

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИСТЕМ ШКИВНЫХ СЕПАРАТОРОВ.**

**ЧАСТЬ 3. АЛГОРИТМ СИНТЕЗА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ШКИВНОГО СЕПАРАТОРА**

**М. В. Загирняк, А. П. Оксанич, В. П. Ляшенко, И. А. Луценко**

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского  
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: mzagirn@kdu.edu.ua

Сформулирована задача синтеза электромагнитной системы шкивного сепаратора, как задача определения таких размеров полюсов и намагничивающей катушки, которые обеспечивают создание проектируемым устройством на заданной глубине извлечения необходимого параметра извлекающей силы. В результате анализа конструкции типичного электромагнитного шкива обоснован выбор исходных размеров на проектирование. Предложена методика решения задачи синтеза рассматриваемых устройств. Разработан алгоритм решения задачи синтеза электромагнитных шкивных сепараторов классической конструкции. Он представляет собой совместное решение уравнений магнитной цепи и теплового баланса. Это решение дополняется расчётом электрических параметров намагничивающей катушки. Представлена схема описанного алгоритма, составляющего основу решения задачи синтеза электромагнитной системы шкивного сепаратора рассматриваемой конструкции.

**Ключевые слова:** алгоритм, шкивной сепаратор, уравнения теплового баланса и магнитной цепи.

**ПРОЕКТУВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ СИСТЕМ ШКІВНИХ СЕПАРАТОРІВ.**

**ЧАСТИНА 3. АЛГОРИТМ СИНТЕЗУ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СИСТЕМИ ШКІВНОГО СЕПАРАТОРУ**

**М. В. Загирняк, А. П. Оксанич, В. П. Ляшенко, І. А. Луценко**

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського  
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: mzagirn@kdu.edu.ua

Сформульовано задачу синтезу електромагнітної системи шківно сепаратора, як завдання визначення таких розмірів полюсів і катушки намагнічування, які забезпечують створення проєктованим пристроєм на заданій глибині вилучення необхідного параметра витягаючої сили. В результаті аналізу конструкції типового електромагнітного шків обґрунтований вибір вихідних розмірів на проєктування. Запропоновано методику розв'язання задачі синтезу розглянутих пристроїв. Розроблено алгоритм розв'язання задачі синтезу електромагнітних шківних сепараторів класичної конструкції. Він уключає собою спільне рішення рівнянь магнітної кола і теплового балансу. Це рішення доповнюється розрахунком електричних параметрів катушки намагнічування. Представлена схема описаного алгоритму, що становить основу рішення задачі синтезу електромагнітної системи шківно сепаратора розглянутої конструкції.

**Ключові слова:** алгоритм, шківний сепаратор, рівняння теплового балансу і магнітного кола.

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ.** Задача синтеза электромагнитной системы шкивного сепаратора заключается в определении таких размеров полюсов и намагничивающей обмотки, которые обеспечивают создание проектируемым шкивом на расстоянии  $Y_0$  от полюсов посередине межполюсного зазора магнитного поля с параметром силы  $(H_0 \text{grad} H_0)$  равным  $(H_0 \text{grad} H_0)_{\text{нм}}$  [1–6]. При постановке этой задачи, на рис. 1, перечислены все размеры электромагнитного шкива, полностью определяющие рассматриваемую конструкцию:  $D, Z_2, Z, \delta, a, b, D_c, Z_m, b_1, b_2, d_1, d_2, a_k, b_k, T_p, \Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$ . Именно определение числовых значений этих семнадцати размеров является целью задачи синтеза.

**МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.** Выбор исходных размеров. Два габаритных размера  $D$  и  $Z_2$  находятся исходя из размеров конвейерной ленты, для которой проектируется магнитный шкив. Числовые значения размеров  $\Delta_1, \Delta_2$  и  $\Delta_3$  определяются условиями обеспечения электро-безопасности проектируемого шкива и могут быть приняты следующими:  $\Delta_1 = \Delta_3 = 1 \dots 2$  мм;  $\Delta_2 = 20$  мм (последний размер, одинаковый для всех типоразмеров шкивов, обеспечивает, как показывает опыт эксплуатации серийных шкивов Луганского

завода им. Пархоменко, необходимую степень электробезопасности и заполнение кварцзаливочной массой предназначенного ей объема без воздушных раковин).

