УДК 621.311

**ИССЛЕДОВАНИЕ ИНДУКЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ С БЕГУЩИМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПОЛЕМ ДЛЯ ТЕРМООБРАБОТКИ РАБОЧИХ ВАЛКОВ ПРОКАТНЫХ СТАНОВ**

**Качанов А.Н., Юрьев Ю.Н., Миронов Е.А.**

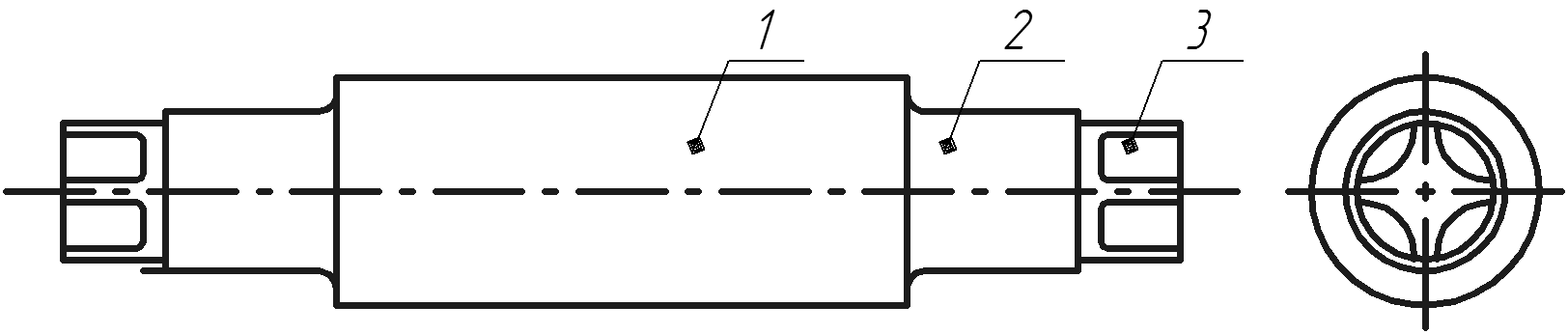
*Россия, г. Орёл, ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева»*

*Россия, г. Орёл, ООО «ИНТЕР РАО – Орловский энергосбыт»*

*В статье приведены результаты исследования индукционных устройств с бегущим электромагнитным полем для термообработки рабочих валков прокатных станов. Приведены картины распределения электромагнитных и температурных полей, полученные в программной среде ELCUT.*

*Ключевые слова: индукционная термообработка, предварительный нагрев, бегущее электромагнитное поле, программный продукт ELCUT.*

При индукционной закалке крупногабаритных изделий таких как рабочие валки прокатных станов (рисунок 1) на глубины больше 10 мм возникает опасность перегрева поверхности бочки, а, следовательно, нарушение технологии, которое может привести к браку изделия. Гарантией хорошего качества закаленного слоя является обеспечение требуемого распределения температуры по сечению валка, которое регламентируется технологическими картами термообработки, что позволяет избежать возникновения остаточных термических напряжений, а значит повысить качество термообработки.



