

## **Выводы**

Для многих потенциально опасных объектов, к которым принадлежит ССЭ, характерны старение основных фондов, выработка сроков службы остаточного ресурса. Все это приводит к тому, что растет число аварий, приводящих к перерывам электроснабжения потребителей, травматизму людей и электропатологии животных. Система сельского электроснабжения в настоящее время не удовлетворяет условиям электромагнитной совместимости, как следствие, ухудшаются показатели качества электроэнергии. Для поддержания высокой эффективности функционирования ССЭ требуется мониторинг и диагностика основных ее показателей, анализ опасностей и рисков, связанных с эксплуатацией системы сельского электроснабжения. Это требует в свою очередь поиска новых нетривиальных подходов, направленных на выработку оптимальных решений в области управления рисками человеко-машинных систем.

## **Литература**

1. Вентцель Е.С. Исследование операций. – М.: Сов. радио, 1972.
  2. Основы электромагнитной совместимости: учеб. для вузов / под ред. Р.Н. Карякина; Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул: Алт. полиграф. комбинат, 2007.
  3. Руденко Ю.Н., Ушаков И.А. Надежность систем энергетики. – М.: Энергоатомиздат, 1984.
  4. Анализ рисков отказов при функционировании потенциально опасных объектов/ Н.А. Махутов, М.М. Гаденин, А.О. Чернявский [и др.] // Проблемы анализа риска. – 2001. – Т. 9. – № 3.
  5. Рябинин И.А., Черкесов Г.Н. Логико-вероятностные методы исследования надежности структурно-сложных систем. – М.: Радио и связь, 1981.
- 

УДК 669.715

*R.M. Христинич, A.P. Христинич, E.V. Христинич*

## **ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИНДУКЦИОННОЙ МАШИНЫ С ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИМ РАБОЧИМ ТЕЛОМ**

*В статье приведены результаты математического моделирования индукционной машины с жидкостным рабочим телом на основе электромагнитного перемешивателя жидкой сердцевины слитка. Проведен анализ характеристик индукционной машины и определены пути повышения эффективности ее работы.*

**Ключевые слова:** индукционная машина, жидкостное рабочее тело, эффективность работы, характеристики индукционной машины.

*R.M. Khristinich, A.R. Khristinich, E.V. Khristinich*

## **ENERGY CHARACTERISTICS OF THE INDUCTION MACHINE WITH THE LIQUID-METAL WORKING BODY**

*The results of mathematical modeling of the induction machine with the liquid-metal working body on the basis of the electromagnetic mixer of the bar liquid core are given in the article. The analysis of the induction machine characteristics is conducted and the ways of its work efficiency increase are defined.*

**Key words:** induction machine, liquid metal working body, work efficiency, induction machine characteristics.

---

Индукционная машина с жидкостным рабочим телом имеет свои особенности, отличные от классического асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. Распределение усилий в жидкостном рабочем теле носит неравномерный характер, что вызывает образование течений электропроводной жидкой фазы. Скорость течения и траектории движения электропроводной жидкой фазы в рабочем теле индукционной машины возникают под действием электродинамических сил, обусловленных электромагнитным полем индуктора (статора). Многокомпонентный характер движения слоев жидкостного рабочего тела накладывает особенности на работу такой электрической машины в целом, поэтому важно исследовать

давать характер движения электропроводной жидкой фазы рабочего тела индукционной машины в различных режимах работы. Одним из практических вариантов реализации индукционной машины с жидкотемпературным рабочим телом является электромагнитный перемешиватель жидкости сердцевины непрерывно отливающегося слитка.

Электромагнитное перемешивание расплава в процессе кристаллизации слитка основывается на создании многокомпонентного движения расплава в ядре слитка при помощи электромагнитного поля, что улучшает тепломассообмен в кристаллизующемся слитке и способствует созданию мелкозернистой однородной структуры слитка, улучшая его физические свойства. Известны два способа электромагнитного перемешивания жидкого ядра слитка – кондукционный и индукционный. Индукционный способ перемешивания жидкой фазы затвердевающего слитка является более предпочтительным перед кондукционным, так как он более надежен, в нем отсутствует непосредственный контакт между индуктором и движущимся слитком.