Кроме того с целью унификации производства, ширина «теплового полюса»  $T_p$  может быть принята одинаковой для шкивов одного типоразмера и равной ширине «теплового полюса» серийного шкива завода им. Пархоменко (здесь следует заметить, что указанный завод не имеет своего металлургического производства для крупногабаритного цветного литья и получает «тепловые полюса» в виде алюминиевых отливок с соответствующих предприятий цветной металлургии).

Таким образом, общее количество неопределенных размеров сводится к двенадцати:  $Z, \delta, a, b, D_c, Z_m, b_1, b_2, d_1, d_2, a_k, b_k$ . Для их нахождения необходимо учесть прежде всего очевидные геометрические соотношения (рис. 1)

$$\begin{aligned} Z_m &= b + 2b_1, \\ a_k &= a - \Delta_1 - \Delta_2, \\ b_k &= (b - T_p - 4\Delta_3) / 2, \end{aligned} \tag{1}$$

а также соотношение

$$D_c = D - 2a - 2d_1. \tag{2}$$

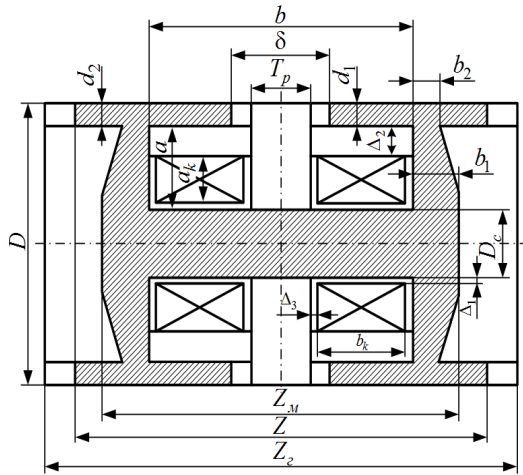


Рисунок 1 – Основные геометрические размеры двухполюсного электромагнитного шкива с «тепловым полюсом»

Кроме того, необходимо учесть, что протекание магнитного потока по магнитопроводу шкива с минимальными потоками рассеяния обеспечивается равенством площади сердечника магнитопровода  $(\pi D_c^2 / 4)$  и площади цилиндрической поверхности в толще полюсного диска, через которую проходит магнитный поток, выходящий из сердечника (образующая этой цилиндрической поверхности представляет собой линию, параллельную оси шкива, с длиной, изменяющейся от  $b_1$  до  $b_2$  с увеличением радиуса цилиндрической поверхности). В результате, приняв, что для наименьшей и наибольшей толщин полюсного диска площади боковых поверхностей указанных цилиндров равны соответственно  $\pi(D - d_1)b_2$  и  $\pi D_c b_1$ , дополнительно можно получить еще два соотношения между геометрическими размерами шкива:

$$b_1 = 0,25D_c, \quad b_2 = b_1 D_c / (D_c - d_1). \quad (3)$$

Дополнительным соотношением между размерами литого магнитопровода шкива является также соотношение для толщины полюсных наконечников

$$d_2 = 0,5d_1, \quad (4)$$

к которому следует добавить соотношение

$$d_1 = 0,025D + 0,04(b - \delta). \quad (5)$$

Соотношения (1)–(5), связывая между собой размеры электромагнитного шкива рассматриваемой конструкции, снижают число неопределенных размеров с двенадцати до четырех. В свою очередь, два уравнения магнитной цепи и теплового баланса, которым должны удовлетворять размеры работоспособного шкива, доводят число неопределенных размеров до двух.

При принятых условиях для рассматриваемых шкивов эти два размера могут быть заданы любыми (конечно, с учетом габаритных ограничений). При-

чем в качестве таких неопределенных задаваемых размеров могут быть взяты любые два размера, числовые значения которых определяют и числовые значения остальных размеров. То есть, если задать два любых размера произвольно (выбрав их числовые значения из области, допускаемой габаритами и конструкцией), то числовые значения остальных размеров могут быть найдены из решения уравнений магнитной цепи и теплового баланса и использования соотношений (1)–(5).

Как показывает практический опыт [5; 6], двумя размерами, которые наиболее удобно задавать произвольно при решении задачи синтеза электромагнитного шкива рассматриваемой конструкции, являются ширина  $Z$  и межполюсный зазор  $\delta$ : во-первых, при заданном диаметре шкива соотношение именно этих размеров определяет формирование рабочего магнитного потока в межполюсном пространстве и, согласно уравнению

$$(H_{grad}H)_{omn} = \frac{H_{grad}H}{(H_{grad}H)_B} = H_{grad}H \frac{L_B}{H_B} = H_{grad}H \frac{Z^3}{U_m^2}, \quad (6)$$

определяет ту разность магнитных потенциалов между полюсами шкива, которая обеспечивает необходимое значение  $(H_0 grad H_0)_{omn}$  на расчетном расстоянии  $Y_0$  от поверхности шкива; во-вторых, эти размеры связаны между собой простым геометрическим неравенством (рис. 1):

$$Z_c > Z > \delta > 0, \quad (7)$$

что позволяет легко организовать вычислительный процесс при решении рассматриваемой задачи синтеза.