***Рисунок 1 – Типовая конструкция рабочего валка прокатного стана:***

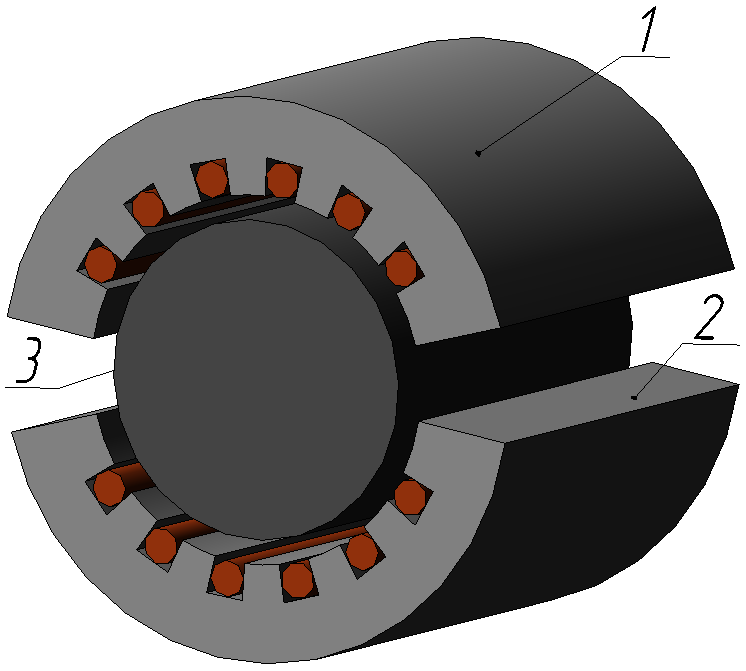
***1 – бочка; 2 – шейка; 3 – трефа***

Успешным решением данной задачи является предварительный подогрев валка, который может осуществляться как в специальной печи, так и обеспечиваться непосредственно самой индукционной закалочной установкой, а также комбинацией этих способов. Дополнительно, для большей равномерности нагрева, валок приводится во вращение с помощью электропривода.

Известны технические решения, направленные на внедрение технологии электромагнитной термообработки рабочих валков прокатных станов. Так, в полезной модели [1], для предварительного нагрева валка авторы предлагают использовать токи частотой от 50 до 175 Гц, а затем осуществлять закалку на расчетной частоте. В полезной модели [2] авторы предлагают использовать закалочный блок, включающий в себя два водоохлаждаемых индуктора: дополнительный индуктор высокой (питаемый током частотой 500 Гц) частоты и индуктор промышленной (50 Гц) частоты. Эти индукторы работают одновременно и обеспечивают более быстрый и равномерный прогрев тела бочки валка, обеспечивая повышение качества последующей закалки.

Применение индукторов с бегущим электромагнитным полем (БЭМП) может позволить не только решить задачу предварительного подогрева, но и упростить конструкцию закалочной установки за счет исключения из её состава электропривода обеспечивающего вращение валка. Индуктор с бегущим электромагнитным полем промышленной частоты вызывает не только нагрев валка, но и возникновение в нём электродинамических сил, которые обеспечивают его вращение, что способствует большей равномерности нагрева.

