

А.Н.Карлов, И.П.Кондратенко, докт.техн.наук, А.П.Ращепкин, докт.техн.наук (Ин-т электродинамики НАН Украины, Киев)

МЕТОД РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ СИЛ В ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ КРИСТАЛЛИЗАТОРАХ ПОД ДЕЙСТВИЕМ КОМБИНИРОВАННЫХ БЕГУЩИХ ПОЛЕЙ

Разработана методика расчета электродинамических сил в жидком металле под действием комбинированных бегущих полей в зависимости от конструктивного исполнения и схем соединения обмоток перемешивателя.

Розроблено методіку розрахунку електродинамічних сил у рідкому металі під дією комбінованих біжущих полів в залежності від конструктивного виконання і схем з'єднання обмоток перемішувача.

Анализ распределения магнитного поля в многообмоточном электромагнитном перемешивателе, предложенном в статье [3], выполнен в функциональной зависимости от токовой нагрузки перемешивателя. В зависимости от конструктивного исполнения и величины тока обмотки перемешивателя изменяется и его токовая нагрузка. Среднее значение азимутальной составляющей напряженности магнитного поля в воздушном зазоре на ширине паза (рис. 1) при допущении о бесконечности магнитной проницаемости железа индуктора согласно закону полного тока определяется как

$$H_{\varphi}(r_2) = -s_k i_{\phi} / b_n. \quad (1)$$

Здесь s_k – количество проводников в пазу, i_{ϕ} – ток фазы обмотки, b_n – ширина паза.

Зависимость H_{φ} эквивалентна представлению обмотки статора бесконечно тонкими токовыми слоями шириной b_n ,

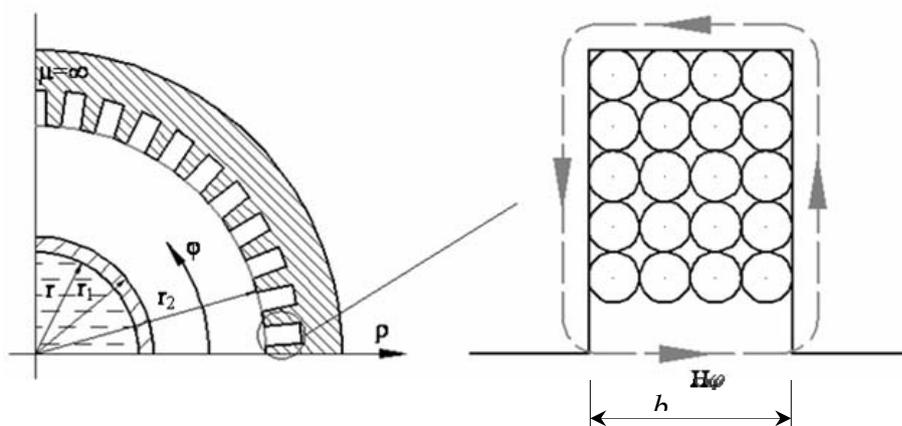


Рис. 1

сосредоточенными на гладкой поверхности магнитопровода. В результате линейная токовая нагрузка задается дискретной функцией с учетом влияния высших пространственных гармоник [5], а не в виде непрерывного токового слоя по основной гармонике [1]. В случае многофазного исполнения z -составляющая токовой нагрузки индуктора равна

сумме z -составляющих фазных токовых нагрузок и для трехфазной обмотки имеет вид

$$i_z = i_{zA} + i_{zB} + i_{zC}. \quad (2)$$

Предположим, что $2p$ -полюсная обмотка перемешивателя размещается на всей поверхности магнитопровода $-\pi < \varphi < \pi$. Все катушки обмотки имеют идентичное исполнение и сдвинуты в пределах фазной зоны на одинаковый угол $\pi t_z / p\tau$. В общем случае катушки разных фаз имеют различное количество витков s_A, s_B, s_C и пространственный шаг y_A, y_B, y_C . Положим также, что фазная зона фазы A начинается при $\varphi = -\pi + \varphi_A$, тогда токовую нагрузку фазы A можно представить в виде

$$i_{zA} = \frac{I_A s_A}{b_n} \sum_{s=1}^p \sum_{k=1}^q (\Theta(r_2(\varphi - T(k, s)) + 0,5b_n) - \Theta(r_2(\varphi - T(k, s)) - 0,5b_n) - \Theta(r_2(\varphi - T(k, s)) + 0,5b_n - y_A) + \Theta(r_2(\varphi - T(k, s)) - 0,5b_n - y_A)), \quad (3)$$

где $T(k, s) = \frac{2k-1}{2pmq} \pi + \frac{2(s-1)\pi}{p} - \pi + \varphi_A$.

