

## МОЩНОСТЬ СИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПЕРЕМЕШИВАТЕЛЯ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА В КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ

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

*Установлены функциональные зависимости и расчетные формулы для определения полной мощности синхронных электромагнитных перемешивателей, включающих синхронный электрический двигатель и вращающуюся магнитную систему постоянных магнитов. Обоснованы требования для обеспечения устойчивого режима работы синхронного перемешивателя и устранения его возможного выпадения из синхронизма. Сформулированы требования к величине тока статора и величине намагниченности постоянных магнитов системы возбуждения, которая используется также для обеспечения в жидком металле магнитной индукции заданной величины. Показано, что при неизменных конструктивных параметрах магнитной системы возбуждения индукцию в жидком металле можно создать большей величины при недо возбужденном режиме работы синхронной машины. Управление режимами работы перемешивателя и величиной магнитной индукции в жидком металле целесообразно осуществлять изменением величины напряжения обмотки статора. Библиограф. 8, табл. 1, рис. 4. **Ключевые слова:** магнитное поле, синхронный электромагнитный перемешиватель, постоянные магниты, непрерывное литье, кристаллизатор.*

Электромагнитное перемешивание (ЭМП) является одним из последних достижений, используемым при непрерывной разливке стали. ЭМП жидкой фазы заготовки непосредственно в кристаллизаторе машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) позволяет повысить качество непрерывнолитой стали – повышает ее чистоту по неметаллическим включениям, улучшает кристаллическую структуру заготовки, подавить ликвационные дефекты и пористость [1,4,8].

Предложенный в работах [2,3,5] синхронный электромагнитный перемешиватель состоит из вращающейся магнитной системы с постоянными магнитами и синхронного электрического двигателя. При этом магнитная система постоянных магнитов и статор электрической машины располагаются соосно так, что полая магнитная система охватывает цилиндрическую стенку кристаллизатора. Вращающаяся магнитная система создает в области расплавленного металла индукцию величиной 0,06 – 0,08 Тл, что позволяет привести жидкий металл в круговое движение со скоростью, достаточной для получения металлургического эффекта при литье стальных заготовок. В работах [3,6] обоснована возможность раздельного решения электромагнитной задачи для нахождения электромагнитных полей магнитной системы на постоянных магнитах и токов статорной обмотки. В обоих случаях особенностью расчета магнитного поля в кристаллизаторе является непостоянство скорости вращения жидкого металла по радиусу, что приводит к необходимости использования итерационных методов расчета скорости, изложенных в работе [2]. Установлено, что скорость вращения жидкого металла существенным образом зависит от режима возбуждения синхронной машины и, соответственно, соотношения намагниченности постоянных магнитов и тока в обмотке статора. Для выбора оптимального соотношения этих параметров целесообразно рассмотреть мощность полифункциональной электрической машины – перемешивателя жидкого металла в кристаллизаторе МНЛЗ.

**Цель работы.** Разработать метод расчета мощности синхронного электромагнитного перемешивателя жидкого металла в кристаллизаторе МНЛЗ.

В модельном представлении принято, что на поверхности гладкой (без пазов) расточки статора радиусом  $r_7$  распределен ток статорной обмотки, который взаимодействует с полем постоянных магнитов, укрепленных на внутренней поверхности полого неферромагнитного цилиндра. Внешний радиус цилиндра –  $r_6$ , внутренний –  $r_5$ . Результатом их взаимодействия является вращение магнитной системы вокруг кристаллизатора с радиусом  $r_3$ . Магнитное поле такой системы замыкается через полость кристаллизатора, взаимодействуя с жидким металлом, заключенным в медной гильзе с

внутренним радиусом  $r$ . Вращающееся магнитное поле возбуждает во всех электропроводных частях кристаллизатора вихревые токи, протекание которых, с одной стороны, сопровождается тепловыми потерями, а с другой – приводит к созданию вращающего момента в жидком металле.

