

УДК 621.313.8

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ СИСТЕМЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ НА ПОСТОЯННЫХ МАГНИТАХ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОЛЫМ РОТОРОМ

И.П.Кондратенко, докт.техн.наук, **А.П.Ращепкин**, докт.техн.наук, **Т.В.Виштак**, **А.Н.Карлов**
Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина.
e-mail: dep7ied@ukr.net

Для машин непрерывного литья заготовок предложен электромагнитный перемешиватель в виде синхронного двигателя с полым ротором. Вращающееся магнитное поле в жидком металле возбуждается магнитной системой ротора на постоянных магнитах совместно с токами обмотки статора. Показана необходимость отдельного определения полей системы возбуждения и токов обмотки статора. Для произвольной скорости вращения жидкого металла выведены граничные условия для магнитного потенциала на поверхности заготовки и найдено распределение магнитного поля в полости перемешивателя, создаваемого постоянными магнитами ротора. Библ. 7, рис. 1.

Ключевые слова: перемешиватель, постоянные магниты, непрерывное литье, кристаллизатор.

Перемешивание жидкого металла в кристаллизаторах машин непрерывного литья заготовок способствует повышению их производительности и улучшению качества отливок. Поэтому в мировой практике, несмотря на дополнительные энергозатраты, все более широкое применение находит электромагнитное перемешивание жидкого металла в кристаллизаторах, позволяющее бесконтактным способом воздействовать на жидкий металл. Обычно для этих целей используется статор двухфазного [1] либо трехфазного [6] асинхронного двигателя, возбуждающего в области жидкого металла вращающееся магнитное поле. Его силовое взаимодействие с индуцированными им токами в жидком металле приводит к вращательному движению металла и, в результате, его интенсивному перемешиванию, что способствует повышению теплообменных процессов и улучшению структуры металла.

Вследствие большого воздушного зазора, практически равного диаметру расточки статора, для возбуждения магнитной индукции в области жидкого металла на экспериментально установленном уровне 0,067 Тл особенно при внешнем расположении перемешивателя относительно корпуса кристаллизатора требуется значительная токовая нагрузка статора. Это приводит к тому, что даже при обычно используемой частоте тока в обмотке порядка 5 Гц мощность питания перемешивателя от преобразователя частоты достигает с учетом пазового и лобового рассеяния величины 60 кВА. При этом потребляемая перемешивателем активная мощность не превышает 10 кВт, причем активная составляющая электромагнитной мощности составляет 5 кВт и потери в обмотке достигают 5 кВт. Поэтому представляется обоснованным возбуждать в полости кристаллизатора требуемое магнитное поле магнитной системой на постоянных магнитах [7], вращение которой с заданной частотой обеспечивается с помощью, например, клиноременной или зубчатой передачи внешним двигателем мощностью 10 кВт. Известно также совмещенное, блочное исполнение такой магнитной системы с асинхронным приводом [5], в котором массивное ферромагнитное ярмо магнитной системы с медным покрытием является ротором асинхронного двигателя. Достоинством такой системы является возможность на диаметре расточки статора, приблизительно равном 0,5 м, выполнить многополюсный двигатель и практически питать его от трехфазной промышленной сети без использования преобразователя частоты. Недостатком такого исполнения является необходимость применения специальных мер охлаждения постоянных магнитов от тепловыделений в роторе индуцированными в ярме токами, поскольку при превышении определенной температуры они теряют намагниченность.

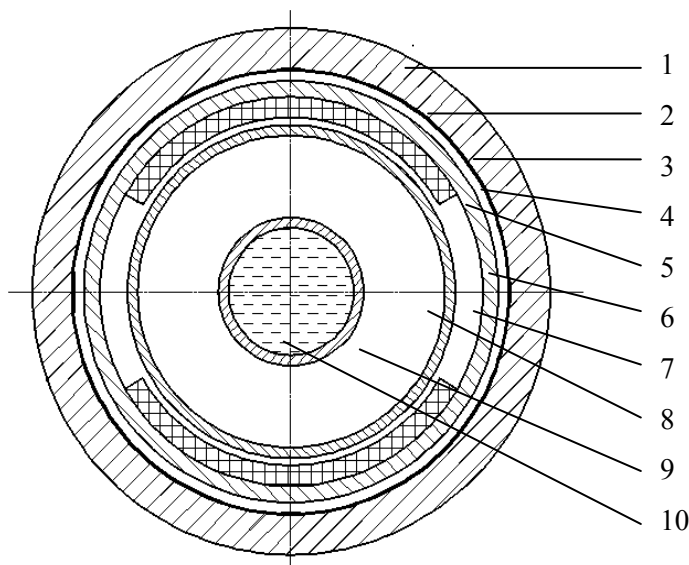
Если же ярмо 2р-полюсной магнитной системы на постоянных магнитах выполнить из неферромагнитной стали и разместить ее внутри статора с обмоткой такой же полюсности, то магнитный поток постоянных магнитов будет замыкаться по железу статора. Его было бы целесообразно ис-