Аналогичное представление имеют токовые нагрузки фаз B и C

$$\begin{aligned} i_{zB} &= i_{zA}(I_A \rightarrow I_B, s_A \rightarrow s_B, \varphi_A \rightarrow \varphi_B, y_A \rightarrow y_B), \\ i_{zC} &= i_{zA}(I_A \rightarrow I_C, s_A \rightarrow s_C, \varphi_A \rightarrow \varphi_C, y_A \rightarrow y_C). \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь I_A, I_B, I_C – амплитудные значения фазных токов, q – число пазов на полюс и фазу, p – число пар полюсов обмотки, m – число фаз обмотки, b_n – ширина открытия паза, r_2 – радиус расточки статора, $\theta(\dots)$ – единичная обобщенная функция, равная нулю при отрицательных значениях аргумента и равна единице при его положительных значениях. Представление $P(a \rightarrow b)$ означает: выполнить в выражении $P(a)$ замену величины a на величину b . Полусное деление $2p$ -полюсной обмотки равно

$$\tau = \pi r_2 / p. \quad (5)$$

Значения φ_B и φ_C определяются через φ_A

$$\varphi_B = \varphi_A + 2\pi / pm, \quad \varphi_C = \varphi_A + \pi / pm, \quad \varphi_A = k\pi / pm, \quad k = 1, \dots, 2m. \quad (6)$$

Применяя к равенству (2) дискретное интегральное преобразование Фурье [2], найдем преобразованное значение токовой нагрузки $2p$ -полюсной обмотки

$$I(n) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} e^{in\varphi} (i_{zA} + i_{zB} + i_{zC}) d\varphi = I_A(n) + I_B(n) + I_C(n), \quad (7)$$

где n – параметр преобразования Фурье.

С учетом представления токовой нагрузки фазы A согласно (3) найдем по (7) $I_A(n) = I_A w_A k_A / 2\pi r_2$, где количество витков в фазе A $2p$ -полюсной машины $w_A = s_A p q$, а обмоточный коэффициент

$$k_A = e^{-\frac{in\pi}{p}(1 - \frac{p\varphi_A}{\pi} - \frac{1}{2m})} (1 - e^{\frac{in\pi y_A}{p\tau}}) \frac{\sin(n\pi)}{p \sin(n\pi/p)} \frac{\sin(n\pi/2pm)}{q \sin(n\pi/2pmq)} \frac{\sin(n\pi b_n/2p\tau)}{n\pi b_n/2p\tau}. \quad (8)$$

Аналогичным образом определяются согласно (4) и (7) преобразованные значения токовых нагрузок фаз B и C

$$I_B(n) = \frac{I_B w_B k_B}{2\pi r_2}, \quad I_C(n) = \frac{I_C w_C k_C}{2\pi r_2},$$

где $w_B = s_B p q$, $w_C = s_C p q$, а обмоточные коэффициенты

$$k_B = k_A(\varphi_A \rightarrow \varphi_B, y_A \rightarrow y_B); \quad k_C = k_A(\varphi_A \rightarrow \varphi_C, y_A \rightarrow y_C). \quad (9)$$

Наличие в обмоточных коэффициентах множителя $\sin(n\pi)/p \sin(n\pi/p)$, всегда равного нулю при $n < p$, указывает на отсутствие пространственных субгармоник в токовой нагрузке и магнитном поле перемещивателя. Магнитное поле содержит основную гармонику $n = p$ и высшие гармоники, кратные p .