Активная мощность вращающейся с угловой скоростью  $\omega$  магнитной системы возбуждения в условиях установившегося движения металлического расплава, затраченная на покрытие джоулевых потерь в корпусе кристаллизатора, медной гильзе и жидком металле, а также механической мощности вращения жидкого металла, исходя из потока вектора Пойнтинга через цилиндрическую поверхность корпуса кристаллизатора ( $\rho = r_3$ ), равна

$$P_1 = \frac{L}{T} \int_0^{2\pi} \int_0^T r_3 \operatorname{Re}(E_z) \operatorname{Re}(H_\varphi) d\phi dt = \frac{r_3 L f}{2} \operatorname{Re} \left[ \int_0^{1/f} \int_0^{2\pi} E_z (H_\varphi + H_\varphi^*) dt d\phi \right].$$

Значком (\*) отмечено комплексно сопряженное значение функции. Учитывая, что согласно [5]  $\phi = \varphi - \omega t$  и  $dt = -d\phi / \omega$ ,  $\omega = 2\pi f$ ,  $T = 1/f$  и, кроме того,  $E_z = -\partial A_z / \partial t$  и  $\mu_0 H_\varphi = -\partial A_z / \partial \rho$ , окончательно найдем при  $\rho = r_3$  мощность магнитной системы возбуждения

$$P_1 = \frac{2\pi\omega r_3 L}{\mu_0} \operatorname{Re} \sum_{-\infty}^{\infty} i n A_n \frac{\partial A_n^*}{\partial \rho}, \quad (1)$$

где  $L$  – длина машины вдоль продольной оси,  $n$  – параметр дискретного преобразования Фурье,  $A_n$  – преобразованное значение векторного магнитного потенциала на поверхности корпуса кристаллизатора от действия постоянных магнитов [5]  $A_n(-n, \rho) = A_n^*(n, \rho)$  (прямопропорциональна  $I_0$ ). Поскольку реактивная мощность постоянных магнитов равна нулю, полная мощность магнитной системы  $S_1 = P_1$ . Таким образом, мощность синхронного двигателя для вращения магнитной системы возбуждения должна составлять  $P_1$  по (1). Вместе с тем, токами обмотки статора в полости перемешивателя также возбуждается вращающееся магнитное поле, которое вызывает движение жидкого металла и тепловые потери в металле, гильзе и корпусе кристаллизатора. Для обеспечения этих процессов обмоткой статора синхронного двигателя потребляется из сети полная мощность

$$S_2 = i\omega\pi r_7 L \sum_{-\infty}^{\infty} A_n \Big|_{\rho=r_7} A_m^* . \quad (2)$$

Она определена через поток вектора Пойнтинга с поверхности расточки статора ( $\rho = r_7$ ) при амплитуде токовой нагрузки  $A_m$ , преобразованной по Фурье, и осреднения гармонической функции по периоду [7].

Кроме того синхронным перемешивателем из сети потребляется полная мощность, расходуемая на вращение магнитной системы постоянных магнитов. Эта магнитная система является одновременно системой возбуждения синхронного электрического двигателя. Средняя во времени электромагнитная мощность синхронного двигателя, затрачиваемая на вращение магнитной системы возбуждения, может быть определена по найденному в [5] значению векторного магнитного потенциала на поверхности расточки статора ( $\rho = r_7$ ) и величине токовой нагрузки статора [3]

$$S_3 = i\omega\pi r_7 L n A_n(r_7) A_m \Big|_{n=1} . \quad (3)$$

Расчет мощности по (3) проводится только по первой гармонике, поскольку среднее во времени значение электромагнитной мощности не равно нулю лишь при  $n = 1$ .

Очевидно, что устойчивая работа синхронного двигателя возможна только при соблюдении равенства активной мощности, потребляемой из сети на вращение магнитной системы, и активной мощности  $P_1$ , а именно, должно выполняться следующее условие:

$$\operatorname{Re}(S_3) = P_1 . \quad (4)$$

Если  $\operatorname{Re}(S_3) < P_1$ , то синхронный двигатель превысит предел статической перегружаемости и машина выпадет из синхронизма. Для заданного конструктивного исполнения перемешивателя из-

менение  $S_3$  может достигаться варьированием  $A_m$ , т.е. изменением величины фазных токов обмотки перемешивателя [3] или, что то же, изменением величины напряжения питания обмотки.

Поскольку судить об электромагнитных процессах в перемешивателе представляется возможным лишь на основе численных решений уравнений, то в дальнейших расчетах будем полагать известными количественные значения электрофизических параметров материалов и геометрические размеры кристаллизатора, а также магнитной системы с заданными значениями намагниченности постоянных магнитов, принятыми в [2]. Тогда вычисленная по указанным данным активная мощность вращающейся магнитной системы  $P_1$  по (1), выделяющаяся в конструктивных элементах кристаллизатора при равной нулю скорости вращения жидкого металла ( $v = 0$ ), с учетом членов ряда  $-7 \leq n \leq 7$  равна  $P_1 = 5522,1$  Вт.

