = (H_0 grad H_0)_{nm}$. Иными словами учтем, что разность магнитных потенциалов U_m проектируемого шкива должна соответствовать численному значению $(H_0 grad H_0)_{nm}$ по уравнению (3). При этом соответствие между U_m и $(H_0 grad H_0)_{nm}$ легко установить исходя из критериев подобия с учетом независимых базовых величин, что дает следующее соотношение:

$$U_m = [(H_0 grad H_0)_{nm} Z^3 / (H_0 grad H_0)_{omn}]^{1/2} \quad (7)$$

где $(H_0 grad H_0)_{omn}$ – критерий подобия (относительный параметр силы извлечения) параметра силы $(H_0 grad H_0)$.

Подставляя уравнение (7) в формулу (6) можно записать окончательно уравнение

$$D_c = 2[\Lambda_{\Sigma} / (\pi B_{co})]^{1/4} = [(H_0 grad H_0)_{nm} \times Z^3 / (H_0 grad H_0)_{omn}]^{1/4} \quad (8)$$

которое может быть названо уравнением магнитной цепи, поскольку связывает между собой геометрические размеры магнитопровода шкивного сепаратора, функциями которых являются и Λ_{Σ} , и $(H_0 grad H_0)_{omn}$.

Выражения для вычисления параметров уравнения. Следует заметить, что для рассматриваемой конструкции электромагнитного шкивного двухполюсного сепаратора межполюсное кольцо из немагнитного материала ("тепловой полюс") обуславливает выполнение намагничивающей обмотки шкива из двух катушек с зазором между ними, равным ширине "тепловой полюса". Наличие указанного межкатушечного зазора не учитывалось в проектной методике, но исследовалось при моделировании магнитного поля электромагнитных шкивов на соответствующих физических моделях. Поэтому непосредственное использование аппроксимационных выражений для значений Λ_{Σ} и $(H_0 grad H_0)_{omn}$ требует в данном случае дополнительного пояснения.

Это пояснение касается качественной оценки влияния межкатушечного зазора на магнитное поле двухполюсного электромагнитного шкива. Причем, в силу математических трудностей аналитических расчетов магнитного поля для электромагнитных систем с осевой симметрией рассматриваемое влияние межкатушечного зазора на магнитное поле оценим, используя аналитический расчет магнитного

поля в обмоточном окне П-образного плоскопараллельного электромагнита [9–11].

Отметим, что получение качественных соотношений для полюсной системы с осевой симметрией из рассмотрения соответствующей (по граничным условиям) плоскопараллельной системы является распространенным приемом при решении различных задач электромагнитного поля [12–14], который, однако, не имеет строгого аналитического обоснования. Впрочем, укажем на попытку такого обоснования для метода Кропля и для других методов, основанных на использовании закона кривизны [13]. Именно отсутствие строгого обоснования перехода от плоскопараллельной электромагнитной системы к соответствующей системе с осевой симметрией предопределило использование строгих аналитических результатов [9–11] лишь для качественной оценки влияния межкатушечного зазора на магнитное поле электромагнитного шкива.

Согласно этим результатам для межкатушечных зазоров, не превышающих трети ширины обмоточного окна, проводимость магнитного потока рассеяния внутри обмоточного окна П-образного плоскопараллельного электромагнита равна проводимости катушек без зазора с погрешностью менее 5 %. Тогда, учитывая, что сам поток рассеяния через обмоточную зону составляет менее 20 % от общего магнитного потока, из изложенного можно сделать вывод о незначительном влиянии межкатушечного зазора на распределение магнитного поля в электромагнитной системе рассматриваемого типа. Сказанное подтверждается также тем, что размеры обмоточного окна не входят в аппроксимации напряженности магнитного поля и соответствующего градиента для точек рабочей зоны П-образных электромагнитных железоотделителей.

В результате для электромагнитных шкивов рассматриваемой конструкции можно принять, что межкатушечный зазор обмотки намагничивания, обусловленный использованием «тепловой полюса», практически не влияет на распределение магнитного поля в межполюсном пространстве, а следовательно, и на напряженность магнитного поля в рабочей зоне шкива. Поэтому, при проведении проектных расчетов электромагнитных двухполюсных шкивов их магнитное поле можно рассчитывать по формулам, полученным на основе данных физического моделирования электромагнитных шкивов с обмотками без межкатушечного зазора.