пользовать для привода магнитной системы. Такое конструктивное исполнение представляет собой синхронный двигатель с полым ротором, внутри которого размещается кристаллизатор. При этом отпадает необходимость охлаждения ротора, так как в нем отсутствуют тепловыделения. В таком исполнении перемешивателя вращающееся магнитное поле в области кристаллизатора возбуждается суммарным действием постоянных магнитов и токов обмотки статора. Кроме основной волны магнитного поля магнитной системой и токами обмотки статора возбуждается широкий спектр высших пространственных гармоник, которые вызывают в электропроводных элементах кристаллизатора дополнительные потери от вихревых токов, приводя к увеличению потребляемой мощности от источника питания. Для количественного определения этих потерь необходимо учитывать влияние всех пространственных гармоник. Возбуждаемые трехфазной обмоткой высшие гармоники поля [3] порядка $\nu = 6k - 1$ движутся против направления вращения основной гармоники, а гармоники $\nu = 6k + 1$ движутся по направлению движения основной волны, в то время как все высшие гармоники, возбуждаемые магнитной системой с постоянными магнитами, имеют однонаправленное движение. Поэтому для определения результирующего поля в кристаллизаторе необходимо сначала отдельно определить структуру и гармонический состав магнитного поля, возбуждаемого токами обмотки статора и постоянными магнитами ротора.

Цель работы. Разработать метод расчета распределения магнитного поля в конструктивных элементах кристаллизатора непрерывного литья заготовок, создаваемого системой возбуждения на постоянных магнитах синхронного электромагнитного перемешивателя.

Модельное представление кристаллизатора с наружным расположением перемешивателя, выполненного в виде двухполюсного синхронного двигателя с полым ротором, показано на рисунке. Здесь 1 – шихтованный статор синхронного двигателя с радиусом расточки r_7 , 2 – поверхностный токовый слой, соответствующий токовой нагрузке статора, 3 – воздушный зазор между статором и ротором, 4 – ярмо ротора, выполненное из немагнитного материала, с наружным и внутренним радиусами r_6 и r_5 соответственно, 5 – постоянные магниты с внутренним радиусом r_4 , 6 – воздушный зазор между ротором синхронного двигателя и корпусом кристаллизатора, 7 – корпус кристаллизатора с наружным и внутренним радиусами r_3 и r_2 , 8 – полость водяного охлаждения, 9 – медная

гильза кристаллизатора с наружным и внутренним радиусами r_1 и r , 10 – жидкометаллическая заготовка.



Распределение магнитного поля в полости перемешивателя, возбуждаемого постоянными магнитами, определим на основе уравнений Максвелла

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \mathbf{H} &= \mathbf{j} + \mathbf{j}_s, \quad \operatorname{rot} \mathbf{E} = -\partial \mathbf{B} / \partial t, \\ \operatorname{div} \mathbf{B} &= 0, \quad \operatorname{div} \mathbf{j} = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

и материальных уравнений, учитывающих электрофизические свойства конструктивных элементов

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}, \quad \mathbf{j} = \sigma [\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}], \quad (2)$$

где μ, σ, \mathbf{v} – магнитная проницаемость, электропроводность и скорость движения соответствующей среды, размещенной в полости перемешивателя. Постоянный магнит можно представить эквивалентным соленоидом с плотностью тока \mathbf{j}_s , располо-

женным на боковой поверхности магнита по всей его высоте с поверхностной плотностью тока, равной величине намагниченности магнита I_0 [4]. Применительно к постоянным магнитам из композита NdFeB с близкой к единице относительной магнитной проницаемостью будем полагать эквивалентный соленоид расположенным в воздушной среде. В этих условиях магнитная проницаемость всех сред в полости статора равна величине магнитной постоянной.