При тех же условиях, но при средней скорости вращения жидкого металла согласно [2]  $v = (21,7\rho - 1,2 \cdot 10^{35} \rho^{31})$  м/с мощность принимает значение  $P_1 = 5528$  Вт.

Еще один крайний случай, по которому можно судить об адекватности выбранных моделей, заключается в тенденции увеличения мощности, которая выделяется в элементах кристаллизатора при отсутствии жидкого металла в гильзе кристаллизатора, что равнозначно принятию в расчетах значения величины электропроводности жидкого металла  $\sigma$  равной нулю. В этом случае мощность, рассчитанная по предложенной методике, составляет  $P_1 = 5538$  Вт.

Некоторое возрастание  $P_1$  при  $\sigma = 0$  обусловлено увеличением величины индукции в полости перемешивателя, обусловленной отсутствием размагничивающих потоков, вызванных индуцированными токами в жидком металле. Незначительное различие потребляемых мощностей объясняется относительно низкой величиной потерь в жидком металле. Поэтому примем, что энергетические показатели перемешивателя (с удовлетворительной для технических результатов точностью) можно вычислять при допущении  $v = 0$  с использованием аналитических решений для векторных магнитных потенциалов из [3,5].

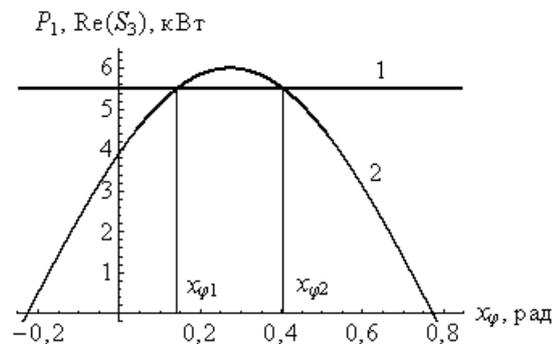


Рис. 1

Условие (4) позволяет определить пространственный сдвиг фазных токов статорной обмотки относительно оси магнитной системы возбуждения. Так при амплитуде фазных токов статорной обмотки  $I_m = 90$  А и указанных в [2] параметрах магнитной системы на рис. 1 построены кривые изменения мощности  $P_1$  (кривая 1) и действительной части мощности  $S_3$  (кривая 2) при изменении пространственного сдвига  $x_\varphi$ . Как видно, имеется два возможных решения уравнения (4):  $x_{\varphi 1} = 0,143$  рад и  $x_{\varphi 2} = 0,403$  рад. Максимальное значение мощности  $\text{Re}(S_3)$  достигает при

$x_{\varphi 0} = (0,143 + 0,403)/2 = 0,273$  рад. При этом угол  $\phi_0 = \pi(1/2 + 1/(2m) + \Delta\phi + x_\varphi)$  между вектором тока и вектором результирующей ЭДС  $E_0$  обмотки статора должен быть равен  $\pi$ . Последняя пропорциональна результирующему потоку возбуждения на поверхности расточки перемешивателя с учетом магнитных потоков от токов, которые индуцированы магнитной системой постоянных магнитов в конструктивных элементах кристаллизатора. Т.е. при  $x_{\varphi 0} = 0,273$  рад вектор тока обмотки перемешивателя должен совпадать с вектором  $(-E_0)$ , при котором достигается максимум мощности  $\text{Re}(S_3)$ . Следовательно угол отставания  $\Delta\phi$  результирующего потока магнитной системы возбуждения от магнитного потока магнитной системы на постоянных магнитах при числе фаз  $m=3$  равен

$$\Delta\phi = 1 - 1/2 - 1/(2m) - x_{\varphi 0} = 0,06 \text{ рад.} \quad (5)$$

Тогда при принятой величине фазных токов синхронный перемешиватель может работать при двух значениях угла  $\phi$

$$\phi_1 = \pi(1/2 + 1/(2m) + 0,06 + x_{\varphi 1}) = 0,87\pi \text{ рад,} \quad \phi_2 = \pi(1/2 + 1/(2m) + 0,06 + x_{\varphi 2}) = 1,13\pi \text{ рад,} \quad (6)$$

т.е. ток отстает от ЭДС ( $-E_0$ ) или опережает ее на  $0,13\pi$  рад, которые (без учета потерь в обмотках статора) условно характеризуют режимы недовозбуждения или перевозбуждения электрической машины с генерацией индуктивной или емкостной составляющей электрической мощности в сеть.

