

**СИНХРОННЫЙ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПЕРЕМЕШИВАТЕЛЬ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА В КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ МАШИН НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ ЗАГОТОВОК СТАЛИ**

**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)

*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. 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 и токами обмотки статора. Разработан итерационный численно-аналитический метод для расчета распределения скорости вращения жидкого металла в кристаллизаторе. Установлены функциональные зависимости максимальной скорости металла у фронта кристаллизации на выходе из перемешивателя и его мощности от частоты тока питания. Выведены функциональные зависимости и расчетные формулы для определения энергетических показателей синхронных электромагнитных перемешивателей. Установлены 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 для обеспечения в жидком металле магнитной индукции заданной величины. Показано, что при одинаковых исполнениях магнитной системы возбуждения большую индукцию в жидком металле можно создать в режиме недо возбуждения. Управление режимами работы перемешивателя и величиной магнитной индукции в жидком металле осуществляется изменением величины напряжения обмотки статора. Библ. 6.*

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

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 [2] асинхронного двигателя, возбуждающего в области жидкого металла вращающееся магнитное поле. Его силовое действие 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 требуется значительная токовая нагрузка статора. Это приводит к тому, что даже при обычно используемой частоте тока в обмотке порядка 5 Гц мощность преобразователя частоты достигает величины 60 кВА. При этом потребляемая активная мощность не превышает 10 кВт, причем активная составляющая электромагнитной мощности составляет 5 кВт, а потери в обмотке – 5 кВт. Поэтому представляется обоснованным возбуждать требуемое магнитное поле магнитной системой на постоянных магнитах [3], вращение которой с заданной частотой обеспечивается клиноременной или зубчатой передачей от двигателей мощностью 10 кВт. Известно также исполнение, блочное исполнение такой магнитной системы с асинхронным приводом [4], в котором массивное ферромагнитное ярмо магнитной системы с медным покрытием является ротором асинхронного двигателя. Достоинство такой системы – возможность на диаметре расточки статора, приблизительно равном 0,5 м, выполнить многополюсный двигатель и питать его от трехфазной промышленной сети. 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. 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.

На основе предложенного модельного представления кристаллизатора разработан метод расчета распределения результирующего магнитного поля в конструктивных элементах кристаллизатора непрерывного литья заготовок, создаваемого системой возбуждения [5] на постоянных магнитах и токами статорной обмотки

синхронного магнитоэлектрического перемешивателя [6], выполненного в виде двухполюсного синхронного двигателя с полым ротором.

Особенностью расчета магнитного поля в кристаллизаторе является непостоянство скорости вращения жидкого металла по радиусу, что приводит к необходимости использования итерационных методов расчета скорости жидкого металла в гильзе кристаллизатора. Для этого на основе условий сопряжения сформулированы граничные условия на поверхности жидкого металла при произвольной функциональной зависимости скорости движения металла, которые используются в итерационном процессе определения магнитного поля и его силового воздействия.

Азимутальная электродинамическая сила определяется в результате взаимодействия аксиальной составляющей плотности тока и результирующего магнитного поля в жидком металле. В свою очередь, полученное значение электродинамической силы полагается постоянной на шаге итерации и используется для определения начальной скорости на следующем шаге итерации. В первой итерации начальная скорость вращения полагается равной нулю. Принимая во внимание, что за время одной итерации стальная заготовка смещается вдоль оси на определенную скоростью вытяжки величину, то каждой итерации можно поставить в соответствие распределение скорости вращения по высоте активной зоны перемешивателя.

На основе проведенного анализа установлено, что скорость вращения жидкого металла существенным образом зависит от режима возбуждения синхронной машины. Так, в режиме недовозбуждения результирующее магнитное поле возрастает, что приводит к возрастанию вращающих электродинамических сил и соответственно скорости вращения жидкого металла. Поэтому, при одинаковых магнитах и токах обмотки статора существенно повысить результирующее магнитное поле в жидком металле можно лишь в режиме недовозбуждения. Скорость вращения металла также повышается при увеличении частоты питания обмоток статора. Однако прямо пропорциональное увеличение возможно лишь до частоты 6 Гц. Дальнейшая динамика изменения скорости снижается и приходит к насыщению уже при частоте 12 Гц для рассматриваемого конструктивного исполнения перемешивателя. Кроме того, при этом резко возрастает потребляемая мощность перемешивателя и потери в конструктивных элементах кристаллизатора.

Исходя из потока вектора Пойтинга через цилиндрическую поверхность перемешивателя, определена мощность вращающейся магнитной системы возбуждения в условиях установившегося движения расплава, необходимая на покрытие джоулевых потерь в корпусе кристаллизатора, медной гильзе и жидком металле, а также механической мощности вращения жидкого металла. Эта мощность должна компенсироваться мощностью синхронного двигателя. Вместе с тем, токами обмотки статора в полости перемешивателя также возбуждается вращающееся магнитное поле, которое вызывает движение жидкого металла и джоулевы потери в металле, гильзе и корпусе кристаллизатора. Для обеспечения этих процессов определена потребляемая из сети полная мощность синхронного двигателя. Установлено, что для определения энергетических показателей синхронного магнитоэлектрического перемешивателя наружного исполнения можно полагать скорость вращения жидкого металла в кристаллизаторе равной нулю.

Показана возможность регулирования скорости вращения металла в гильзе кристаллизатора путем изменения тока обмотки статора при регулировании величины напряжения питания синхронного перемешивателя с возбуждением на постоянных магнитах.