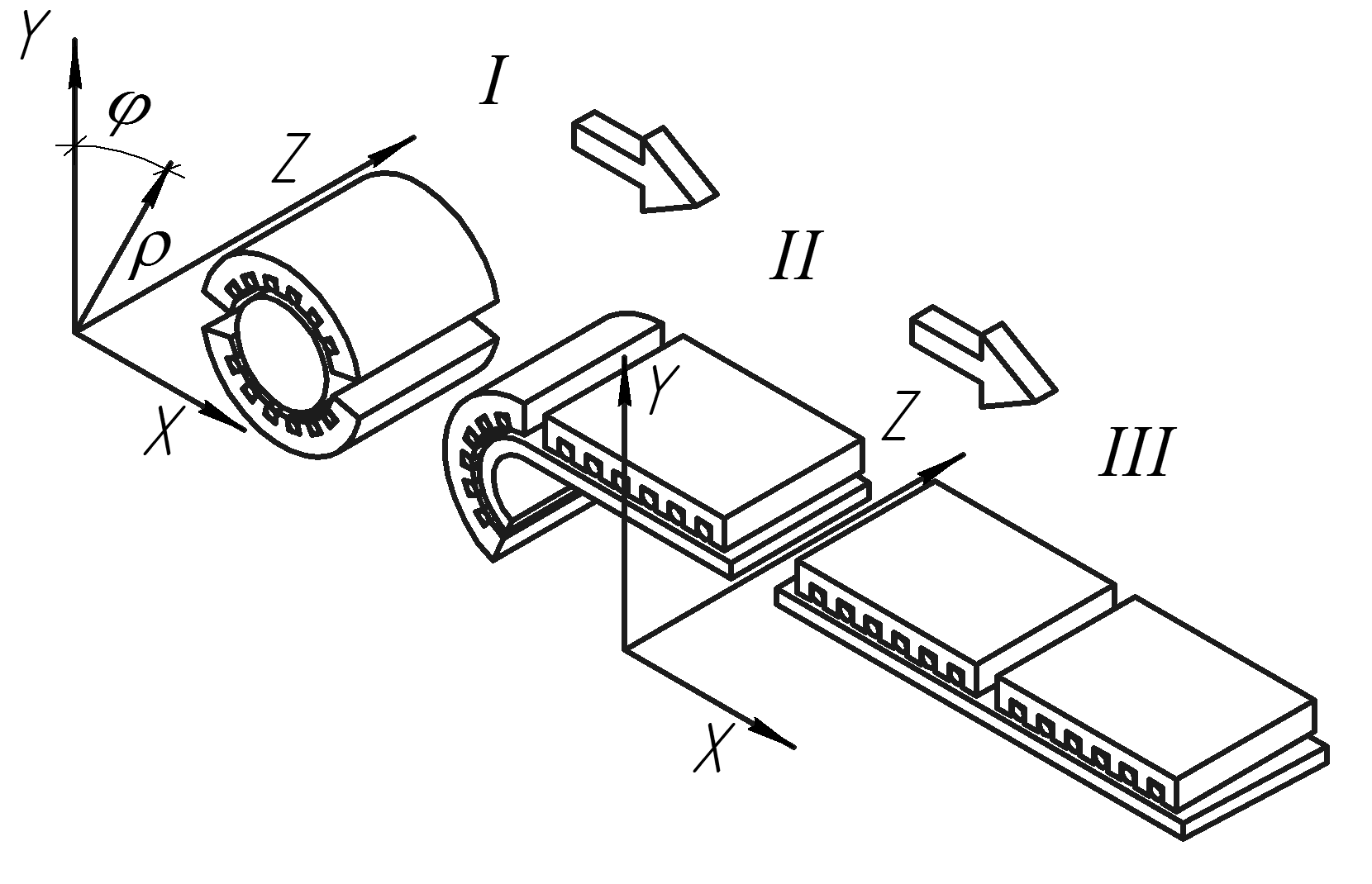
Для исследования процесса предварительного нагрева бочки валка, которая представляет собой цилиндр, была использована система «индукторы с БЭМП – ферромагнитная загрузка», представленная на рисунке 2.

******

***Рисунок 2 – Трехмерная модель системы «индукторы с БЭМП – ферромагнитная загрузка»: 1 – индуктор №1; 2 – индуктор №2; 3 – загрузка***

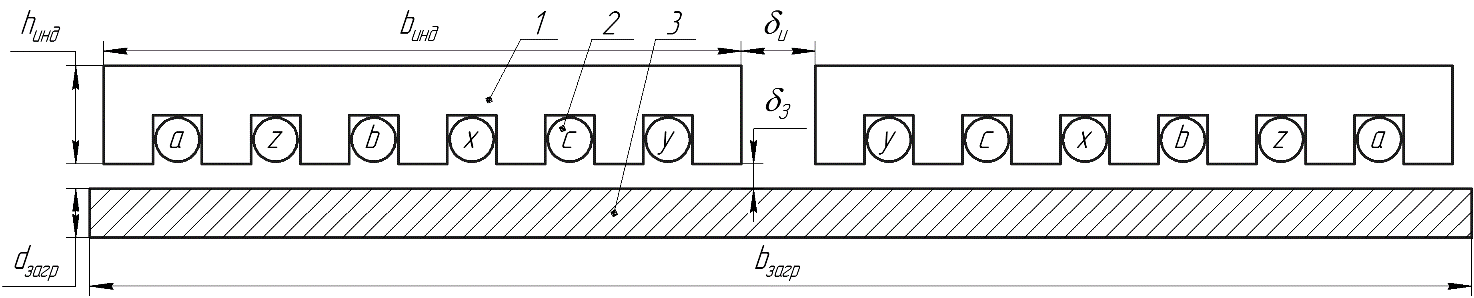
Такую конструкцию индукторов с БЭМП можно получить, если из статора асинхронного двигателя вырезать и оставить в конструкции часть, соответствующую некоторому центральному углу. Получится так называемый дугостаторный или сегментный индуктор [3], который по характеру электромагнитных процессов может рассматриваться как модификация линейного асинхронного двигателя. Наличие двух индукторов позволяет решить задачу управления нагревом с одновременным регулированием скорости и направления перемещения загрузки [4].