Окончательно преобразованное значение токовой нагрузки $2p$ -полюсной обмотки равно, учитывая, что фаза C начинается с фазной зоны Z ,

$$I(n) = (I_A w_A k_A + I_B w_B k_B - I_C w_C k_C) / 2\pi r_2. \quad (10)$$

Для $2p$ -полюсной обмотки, размещенной на дуге статора $-\pi < \varphi < 0$, с традиционным следованием фазных зон ($AZBXY$) в пределах пары полюсов, полагая, что обмотка начинается с фазной зоны фазы A , распределение тока фазы A по поверхности расточки представим в виде

$$i_{1zA} = \frac{I_{1A} s_{1A}}{b_n} \sum_{s=1}^{p_1} \sum_{k=1}^{q_1} (\Theta(r_2(\varphi - T_1(k, s)) + 0,5b_n) - \Theta(r_2(\varphi - T_1(k, s)) - 0,5b_n) - \Theta(r_2(\varphi - T_1(k, s)) + 0,5b_n - y_{1A}) + \Theta(r_2(\varphi - T_1(k, s)) - 0,5b_n - y_{1A})), \quad (11)$$

где $T_1(k, s) = -\pi + \varphi_{1A} + \frac{2k-1}{4p_1 m q_1} \pi + \frac{(s-1)\pi}{p_1}$, $\tau_1 = \frac{\pi r_2}{2 p_1}$.

Здесь p_1, q_1 – число пар полюсов и количество пазов на полюс и фазу дугостаторной обмотки, y_{1A} – шаг катушек фазы A .

Зубцовый шаг t_z и ширина паза b_n равны зубцовому шагу и ширине паза $2p$ -полюсной обмотки, поскольку катушки дугостаторной обмотки вкладываются в те же пазы, что и $2p$ -полюсной обмотки. Следовательно, количество пазов на полюс и фазу $2p$ -полюсной обмотки должно составлять

$$q = 2 q_1 p_1 / p \quad (12)$$

и результирующее количество пазов статора

$$z = 4 m p_1 q_1. \quad (13)$$

При указанном следовании фазных зон сдвиги фаз B и C относительно фазы A равны

$$\varphi_{1B} = \varphi_{1A} + \frac{\pi}{m p_1}, \quad \varphi_{1C} = \varphi_{1A} + \frac{\pi}{2 m p_1}, \quad \varphi_{1A} = 0. \quad (14)$$

Интегральное преобразование Фурье

$$I_{1A}(n) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^0 e^{in\varphi} i_{1zA} d\varphi \quad (15)$$

токовой нагрузки фазы A (11) равно

$$I_{1A}(n) = I_{1A} w_{1A} k_{1A} / 2\pi r_2, \quad (16)$$

где $w_{1A} = s_{1A} p_1 q_1$,

$$k_{1A} = e^{-\frac{in\pi}{2p_1}(1+p_1-\frac{2p_1\varphi_{1A}}{\pi}-\frac{1}{2m})} (1 - e^{\frac{in\pi}{2p_1}\tau_1}) \frac{\sin(n\pi/2)}{p_1 \sin(n\pi/2p_1)} \cdot \frac{\sin(n\pi/4p_1 m)}{q_1 \sin(n\pi/4p_1 m q_1)} \cdot \frac{\sin(n\pi b_n/4p_1 \tau_1)}{n\pi b_n/4p_1 \tau_1}.$$

Полагая исполнения фаз B и C аналогичными фазе A и лишь сдвинутыми в пространстве на углы согласно (14), найдем, что

$$\begin{aligned} I_{1B}(n) &= I_{1B} w_{1B} k_{1B} / 2\pi r_2, \\ I_{1C}(n) &= I_{1C} w_{1C} k_{1C} / 2\pi r_2, \end{aligned} \quad (17)$$

где $w_{1B} = s_{1B} p_1 q_1$, $w_{1C} = s_{1C} p_1 q_1$,

$$k_{1B} = k_{1A}(\varphi_{1A} \rightarrow \varphi_{1B}, y_{1A} \rightarrow y_{1B}), k_{1C} = k_{1A}(\varphi_{1A} \rightarrow \varphi_{1C}, y_{1A} \rightarrow y_{1C}).$$

Учитывая, что фаза C начинается с фазной зоны Z , преобразованное значение токовой нагрузки $2p_1$ -полюсной дугостаторной обмотки подобно (10) представим в виде

$$I_1(n) = (I_{1A} w_{1A} k_{1A} + I_{1B} w_{1B} k_{1B} - I_{1C} w_{1C} k_{1C}) / 2\pi r_2. \quad (18)$$