Установлено, что магнитная энергия в полости перемешивателя недостаточна для эффективного использования режима перевозбуждения с целью компенсации потребляемой из сети индуктивной мощности и, таким образом, для устойчивой работы двигателя необходимо из сети потреблять реактивную мощность.

Активная мощность синхронного перемешивателя существенно возрастает с ростом намагниченности постоянных магнитов системы возбуждения.

1. Виштак Т.В., Карлов А.Н., Кондратенко И.П., Ращепкин А.П. Магнитное поле токов статорной обмотки синхронного двигателя с полым ротором // Техн. електродинаміка. – 2013. – № 5. – С. 41–46.
2. 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.
3. Кондратенко И.П., Ращепкин А.П., Виштак Т.В., Карлов А.Н. Магнитное поле системы возбуждения на постоянных магнитах синхронного двигателя с полым ротором // Техн. електродинаміка. – 2013. – №2. – С. 58–63.
4. Патент UA №81579, Україна. МПК В22D 27/02, Н02К 17/02. Пристрій для електромагнітного перемішування металевого розплаву / Білобров Ю.М., Кондратенко І.П., Ращепкін А.П.
5. Beitelman L., Mulcahy J.A. Flow control in the meniscus of continuous casting mold with an auxiliary A.C. magnetic field // Int. Symp. on Electromagnetic Processing of Materials, Nagoya, ISIJ. – 1994. – Pp. 235 – 241.
6. T.Kuwano, N.Shigematsu, F.Hoshi, H.Ogiwara. Металургические проблемы непрерывной разливки нержавеющей стали // Труды международного конгресса (London, 1982) "Достижения в области непрерывной разливки стали". – М.: Металлургия, 1987. – 224 с.

**СИНХРОННИЙ МАГНІТОЕЛЕКТРИЧНИЙ ПЕРЕМІШУВАЧ РІДКОГО МЕТАЛУ В КРИСТАЛІЗАТОРІ МАШИНИ БЕЗПЕРЕРВНОГО ЛИТТЯ ЗАГОТОВОК СТАЛІ****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)**

*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 спільно з струмами обмотки статора. При довільній швидкості обертання рідкого металу введене граничні умови для магнітного потенціалу на поверхні заготовки і знайдено розподіл магнітного поля в порожнині перемішувача, створеного постійними магнітами ротора і струмами обмотки статора. Розроблено ітераційний чисельно-аналітичний метод для розрахунку розподілу швидкості обертання рідкого металу в кристалізаторі. Встановлено функціональні залежності максимальної швидкості металу на фронті кристалізації на виході з перемішувача і його потужності від частоти струму живлення. Виведено функціональні залежності та розрахункові формули для визначення енергетичних показників синхронних електромагнітних перемішувачів. Встановлено 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 для забезпечення в рідкому металі магнітної індукції заданої величини. Показано, що при однакових виконаннях магнітної системи збудження більшу індукцію в рідкому металі можна створити в режимі недозбудження. Управління режимами роботи перемішувача і величиною магнітної індукції в рідкому металі здійснюється зміною величини напруги обмотки статора. Бібл. 6.*

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

**THE SYNCHRONOUS MAGNETOELECTRICAL STIRRER OF THE LIQUID METAL IN THE MOLD OF THE CONTINUOUS CASTING MACHINE THE STEEL****Kondratenko I.P., Rashchepkin A.P.****Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,****pr. Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine,****e-mail: [dep7ied@ukr.net](mailto: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. 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 and currents of the stator winding. Developed an iterative numerical-analytical method for calculating the distribution of the rotational speed of the liquid metal in the mold with synchronous electromagnetic a stirrer. The functional dependence of the maximum velocity of the metal near the crystallization front at the exit of the stirrer and him the power on the frequency a supply current is set. We derive the functional dependence, and formulas for calculating the energy performance of synchronous electromagnetic stirrer in the continuous casting molds. Formulated the requirements for the sustainable operation of synchronous electromagnetic stirrer and eliminate its possible falling out of synchronism. Formulated the requirements to the magnitude of the stator current and the magnitude of the magnetization of permanent magnet excitation system for excitation the magnetic induction given value in a liquid metal. It is shown that for identical versions of magnet excitation system greater a magnitude the magnetic induction in the liquid metal can be created in the mode under excitation. Control modes of the stirrer and the magnitude of the magnetic induction in the liquid metal is achieved varying the voltage of the stator winding. References 6.*

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

1. 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)

2. Grachev V.G., Shifrin I.N., Sivak B.A., Kuzmin L.I., Solodovnik F.S. Electromagnetic stirring on the sort, bloom and slab casters // Stal. – 2002. – No. 11. – P. 21–26. (Rus)

3. 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. 58–83. (Rus)

4. Patent №81579, UA, IPC B22D 27/02, H02K 17/02. A device for electromagnetic stirring of liquid metal / Bilobrov Yu.M., Kondratenko I.P., Rashchepkin A.P.

5. Beitelman L., Mulcahy J.A. Flow control in the meniscus of continuous casting mold with an auxiliary A.C. magnetic field // Int. Symp. on Electromagnetic Processing of Materials, Nagoya, ISIJ. – 1994. – Pp. 235 – 241.

6. Kuwano T., Shigematsu N., Hoshi F., Ogiwara H. Metallurgical problem for continuous casting of stainless steel // Proc. Int. Advances in continuous casting of steel. Proceedings of the International Congress (London, 1982) – Moskva: Metallurgiya, 1987. – 224 p. (Rus)

Надійшла 17.02.2014