

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИСТЕМ ШКИВНЫХ СЕПАРАТОРОВ ЧАСТЬ 2. РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЯ ТЕПЛООВОГО БАЛАНСА

М. В. Загирняк, В. М. Усатюк, А. П. Оксанич, В. П. Ляшенко, І. А. Луценко, В. В. Загорулько

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

Рассматривается проектирование электромагнитных систем шкивных сепараторов. Ввиду того, что различные части электромагнитной системы шкивного сепаратора обладают неодинаковыми теплопроводностью и теплоотводящей способностью, а также с учетом того, что процесс нагрева является переходным процессом, температура является сложной функцией пространственных координат точек внутри объема, занимаемого шкивом, а также функцией времени. Поэтому в основу рассматриваемого подхода положено определение среднего перегрева намагничивающей обмотки для установившегося режима нагрева электромагнитного шкива. На базе анализа обеих частей сформулированного уравнения теплового баланса определены функциональные зависимости выделяющейся и отводимой мощностей от геометрических, электрических и других параметров. При этом на основе обобщения данных тепловых испытаний промышленных электромагнитных шкивов различных типоразмеров и климатических исполнений получены аппроксимирующие аналитические выражения для расчета удельной мощности рассеивания обмоток этих аппаратов. Найденное уравнение теплового баланса преобразовано к виду, удобному для определения одного из геометрических параметров проектируемого электромагнитного шкива.

Ключевые слова: теплопроводность, теплоотводящая способность, переходный процесс нагрева, перегрев, удельная мощность рассеивания, климатическое исполнение, тепловые испытания.

ПРОЕКТУВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ СИСТЕМ ШКІВНИХ СЕПАРАТОРІВ ЧАСТИНА 2. РОЗВ'ЯЗОК РІВНЯННЯ ТЕПЛООВОГО БАЛАНСУ

М. В. Загірняк, В. М. Усатюк, А. П. Оксанич, В. П. Ляшенко, І. А. Луценко, В. В. Загорулько

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

Розглядається проектування електромагнітних систем шківних сепараторів. З огляду на те, що різні частини електромагнітної системи шківних сепараторів мають неоднакові теплопровідність і тепловідводну здатність, а також з урахуванням того, що процес нагріву є перехідним процесом, температура є складною функцією просторових координат точок усередині об'єму, займаного шківом, а також функцією часу. Тому в основу підходу, який розглядається, покладено визначення середнього перегріву намагничувальної обмотки для сталого режиму нагріву електромагнітного шкива. На базі аналізу обох частин сформульованого рівняння теплового балансу визначено функціональні залежності для потужностей, що виділяються та відводяться, від геометричних, електричних та інших параметрів. При цьому на основі узагальнення даних теплових випробувань промислових електромагнітних шківів різних типорозмірів і кліматичних виконань отримані апроксимуючі аналітичні вирази для розрахунку питомої потужності розсіювання обмоток цих апаратів. Знайдене рівняння теплового балансу перетворено до вигляду, зручного для визначення одного з геометричних параметрів проектованого електромагнітного шкива.

Ключові слова: теплопровідність, тепловідводна здатність, перехідний процес нагріву, перегрів, питома потужність розсіювання, кліматичне виконання, теплові випробування.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. В продолжение исследований [1], где была сформулирована общая задача по проектированию электромагнитных шкивных сепараторов, получено и обосновано уравнение магнитной цепи, целью данной работы является определение среднего перегрева намагничивающей обмотки для установившегося режима нагрева электромагнитного шкива на основе уравнения теплового баланса для определения функциональных зависимостей выделяющейся и отводимой мощностей от геометрических, электрических и других параметров.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.

Уравнение теплового баланса. Формулировка уравнения. Для обеспечения нормальной работоспособности электромагнитного шкива основное условие, которое должно быть принято в качестве исходного при рассмотрении тепловых процессов, заключается в отсутствии перегрева намагничивающей обмотки сверх температуры, допускаемой классом изоляции и исполнением шкива как электротехнического устройства.