Результирующий поток возбуждения магнитной системы  $\Phi_0$ , поток реакции токов обмотки статора  $\Phi_a$  и суммарный поток через зазор  $\Phi_\delta$  пропорциональны соответствующим радиальным составляющим индукции на поверхности рашотки статора перемешивателя во вращающейся вместе с ротором системе координат, которые описываются по основной гармонике зависимостями

$$B_{\rho 0} = -(i/r_7)A_{1n}(r_7)e^{-i\phi}, \quad B_{\rho a} = -(i/r_7)A_n(r_7)e^{-i\phi}, \quad B_{\rho \delta} = -(i/r_7)(A_{1n}(r_7) + A_n(r_7))e^{-i\phi}. \quad (7)$$

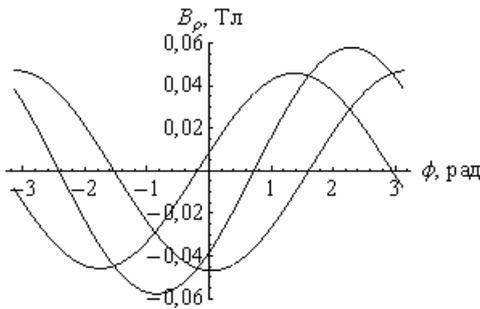


Рис. 2

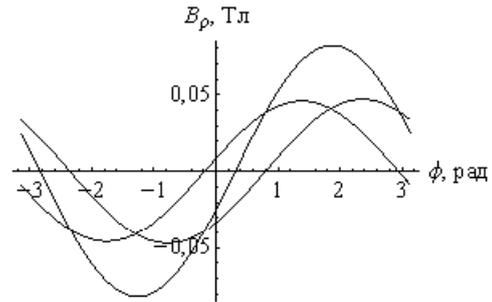


Рис. 3

Приведенные зависимости магнитной индукции показаны на рис. 2 (режим перевозбуждения,  $x_{\varphi 2} = 0,403$  рад) и рис. 3 (режим недовозбуждения,  $x_{\varphi 1} = 0,143$  рад). Как видно, результирующий поток возбуждения отстает от потока постоянных магнитов в обоих случаях на величину  $\pi \Delta\phi \approx -0,2$  рад, что практически совпадает с величиной угла, полученной по (5). Кроме того, из сопоставления величин по рис. 2 и рис. 3 следует, что в режиме недовозбуждения суммарная величина магнитной индукции через зазор ( $B_{\rho \delta}$ ) возрастает по сравнению с режимом перевозбуждения, что, в свою очередь, приводит также к возрастанию магнитной индукции в жидком металле и повышению силового воздействия магнитного поля на жидкий металл.

Выполняя суммирование в (1) и (2) по  $n$ , например, от  $-7$  до  $+7$ , найдем, что мощность вращения магнитной системы возбуждения  $S_1$  и мощность  $S_2$  соответственно равны

$$S_1 = P_1 = (5522,1 + 0i) \text{ ВА}, \quad S_2 = (1121,7 + 6113,6i) \text{ ВА},$$

причем они принимают одинаковые значения как при недовозбуждении ( $x_\varphi = x_{\varphi 1}$ ), так и при перевозбуждении ( $x_\varphi = x_{\varphi 2}$ ). Если ограничиться первой гармоникой ( $n=1$ ), то  $S_2|_{n=1} = (1117,5 + 6113,6i) \text{ ВА}$  и, как видно, она незначительно отличается от мощности, полученной суммированием гармоник. Таким образом, с удовлетворительной точностью в технических расчетах можно ограничиться определением  $S_2$  по первой гармонике. Тогда полную электромагнитную мощность синхронного перемешивателя  $S_4$  можно определить в режиме недовозбуждения ( $x_\varphi = x_{\varphi 1}$ ) как

$$S_4 = S_2 + S_3 = i\omega \pi r_7 L (A_{1n}(r_7) + A_n(r_7)) A_m^*|_{n=1} = (6639,6 + 8448,2i) \text{ ВА}, \quad (8)$$