Путем введения векторного магнитного потенциала \mathbf{A}

$$\mathbf{B} = \text{rot}\mathbf{A}, \quad (3)$$

удовлетворяющего условию Кулоновской калибровки $\text{div}\mathbf{A} = 0$, в неподвижной цилиндрической системе координат (ρ, φ, z) для перемешивателя бесконечной высоты распределение магнитного поля для каждой из сред может быть описано уравнением для z -составляющей векторного магнитного потенциала

$$\frac{\partial^2 A_z}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 A_z}{\partial \varphi^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial A_z}{\partial \rho} - \mu\sigma \frac{\partial A_z}{\partial t} - \frac{\mu\sigma v}{\rho} \frac{\partial A_z}{\partial \varphi} = -\mu j_s, \quad (4)$$

принимая ограниченное значение при $\rho = 0$ и в предположении о бесконечной магнитной проницаемости железа статора, удовлетворяющего граничному условию Неймана при $\rho = r_7$

$$\partial A_z / \partial \rho = 0. \quad (5)$$

В системе координат (ρ, ϕ, z) , вращающейся вместе с постоянными магнитами с угловой скоростью ω , так что

$$\phi = \varphi - \omega t, \quad (6)$$

плотность тока соленоида j_s , эквивалентного величине намагниченности постоянных магнитов, описывается зависимостью

$$j_s = I_0 \sum_{s=1}^p (\delta(\rho(\phi + \pi - \phi_1 / 2 - 2(s-1)\pi / p)) - \delta(\rho(\phi + \pi - \phi_1 / 2 - \phi_2 - 2(s-1)\pi / p)) - \delta(\rho(\phi + \pi - 3\phi_1 / 2 - \phi_2 - 2(s-1)\pi / p)) + \delta(\rho(\phi + \pi - 3\phi_1 / 2 - 2\phi_2 - 2(s-1)\pi / p))) (\theta(\rho - r_4) - \theta(\rho - r_5)). \quad (7)$$

Здесь $\delta(x)$ – дельта-функция Дирака, $\theta(x)$ – единичная обобщенная функция, p – число пар полюсов магнитной системы, ϕ_1 – угловой размер расстояния между полюсами по азимуту, ϕ_2 – угловой размер полюса. При этом для $2p$ -полюсной магнитной системы должны выполняться условия $\phi_1 + \phi_2 = \pi / p$, $\phi_2 = k\pi / p$, $\phi_1 = (1-k)\pi / p$, где k любое число, меньшее единицы, определяющее степень перекрытия полюсного деления магнитным полюсом.

Учитывая, что согласно (6) $\frac{\partial A_z}{\partial \varphi} = \frac{\partial A_z}{\partial \phi} \frac{\partial \phi}{\partial \varphi} = \frac{\partial A_z}{\partial \phi}$, $\frac{\partial A_z}{\partial t} = \frac{\partial A_z}{\partial \phi} \frac{\partial \phi}{\partial t} = -\omega \frac{\partial A_z}{\partial \phi}$, применим к уравнению (4) дискретное преобразование Фурье [2] по переменной ϕ

$$A_n = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} A_z e^{in\phi} d\phi \quad (8)$$

и найдем, что преобразованное значение z -компоненты векторного магнитного потенциала удовлетворяет уравнению

$$\frac{\partial^2 A_n}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial A_n}{\partial \rho} - (n^2 / \rho^2 + in\mu\sigma(\omega - v / \rho) A_n) = -\mu j_n, \quad (9)$$

$$j_n = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} j_s e^{in\phi} d\phi = \frac{I_0 k_w}{\pi \rho} (\theta(\rho - r_4) - \theta(\rho - r_5)), \quad (10)$$