В процессе выделения в намагничивающей обмотке джоулева тепла ее нагрев и шкива в целом происходит неравномерно, т.к. различные части электромагнитной системы шкивного сепаратора обладают неодинаковой теплопроводностью и неодинаковой теплоотводящей способностью. Различие в теплопроводящей и теплоотводящей способности определяет пространственную неравномерность распределения температуры в конструктивных элементах шкива. Следовательно, это различие обуславливает наличие неравномерного температурного поля в нем (температура является сложной функцией пространственных координат точек внутри объема, занимаемого шкивом). Кроме того, при подключении электромагнитного шкива к источнику энергии постоянного тока имеет место переходный процесс нагрева, определяющий зависимость температуры в различных частях шкива от времени. Таким образом, после включения намагничивающей обмотки на постоянное напряжение температурное поле является еще и функцией времени.

Примем за основу исследования тепловых процессов в электромагнитных шкивных сепараторах, сформулированное выше условие. Далее будем исходить из определения среднего перегрева намагничивающей обмотки в установившемся тепловом режиме, когда переходный процесс нагрева заканчивается, и во всех ее точках температура принимает некоторое установившееся значение, являющееся максимально возможным для конкретных условий теплоотвода работающего электромагнитного шкива. Такой подход значительно упрощает задачу теплового расчета электромагнитного шкива, поскольку определение средней температуры (или перегрева) намагничивающей обмотки может быть проведено без решения сложной задачи о распределении температурного поля внутри нее.

Таким образом, всю совокупность тепловых процессов в электромагнитных шкивах можно упрощенно рассматривать как некоторый установившийся тепловой процесс, соответствующий продолжительному режиму работы электромагнитных шкивов как магнитосепарирующих устройств (именно продолжительный режим работы устанавливается по ГОСТ 30577–98 для электромагнитных шкивов). При этом, поскольку в установившемся тепловом режиме количество джоулевой теплоты $Q_{вйд}$, выделяющегося в намагничивающей обмотке под действием электрического тока, равняется количеству тепла $Q_{омв}$, отведенному от шкива за счет теплоотдачи в окружающую среду, то тепловой расчет электромагнитного шкива в рассматриваемом случае сводится к установлению зависимости от параметров шкива левой и правой части равенства

$$Q_{вйд} = Q_{омв}, \quad (1)$$

которое представляет собой уравнение теплового баланса для установившегося режима нагрева электромагнитного шкива.

Если рассматривать количество выделенного и отведенного тепла при нагреве электромагнитного шкива в единицу времени, что допустимо, т.к. это количество тепла в установившемся режиме нагрева не изменяется, то для решения уравнения (1) его удобно записать в виде

$$P_{вйд} = P_{омв}, \quad (2)$$

где $P_{вйд}$ – тепловая мощность, выделяющаяся в намагничивающей обмотке электромагнитного шкива при протекании по ней тока (мощность джоулевых потерь); $P_{омв}$ – тепловая мощность, отводимая от намагничивающей обмотки шкива путем теплоотвода в окружающую среду.

С целью определения функциональной зависимости $P_{вйд}$ и $P_{омв}$ от геометрических, электрических и других параметров двухполюсного электромагнитного шкива рассматриваемой конструкции проведем анализ каждой из частей уравнения (2) отдельно.

Выделяющаяся мощность. Для левой части уравнения (2) запишем известное выражение электрической мощности джоулевых потерь

$$P_{вйд} = I^2 R_{обм} \quad (3)$$

где I – постоянный электрический ток, протекающий по намагничивающей обмотке; $R_{обм}$ – активное (омическое) сопротивление обмотки.