а при перевозбуждении ( $x_\varphi = x_{\varphi 2}$ ) мощность  $S_4 = (6639,6 + 3676,7i) \text{ ВА}$ . С другой стороны, суммирование мощности вращения магнитной системы и статорной обмотки дает следующее значение:  $S_1 + S_2 = S_5 = (6643,8 + 6113,6i) \text{ ВА}$ . Из сопоставления электромагнитных мощностей  $S_4$  и  $S_5$  видно, что достигнуто удовлетворительное совпадение активных составляющих мощности синхронного перемешивателя и наблюдается заметное различие реактивных мощностей. Это объясняется тем, что при недовозбуждении реактивная мощность потребляется из сети, а при перевозбуждении отдается в сеть

$$S_3 \Big|_{\varphi_A = \varphi_{A1}} = i\omega \pi r_7 L A_n(r_7) A_m^* \Big|_{\varphi_A = \varphi_{A1}} = (5522,1 + 2385,7i) \text{ ВА} , \quad (9)$$

$$S_3 \Big|_{\varphi_A = \varphi_{A2}} = i\omega \pi r_7 L A_n(r_7) A_m^* \Big|_{\varphi_A = \varphi_{A2}} = (5522,1 - 2385,7i) \text{ ВА} , \quad (10)$$

но ввиду малости реактивных мощностей в  $S_3$  в обоих случаях реактивная составляющая полной электромагнитной мощности  $S_4$  синхронного перемешивателя все же представляет индуктивную нагрузку для сети. Активное и индуктивное сопротивления фаз обмотки статора могут быть определены по известным соотношениям, например, [6]

$$r_1 = \frac{2(L + 1,5\pi r_7/p)w}{\sigma_m \cdot 20 \cdot 10^{-6}} = 0,5 \text{ Ом}, \quad x_1 = 2\mu_0 \omega(1,1L + 0,57q\pi r_7) \frac{w^2}{pq} = 0,99 \text{ Ом}, \quad (11)$$

где  $\sigma_m$  – удельная электропроводность проводников статорной обмотки.

Тогда, учитывая, что потери активной мощности и реактивную мощность обмотки можно определить как

$$S_6 = m I_A I_A^* (r_1 + i x_1) / 2 = (6096 + 12019i) \text{ ВА}, \quad (12)$$

результатирующая потребляемая из сети полная мощность перемешивателя равна

$$S_7 \Big|_{x_\varphi = x_{\varphi 1}} = S_6 + S_4 = (12735 + 20467i) \text{ ВА}, \quad S_7 \Big|_{x_\varphi = x_{\varphi 2}} = (12735 + 15676i) \text{ ВА} . \quad (13)$$

В обоих случаях синхронный перемешиватель представляет для сети активно-индуктивную нагрузку, причем большей индуктивностью обладает перемешиватель в режиме недо возбуждения. При этом результирующая магнитная индукция в жидком металле становится существенно выше, и возрастают электродинамические усилия, приводящие к более интенсивному перемешиванию жидкого металла.

Таким образом, помимо условия (4) необходимо также для обеспечения требуемой скорости вращения расплава возбудить в жидком металле одинаковое силовое воздействие как при недо возбуждении, так и при перевозбуждении, что достигается при равной результирующей радиальной составляющей магнитной индукции при  $\rho = r$  по абсолютной величине, например, 0,067 Тл [5]. При соответствующих значениях пространственного сдвига обмотки ( $x_\varphi$ ) величины фазного тока ( $I_A$ ), которому пропорциональна величина векторного магнитного потенциала  $A1_n$ , и величина намагниченности постоянных магнитов ( $I_0$ ), возбуждающих векторный магнитный потенциал  $A_n$ , магнитная индукция должна удовлетворять условию

$$B_\rho = \left| \frac{-i}{r} (A1_n(r) + A_n(r)) \Big|_{n=1} \right| = 0,067 \text{ Тл}. \quad (14)$$

Поскольку система уравнений (4) и (14) не имеет однозначного решения, для приближенного определения корней этой системы представляется целесообразным воспользоваться контурным графиком электромагнитной мощности  $\text{Re}(S_3)$  с многоуровневым делением. При этом в плоскости чертежа изображаются проекции линий, по которым пересекается объемная поверхность  $\text{Re}(S_3)$  с секущими плоскостями уровня мощности.

Построение контурного графика начнем с определения граничных значений. Пусть, например, мощность  $P_1 = 5522,1 \text{ Вт}$  соответствует 11-му уровню величины  $\text{Re}(S_3)$ , разделенной на 20 уровней. Тогда максимальное значение  $\text{Re}(S_3)$  должно принимать величину  $\text{Re}(S_3) \Big|_{\max} = P_1 \cdot 20 / 11 = 10040,2 \text{ Вт}$ . Как было указано ранее, максимальное значение мощности  $\text{Re}(S_3) \Big|_{\max}$  принимает при величине  $x_\varphi = 0,273$  рад, когда ток  $I_A$  совпадает по фазе с  $-E_0$ . Ток в обмотке при этом составляет  $I_A \Big|_{\max} = 150,2 \text{ А}$ . Это легко показать, если определить мощность  $\text{Re}(S_3)$  по (3) при  $x_\varphi = 0,273$  рад и токе  $I_A = 100 \text{ А}$ , которая при этом равна  $\text{Re}(S_3) = 6683,8 \text{ Вт}$ . Тогда, поскольку  $S_3$  согласно (3) линейно зависит от  $I_A$ , величина фазного тока, при котором достигается максимальная мощность  $\text{Re}(S_3) \Big|_{\max}$ , равна