Условно разрезав вдоль осевой ли­нии и развернув на плоскость, данную систему можно пред­ставить в прямоугольной (декартовой) системе координат. Этапы перехода от цилиндрической к прямоугольной системе координат показаны на рисунке 3.



***Рисунок 3 – Этапы перехода от цилиндрической к прямоугольной системе координат***

После перехода к декартовой системе координат, расчет уже будет производиться в системе «индукторы с БЭМП – плоская ферромагнитная загрузка», эскиз которой представлен на рисунке 4.

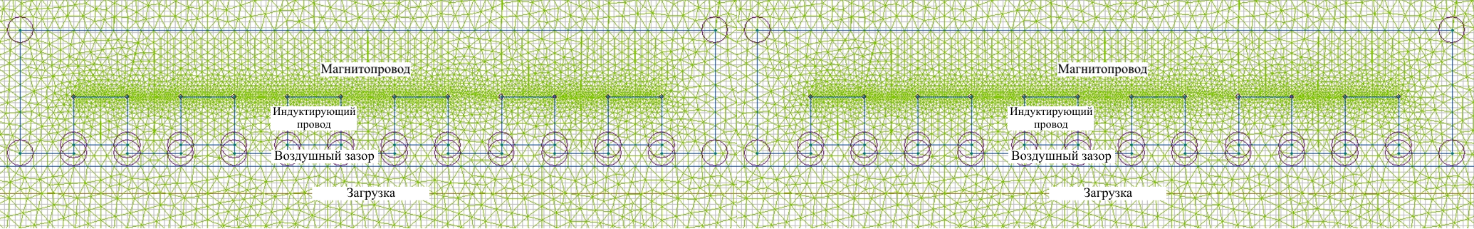


*Рисунок 4 – Эскиз исследуемой системы*

*«индукторы с БЭМП – плоская ферромагнитная загрузка»:*

*1 – магнитопровод; 2 – индуктирующий провод; 3 – загрузка*

Исследование электромагнитных и тепловых полей в системе «индукторы с БЭМП – плоская ферромагнитная загрузка» было проведено в программной среде Elcut (рисунок 5). С целью повышения точности расчетов, сетка дискретизации задается неравномерной путем увеличения количества узлов в зонах исследуемой системы, представляющих наибольший интерес.



*Рисунок 5 – Модель исследуемой системы в программной среде Elcut*

При проведении исследования было принято, что частота тока индукторов равна 50 Гц, а элементы системы имеют следующие обозначения:

1. hинд и bинд – высота и ширина магнитопровода каждого индуктора соответственно;

2. bзагр и dзагр – ширина и толщина загрузки, длина загрузки равна длине индуктора;

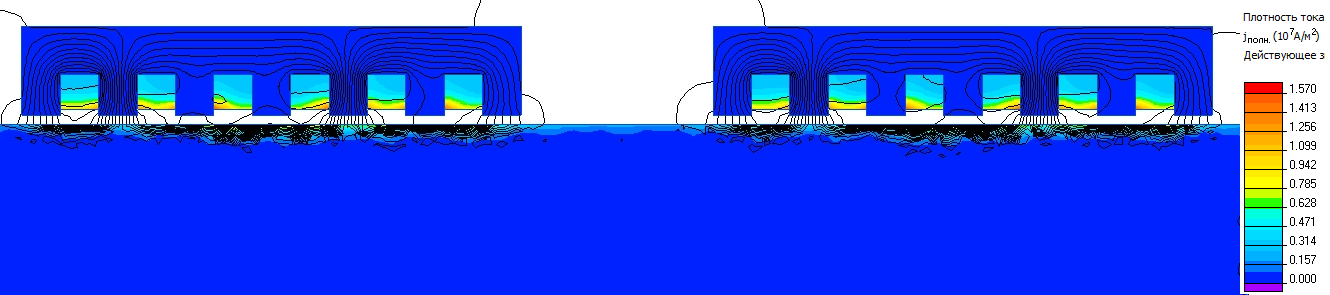
3. δз – величина воздушного зазора между полюсами магнитопроводов индукторов и поверхностью плоской ферромагнитной загрузки, δи – расстояния между индукторами.