Таким образом, в уравнении магнитной цепи (8) для определения Λ_{Σ} и $(H_0 grad H_0)_{omn}$ без существенной потери точности можно использовать соответствующие аппроксимационные формулы. В частности, если учесть, что суммарный магнитный поток Φ_{Σ} представляет собой сумму локальных магнитных потоков

$$\Phi_{\Sigma} = \Phi_0 + \Phi_r + \Phi_d + \Phi_c + \Phi_a, \quad (9)$$

и следовательно полная магнитная проводимость Λ_{Σ} представима суммой соответствующих прово-

димостей локальних магнитных потоков $(\Lambda_{\Sigma} = \Lambda_0 + \Lambda_T + \Lambda_d + \Lambda_c + \Lambda_a)$, то для вычисления Λ_{Σ} можно воспользоваться формулой

$$\Lambda_{\Sigma} = \mu_0 \pi [D(\lambda_0 + \lambda_T) + (D - d_1)\lambda_d + (D - 2d_1)\lambda_c + (D - 2d_1 - a)\lambda_a] \quad (10)$$

в которой удельные проводимости $\lambda_0, \lambda_T, \lambda_d, \lambda_c, \lambda_a$ могут быть рассчитаны по формулам, полученным на основе аппроксимации данных физического моделирования двухполюсных электромагнитных систем шкивных сепараторов.

Что же касается вычисления $(H_0 grad H_0)_{омн}$ по формуле (8), то оно также может быть проведено с использованием данных физического моделирования магнитного поля электромагнитного шкива. В результате получим

$$\begin{aligned} (H_{омн})_1 &= \left(0,644 \frac{Z}{\delta} - 0,08\right) \times \\ &\times \left\{ \left[1 + 4 \left(\frac{Y_0}{\delta} \right)^2 \right] \left[1 + 4 \left(\frac{Y_0}{Z} \right)^2 \right] \right\}^{-1/2} \times \\ &\times \left\{ 1 - \left[0,06744 \frac{Z}{\delta} + 2,22 \frac{Y_0}{Z} + 0,00442 \left(\frac{Z}{\delta} \right)^2 - \right. \right. \\ &\left. \left. - 2,61 \left(\frac{Y_0}{Z} \right)^2 - 0,015 \right] \exp \left[-0,64 \frac{D}{Z} + 0,0095 \frac{DZ}{Y_0 \delta} \right] \right\}. \end{aligned} \quad (11)$$

Формула (11) позволяет найти значение $(H_0 grad H_0)_{омн}$ путем замены на отношение конечных разностей дифференциального отношения в выражении

$$(H_0 grad H_0)_{омн} = (H_{омн})_1 \frac{d(H_{омн})_1}{d(y/Z)} \Big|_{y=Y_0} \quad (12)$$

Указанная замена имеет вид

$$\frac{d(H_{омн})_1}{d(y/Z)} \Big|_{y=Y_0} \cong Z \frac{\Delta(H_{омн})_1}{\Delta Y_0} \quad (13)$$

где $\Delta(H_{омн})_1$ – разность двух значений $\Delta(H_{омн})_1$, рассчитанных по формуле (11) соответственно при $y = Y_0$ и $y = Y_0 + \Delta Y_0$; ΔY_0 – некоторое приращение по расстоянию y , которое может быть принято равным некоторой весьма малой части от Y_0 (непосредственный расчет показал, что для практически реализуемого диапазона изменения размеров существующих конструкций электромагнитных шкивов ошибка в рассматриваемой замене дифференциального отношения на отношение конечных разностей не превосходит 0,1 % при $\Delta Y_0 = Y_0 \cdot 10^{-3}$).