Для $2p_2$ -полюсной обмотки, размещенной на дуге расточки $0 < \varphi < \pi$ со следованием фазных зон ($AZBXY$) в пределах каждой пары полюсов, распределение тока фазы A описывается функцией

$$i_{2zA} = \frac{I_{2A} s_{2A}}{b_n} \sum_{s=1}^{p_2} \sum_{k=1}^{q_2} (\Theta(r_2(\varphi - T_2(k, s)) + 0,5b_n) - \Theta(r_2(\varphi - T_2(k, s)) - 0,5b_n) - \Theta(r_2(\varphi - T_2(k, s)) + 0,5b_n - y_{2A}) + \Theta(r_2(\varphi - T_2(k, s)) - 0,5b_n - y_{2A})), \quad (19)$$

где $T_2(k, s) = \varphi_{2A} + \frac{2k-1}{4p_2 m} \pi + \frac{(s-1)\pi}{p_2}$, $\tau_2 = \frac{\pi r_2}{2p_2}$, p_2, q_2 – число пар полюсов и количество пазов на полюс и фазу дугостаторной обмотки, τ_2 и y_{2A} – полюсное деление и шаг катушек $2p_2$ -полюсной обмотки, I_{2A} – амплитудное значение тока фазы A , s_{2A} – количество витков фазы A в пазу.

Аналогичными зависимостями описываются и распределение токов фаз B и C с тем лишь отличием, что они имеют собственное количество витков в пазу s_{2B} и s_{2C} и шаг катушек y_{2B} , y_{2C} , а также согласно указанному чередованию фазных зон – соответствующие пространственные сдвиги фаз

$$\varphi_{2B} = \varphi_{2A} + \frac{\pi}{p_2 m}, \quad \varphi_{2C} = \varphi_{2A} + \frac{\pi}{2p_2 m}, \quad \varphi_A = 0. \quad (20)$$

Тогда преобразованные значения токовых нагрузок фаз A, B и C $2p_2$ -полюсной дугостаторной обмотки согласно (15), (19), (20) равны

$$\begin{aligned} I_{2A}(n) &= I_{2A} w_{2A} k_{2A} / 2\pi r_2, \\ I_{2B}(n) &= I_{2B} w_{2B} k_{2B} / 2\pi r_2, \\ I_{2C}(n) &= I_{2C} w_{2C} k_{2C} / 2\pi r_2, \end{aligned} \quad (21)$$

где $w_{2A} = s_{2A} p_2 q_2$, $w_{2B} = s_{2B} p_2 q_2$, $w_{2C} = s_{2C} p_2 q_2$,

$$k_{2A} = e^{-\frac{i\pi}{2p_2}(1-p_2-\frac{2p_2\varphi_{2A}}{\pi}-\frac{1}{2m})} (1 - e^{\frac{i\pi y_{2A}}{2p_2 \tau_2}}) \frac{\sin(n\pi/2)}{p_2 \sin(n\pi/2p_2)} \cdot \frac{\sin(n\pi/4p_2 m)}{q_2 \sin(n\pi/4p_2 m q_2)} \cdot \frac{\sin(n\pi b_n/4p_2 \tau_2)}{n\pi b_n/4p_2 \tau_2},$$

$$k_{2B} = k_{2A}(\varphi_{2A} \rightarrow \varphi_{2B}, y_{2A} \rightarrow y_{2B}),$$

$$k_{2C} = k_{2A}(\varphi_{2A} \rightarrow \varphi_{2C}, y_{2A} \rightarrow y_{2C}).$$

Преобразование Фурье токовой нагрузки дугостаторной $2p_2$ -полюсной обмотки представляется суммой вида (18)

$$I_2(n) = (I_{2A} w_{2A} k_{2A} + I_{2B} w_{2B} k_{2B} - I_{2C} w_{2C} k_{2C}) / 2\pi r_2. \quad (22)$$

Амплитудное значение токовой нагрузки трехобмоточного электромагнитного перемешивателя является суперпозицией токовых нагрузок трех обмоток:

$$A_m = I(n) + I_1(n) + I_2(n) \quad (23)$$

и на поверхности статора ($\rho = r_2$) выполняется условие:

$$B_\varphi = -\mu_0 A_m. \quad (24)$$

Полученное представление токовой нагрузки перемешивателя (23) и условия для тангенциальной составляющей магнитной индукции при $\rho = r_2$ (24) позволяют в зависимости от конструктивного исполнения обмоток и электрических схем их соединения найти распределение векторного магнитного потенциала в полости перемешивателя, компоненты магнитной индукции и плотности тока в проводящих средах.