$I_A|_{\max} = [I_A \cdot \operatorname{Re}(S_3)|_{\max}] / \operatorname{Re}(S_3) = 150,2$  А, и эта зависимость выполняется при любых предварительно произвольно принятых величинах  $I_A$ .

На рис. 4 показан контурный график  $\operatorname{Re}(S_3)$ , на котором координатам  $x_\varphi = 0,273$  рад и  $I_A = 150,2$  А соответствует значение  $\operatorname{Re}(S_3)|_{\max}$ , а при  $x_\varphi = -0,227$  рад и  $I_A = 0$  мощность  $\operatorname{Re}(S_3) = 0$ . Сплошным кривым соответствуют линии равных уровней мощности  $\operatorname{Re}(S_3)$ , которая разделена на 20 уровней, различающихся между собой на величину  $\frac{\operatorname{Re}(S_3)|_{\max}}{20} = \frac{P_1}{11} = \frac{10040,2}{20} = 502$  Вт. В сущности, эти кривые являются линиями пересечения плоскостей  $P_k = 502 \cdot k$ ,  $k = \{1 \dots 20\}$  с поверхностью  $\operatorname{Re}(S_3)$ , причем величине  $P_k$  при  $k=20$  соответствует значение  $\operatorname{Re}(S_3)|_{\max}$ , а при  $k=11$  –  $P_1$ . Учитывая, что  $P_1$  согласно (1) пропорциональна  $I_0^2$ , а величина  $P_1 = 5522,1$  Вт была получена при величине намагниченности постоянных магнитов  $I_0 = 9 \cdot 10^5$  А/м, то точке контурного графика  $\operatorname{Re}(S_3)|_{\max}$  можно поставить в соответствие величину намагниченности, равную

$$I_0 = \sqrt{10040,2 \cdot 9^2 / 5522,1 \cdot 10^5} = 12,1356 \cdot 10^5 \text{ А/м,}$$

и, следовательно, определенным линиям равного уровня контурного графика – линии

$$I_0 = \sqrt{502 \cdot k \cdot 9^2 / 5522,1 \cdot 10^5} \text{ А/м.}$$

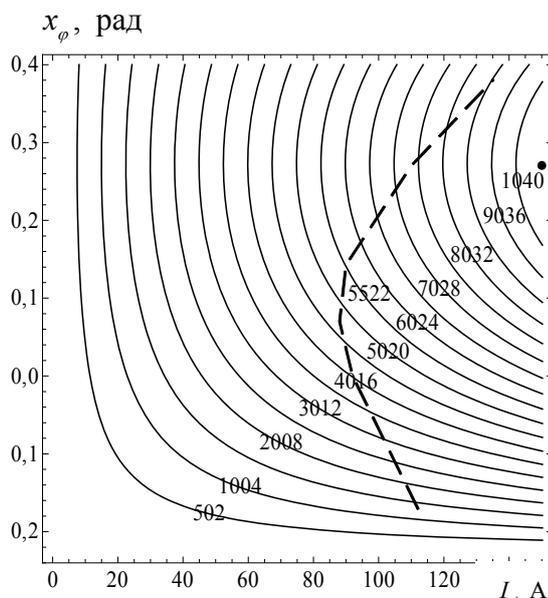


Рис. 4

лишь при вполне определенных значениях  $I_A, I_0, x_\varphi$  выполняется условие (14), при котором обеспечивается возбуждение в жидком металле при  $\rho = r$  результирующей радиальной составляющей магнитной индукции по абсолютной величине, равной заданному значению. На рис. 4 штриховой линией определены величины  $I_A, I_0, x_\varphi$ , при которых обеспечивается выполнение условия (14). Причем правее от этой кривой индукция  $B_\rho$  по (14) для каждого  $I_0$  превышает 0,067 Тл, а левее она не достигает этой величины.