Преобразование уравнения для решения методом итераций. Все, изложенное ранее о вычислении Λ_{Σ} и $(H_0 grad H_0)_{омн}$, позволяет сделать вывод о

том, что уравнение магнитной цепи (8) является уравнением, связывающим между собой следующие геометрические размеры магнитопровода электромагнитного шкива: $D, Z, \delta, a, b, d_1, D_c$. Причем, если учесть геометрическую связь диаметра сердечника магнитопровода шкива D_c с высотой обмоточного окна a и с толщиной полюсного наконечника d_1 , выражаемую соотношением (рис. 1)

$$D_c = D - 2a - 2d_1, \quad (14)$$

то количество геометрических размеров, связанных уравнением магнитной цепи, можно уменьшить, перепишав его в виде

$$\begin{aligned} a &= 0,5D - d_1 - \left(\frac{\Lambda_{\Sigma}}{\pi B_{co}} \right)^{1/2} \times \\ &\times Z^{3/4} \left[\frac{(H_0 grad H_0)_{им}}{(H_0 grad H_0)_{омн}} \right]^{1/4}, \end{aligned} \quad (15)$$

получаемся из формулы (8) после подстановки в нее выражения (14).

При этом уравнение (15), как и уравнение (8), следствием которого оно является, выражает условие полного использования магнитных свойств стали магнитопровода при проведении через него магнитного потока, создающего необходимое извлекающее усилие. Поэтому уравнение (15) также может быть названо уравнением магнитной цепи.

Это уравнение при заданном диаметре шкива D может служить для определения любого одного размера из совокупности геометрических размеров $(D, Z, \delta, a, b, d_1)$, если остальные размеры из этой совокупности уже определены каким-либо образом. В данном случае, в качестве такого геометрического размера, определяемого через решение уравнения (15) удобнее всего принять a , что следует из вида записи уравнения (15). Тогда, для решения (15) относительно a , предварительно известными размерами должны быть Z, δ и b (D , как исходный размер, считаем заданным). Что же касается d_1 , то для его определения учтем, что полюса шкива изготавливаются литьем, и d_1 , как толщина некоторого литевского участка магнитопровода шкива, зависит от технологии литья и обуславливается [15] габаритом литевского участка (D) и длиной отливаемого участка – наконечника полюса, которая согласно рис. 1 равна $0,5(b - \delta)$.

Сказанное, а также использование данных по электромагнитным шкивам завода им. Пархоменко (г. Луганск), позволило установить следующее соотношение, связывающее d_1 с размерами D, δ, b :

$$d_1 = 0,025D + 0,04(b - \delta). \quad (16)$$

Учет этого соотношения дает возможность задавать при решении уравнения (15) относительно a лишь три размера: Z, δ и b .

Следовательно, при некотором фиксированном значении диаметра D и заданных значениях размеров Z, δ и b , уравнение (15) является уравнением лишь относительно размера a . Левая часть этого уравнения представляет собой уравнение прямой (относительно переменной a). Правая же часть является некоторой убывающей функцией аргумента a (это можно увидеть, если воспользоваться соответствующими аппроксимационными формулами для Λ_Σ и учесть влияние параметра a на Λ_Σ и на правую часть уравнения магнитной цепи). При этом очевидно, что пересечение указанных прямой и убывающей функции правой части рассматриваемого уравнения (рис. 2) представляет собой решение уравнения (15) относительно a .

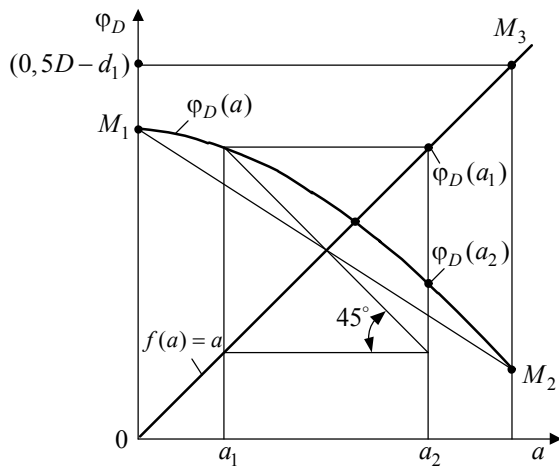


Рисунок 2 – К обоснованию итерационного процесса для решения уравнения магнитной цепи:

1 – прямая $f(a) = a$; 2 – функция $\varphi_D(a)$

Следует отметить, что запись уравнения магнитной цепи в виде (15) является наиболее приемлемой для решения этого уравнения методом итераций [16], согласно которому каждое новое приближение к корню ищется через значение предыдущего приближения по алгоритму

$$a_{i+1} = \varphi_D(a_i), \tag{17}$$

где i – номер шага итерации; a_i – приближение к корню на соответствующем шаге итерации; $\varphi_D(a)$ – правая часть уравнения (15), рассматриваемая как функция a .