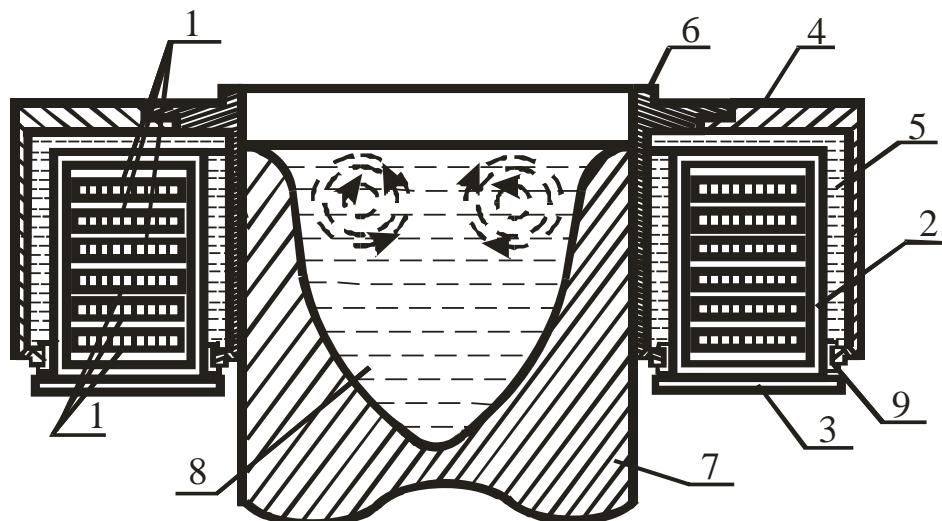


Рис. 1. Литейная система с электромагнитным перемешивателем

Литейная система с электромагнитным перемешивателем жидкости сердцевины алюминиевого слитка (рис. 1) содержит катушки 1, расположенные в кожухе 2, закрытом крышкой 3. Катушки 1 с кожухом 2 установлены в ферромагнитный стол 4 литейной машины, который заполнен водой 5 для охлаждения кристаллизатора 6 и слитка 7 с жидкостью сердцевиной 8, которая является жидкотемпературным ротором индукционной машины. Для уплотнений между кожухом 2 и столом 4 литейной машины установлена уплотнительная втулка 9. Расположение концентрических катушек 1 обмотки с током вокруг цилиндрического рабочего тела 7 в исследуемой индукционной машине позволяет создать осесимметричные аксиально-радиальные течения жидкого металла в жидкотемпературном рабочем теле 8.

Управление магнитными полями индукционной машины при перемешивании жидкого металла в процессе затвердевания слитка позволяет влиять на изменение распределения компонент сплава по сечению слитка и обеспечивать требуемое качество заготовки для жидкотвердого формования.

Для определения электромагнитных параметров такой специальной электрической машины успешно применяется численный расчет электромагнитного поля методами конечно элементного анализа [1], которые впоследствии могут быть использованы при расчете статических и динамических характеристик исследуемой индукционной машины.

Исследования траекторий перемещения жидкого расплава под действием электромагнитных сил в жидкотемпературном рабочем теле служат для определения скоростей движения расплава в области жидкой фазы слитка. Они проводились с использованием численной модели системы «индуктор-слиток», которая реализована в программном комплексе ANSYS с учетом физических критериев подобия [2]. Расчетная модель «индуктор – слиток» представлена на рис. 2.