в котором, согласно (7) и (8),

$$k_w = -\sin \frac{kn\pi}{2p} \sin(n\pi) / \cos \frac{n\pi}{2p}.$$

Азимутальная скорость движения равна нулю для всех сред в полости перемешивателя кроме жидкого металла и ярма ротора с магнитами, для которого

$$v = \omega \rho. \quad (11)$$

Следовательно, для магнитного поля постоянных магнитов магнитные свойства немагнитного электропроводного ярма и постоянных магнитов эквивалентны воздушному промежутку. Тогда единственным решением уравнения (9), найденным путем использования метода вариации произвольных постоянных, в области между корпусом кристаллизатора и расточкой статора $r_3 < \rho < r_7$ при $\rho > r_5$ является зависимость

$$A_n = C_1 \rho^n + C_2 \rho^{-n}, \quad (12)$$

а при $\rho < r_4$ –

$$A_n = C_1 \rho^n + C_2 \rho^{-n} + \frac{\mu I_0 k_w}{2\pi m} \int_{r_4}^{r_5} \left(\frac{\rho^n}{s^n} - \frac{s^n}{\rho^n} \right) ds. \quad (13)$$

Подчиняя решение (12) граничному условию (5), найдем, что

$$C_1 = C_2 / r_7^{2n} \quad \text{и при } \rho = r_7 \quad A_7 = 2C_2 / r_7^n. \quad (14)$$

Тогда решение (13) на основе теоремы о среднем можно приближенно представить, полагая $s = r_8 = (r_4 + r_5) / 2$, в виде

$$A_n = C_2 \left(\frac{\rho^n}{r_7^{2n}} + \rho^{-n} \right) + \frac{\mu I_0 k_w}{2\pi m} (r_5 - r_4) \left(\frac{\rho^n}{r_8^n} - \frac{r_8^n}{\rho^n} \right). \quad (15)$$

Поскольку в теле корпуса кристаллизатора ($r_2 < \rho < r_3$) $v = 0$ и $j_n = 0$, общее решение уравнения (9) описывается модифицированными функциями Бесселя

$$A_n = C_3 I_n(a_1 \rho) + C_4 K_n(a_1 \rho), \quad a_1 = \sqrt{in \mu \sigma_k \omega}, \quad (16)$$

где μ, σ_k – магнитная проницаемость и электропроводность материала корпуса кристаллизатора, который обычно выполняется из немагнитной стали. Исходя из условия равенства нормальной составляющей индукции и тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля на границе раздела сред

$$\frac{dA_n(\rho+0)}{d\rho} = \frac{dA_n(\rho-0)}{d\rho}, \quad A_n(\rho+0) = A_n(\rho-0), \quad (17)$$

при $\rho = r_3$ с использованием решений (15) и (16) найдем, исключая неизвестную C_2 , что

$$C_3 b_1 + C_4 d_1 = C_{1n}, \quad C_{1n} = -\frac{\mu I_0 k_w (r_5 - r_4) r_3^{n-1} \left(1 + \frac{r_8^n}{r_7^n}\right)}{\pi \cdot r_8^n}, \quad (18)$$

$$b_1 = \frac{n}{r_3} \left(1 - \frac{r_3^{2n}}{r_7^{2n}}\right) I_n(a_1 r_3) + \left(1 + \frac{r_3^{2n}}{r_7^{2n}}\right) \frac{dI_n(a_1 r_3)}{dr_3}, \quad d_1 = \frac{n}{r_3} \left(1 - \frac{r_3^{2n}}{r_7^{2n}}\right) K_n(a_1 r_3) + \left(1 + \frac{r_3^{2n}}{r_7^{2n}}\right) \frac{dK_n(a_1 r_3)}{dr_3}.$$

С учетом установленных зависимостей (18) решение (16) может быть представлено в виде

$$A_n = C_{1n} I_n(a_1 \rho) / b_1 - C_4 (d_1 I_n(a_1 \rho) - b_1 K_n(a_1 \rho)) / b_1. \quad (19)$$