Поскольку реализация указанного алгоритма итерационного решения уравнения (15) при непосредственном численном расчете (решении задачи синтеза электромагнитной системы шкивного сепаратора) обуславливается сходимостью для решаемого уравнения соответствующего итерационного процесса, то необходимо доказать выполнение в рассматриваемом случае известного условия такой сходимости – условия Липшица [16].

Доказательство сходимости решения уравнения. Как известно, условие Липшица ограничивает модуль производной правой части решаемого уравне-

ния [17]. Для уравнения (15) это условие равносильно неравенству

$$|a_{i+1} - a_i| \geq |\varphi_D(a_i) - \varphi_D(a_{i+1})|, \tag{18}$$

выполнение которого означает последовательное уменьшение (сжатие) расстояния по аргументу между итерационными точками.

Очевидно, что такое сжатие должно привести на некотором шаге итерации к уменьшению расстояния $|a_{i+1} - a_i|$ до значения, меньшего, чем принятая точность решения. В этом случае вычисление по итерационному алгоритму (17) может быть закончено, что и означает сходимость соответствующего итерационного процесса.

Для доказательства неравенства (18) учтем, что функция $\varphi_D(a)$ удовлетворяет следующим соотношениям:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_D(a = 0) < 0,5D - d_1, \\ \varphi_D(a = 0,5D - d_1) > 0, \end{aligned} \right\} \tag{19}$$

которые получаются из несложной оценки значения правой части уравнения (15) при подстановке в нее соответствующих значений a .

С учетом отмеченного выше монотонного убывания функции $\varphi_D(a)$ с ростом a , неравенства (18) означают, что угол наклона прямой M_1, M_2 к оси $0a$ будет меньше 45° (см. рис.2, где M_1 и M_2 – значения рассматриваемой функции соответственно при минимально и максимально возможном значениях аргумента a).

Кроме того, учтем следующее. Как показывает непосредственный расчет, функция $\varphi_D(a)$ является выпуклой; для любого квадрата, одна из вершин которого лежит на кривой $\varphi_D(a)$, а две другие вершины – на линии OM_3 (на рис. 2 линия OM_3 соответствует левой части решаемого уравнения магнитной цепи), диагональ расположена под углом 45° к оси $0a$. Тогда, для любого квадрата, соответствующего итерационному процессу по формуле (17), т.е. для любого квадрата с вершинами в точках с координатами $(a_i, \varphi_D(a_i))$, (a_{i+1}, a_{i+1}) , (a_{i+1}, a_i) и (a_i, a_i) , его сторона $|a_{i+1} - a_i|$ будет всегда больше, чем разность соответствующих значений $\varphi_D(a)$. Это отражено на рис. 2, где показан рассматриваемый квадрат для первого шага итерации ($i = 1$).

Таким образом, условие (18) выполняется на любом шаге итерации по формуле (17), и, следовательно, для решения уравнения магнитной цепи (15) относительно a можно пользоваться методом итерации.

ВЫВОДЫ. Сформулирована общая задача по проектированию электромагнитных шкивных сепараторов, учитывающая заданные габаритные размеры D и Z_2 , состоящая в определении геометрических размеров электромагнитной системы шкива и

электротехнических параметров обмотки намагничивания, обеспечивающих на заданной глубине извлечения посередине межполюсного зазора создание магнитного поля с необходимыми значениями напряженности и градиента.

В соответствии с результатами исследования магнитного поля электромагнитных шкивов и рассмотрения влияния межкатушечного зазора на его распределение в рабочей зоне сепаратора получено и обосновано уравнение магнитной цепи.

С учетом особенности конструкций и технологии изготовления электромагнитных шкивов, показано, что двумя размерами, которые удобно задавать произвольно при решении задачи синтеза, являются ширина полюсов Z и межполюсный зазор δ .