*Методика решения задачи синтеза.* Если размеры  $Z$  и  $\delta$  заданы каким-либо образом, то числовые значения остальных размеров шкива могут быть найдены из решения уравнений магнитной цепи и теплового баланса и использования соотношений (1)–(5). При этом уравнение магнитной цепи, как это показано при его выводе в форме (8),

$$a = 0,5D - d_1 - \left( \frac{\Lambda_\Sigma}{\pi B_{co}} \right)^{1/2} Z^{3/4} \left[ \frac{(H_0 grad H_0)_{nm}}{(H_0 grad H_0)_{omn}} \right]^{1/4} \quad (8)$$

может рассматриваться как уравнение относительно размера  $a$ , если размер  $b$  уже известен. Что же касается уравнения теплового баланса, то его запись в форме (9),

$$U_m + (1,2125D + 0,9b + 0,1\delta - 2,5a)102B_{co} \times (9,85 + B_{co}^8) = 2\sqrt{2} \left[ P_{yo} a_k b_k (a_k + b_k) / (\rho_v k_{zan}) \right]^{1/2} \quad (9)$$

с учетом соотношений для  $P_{yo}$ ,  $a_k$  и  $b_k$  позволяет рассматривать это уравнение, как уравнение относительно размера  $b$ , если размер  $a$  уже известен.

То есть уравнения магнитной цепи и теплового баланса могут рассматриваться как система двух уравнений относительно двух неизвестных  $a$  и  $b$ . Из изложенного следует, что решение исходной задачи синтеза электромагнитной системы шкивного сепаратора рассматриваемой конструкции сводится к следующему:

- нахождение для заданных  $Z$  и  $\delta$ , удовлетворяющих неравенствам (7), числовых значений  $a$  и  $b$  путем совместного решения системы из уравнений (8) и (9);
- определение геометрических размеров шкива по формулам (1) – (5), соответствующих заданным  $Z$  и  $\delta$  и найденным  $a$  и  $b$ ;
- определение электрических параметров намагничивающей обмотки, соответствующих найденному размеру обмоточного окна  $a \times b$ .

Последнее требует пояснения. При рассмотрении уравнения магнитной цепи и уравнения теплового баланса внимание не акцентировалось на определении электрических параметров намагничивающей обмотки. Это обуславливалось тем, что электрические параметры обмотки намагничивания при известных ее размерах полностью определяются той электрической мощностью, которую намагничивающая обмотка потребляет в установившемся тепловом режиме, создавая в межполюсном зазоре требуемое значение  $(H_0 \text{grad} H_0)_{\text{нм}}$ . В свою очередь, эта электрическая мощность, равная мощности теплоотвода, полностью определяется геометрическими размерами намагничивающей обмотки, определение которых и является задачей, предшествующей задаче определения ее электрических параметров. Как следствие, задача определения электрических параметров намагничивающей обмотки может рассматриваться отдельно от задачи определения ее геометрических размеров, что сводит задачу синтеза к решению системы уравнений (8) и (9).

*Алгоритм решения уравнений магнитной цепи и теплового баланса.* Перейдем теперь непосредственно к решению уравнений магнитной цепи и теплового баланса как системы уравнений относительно размеров  $a$  и  $b$ . Для этого учтем, что если рассматривать каждое из названных уравнений в отдельности как некоторые функции  $a$  от  $b$ , то искомое решение представит собой точку пересечения в плоскости прямоугольных координат  $(a, b)$  кривой, соответствующей зависимости  $a$  от  $b$  по уравнению магнитной цепи (8), и кривой, соответствующей зависимости  $a$  от  $b$  по уравнению теплового баланса (9). Качественно ситуация, соответствующая указанному пересечению, показана на рис. 2. При этом, в силу нелинейности зависимости  $a$  от  $b$  по уравнениям (8) и (9), совместное решение этих уравнений аналитически не представляется возможным. Поэтому уравнение магнитной цепи и теплового баланса относительно  $a$  и  $b$  решались численно.