В полости водяного охлаждения между корпусом кристаллизатора и медной гильзой $r_1 < \rho < r_2$, так как электропроводность воды равна нулю, общее решение уравнения (9) имеет вид

$$A_n = C_5 \rho^n + C_6 \rho^{-n}. \quad (20)$$

Удовлетворяя на границе раздела сред $\rho = r_2$ решения (19) и (20) условиям сопряжения (17), найдем $C_5 = C_{1n} / p_1 r_2 - C_6 q_1 / p_1$ и, следовательно, согласно (20)

$$A_n = \frac{C_{1n} \rho^n}{r_2 p_1} + C_6 (\rho^{-n} - \rho^n q_1 / p_1),$$

$$p_1 = r_2^n \left(\left(d_1 \frac{dI_n(a_1 \rho)}{d\rho} - b_1 \frac{dK_n(a_1 \rho)}{d\rho} \right) \Big|_{\rho=r_2} - \frac{n}{r_2} (d_1 I_n(a_1 r_2) - b_1 K_n(a_1 r_2)) \right), \quad (21)$$

$$q_1 = r_2^{-n} \left(\left(d_1 \frac{dI_n(a_1 \rho)}{d\rho} - b_1 \frac{dK_n(a_1 \rho)}{d\rho} \right) \Big|_{\rho=r_2} + \frac{n}{r_2} (d_1 I_n(a_1 r_2) - b_1 K_n(a_1 r_2)) \right).$$

Решением уравнения (9) в медной гильзе ($r < \rho < r_1$) с электропроводностью σ_2 является

$$A_n = C_7 I_n(a_2 \rho) + C_8 K_n(a_2 \rho), \quad a_2 = \sqrt{in \mu \sigma_2 \omega}, \quad (22)$$

Используя условия сопряжения (17) при $\rho = r_1$, найдем, что

$$C_7 = 2C_{1n} n / r_1 r_2 m_1 - C_8 n_1 / m_1,$$

$$m_1 = \frac{n}{r_1} (p_1 r_1^{-n} + q_1 r_1^n) I_n(a_2 r_1) + (p_1 r_1^{-n} - q_1 r_1^n) \frac{dI_n(a_2 r_1)}{dr_1}, \quad (23)$$

$$n_1 = \frac{n}{r_1} (p_1 r_1^{-n} + q_1 r_1^n) K_n(a_2 r_1) + (p_1 r_1^{-n} - q_1 r_1^n) \frac{dK_n(a_2 r_1)}{dr_1}.$$

С учетом полученных соотношений (23) распределение магнитного потенциала в медной гильзе кристаллизатора и его производная по ρ представляются зависимостями

$$A_n = \frac{2C_1 n}{r_1 r_2 m_1} I_n(a_2 \rho) + C_8 (K_n(a_2 \rho) - \frac{n_1}{m_1} I_n(a_2 \rho)),$$

$$\frac{dA_n}{d\rho} = \frac{2C_1 n}{r_1 r_2 m_1} \frac{dI_n(a_2 \rho)}{d\rho} + C_8 \frac{d}{d\rho} (K_n(a_2 \rho) - \frac{n_1}{m_1} I_n(a_2 \rho)).$$
(24)

На основе условий сопряжения (17), освобождаясь в системе (24) от неизвестного коэффициента C_8 , найдем граничные условия для магнитного потенциала в жидком металле при $\rho = r$ для произвольной функциональной зависимости скорости движения жидкого металла $v(\rho)$ в уравнении (9)

$$\frac{dA_n}{d\rho} (m_1 K_n(a_2 \rho) - m_1 I_n(a_2 \rho)) - A_n (m_1 \frac{dK_n(a_2 \rho)}{d\rho} - n_1 \frac{dI_n(a_2 \rho)}{d\rho}) = \frac{2C_1 n}{r_1 r_2}. \quad (25)$$

Векторный магнитный потенциал, удовлетворяющий граничному условию (25), в классе ограниченных функций может быть определен для произвольной скорости движения жидкого металла методом итераций в результате численного решения уравнений магнитной гидродинамики. В электродинамическом же приближении при допущении, что жидкий металл вращается, как твердое тело $v = k\omega\rho$, где k может принимать любые значения от 0 до 1, ограниченное в области жидкого металла решение уравнения (9), удовлетворяющее условию (25), имеет вид

$$A_n = C_9 I_n(a_3 \rho),$$

$$C_9 = \frac{2C_1 n}{r_1 r_2} / \left(\frac{dI_n(a_3 \rho)}{d\rho} (m_1 K_n(a_2 \rho) - m_1 I_n(a_2 \rho)) - I_n(a_3 \rho) (m_1 \frac{dK_n(a_2 \rho)}{d\rho} - n_1 \frac{dI_n(a_2 \rho)}{d\rho}) \right) \Big|_{\rho=r}, \quad (26)$$

где $a_3 = \sqrt{(1-k)in\mu\sigma\omega}$, σ – электропроводность жидкого металла.