С использованием полученных в [3] зависимостей (22), (23), (24) для определения компонент магнитной индукции и плотности тока, распределение средних во времени объемных электромагнитных усилий, возникающих в результате взаимодействия комбинированных бегущих полей и индуцированных токов в жидком металле, равно

$$F_{\varphi} = \frac{1}{2} \operatorname{Re}(j_z B_{\rho}^*) = -\frac{\sigma \omega}{2 \rho} \operatorname{Re}\left(\sum_{n=-\infty}^{+\infty} A_3 e^{-in\varphi} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} n A_3^* e^{in\varphi}\right),$$

$$F_{\rho} = -\frac{1}{2} \operatorname{Re}(j_z B_{\varphi}^*) = -\frac{\sigma \omega}{2} \operatorname{Re}\left(\sum_{n=-\infty}^{+\infty} A_3 e^{-in\varphi} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \frac{\partial A_3^*}{\partial \rho} e^{in\varphi}\right),$$
(25)

где $A_3 = -2B_{\varphi} \frac{r_1^{n-1}}{r r_2^{n-1}} \frac{I_n(a_1 \rho)}{(I_n'(a_1 r) \zeta - I_n(a_1 r) \xi)}$ – распределение преобразованных значений z -составляющей векторного магнитного потенциала в жидком металле, $a_1 = \sqrt{i \mu_c \sigma_c \omega}$, ζ и ξ – постоянные интегрирования в [3], $I_n(\dots)$ – модифицированная функция Бесселя, σ_c и μ_c – электропроводность и магнитная проницаемость жидкого металла, $\omega = 2\pi f$. В (25) знак (*) означает комплексно сопряженную величину. Поскольку решение для векторного магнитного потенциала A_3 в [3] получено при допущении, что скорость жидкого металла равна нулю, то и расчет сил в (25) приведен при этом допущении.

Разработанная методика расчета электродинамических сил учитывает конструктивное исполнение перемешивателя и затухание электромагнитного поля в элементах конструкции. Наибольшее затухание поля, очевидно, происходит в гильзе кристаллизатора, которая выполнена из меди с толщиной стенки до 15 мм, что существенно затрудняет проникновение поля в жидкий металл. Поэтому электропитание обмоток перемешивателя осуществляется от преобразователя низкой частоты.

На рис. 2 показана зависимость азимутальной составляющей объемной электродинамической силы от частоты тока питания при $\rho = r$ для двухполюсного (кривые 1, 2) и четырехполюсного (кривые 3, 4) исполнения обмотки в перемешивателях с радиусом расточки 0,145 м (кривые 2, 3) и 0,225 м (кривые 1, 4). Меньший диаметр расточки соответствует внутреннему (внутри корпуса кристаллизатора) размещению перемешивателя, а больший – наружному размещению (вне корпуса кристаллизатора).