Показано, что его решение может быть найдено методом итераций при задании начального значения аргумента a (высота обмоточного окна) произвольным из диапазона, определяемого геометрическими соотношениями между размерами шкива.

ЛИТЕРАТУРА

1. Обогащительное оборудование: каталог / Ин-т Гипромашуглеобогащение. – Ворошиловград: Облполиграфиздат, 1989. – 100 с.
2. Новиков Ю.Н. Теория и расчет электрических аппаратов. – Л.: Энергия, 1970. – 327 с.
3. Никитенко А.Г. Автоматизированное проектирование электрических аппаратов. – М.: Высшая школа, 1983. – 192 с.
4. Никитенко А.Г., Гринченков В.П., Иванченко А.Н. Программирование и применение ЭВМ в расчетах электрических аппаратов. – М.: Высшая школа, 1990. – 231 с.
5. Любчик М.А. Оптимальное проектирование силовых электромагнитных механизмов. – М.: Энергия, 1974. – 392 с.
6. Зенков Р.А., Ивашов Н.Н., Колобов Л.И. Ма-

шины непрерывного транспорта. – М.: Машиностроение, 1987. – 432 с.

7. Шахмейстер Л.Г., Дмитриев В.Г. Теория и расчет ленточных конвейеров. – М.: Машиностроение, 1987. – 334 с.

8. Сумцов В.Ф. Электромагнитные железоотделители. – М.: Машиностроение, 1978. – 174 с.

9. Загирняк М.В. Электромагнитные расчеты. – К.: Ин-т системных исследований образования, 1995. – 204 с.

10. Загирняк М.В., Бранспиз Ю.А. Расчет магнитного поля в обмоточной зоне П-образного электромагнита // Электричество. – 1980. – № 6. – С. 66–68.

11. Загирняк М.В., Бранспиз Ю.А., Бычков Е.В. Расчет потоков в обмоточном окне тягового П-образного электромагнита // Конструирование и пр-во трансп. машин: Респ. межвед. науч.-техн. сборник. – Харьков: Вища школа, 1983. – Вып. 15. – С. 78–83.

12. Смолкин Р.Д., Сайко О.Л., Устинова Р.Г. Расчет плоскомеридианных магнитных систем шкивных электромагнитных железоотделителей // Электротехника. – 1980. – № 6. – С. 37–41.

13. Резвых К.А. Расчет электростатических полей. – М.: Энергия, 1967. – 120 с.

14. Русин Ю.С. Расчет электромагнитных систем. – Л.: Энергия, 1968. – 132 с.

15. Справочник техника-конструктора / Под ред. М.Я. Левицкого. – К.: Техніка, 1978. – 592 с.

16. Тихонов А.Н., Костомаров Д.П. Вводные лекции по прикладной математике. – М.: Наука, 1984. – 192 с.

17. Ледовский А.Н., Шапиро Л.З. Расчет магнитного поля в шаговом двигателе методом конечных элементов // Проблемы автоматизации проектирования и САПР средств хронометрической техники: сбор. науч. трудов НИИЧаспрома. – 1986. – С. 87–100.

DESIGN OF ELECTROMAGNETIC PULLEY SEPARATORS

PART 1. PROBLEM STATEMENT. THE SOLUTION OF THE MAGNETIC CIRCUIT EQUATION

M. Zagirnyak, V. Usatyuk, A. Oksanych, V. Lyashenko, A. Nikitina

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine, E-mail: mzagirn@kdu.edu.ua

Paper deals with the design of the electromagnetic systems of the pulley separators. On the basis of the relations for the required extraction forces (taking into account the mechanical processes of removing the bodies from the granular medium) it was received an analytical expression that allows to calculate the initial parameter for the design of the optimal devices for the current exploitation mode, the type of the separated particulate material, the shape and magnetic properties of recoverable fraction. The problem of the synthesis of the bipolar magnetic system of the electromagnetic pulleys is formulated. It consists in joint consideration of the magnetic flux distribution in the magnetic core steel and heat emission in the magnetizing coil to determine the geometrical dimensions of the magnetic system elements and the magnetizing coil parameters. Due to its multi-variance this problem requires the addition of a solution of the optimization problem of choosing the best option according to a certain criterion.