Поскольку намагничивающая обмотка в электромагнитном шкиве рассматриваемой конструкции выполняется из двух катушек (рис. 1 [1]), соединенных последовательно и так, что их магнитные потоки складываются, создавая единый магнитный поток через магнитопровод шкива, то сопротивление $R_{обм}$ можно рассчитать как

$$R_{обм} = 2R_k, \quad (4)$$

где R_k – активное (омическое) сопротивление одной катушки в обмотке намагничивания электромагнитного шкива, определяемое соотношением

$$R_k = \rho_g L_k / S_{np}. \quad (5)$$

Здесь ρ_g – удельное электрическое сопротивление материала провода намагничивающей обмотки при температуре нагрева ее в установившемся тепловом режиме; L_k – длина провода катушки; S_{np} – площадь сечения проводника катушки, равная площади сечения провода без изоляции.

Выразим S_{np} и L_k через размеры катушки a_k и b_k (рис. 1 [1]), что позволит преобразовать выражение (3).

Для этого введем в рассмотрение коэффициент заполнения $k_{зан}$, равный отношению площади обмоточного окна катушки ($a_k \times b_k$) к площади сечения всего проводникового материала этой же катушки wS_{np} , (w – число витков катушки); среднюю длину витка в катушке l_{cp} , равную (по определению среднего) отношению длины провода катушки к числу витков провода в ней.

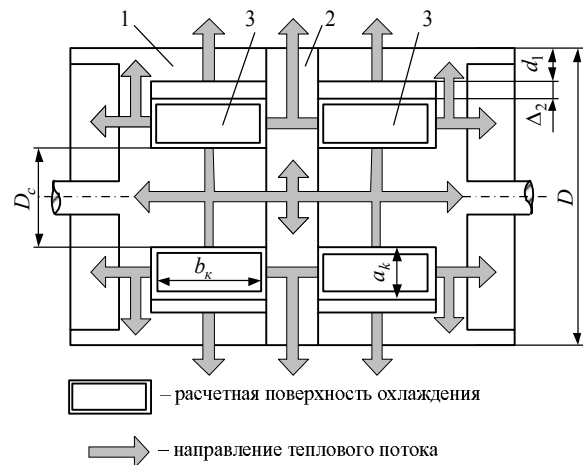


Рисунок 1 – Схема распределения тепловых потоков электромагнитного шкива: 1 – железо магнитопровода; 2 – алюминиевый «тепловой полюс»; 3 – катушка

В результате можно записать следующие равенства:

$$S_{np} = a_k b_k / (w k_{zan}), \quad (6)$$

$$L_k = w l_{cp}, \quad (7)$$

подстановка которых в формулу (5) дает

$$R_k = \rho_g k_{zan} w^2 l_{cp} / (a_k b_k). \quad (8)$$

Таким образом, после соответствующих преобразований имеем

$$P_{вгд} = 2(Iw)^2 \rho_g k_{zan} l_{cp} / (a_k b_k), \quad (9)$$

где (Iw) – МДС одной катушки обмотки намагничивания шкива.

Мощность теплоотвода. При нагреве электромагнитного шкива $P_{омс}$ определяется правой частью уравнения (2). В общем случае этот теплоотвод представляет собой совокупное действие трех видов теплообмена – конвекции, излучения, теплопроводности. Причем, точный учет вклада каждого из этих видов теплообмена в суммарный тепловой поток, отводимый от нагретшегося электромагнитного шкива, является весьма сложной задачей. Поэтому, аналогично тому, как это делается при тепловых расчетах других электромагнитных устройств, для нагретого электромагнитного шкива мощность теплоотвода $P_{омс}$ определялась на основе известной формулы Ньютона

$$P_{омс} = 2k_T S_{охл} (\vartheta_y - \vartheta_0), \quad (10)$$

где k_T – коэффициент теплоотдачи, являющийся в общем случае функцией многих факторов, влияющих на теплообмен между нагретым электромагнитным шкивом и окружающей средой; $S_{охл}$ – расчетная площадь охлаждения одной катушки; ϑ_y – установившаяся (средняя) температура намагничивающей обмотки; ϑ_0 – температура окружающей среды.