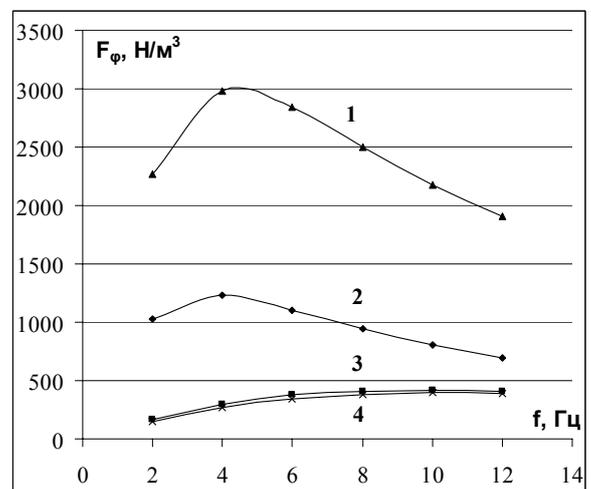


Рис. 2

Приведенные на рис. 2 зависимости рассчитаны при толщине стенки 13 мм и допущении, что токовые нагрузки двухполюсной и четырехполюсной обмоток равны между собой. Это оправдано тем, что катушки обеих обмоток размещаются в одних и тех же пазах и, следовательно, содержат одинаковое количество витков в пазу. Поскольку диаметр перемешивателя наружной установки превышает диаметр перемешивателя внутреннего размещения в 1,5 раза, то сечение паза его возросло в 2,25 раза и количество витков в пазу возросло в 2,25 раза и, следовательно, токовая нагрузка его принята большей в 1,5 раза. Характерной особенностью обоих исполнений перемешивателей является достижение максимальных азимутальных усилий при частоте 4 Гц для двухполюсных обмоток электромагнитных перемешивателей и при 10 Гц – для четырехполюсных исполнений обмоток.

Характерное распределение объемных электродинамических сил в сечении круглой заготовки диаметром 0,15 м показано на рис. 3. Причем характер распределения сил не зависит от исполнения перемешивателя – внутреннего или наружного и числа пар полюсов. Такое распределение усилий вызывает круговое движение жидкого металла, приводя к переносу металла в периферийную зону и вытеснение более легких частиц и газовых включений в осевую зону.

Для интенсификации теплообменных процессов между жидким металлом и водоохлаждаемой гильзой кристаллизатора целесообразно обеспечить тепломассоперенос металла из центральной

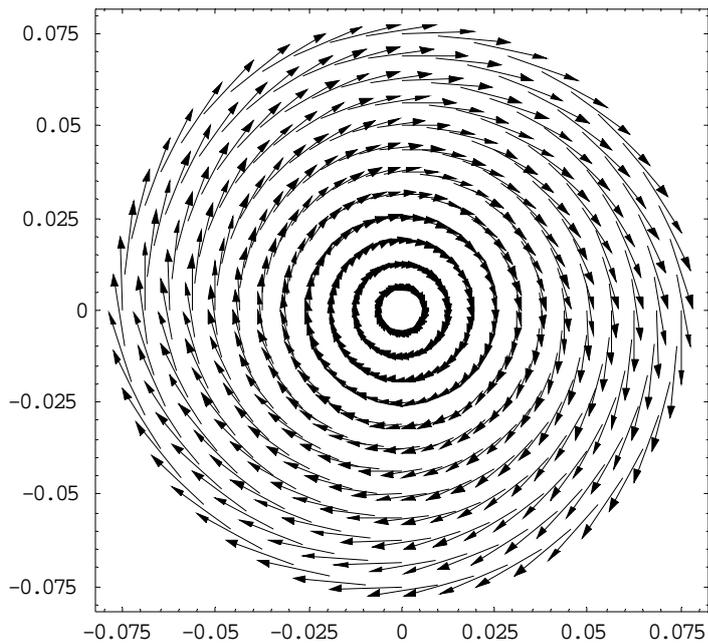


Рис. 3

ря возникают, если используется двухполюсная и шестиполюсная обмотки, создающие встречно вращающиеся поля и т.д.

Маловероятным представляется, что движение жидкого металла в кристаллизаторе будет повторять приведенное на рис. 4 распределение усилий.