При заданном конструктивном исполнении электромагнитного перемешивателя регулировать величину магнитной индукции в жидком металле можно изменением величины тока статорной обмотки  $I_A$  путем изменения действующего значения фазного напряжения источника питания перемешивателя  $U$ . В таблице показано, что при изменении напряжения  $U$  от 63 до 53 В амплитудная величина тока  $I_A$  изменяется от 90 А отстающего ( $\phi = -0,13$  рад) от  $-E_0$  до 90 А опережающего ( $\phi = 0,13$  рад)  $-E_0$ , проходя через минимальное значение 82,6 А, при котором ток  $I_A$  совпадает ( $\phi = 0$ )

с напряжением  $-E_0$ . При таком изменении напряжения величина магнитной индукции в жидком металле изменяется от 0,0673 до 0,0476 Тл.

$ S_7 $ , кВА	$U$ , В	$I_A$ , А	$\varphi_C$ , рад	$\phi$ , рад	$\theta$ , рад	$B_p$ , Тл
24,2	63	90	0,323	-0,13	0,193	0,0673
19,1	55	82,6	0,293	0	0,293	0,0563
20,2	53	90	0,283	0,13	0,413	0,0476

Зная величину мощности  $S_7$  в соответствии с (13), угол между напряжением и током сети определяется из зависимости

$$\varphi_c = \arccos(\operatorname{Re} S_7 / |S_7|) / \pi,$$

а угол статической устойчивости – как  $\theta = \varphi_c + \phi$ . Как видно, при перевозбуждении он близок уже к предельному значению 0,5 рад. Величина действующего значения фазного напряжения источника питания перемешивателя  $U$  по известной величине  $|S_7|$  определяется из соотношения

$$U = \sqrt{2} |S_7| / (m I_A).$$

При этом величина фазного тока  $I_A$  представлена амплитудным значением, поскольку предыдущие расчеты выполнены по заданной величине амплитудного тока.

**Выводы.** 1. При определении мощности синхронного электромагнитного перемешивателя разработанным методом расчета скорость вращения жидкого металла в кристаллизаторе можно полагать равной нулю.

2. С достаточной для технических расчетов точностью при определении мощности перемешивателя можно ограничиться расчетом для первого члена ряда Фурье ( $n=1$ ).

3. При заданных размерах и величине намагниченности постоянных магнитов уровень магнитной индукции в жидком металле возрастает в режимах недовозбуждения двигателя, что приводит к увеличению силового воздействия на жидкий металл. В режимах перевозбуждения представляется возможным снизить потребляемую из сети индуктивную мощность.

4. С увеличением намагниченности постоянных магнитов системы возбуждения, при прочих равных условиях, необходимая для обеспечения статической устойчивости активная мощность синхронного перемешивателя существенно возрастает.

1. Арно П., Миньо Ж.Ф., Бира Ж.П., Руэ Ж. Электромагнитное перемешивание по способу «Магнетогир» на МНЛЗ // Черные металлы. – 1980. – № 22. – С. 9 – 13.

2. Виштак Т.В., Карлов А.Н., Кондратенко И.П., Ращепкин А.П. Скорость вращения жидкого металла в кристаллизаторе с синхронным электромагнитным перемешивателем // Технічна електродинаміка. – 2014. – № 2. – С. 67 – 72.

3. Виштак Т.В., Карлов А.Н., Кондратенко И.П., Ращепкин А.П. Магнитное поле токов статорной обмотки синхронного двигателя с полым ротором // Технічна електродинаміка. – 2013. – № 5. – С. 41 – 46.

4. Грачев В.Г., Шифрин И.Н., Сивак Б.А., Кузмина Л.И., Солодовник Ф.С. Электромагнитное перемешивание на сортовых, блюмовых и слябовых МНЛЗ // Сталь. – 2002. – № 11. – С. 21 – 26.

5. Кондратенко И.П., Ращепкин А.П., Виштак Т.В., Карлов А.Н. Магнитное поле системы возбуждения на постоянных магнитах синхронного двигателя с полым ротором // Технічна електродинаміка. – 2013. – № 2. – С. 58–63.

6. Костенко М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины. Часть 2. Машины переменного тока. – Ленинград: Энергия, 1973. – 648 с.

7. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. – М.: Наука, 1982. – 620 с.

8. Маточкин В.А. Новые технические решения и этапы реконструкции МНЛЗ-3 на Белорусском металлургическом заводе // Сталь. – 2002. – № 10. – С. 26 – 28.