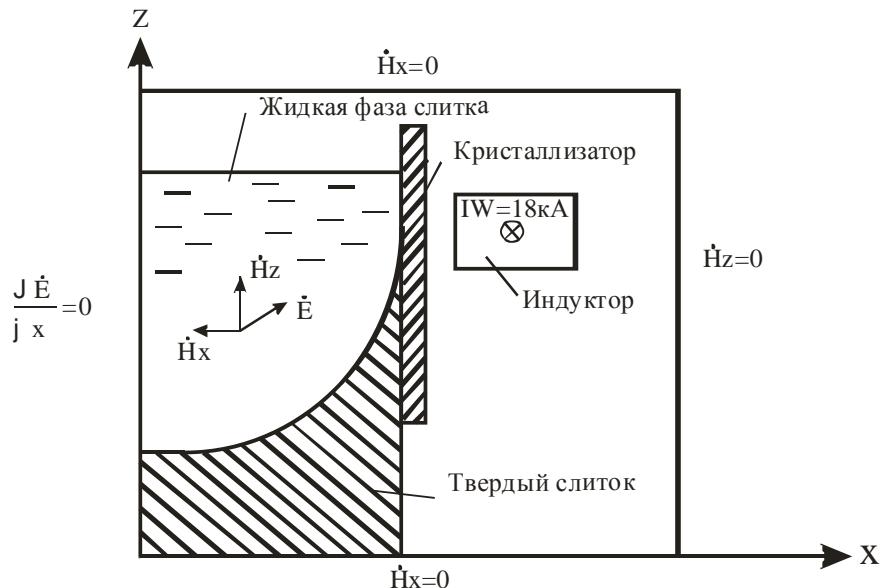


Рис. 2. Расчетная модель системы «индуктор – слиток»

При ее составлении учтены следующие особенности:

- индукционная машина является осесимметричной, что позволяет при составлении расчетной модели ограничиться ее половинным представлением;
  - индуктор индукционной машины заменяется медным проводником с величиной тока 18000 А;
  - кристаллизатор моделируется алюминиевой втулкой толщиной 10 мм;
  - твердая и жидкая фазы слитка моделируются средами рабочего тела с параметрами твердого и жидкого алюминия;
  - скорость движения слитка (рабочего тела) в аксиальном направлении принимается равной нулю;
  - термоконвективное движение расплава в жидкой фазе слитка не учитывается.
- Электромагнитное поле в расчетной области описывается уравнениями Максвелла [3]:

$$\text{rot} \vec{H} = \vec{\delta} + \vec{\delta}_{cm}, \quad (1)$$

$$\text{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad (2)$$

где  $\vec{H}$  – напряженность магнитного поля;  $\vec{E}$  – напряженность электрического поля;  $\vec{B}$  – магнитная индукция;  $\vec{\delta} = \gamma(\vec{E} + \nu \vec{B})$  – плотность тока проводимости;  $\vec{\delta}_{cm}$  – плотность сторонних токов;  $\nu$  – скорость движения расплава;  $\gamma$  – удельная электропроводность.

Расчет электромагнитного поля в системе «индуктор – слиток» сводится к решению уравнений Максвелла в численном виде относительно напряженности электрического и магнитного полей [4].

Комплексные напряженности электрического и магнитного полей в численной модели имеют составляющие:

$$\dot{\vec{E}} = \bar{e}_y \dot{E}^y; \quad (3)$$

$$\dot{\vec{H}} = \bar{e}_x \dot{H}_x + \bar{e}_z \dot{H}_z. \quad (4)$$

На краях расчетной области касательные составляющие напряженности магнитного поля равны нулю:

$$\vec{H}_x = 0; \quad \vec{H}_z = 0. \quad (5)$$

Расчет проводился при помощи программного комплекса ANSYS для осесимметричной задачи в координатах  $x$  ( $R$ ),  $z$ . Результаты изменений магнитной индукции в сечении жидкотемпературной фазы рабочего тела индукционной машины представлены на рис. 3.