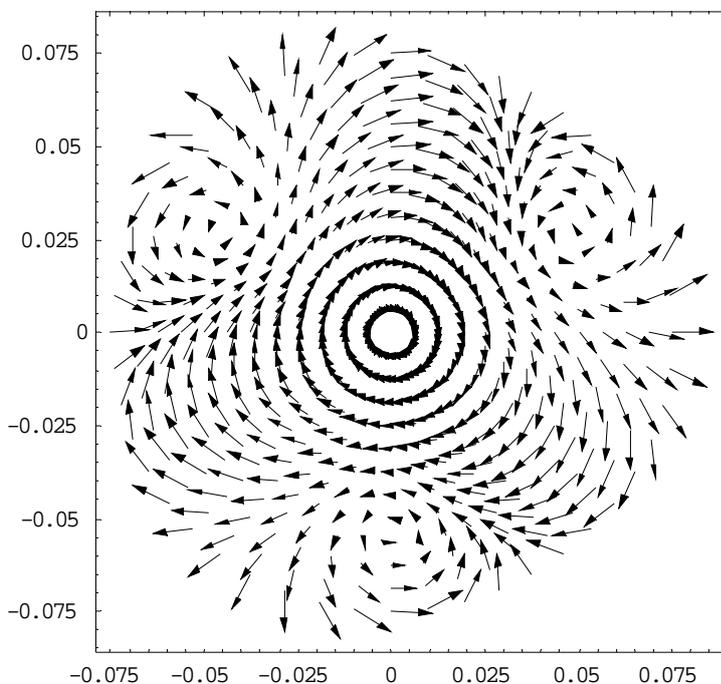


Рис. 4

зоны к периферии. Такое движение можно обеспечить путем создания многовихревой структуры распределения объемных электродинамических сил в металле (рис. 4).

Подобное распределение сил возникает, если последовательно соединить двухполюсную и две согласно включенные дугостаторные обмотки со встречно вращающимися полями [4]. Для такого исполнения обмотки перемешивателя токовая нагрузка согласно (23) равна

$$A_m = [I_A(w_A k_A + w_{1A} k_{1B} + w_{2A} k_{2B}) + I_B(w_B k_B + w_{1B} k_{1A} + w_{2B} k_{2A}) - I_C(w_C k_C + w_{1C} k_{1C} + w_{2C} k_{2C})] / 2\pi r_2. \quad (26)$$

Представленная на рис. 4 картина распределения объемных усилий в металле существенным образом зависит от соотношения витков двухполюсной и четырехполюсной обмоток. Количество же силовых вихрей равно сумме пар полюсов применяемых обмоток. Например, четыре вихря возникают, если используется двухполюсная и шестиполюсная обмотки, создающие встречно вращающиеся поля и т.д.

Маловероятным представляется, что движение жидкого металла в кристаллизаторе будет повторять приведенное на рис. 4 распределение усилий. Вынос металла из осевой зоны, вероятно, будет происходить за счет неустойчивости движения. Между тем, путем комбинирования двухполюсной обмотки и одной дугостаторной обмотки, создающими встречное движение магнитных полей, удастся обеспечить одностороннее движение жидкого металла через осевую зону слитка. При этом токовая нагрузка перемешивателя, полагая, например, $w_{1A} = w_{1B} = w_{1C} = 0$, описывается зависимостью

$$A_m = [I_A(w_A k_A + w_{2A} k_{2B}) + I_B(w_B k_B + w_{2B} k_{2A}) - I_C(w_C k_C + w_{2C} k_{2C})] / 2\pi r_2. \quad (27)$$

Под действием этой токовой нагрузки устанавливается распределение объемных электродинамических усилий в жидком металле, показанное на рис. 5. Такое распределение сил будет способствовать интенсификации процессов тепло-массопереноса, выносу металла из осевой зоны, что позволит снизить осевую пористость слитка и повысить его качество.