Массогабаритные параметры намагничивающих обмоток электромагнитных шкивов существенно превосходят соответствующие параметры электромагнитных катушек обычных аппаратов электроавтоматики, поэтому при расчете $P_{омс}$ по формуле (10) в данном случае нельзя непосредственно использовать те методы и рекомендации, которые получены и разработаны для определения k_T катушек традиционных электрических аппаратов [2–5]. Это обстоятельство предопределило то, что для тепловых расчетов различных электромагнитных сепарирующих устройств используются полуэмпирические методы, основанные на обобщении данных тепловых испытаний промышленных образцов [6, 7]. В целом, такой подход согласуется с принятым в практике электроаппаратостроения эмпирическим определением коэффициента k_T для конкретной конструкции электрического аппарата и определенных условий теплоотдачи в нем [5]. Различие за-

ключается лишь в том, что при тепловых расчетах электромагнитных сепарирующих устройств используют не непосредственно коэффициент теплоотдачи k_T , а вводят в рассмотрение удельную (на единицу площади охлаждения) мощность теплоотвода P_{yd} , применение которой позволяет записать формулу (10) в более компактном виде

$$P_{омс} = P_{yd} 2S_{охл}. \quad (11)$$

Сравнивая выражения (10) и (11), видно, что коэффициент k_T и удельная мощность P_{yd} связаны между собой соотношением

$$P_{yd} = k_T (\vartheta_y - \vartheta_0). \quad (12)$$

Это соотношение показывает, что, даже если коэффициент k_T не будет зависеть от температуры нагрева, а будет определяться лишь размерами электромагнитной катушки и конкретными условиями ее охлаждения, то от температуры нагрева катушки будет зависеть P_{yd} . Поэтому представляется не обоснованным принятие для P_{yd} некоторого постоянного значения, как это рекомендуется делать в работе [6] при проведении численных расчетов по формуле (11) для электромагнитных сепарирующих устройств.

Из соотношения (12) следует и то, что P_{yd} с точностью до сомножителя $(\vartheta_y - \vartheta_0)$ так же, как и k_T , функционально зависит от различных факторов, определяющих процесс теплоотвода от нагретой обмотки электромагнита. С учетом того, что коэффициент k_T , кроме прочих факторов, существенно зависит и от геометрических размеров намагничивающей обмотки электромагнита [5, 7] можно определить зависимость P_{yd} от определяющих геометрических размеров обмотки при нагреве в установившемся тепловом режиме.

Поскольку тепловой расчет обмоток аналитически затруднен, указанная задача решалась на основе анализа данных тепловых испытаний промышленных образцов электромагнитных шкивных сепараторов различных типоразмеров и климатических исполнений [8, 9]. Этот эмпирический подход связан с необходимостью определения наиболее характерных геометрических параметров обмотки намагничивания, функциональная зависимость от которых и ищется затем при обработке результатов соответствующих тепловых испытаний. В данном случае, согласно традиционной инженерной практике тепловых расчетов намагничивающих обмоток электромагнитных сепараторов [6, 7], рассматриваем лишь один характерный геометрический параметр, который достаточно полно отражает теплоотводящую способность обмотки соответствующего электромагнита. В качестве такого параметра принимаем площадь охлаждения $S_{охл}$ намагничивающей катушки рассматриваемого электромагнитного шкива.

Для определения численного значения $S_{охл}$ уч-

тем, что активными поверхностями, через которые происходит теплоотвод катушек обмотки намагничивания, являются следующие поверхности катушки (рис. 1): торцевая, прилегающая к алюминиевому «тепловому полюсу»; торцевая, прилегающая к торцевой шайбе (щека катушки) из листового металла; наружная цилиндрическая, покрытая слоем кварцзаливочной массы с высокой теплопроводностью; внутренняя цилиндрическая, прилегающая к поверхности сердечника магнитопровода. Соответствующая формула для вычисления $S_{охл}$ легко получается из очевидных геометрических соотношений для поверхностей теплоотвода ((рис. 1 [1] и (1)) с наружным диаметром $D_n = (D - 2d_1 - 2\Delta_2)$, внутренним диаметром $D_g = (D - 2d_1 - 2\Delta_2 - 2a_k)$, длиной цилиндрических поверхностей b_k . В результате можно записать