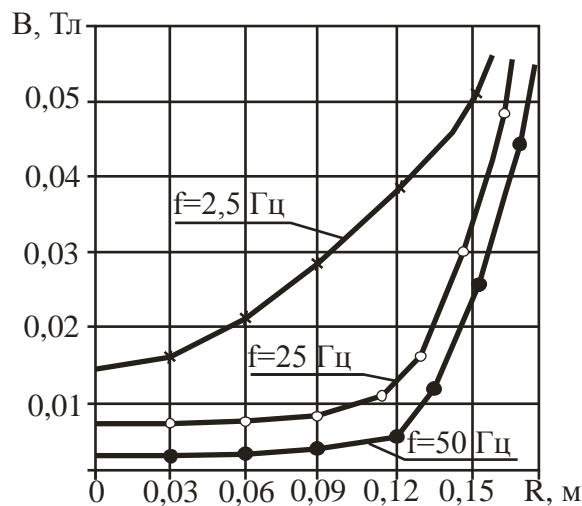


Рис. 3. Распределение магнитной индукции по радиусу рабочего тела

Распределение магнитной индукции при частоте  $f=50$  Гц характеризует глубину проникновения магнитного поля через алюминиевый кристаллизатор в жидкотемпературную часть рабочего тела (отливаемый слиток). В жидкотемпературном рабочем теле индукционной машины величина магнитной индукции достигает 0,05 Тл. Затухание электромагнитного поля и уменьшение величины магнитной индукции в направлении оси жидкотемпературного рабочего тела (слитка) происходит по квадратичному закону.

Анализируя полученные результаты, можно сделать выводы, что для интенсификации движения жидкого металла в рабочем теле и проработки глубинных слоев жидкотемпературной фазы рабочего тела (литника) необходимо, чтобы питание обмотки индукционной машины осуществлялось напряжением пониженной частоты. При уменьшении частоты напряжения, питающего обмотку электрической машины, до величины  $f=25$  Гц глубина проникновения электромагнитного поля в жидкотемпературную фазу рабочего тела увеличивается. Дальнейшее снижение частоты питающего напряжения приводит к увеличению проникновения электромагнитного поля в рабочее тело и в его жидкую фазу, что способствует созданию направленных электромагнитных сил в жидкотемпературной фазе рабочего тела.

На рисунке 4 представлена картина распределения электромагнитных сил по радиусу жидкотемпературного рабочего тела.

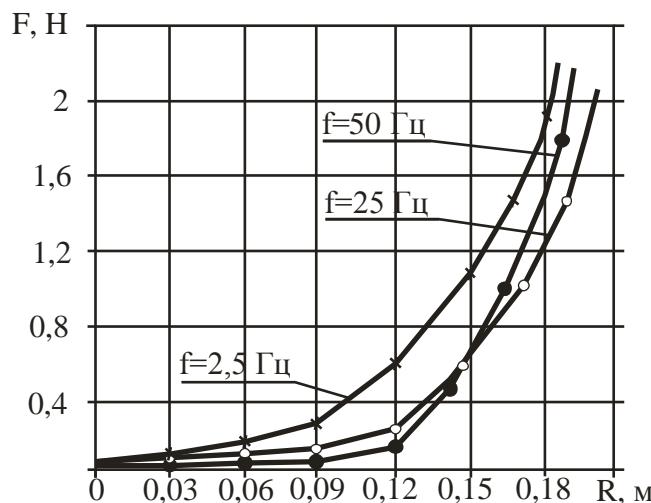
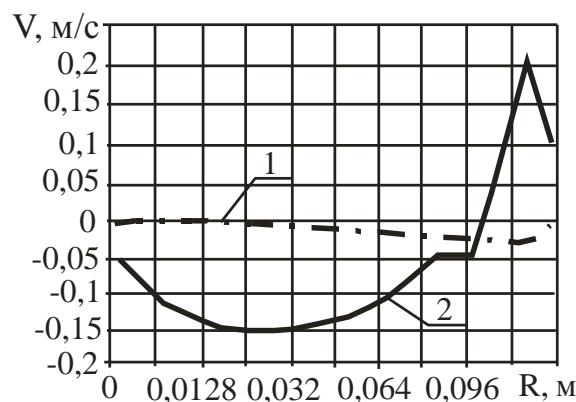