Числовое решение уравнений (8) и (9) может быть найдено следующим образом: для некоторых двух значений  $b$ , заведомо охватывающих искомое решение по  $b$ , из выражения (8) методом итераций определяются соответствующие значения  $a$ ; затем, после проверки этих значений  $a$  на удовлетворение уравнению (9), необходимо перезадать  $b$  по методу половинного деления [7, 8], выполняя расчет до тех пор, пока не найдутся такие числовые значения  $a$  и  $b$ , которые одновременно удовлетворят уравнениям (8) и (9). Заметим, что, поскольку использование метода половинного деления не зависит от конкретного вида функции в решаемом уравнении (функция должна быть лишь непрерывной, а это условие заведомо выполняется в данном случае) [7, 8], то именно метод половинного деления и был положен в основу поиска  $b$  – корня уравнений (8) и (9).

Окончательно, численное решение уравнений магнитной цепи и теплового баланса предлагается проводить по следующему алгоритму [6]:

- для заданных значений  $Z$  и  $\delta$  и некоторого начального значения  $b = b_0$  методом итераций найти  $a = a_0$ , удовлетворяющее уравнению магнитной цепи (8);
- для  $a_0$  и  $b_0$  определить разность  $P_{\text{лн}}$  левой и правой частей уравнения теплового баланса (9);
- задавшись новым значением  $b = b_0 + \Delta b$  методом итераций из выражения (8) найти соответствующее значение  $a$ ;
- соответственно новым значениям  $a$  и  $b$  из формулы (9) определить новое значение разности  $P_{\text{лн}}$ , для которой сопоставить ее знак и знак разности  $P_{\text{лн}}$ , посчитанной перед этим (знак разности  $P_{\text{лн}}$  соответствует относительному положению кривых) (рис. 2);

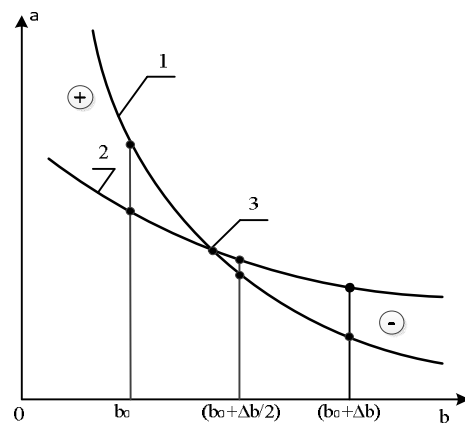


Рисунок 2 – К разработке алгоритма синтеза электромагнитной системы шкивного сепаратора: 1 – зависимость, соответствующая уравнению магнитной цепи шкива; 2 – зависимость, соответствующая уравнению теплового баланса шкива; 3 – точка решения задачи синтеза электромагнитной системы шкива

– повторить расчет согласно методу половинного деления для нового значения  $b = (b_0 + b^*)/2$ , учитывая его положение слева или справа от корня (упоминавшегося уже пересечения кривых на рис. 2) в зависимости от установленного соотношения знаков  $P_{лн}$ ;

– вычислительный процесс продолжать до достижения разностью  $P_{лн}$  заданного приближения к нулю, что при удовлетворении текущими численными значениями  $a$  и  $b$  уравнению (8) будет означать и удовлетворение этими же значениями уравнению (9).

С учетом доказанной сходимости метода итераций для формулы (8), поиск значения  $a$ , соответствующего некоторому  $b$  в рассматриваемом алгоритме, может быть начат с произвольного значения из диапазона  $0 < a < (0,5D - d)$ . При этом, с целью заведомого охвата всего возможного диапазона из-

менения параметра  $b$ , его начальное значение  $b_0$  должно быть задано минимально возможным (с учетом геометрии шкива):  $b_0 = \delta$ , а начальный шаг  $\Delta b$  (также с учетом геометрии шкива) должен соответствовать условию

$$(b_0 + \Delta b) < Z - 2b_1. \quad (10)$$

На рис. 3 представлена схема описанного алгоритма численного решения уравнения магнитной цепи и теплового баланса, составляющего основу решения задачи синтеза электромагнитной системы шкивного сепаратора рассматриваемой конструкции. Эта блок-схема включает в себя определение разности магнитных потенциалов между полюсами шкива по известным значениям  $(H_0 \text{grad} H_0)_{нм}$ ,  $Y_0$ ,  $D$ ,  $Z$  и  $\delta$ , а также два цикла, один из которых (итерация по  $a$ ) вложен в другой (в цикл половинного деления по размеру  $b$ ).