$$S_{охл} = \frac{\pi}{2}(D_n^2 - D_g^2) + \pi D_n b_k + \pi D_g b_k,$$

после преобразований –

$$S_{охл} = 2\pi(a_k + b_k)(D - 2d_1 - 2\Delta_2 - a_k). \quad (13)$$

Если в каждом конкретном случае тепловых испытаний некоторого электромагнитного шкива найти P_{yd} согласно формуле (11) как отношение электрической мощности обмотки намагничивания в установленном тепловом режиме (она же – и мощность теплоотвода) к удвоенной площади $S_{охл}$ по формуле (13), то, обработав соответствующим образом полученные результаты, можно установить искомую функциональную зависимость P_{yd} от $S_{охл}$.

Отметим, что при нахождении функциональной зависимости P_{yd} и $S_{охл}$ учитывалось следующее: соответственно двум классам нагревостойкости электрической изоляции F и H которые, согласно ГОСТ 30577–98, допустимо применять в электромагнитных шкивах, возможно два исполнения шкива одного и того же типоразмера. Согласно этому, машиностроительные предприятия Украины изготавливает электромагнитные шкивы в двух климатических исполнениях: $У$, категории размещения 3, с изоляцией класса нагревостойкости F и T , категории размещения 3, с изоляцией класса нагревостойкости H . Причем, в соответствии с ГОСТ 30577–98 температура катушек намагничивающей обмотки электромагнитных шкивов не должна превышать 130°C при классе изоляции F и 155°C при классе изоляции H .

В зависимости от климатического исполнения соответствующим образом группировались данные заводских тепловых испытаний электромагнитных шкивов, что привело к получению двух эмпирических формул:

для исполнения $У$

$$P_{yd} = 1195,3 S_{охл}^{-0,1413}, \quad (14)$$

для исполнения T

$$P_{yd} = 1303,6 S_{охл}^{-0,2671}. \quad (15)$$

Отметим, что применение формул (14) и (15) при проектировании новых шкивов строго обусловлено соответствием превышения температуры нагрева намагничивающей обмотки, принятого для проектируемого шкива, перегреву, который имел место при проведении соответствующих тепловых испытаний. В самом деле, лишь только при таком соответствии для катушек различных размеров, но с идентичными условиями теплоотвода, удельные тепловые мощности, отводимые от них при нагреве, будут равны между собой, что и позволяет использовать P_{yd} как параметр, характеризующий теплоотводящий процесс проектируемой обмотки.

В рассматриваемом случае указанное соответствие имеет место лишь для электромагнитных шкивов климатического исполнения $У$, для которых средний перегрев обмотки намагничивания при соответствующих тепловых испытаниях равнялся максимально допустимому перегреву 90°C (согласно ГОСТ 15150–69 в качестве расчетной температуры окружающей среды для технических изделий климатического исполнения $У$ следует принимать 40°C , что с учетом максимальной температуры обмотки электромагнитных шкивов согласно ГОСТ 30577–98 и дает приведенное значение для перегрева электромагнитных шкивов климатического исполнения $У$). Тепловые испытания электромагнитных шкивов климатического исполнения T показали, что перегрев их намагничивающих обмоток меньше в среднем на 20°C максимально допустимого для них перегрева 110°C (последнее число легко получить как разность расчетной температуры окружающей среды, принимаемой для технических изделий климатического исполнения T по ГОСТ 15150–69, равной 45°C , и максимально допустимой для электромагнитных шкивов рассматриваемого климатического исполнения по ГОСТ 30577–98 температуры нагрева обмотки намагничивания 155°C).