Рис. 4. Распределение электромагнитных сил по радиусу жидкотемпературного рабочего тела

Распределение электромагнитных сил в сечении жидкокометаллического рабочего тела практически полностью повторяет характер распределения магнитной индукции в нем, представленной на рис. 3. На внешней поверхности жидкокометаллической фазы рабочего тела (у наружной поверхности отливаляемого слитка) электромагнитная сила (при частоте питающего обмотку напряжения  $f= 50$  герц) достигает максимума; далее происходит падение электромагнитной силы до нуля, что характеризуется отсутствием принудительного движения металлического расплава в этой области.

Можно сделать вывод, что эффективность движения жидкого металла в рабочем теле и его перемешивание на более низкой частоте являются предпочтительными из-за большего количества жидкого расплава, вовлеченного в энергообмен между осевой частью слитка и периферийными слоями.

Распределение скорости по сечению жидкокометаллической фазы рабочего тела индукционной машины представлено на рис. 5.



*Рис. 5. Распределение скорости по сечению жидкокометаллической фазы рабочего тела*

Максимальных значений в расчетной области жидкокометаллического рабочего тела скорость достигает в вертикальном направлении вдоль стенки кристаллизатора: скорость представлена кривой 2 –  $V_z$ ; область максимального потока жидкого металла расположена по радиусу в диапазоне от  $R=0,12$  до  $R=0,16$  м. Этот факт характеризует массотеплообмен между слоями жидкого расплава вдоль стенки кристаллизатора и осевыми слоями. В области рабочего тела, ограниченной изменением радиуса от  $R=0,0128$  до  $R=0,08$  м, скорость изменяет знак на противоположный по отношению к направлению движения расплава в пристенной области. Ниже и выше расположения обмотки индукционной машины будет преобладать скорость, представленная кривой 1 –  $V_x$ , которая определяется формой кристаллизатора и пограничным слоем жидкой фазы слитка.

### Выводы

1. На основе электромагнитного перемешивателя жидкой сердцевины слитка разработана численно-математическая модель для исследования характеристик индукционной машины с жидкокометаллическим ротором.

2. Проведено исследование распределения магнитной индукции в цельнометаллическом рабочем теле индукционной машины в зависимости от частоты питающего напряжения. Выявлено, что проникновение магнитного поля в тело алюминиевого рабочего тела при частоте 2,5 Гц имеет почти линейный характер и достигает значений 0,015 Тл у оси. Такое значение магнитной индукции в 2 раза превышает величину индукции в этой точке при частоте 25 Гц.

3. Распределение результирующих электромагнитных сил в жидкокометаллическом теле индукционной машины показывает, что они повторяют характер распределения магнитной индукции. Однако близкие к нулю значения электромагнитных сил у оси рабочего тела позволяют открыть приосевую область для замыкания потоков жидкокометаллической среды, разогнанной до значительных скоростей в пристенной области рабочего тела.

4. Выявлено, что в пристенной области жидкокометаллического рабочего тела скорость жидкого алюминия достигает значений 0,22 м/с, но имеет узкую полосу движения. В приосевой области рабочего тела скорость меняет направление на противоположное и достигает значений, не превышающих 0,15 м/с.

#### **Литература**

1. Тюков В.А., Пастухов В.В., Корнеев К.В. Трехфазовая модель для определения параметров стержня короткозамкнутого ротора асинхронного двигателя // Изв. Том. политехн. ун-та. – 2011. – Т. 319. – № 4. – С. 99–102.
2. Марков Б.Л., Кирсанов А.А. Физическое моделирование в металлургии. – М.: Металлургия, 1984. – 119 с.
3. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле. – М.: Гардарики, 2001. – 317 с.
4. Вольдек А.И. Индукционные магнитогидродинамические машины с жидкокометаллическим рабочим телом. – Л.: Энергия, 1970.