Key words: magnetic separators, synthesis problem, extraction force, electromagnet, magnetic circuit, efficiency indicators.

REFERENCES

1. *Obogatitelnoe oborudovanie: Katalog* (1989), [Mineral Processing Equipment: catalog], Institut Gipromashugleobogashchenie, Oblpoligrafizdat, Voroshilovgrad, Russia.
2. Novikov, Yu.N. (1970), *Teoriya i raschet elektri-*

cheskikh apparatov [Theory and Design of electrical apparatus], Energiya, Leningrad, Russia.

3. Nikitenko, A.G. (1983), *Avtomatizirovannoe proektirovanie elektricheskikh apparatov* [Computer-aided design of electrical devices], Vysshaya shkola, Moscow, Russia.

4. Nikitenko, A.G., Grinchenkov, V.P., Ivanchenko A.N. (1990), *Programmirovaniye i primeneniye EVM v raschetakh elektricheskikh apparatov* [Programming and use of computers in the calculation of electrical devices], Vysshaya shkola, Moscow, Russia.
5. Lyubchik, M.A. (1974), *Optimalnoye proektirovaniye silovykh elektromagnitnykh mekhanizmov* [Optimal design of electromagnetic power mechanisms], Energiya, Moskva, Russia.
6. Zenkov, R.A., Ivashov, N.N., Kolobov, L.I. (1987), *Mashiny nepreryvnogo transporta* [Continuous transport], Mashinostroeniye, Moscow, Russia.
7. Shakhmeyster, L.G., Dmitriev, V.G. (1987), *Teoriya i raschet lentochnykh konveyerov* [Theory and Design of belt conveyors], Mashinostroeniye, Moscow, Russia.
8. Sumtsov, V.F. (1978), *Elektromagnitnye zhelezootdeliteli* [Electromagnetic iron separators], Mashinostroeniye, Moscow, Russia.
9. Zagirnyak, M.V. (1995), *Elektromagnitnye raschety* [Electromagnetic calculations], Institut sistemnykh issledovaniy obrazovaniya, Kiev, Ukraina.
10. Zagirnyak, M.V., Branspiz, Yu.A. (1980), “Raschet magnitnogo polya v obmotochnoy zone P-obraznogo elektromagnita”, *Elektrichestvo*, no. 6, pp. 66–68.
11. Zagirnyak, M.V., Branspiz, Yu.A., Bychkov, E.V. (1983), “Raschet potokov v obmotochnom okne tyagovogo P-obraznogo elektromagnita”, *Konstruirovaniye i proizvodstvo transportnykh mashin: Resp.mezhved.nauch.-tekhn. sbirnik*, iss. 15, pp. 78–83.
12. Smolkin, R.D., Sayko, O.L., Ustinova, R.G. (1980), “Raschet ploskomeridiannykh magnitnykh sistem shkivnykh elektromagnitnykh zhelezootdeliteley”, *Elektrotekhnika*, no. 6, pp. 37–41.
13. Rezyvkh, K.A. (1967), *Raschet elektrostati-cheskikh poley* [The calculation of electrostatic fields], Energiya, Moscow, Russia.
14. Rusin, Yu.S. (1968), *Raschet elektromagnitnykh sistem* [The calculation of electromagnetic systems], Energiya, Leningrad, Russia.
15. *Spravochnik tekhnika-konstruktora* (1978), [Directory technician designer], ed. M.Ya. Levitskogo, Tekhnika, Kiev, Ukraina.
16. Tikhonov, A.N., Kostomarov, D.P. (1984), *Vvodnye lektsii po prikladnoy matematike* [Introductory Lectures on Applied Mathematics], Nauka, Moscow, Russia.
17. Ledovskiy, A.N., Shapiro, L.Z. (1986), “Raschet magnitnogo polya v shagovom dvigatele metodom konechnykh elementov”, *Problemy avtomatizatsii proektirovaniya i SAPR sredstv khronometricheskoy tekhniki: Sb. nauch. tr. NII chasproma*, pp. 87–100.

Стаття надійшла 28.04.2015.