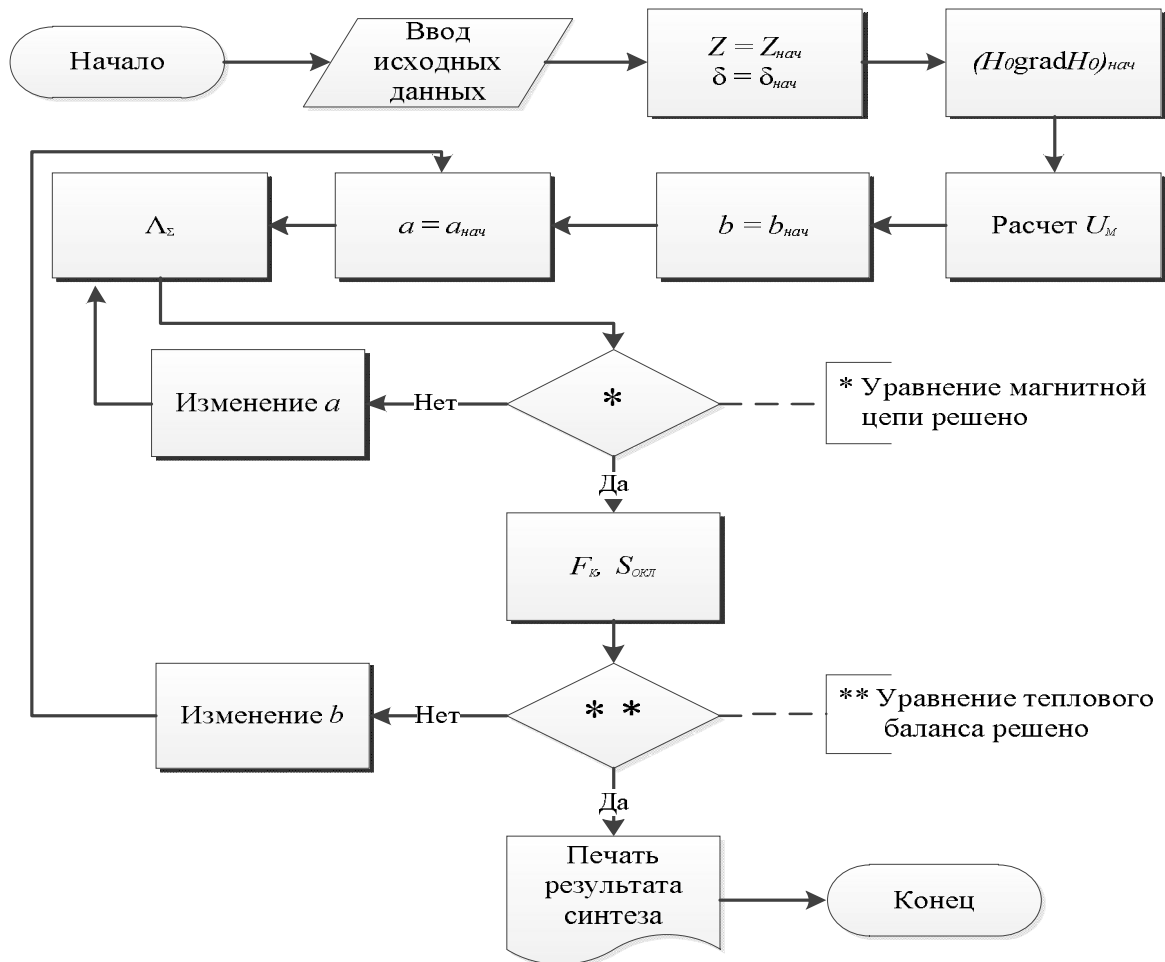


Рисунок 3 – Алгоритм решения задачи синтеза электромагнитных шкивов

**ВЫВОДЫ.** Дополнение алгоритма решения уравнений магнитной цепи и теплового баланса расчетом электрических параметров намагничивающей обмотки (его методика описана в [2]) и представляет в целом алгоритм решения задачи синтеза электро-

магнитных шкивов рассматриваемой конструкции. Он может быть положен в основу методики проектирования соответствующих шкивов с рациональными параметрами.