Полагая таким образом известным значение векторного магнитного потенциала в жидком металле $A_n(r)$, в частности, из (26) при $\rho = r$, из первого уравнения (24) находим

$$C_8 = \frac{A_n(r)m_1 - 2C_1 n I_n(a_2 r) / r_1 r_2}{m_1 K_n(a_2 r) - n_1 I_n(a_2 r)}. \quad (27)$$

Определив из (24) значение векторного магнитного потенциала $A_n(r_1)$ в медной гильзе при $\rho = r_1$, найдем из (21) постоянную интегрирования

$$C_6 = \frac{A_n(r_1)p_1 - C_1 n r_1^n / r_2}{p_1 r_1^{-n} - q_1 r_1^n}. \quad (28)$$

Тогда при известном значении C_6 из (21) легко определяется $A_n(r_2)$ при $\rho = r_2$, а из (19) – постоянная интегрирования

$$C_4 = \frac{A_n(r_2)b_1 - C_1 n I_n(a_1 r_2)}{b_1 K_n(a_1 r_2) - d_1 I_n(a_1 r_2)} \quad (29)$$

и, следовательно, распределение магнитного потенциала согласно (19) в корпусе кристаллизатора.

Определив из (19) значение $A_n(r_3)$ при $\rho = r_3$, найдем из (15)

$$C_2 = (A_n(r_3)r_3^n + \frac{\mu I_0 k_w r_8^n}{2n\pi} (r_5 - r_4) (1 - \frac{r_3^{2n}}{r_8^{2n}})) / (1 + \frac{r_3^{2n}}{r_7^{2n}}). \quad (30)$$

Обратное преобразование z -составляющей векторного магнитного потенциала в каждой из областей полости перемешивателя представляется рядом во вращающейся системе координат (ϕ, ρ, z) и согласно (6) в неподвижной системе координат (φ, ρ, z) соответственно

$$A_z = \sum_{-\infty}^{\infty} A_n e^{-in\phi} = \sum_{-\infty}^{\infty} A_n e^{-in(\varphi - \omega t)}. \quad (31)$$

Выводы. Определено распределение магнитного поля магнитной системы возбуждения на постоянных магнитах синхронного двигателя с полым ротором в каждой из областей в полости электромагнитного перемешивателя при произвольной скорости вращения жидкого металла, которое представлено в функциональной зависимости от величины векторного магнитного потенциала на по-

верхности слитка. Выведены граничные условия для магнитного потенциала на поверхности слитка для произвольной скорости вращения жидкого металла в гильзе кристаллизатора.

1. *Грачев В.Г., Шифрин И.Н., Сивак Б.А., Кузьмина Л.И., Солодовник Ф.С.* Электромагнитное перемешивание на сортовых, блюмовых и слябовых МНЛЗ // *Сталь*. – 2002. – № 11. – С. 21–26.
2. *Гахов Ф.Д., Черский Ю.И.* Уравнения типа свертки. – М.: Наука, 1978. – 296 с.
3. *Костенко М.П., Пиотровский Л.М.* Электрические машины. В 2-х частях. Ч.2. – Машины переменного тока. – Л: Энергия, 1973. – 648 с.
4. *Тамм И.Е.* Основы теории электричества. – М.: Наука, 1989. – 504 с.
5. *Патент UA №81579*, Украина. МПК B22D 27/02, H02K 17/02. Пристрій для електромагнітного перемішування металевого розплаву / *Кочін Л.П., Плугатар В.С., Биховський А.І., Широкопад С.І., Білобров Ю.М., Кондратенко І.П., Ращепкін А.П.* / ЗАТ «Новокраматорський машинобудівний завод». – 2008.
6. *Beitelman L., Mulcahy J.A.* Flow control in the meniscus of continuous casting mold with an auxiliary A.C. magnetic field // *International Symposium on Electromagnetic Processing of Materials, Nagoya, ISIJ*. – 1994. – Pp. 235–241.
7. *Kuwano T., Shigematsu N., Hoshi F., Ogiwara H.* Металлургические проблемы непрерывной разливки нержавеющей стали // *Сб. пер. Достижения в области непрерывной разливки стали. Труды международного конгресса (London, 1982) Пер. с англ. Евтеева Д.П., Колыбова И.Н.* – М.: Металлургия, 1987. – 224 с.