УДК 621.313.8

## ПОТУЖНІСТЬ СИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПЕРЕМІШУВАЧА РІДКОГО МЕТАЛУ В КРИСТАЛІЗАТОРІ

**Т.В. Виштак, О.М. Карлов**, канд.техн.наук, **І.П. Кондратенко**, докт.техн.наук, **А.П. Ращепкін**, докт.техн.наук  
**Інститут електродинаміки НАН України,**  
**пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна.** e-mail: [dep7ied@ukr.net](mailto:dep7ied@ukr.net)

Встановлено функціональні залежності та розрахункові формули для визначення повної потужності синхронних електромагнітних перемешувачів, що поєднують у собі синхронну електричну машину і обертову маг-

нітну систему постійних магнітів. Обґрунтовано вимоги для забезпечення сталого режиму роботи синхронного перемішувача та усунення його можливого випадання з синхронізму. Сформульовано вимоги до величини струму статора і величини намагніченості постійних магнітів системи збудження, яка використовується також для забезпечення в рідкому металі магнітної індукції заданої величини. Показано, що при незмінних конструктивних параметрах магнітної системи збудження в рідкому металі можна створити індукцію більшої величини при недозбудженому режимі роботи синхронної машини. Керування режимами роботи перемішувача і величиною магнітної індукції в рідкому металі доцільно здійснювати зміною величини напруги обмотки статора. Бібл. 8, табл. 1, рис. 4.

**Ключові слова:** магнітне поле, синхронний електромагнітний перемішувач, постійні магніти, безперервне лиття, кристалізатор.

## POWER OF SYNCHRONOUS ELECTROMAGNETIC STIRRER OF LIQUID METAL IN THE MOLD

**Vishtak T.V., Karlov A.N., Kondratenko I.P., Rashchepkin A.P.**  
Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,  
Peremohy pr., 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine.  
e-mail: [dep7ied@ukr.net](mailto:dep7ied@ukr.net)

*Established functional relationships and formulas for calculating the full energy of synchronous electromagnetic stirrers, combining synchronous electric machine and a rotating magnetic system of permanent magnets. Grounded requirements to ensure stable operation of the synchronous stirrer and eliminate its possible falling out of synchronism. The requirements for the magnitude of the stator current and the magnitude of the magnetization of the permanent magnets of the excitation system, which is also used to provide liquid metal in the magnetic induction of a given value. It is shown that under the same designs of the magnetic induction field system in the liquid metal can create higher value for underexcited operation mode of a synchronous machine. Modes control stirrer and the magnitude of the magnetic induction in the liquid metal it is expedient to change the voltage of the stator winding.*

References 8, table 1, figures 4.

**Key words:** the magnetic field, the synchronous electromagnetic stirrer, permanent magnets, the continuous casting, mold.

1. Arno P., Mino J.F., Bira J.P., Rue J. Electromagnetic stirring in a manner "Magnetogir" in CCM // Chornye metaly. – 1980. – No 22. – Pp. 9 – 13. (Rus)
2. Vishtak T.V., Karlov A.N., Kondratenko I.P., Rashchepkin A.P. Rotational speed of liquid metal in the mold with synchronous electromagnetic a stirrer // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2014. – No 2. – Pp. 67 – 72. (Rus)
3. Vishtak T.V., Karlov A.N., Kondratenko I.P., Rashchepkin A.P. Magnetic field of currents a winding stator of the synchronous motor with hollow a rotor // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2013. – No 5. – Pp. 41–46. (Rus)
4. Grachev V.G., Shifrin I.N., Sivak B.A., Kuzmin L.I., Solodovnik F.S. Electromagnetic stirring on the variety, bloom and slab casters // Stal. – 2002. – No 11. – Pp. 21 – 26. (Rus)
5. Kondratenko I.P., Rashchepkin A.P., Vishtak T.V., Karlov A.N. Magnetic field the system excitation on permanent magnets of the synchronous motor with hollow a rotor // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2013. – No 2. – Pp. 58 – 63. (Rus)
6. Kostenko M.P., Piotrowsky L.M. Electric machines. Part 2 - Machine alternating-current. – Leningrad: Energiia, – 1973. – 648 p. (Rus)
7. Landau L.D., Lifshits E.M. Electrodynamics of Continuous Media. – Moskva: Nauka, 1982. – 620 p. (Rus)
8. Matochkin V.A. New technical solutions and stages of reconstruction CCM-3 Belarusian Steel Works // Stal. – 2002. – No 10. – Pp. 26–28. (Rus)

Надійшла 15.10.2014  
Остаточний варіант 20.03.2015