## ЛИТЕРАТУРА

1. 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. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. – 2015. Вип. 2/(91). С. 35–42.
2. Проектирование электромагнитных систем шкивных сепараторов. Часть 2. Решение уравнения теплового баланса / М. В. Загирняк, В. М. Усатюк, А. П. Оксанич, В. П. Ляшенко, И. А. Луценко, В. В. Загорулько. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2015. Вип. 3/(92). С. 9–14.
3. Магнитные сепараторы. Проблемы проектиро-

- вания : монография / М. В. Загирняк, Ю. А. Бранспиз, И. А. Шведчикова. К.: Техника, 2011. 223 с.
4. Structural-Systematic Approach in Magnetic Separators Design / V. F. Shinkarenko, M. V. Zagirnyak, I. A. Shvedchikova. *Studies in Computational Intelligence*. 2011. P. 201–217.
  5. Загирняк М. В. Исследование, расчет и усовершенствование шкивных магнитных сепараторов : Монография. К.: ИСМО, 1996. 488 с.
  6. Загирняк М. В., Бранспиз Ю. А. Шкивные магнитные сепараторы. К.: Техника, 2000. 303 с.
  7. Шуп Т. Решение инженерных задач на ЭВМ. М.: Мир, 1982. 238 с.
  8. Тихонов А. Н., Костомаров Д. П. Вводные лекции по прикладной математике. М.: Наука, 1984. 192 с.

**DESIGNING OF ELECTROMAGNETIC SYSTEMS FOR PULLEY SEPARATORS.  
PART 3. ALGORITHM OF SYNTHESIS OF ELECTROMAGNETIC SYSTEM  
OF PULLEY SEPARATOR**

**M. Zagirnyak, A. Oksanich, V. Lyashenko, I. Lutsenko**

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University

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

**Purpose.** The problem of synthesis of an electromagnetic system of a pulley separator is formulated, as the problem of determining such sizes of poles and magnetizing winding, which ensure creation by the designed device at a given depth of extraction of the necessary parameter of the extracting force. **Methodology.** As a result, of analysis of the construction of a typical electromagnetic pulley, the choice of initial dimensions for design is justified. A technique for solving the synthesis problem of the devices under consideration is proposed. **Results.** An algorithm for solving the problem of synthesis of electromagnetic pulley separators of the classical design is developed. **Originality.** It is a joint solution of the magnetic circuit and heat balance equations. This solution is supplemented by calculating the electrical parameters of the magnetizing coil. **Practical value.** A scheme of the described algorithm is presented, which forms the basis for solving the problem of synthesis of the electromagnetic system of a pulley separator of the structure under consideration.

**Key words:** algorithm, pulley separator, heat balance equation and magnetic circuit.

## REFERENCES

1. Zagirnyak, M. V., Usatyuk, V. M., Oksanich, A. P., Lyashenko, V. P., Nikitina, A. V. (2015), "Design of electromagnetic pulley separators. Part 1. Problem statement. The solution of the magnetic circuit equation", *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University*, iss. 2(91), pp. 35–42.
2. Zagirnyak, M. V., Usatyuk, V. M., Oksanich, A. P., Lyashenko, V. P., Lucenko, I. A., Zagorulko, V. V. (2015), "Design of electromagnetic pulley separators. Part 2. Solution of the heat balance equation", *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University*, iss. 3(92), pp. 9–14.
3. Zagirnyak, M. V., Branspiz, Yu. A., Shvedchikova, I. A. (2011), *Magnitnyie separatoryi. Problemyi proektirovaniya: monografiya* [Magnetic separators. Problems of designing: monograph], Tehnika, Kiev, Ukraina.
4. Shinkarenko, V. F., Zagirnyak, M. V., Shvedchikova, I. A. (2011), "Structural-Systematic Approach in Magnetic Separators", *Design Studies in Computational Intelligence*, pp. 201–217.

5. Zagirnyak, M. V. (1996), *Issledovanie, raschet i usovershenstvovanie shkivnyih magnitnyih separatorov: Monografiya* [Research, calculation and improvement of pulley magnetic separators: monograph], ISMO, Kiev, Ukraina.
6. Zagirnyak, M. V., Branspiz, Yu. A. (2000), *Shkivnyie magnitnyie separatoryi* [Pulley magnetic separators], Tehnika, Kiev, Ukraina.
7. Shup, T. (1982), *Resheniye inzhenernykh zadach na EVM* [Solution of engineering problems on a computer], Mir, Moskva, Russia.
8. Tikhonov, A. N., Kostomarov, D. P. (1984), *Vvodnye leksii po prikladnoy matematike* [Introductory Lectures on Applied Mathematics], Nauka, Moscow, Russia.

Стаття надійшла 30.04.2018.