Изложенное означает, что выражение (14) может быть непосредственно применено при тепловых расчетах электромагнитных шкивов с классом изоляции F и перегревом намагничивающих обмоток в 90°C . Практическое же применение эмпирической формулы (15) требует определенной коррекции, которую можно осуществить, если принять во внимание, что в общем случае возрастание перегрева намагничивающей обмотки обуславливает и возрастание P_{yd} . Последнее обеспечивает достижение обмоткой намагничивания установившегося теплового режима, соответствующего возросшему перегреву (иначе возрастание перегрева, вызванное ростом количества тепла, выделяющегося в обмотке, при неизменной $S_{охл}$ будет непрерывным). Таким образом, для осуществления указанной коррекции можно воспользоваться тем, что P_{yd} является некоторой возрастающей функцией перегрева. Тогда, аппроксимируя в первом приближении эту возрастающую функ-

цию некоторой линейной, удельную мощность $P_{y\delta}$, полученную по формуле (15), действительной при перегреве в 90°C , можно пересчитать на перегрев в 110°C домножением правой части уравнения (15) на коэффициент 1,22, найденный из соотношения соответствующих перегревов (110/90).

Имея выражения (14) и (15) для определения $P_{y\delta}$ по известной площади $S_{охл}$, рассчитываемой по формуле (13), из соотношения (6) легко найти мощность $P_{омв}$, входящую в правую часть уравнения (2).

Преобразование уравнения теплового баланса. Подстановка полученных выражений для $P_{выд}$ и $P_{омв}$ в уравнение (2) позволяет придать ему более удобный для практического применения вид

$$(Iw)^2 = (a_k b_k P_{y\delta} S_{охл}) / (k_{зан} \rho_{\text{эл}} l_{cp}). \quad (16)$$

С целью дальнейшего использования уравнения (16) при решении задачи синтеза электромагнитной системы шкива, запишем это уравнение так, чтобы оно стало уравнением относительно одной переменной. Для этого учтем, что средняя длина витка катушки обмотки намагничивания l_{cp} может быть определена как (рис. 1 [1])

$$l_{cp} = \pi(D_c + 2\Delta_1 + a_k) = \pi(D - 2d_1 - 2\Delta_2 - a_k). \quad (17)$$

Кроме того, будем иметь в виду, что входящая в формулу (16) МДС катушки $F_k = Iw$ равна половине МДС намагничивающей обмотки F (катушки в обмотке соединяются последовательно), которая, определяя собой разность магнитных потенциалов между полюсами шкива, связана с нею функционально некоторым образом. Причем, поскольку выше уже установлена связь между геометрическими размерами электромагнитного шкива рассматриваемой конструкции и U_m , выраженная уравнением магнитной цепи, то для придания уравнению (16) требуемого вида достаточно определить функциональную связь между F и U_m .

Однако задачу расчета магнитного поля в случае электромагнитных шкивов рассматриваемой конструкции решить аналитически весьма затруднительно. Вследствие этого аналитическое нахождение в явном виде функциональной связи между F и U_m также сложно.

Поэтому для установления искомой связи между F и U_m используем известный упрощенный подход, связанный с представлением МДС электромагнита суммой величины U_m и падения магнитного потенциала в стали магнитопровода ΔU_c , что может быть записано как

$$F = U_m + L_c H_{ст}, \quad (18)$$

где L_c – длина средней силовой линии магнитного поля по магнитопроводу шкива (сердечник, полюсные диски, полюсные наконечники); $H_{ст}$ – средняя напряженность магнитного поля в стали магнито-

провода шкива; $L_c H_{ст}$ – усредненное падение магнитного потенциала в стали магнитопровода электромагнитного шкива.