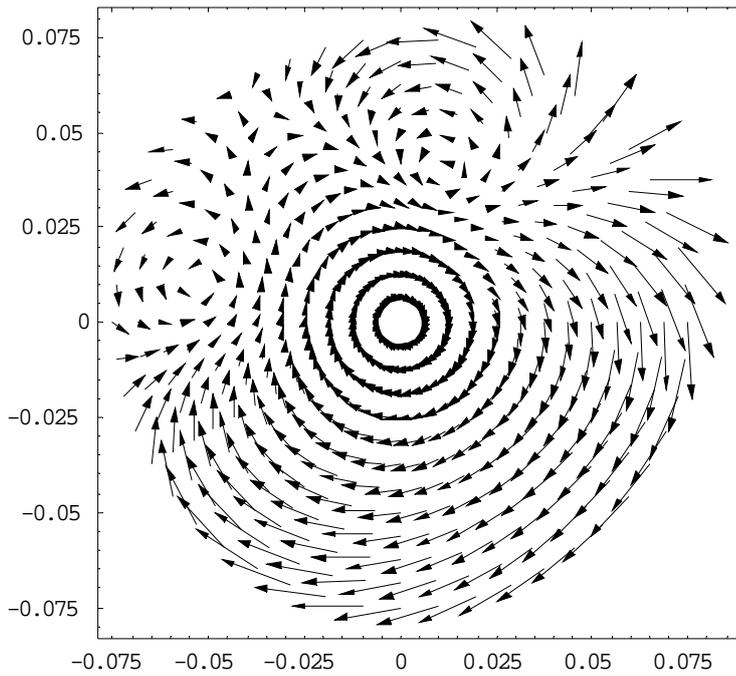


Рис. 5

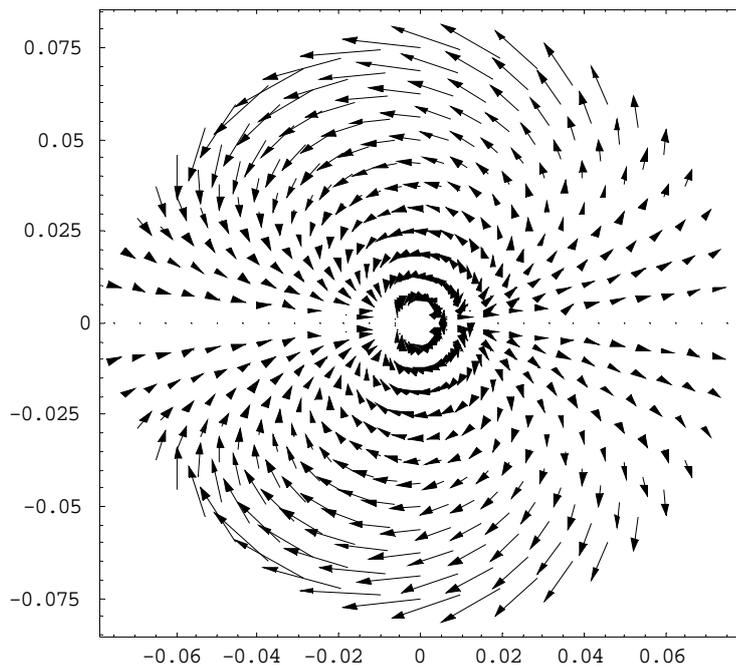


Рис. 6

жидкого металла // Техн. электродинамика. – 2009. – №4. – С. 61–65.

4. Кондратенко И.П., Ращепкин А.П. Двухобмоточный электромагнитный перемешиватель для кристаллизаторов непрерывного литья // Техн. электродинамика. – 2002. – №2. – С.59–63.

5. Лиелпетер Я.Я. Жидкометаллические индукционные МГД-машины. – Рига: Зинатне, 1969. – 246 с.

Недостатком такого исполнения является слабое использование зубцовой зоны, связанное с неполным заполнением пазов обмоткой. В связи с этим предпочтительным представляется исполнение перемешивателя с двумя дугостаторными обмотками, возбуждающими встречно бегущие магнитные поля. Токовая нагрузка такого перемешивателя, полагая

$$w_{1A} = w_{1B} = w_{1C} = w_{2A} = w_{2B} = w_{2C}, \\ w_A = w_B = w_C = 0, \text{ согласно (23) равна}$$

$$A_m = [I_A(w_{1A}k_{1A} + w_{2A}k_{2B}) + \\ + I_B(w_{1B}k_{1B} + w_{2B}k_{2A}) - \\ - I_C(w_{1C}k_{1C} + w_{2C}k_{2C})] / 2\pi r_2. \quad (28)$$

Рассчитанное с использованием этой токовой нагрузки распределение объемных электродинамических усилий в жидком металле показано на рис. 6.

Как видно, такое исполнение перемешивателя также способствует интенсивному выносу металла из осевой зоны слитка.

Таким образом, в работе определены токовые нагрузки круговой и двух дугостаторных обмоток, а также результирующая токовая нагрузка трехобмоточного перемешивателя. Выведены соотношения для расчета распределения φ - и ρ -компонент электродинамических усилий в жидком металле для произвольных схем соединения и конструктивного исполнения обмоток.

1. Вольдек А.И. Индукционные магнетогидродинамические машины с жидкометаллическим рабочим телом. – Л.: Энергия, 1970. – 272 с.

2. Гахов Ф.И., Черский Ю.И. Уравнения типа свертки. – М.: Наука, 1978. – 296 с.

3. Карлов А.Н., Кондратенко И.П., Ращепкин А.П. Анализ электромагнитных полей в цилиндрических кристаллизаторах многообмоточного электромагнитного перемешивателя

Надійшла 22.04.2009