УДК 621.313.8

МАГНІТНЕ ПОЛЕ СИСТЕМИ ЗБУДЖЕННЯ НА ПОСТІЙНИХ МАГНІТАХ СИНХРОННОГО ДВИГУНА З ПОРОЖНИСТИМ РОТОРОМ

І.П.Кондратенко, докт.техн.наук, **А.П.Ращепкін**, докт.техн.наук, **Т.В.Виштак**, **О.М.Карлов**

Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна.

e-mail: dep7ied@ukr.net

Для машин безперервного лиття заготовок запропоновано електромагнітний перемішувач у вигляді синхронного двигуна з порожнистим ротором. Обертове магнітне поле в рідкому металі збуджується магнітною системою ротора на постійних магнітах разом зі струмами обмотки статора. Доведено необхідність окремого визначення полів системи збудження і струмів обмотки статора. Для довільного розподілу швидкості обертання рідкого металу виведені граничні умови для магнітного потенціалу на поверхні вилівки і отримано розподіл магнітного поля в порожнині перемішувача, яке збуджується постійними магнітами ротора. Бібл. 7, рис. 1.

Ключові слова: перемішувач, постійні магніти, безперервне лиття, кристалізатор.

MAGNETIC FIELD THE SYSTEM EXCITATION ON PERMANENT MAGNETS OF THE SYNCHRONOUS MOTOR WITH HOLLOW A ROTOR

Kondratenko I.P., Rashchepkin A.P., Vyshtak T.V., Karlov O.M.

Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,

Peremogy av., 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine.

e-mail: dep7ied@ukr.net

For continuous casting machines proposed electromagnetic stirrer in the form of a synchronous motor with a hollow rotor. The rotating magnetic field in the liquid metal magnetic system is excited by a permanent magnet rotor with the stator winding currents. The necessity of a separate determination of the excitation fields and currents of the stator winding. For an arbitrary rotation speed of the liquid metal boundary conditions are derived for the magnetic potential on the surface of the blanks, and found the magnetic field distribution in the cavity stirrer produced by a permanent magnet rotor. References 7, figure 1.

Keywords: stirrer, permanent magnets, the continuous casting, mold.

1. *Grachev V.G., Shifrin I.N., Sivak B.A., Kuzmina L.I., Solodovnik F.S.* Electromagnetic stirring on the sort, bloom and slab casters // *Stal*. – 2002. – Vol. 11. – Pp. 21–26. (Rus)
2. *Gakhov F.D., Cherskii Yu.I.* Equations type a convolution. – Moskva: Nauka, 1978. – 296 p. (Rus)
3. *Kostenko M.P., Piotrowskii L.M.* Electric machines. In 2 parts. Part 2 – Machine alternating-current. – Leningrad: Energiia, 1973. – 648 p. (Rus)
4. *Tamm I.E.* Fundamentals of electricity. – Moskva: Nauka, 1989. – 504 p. (Rus)
5. *Patent №81579*, UA, IPC B22D 27/02, H02K 17/02. A device for electromagnetic stirring of liquid metal / *Kochin L.P., Plugatar V.S., Bykhovskiy A.I., Shirokorad S.I., Bilobrov Yu.M., Kondratenko I.P., Rashchepkin A.P.* / ЗАТ «Novokramatorskyi mashinobudivnyi zavod». – 2008. (Ukr)
6. *Beitelman L., Mulcahy J.A.* Flow control in the meniscus of continuous casting mold with an auxiliary A.C. magnetic field // *International Symposium on Electromagnetic Processing of Materials, Nagoya, ISIJ*. – 1994. – Pp. 235–241.
7. *Kuwano T., Shigematsu N., Hoshi F., Ogiwara H.* Metallurgicheskoe problem for continuous casting of stainless steel // *Proc. lane. Advances in continuous casting of steel. Proceedings of the International Congress (London, 1982) Trans. from English.* Evteeva D.P., Kolybova I.N. – Moskva: Metallurgiya, 1987. – 224 p. (Rus)

Надійшла 06.07.2012

Received 06.07.2012