В рассматриваемой конструкции электромагнитного шкива (рис. 1 [1])

$$L_c = 1,2125 D + 0,9b + 0,1\delta - 2,5a. \quad (19)$$

Из аппроксимации кривой намагничивания литейной стали (именно из нее изготавливается магнитопровод шкива) следует [10]

$$H_{ст} = 102 B_{co} (9,95 + B_{co}^8). \quad (20)$$

После преобразования выражения (18) с использованием формул (19) и (20) и подстановки полученного вместе с формулами (17) и (13) в уравнение (16), а также с учетом соотношения между МДС одной катушки и обмотки намагничивания ($F = 2F_k$) окончательно уравнение теплового баланса (16) можно представить в виде

$$U_m + (1,2125D + 0,9b + 0,1\delta - 2,5a) \times 102 B_{co} (9,95 + B_{co}^8) = 2\sqrt{2} [P_{y\delta} a_k b_k (a_k + b_k) / (\rho_{\text{эл}} k_{зан})]^{1/2}. \quad (21)$$

Такая запись позволяет рассматривать его как еще одно уравнение, связывающее между собой геометрические и другие параметры проектируемого электромагнитного шкива. При этом, конечно, уравнение (21) может служить для определения лишь одного параметра.

Изложенная методика получения уравнения теплового баланса в силу своей общности применима к тепловому расчету и однокатушечной обмотки намагничивания, которая занимает с необходимыми технологическими зазорами (при отсутствии «теплового полюса») все внутреннее межполюсное пространство двухполюсного шкива. Причем промежуточное уравнение теплового баланса (16) действительно и для однокатушечной обмотки, в уравнении же (21) изменится лишь коэффициент в правой части – с $2\sqrt{2}$ на $\sqrt{2}$.

ВЫВОДЫ. Для обеспечения нормальной работоспособности электромагнитного сепаратора с точки зрения тепловых процессов достаточно обеспечить отсутствие перегрева намагничивающей обмотки сверх температуры, допускаемой классом изоляции и исполнением шкива как электротехнического устройства.

При проектировании намагничивающая обмотка рассматривается в установившемся тепловом режиме, когда температура принимает максимально возможное для конкретных условий теплоотвода некоторое установившееся значение.

Так как в установившемся тепловом режиме количество джоулевой теплоты, выделяющегося в намагничивающей обмотке под действием электрического тока, равняется количеству тепла, отводимому за счет теплоотдачи в окружающую среду, то тепловой расчет электромагнитного шкива в рассматриваемом случае сводится к решению уравнения теплового баланса.

В силу того, что массогабаритные параметры намагничивающих обмоток электромагнитных шкивов существенно превосходят соответствующие пара-

метры электромагнитных катушек обычных аппаратов электроавтоматики для тепловых расчетов используются полуэмпирические методы, основанные на обобщении данных тепловых испытаний промышленных образцов относительно наиболее характерных геометрических параметров обмотки намагничивания.

В результате получено уравнение, связывающее между собой геометрические и другие параметры проектируемого электромагнитного шкива, которое может быть применено для определения еще одного параметра.

ЛИТЕРАТУРА

1. Загирняк М.В., Усатюк В.М., Оксанич А.П., Ляшенко В.П., Никитина А.В. Проектирование электромагнитных систем шкивных сепараторов. Часть 1. Постановка задачи. Решение уравнения магнитной цепи. // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – 2015. – Вип. 2/2015 (91). – С. 35–42.
2. Гордон А.В., Сливинская А.Г. Электромагниты постоянного тока. – М.-Л.: ГЭИ, 1960. – 447 с.
3. Основы теории электрических аппаратов / И.С. Таев, Б.К. Буль, А.Г. Годжелло и др. – М.:

Высшая школа, 1987. – 352 с.

4. Новиков Ю.Н. Теория и расчет электрических аппаратов. – Л.: Энергия, 1970. – 327 с.
5. Витенберг М.И. Расчет электромагнитных реле. – Л.: Энергия, 1975. – 416 с.
6. Сумцов В.Ф. Электромагнитные железоотделители. – М.: Машиностроение, 1978. – 174 с.
7. Буль Б.К., Карташян В.О., Нестеренко А.П. Проектирование оптимальных электромагнитных систем подвесных железоотделителей // Электротехника. – 1981. – № 4. – С. 54–57.
8. Загирняк М.В. Анализ результатов тепловых испытаний и расчет намагничивающих катушек электромагнитных шкивов // Изв. вузов. Электромеханика. – 1991. – № 3. – С. 105–109.
9. Загирняк М.В., Усатюк В.М. Анализ результатов тепловых испытаний и расчет намагничивающих катушек электромагнитных сепараторов // Электротехника. – 1994. – № 1. – С. 54–58.
10. Карташян В.О., Загирняк М.В., Калмыков А.Н. Расчет магнитных систем электромагнитных шкивов с ферромагнитными шунтами // Изв. вузов. Электромеханика. – 1981. – № 6. – С. 668–673.

THE DESIGNING OF ELECTROMAGNET SYSTEMS OF PULLEY SEPARATORS. PART 2. THE SOLUTION OF THERMAL BALANCE EQUATIONS

M. Zagirnyak, V. Usatyuk, A. Oksanych, V. Lyashenko, I. Lutsenko, V. Zahorulko

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

In the paper it is considered the designing of electromagnet systems for pulley separators. As different parts of electromagnet system of pulley separators are thermally nonuniform and their heat-sink cooling differs, and also taking into account that heating process is transient, the temperature is a complicated function of the spatial coordinates of the spots inside the pulley volume, and also it is a time function. Thus, as a base of considered approach it was taken determination of mean overheating of magnetizing winding at steady state of electromagnet pulley heating. On the base of the analysis of both sides of derived thermal balance equation it was determined functional dependencies for released and output power on the geometrics, electrical and other parameters. Along with this on the base of general data of heating tests for industrial electromagnet pulleys of different dimensions types and climatic constructions it were derived approximating analytical expressions for calculation the dissipation power density of the windings of these apparatuses. Derived thermal balance was transformed to representation suitable for determination one of geometrical parameters of designed electromagnetic pulley.

Key words: heat conduction, heat sink capacity, heating transient, overheating, dissipation power density, climatic construction, heating tests.

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. Gordon, A.V., Slivinskaya, A.G. (1960), *Elektromagnitny postoyannogo toka* [Electromagnets DC], GEI, Moscow–Leningrad, USSR.
3. Taev, I.S., Bul', B.K., Godzhello, A.G. et all. (1987), *Osnovy teorii elektricheskikh apparatov* [Fundamentals of the theory of electrical machines], Vysshaya shkola, Moscow, USSR.
4. Novikov, Yu.N. (1970), *Teoriya i raschet elektricheskikh apparatov* [Theory and Design of electrical apparatus], Energiya, Leningrad, USSR.
5. Vitenberg, M.I. (1975), *Raschet elektromagnitnykh rele* [Calculation of electromagnetic relays], Energiya, Leningrad, USSR.

6. Sumtsov, V.F. (1978), *Elektromagnitnye zhelezoottdeliteli* [Electromagnetic iron separators], Mashinostroenie, Moskva, USSR.

7. Bul', B.K., Kartashyan, V.O., Nesterenko, A.P., (1981), "Designing optimal electromagnetic systems suspended separators", *Electrical engineering*, no. 4, pp. 54–57.

8. Zagirnyak, M.V. (1991), "Analysis of the thermal test and calculation of magnetizing coils electromagnetic pulleys", *Russian Electromechanics*, no. 3, pp. 105–109.

9. Zagirnyak, M.V., Usatyuk, V.M. (1994), "Analysis of the thermal test and calculation of magnetizing coils of electromagnetic separators", *Electrical engineering*, no. 1, pp. 54–58.

10. Kartashyan, V.O., Zagirnyak, M.V., Kalmykov, A.N. (1981), "Calculation of magnetic systems with electromagnetic pulleys ferromagnetic shunts", *Russian Electromechanics*, no. 6, pp. 668–673.

Стаття надійшла 29.06.2015.