В таблице 1 приведена информация о способах включения и порядке чередования фаз индуктирующих проводов индукторов №1 и №2 при проведении исследования.

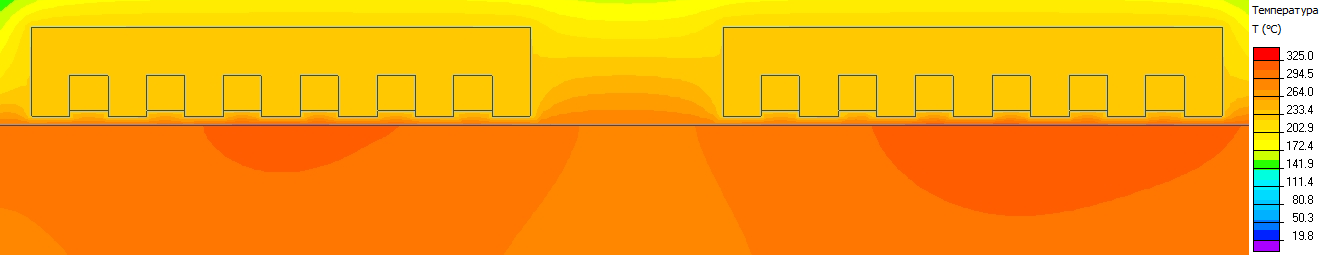
***Таблица 1 – Способы включения и порядок чередования фаз***

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Способ включения индукторов № 1 и № 2 | Чередование фаз | |
| Индуктор № 1 | Индуктор № 2 |
| согласное | АВС | АВС |
| встречное | АВС | СВА |

На первом этапе исследовано распределение электромагнитных и тепловых полей в загрузке при одинаковых значениях тока в индукторах и их согласном включении. На рисунке 6 представлена картина распределения плотности тока по сечению загрузки, а на рисунке 7 представлена картина распределения температуры во время нагрева полученные в программной среде Elcut. Чёрными линиями изображены линии электромагнитного поля, а распределение плотности тока показано цветной картиной. Наибольшее значение плотности тока во загрузке достигается на поверхности, а по толщине материала оно резко уменьшается. Наблюдается выраженный поверхностный эффект.



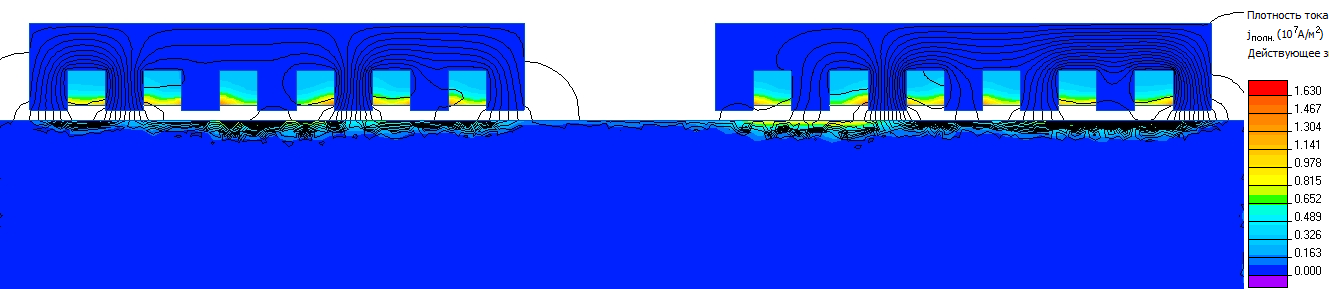
*Рисунок 6 – Картина распределения плотности тока по сечению загрузки при согласном включении индукторов*



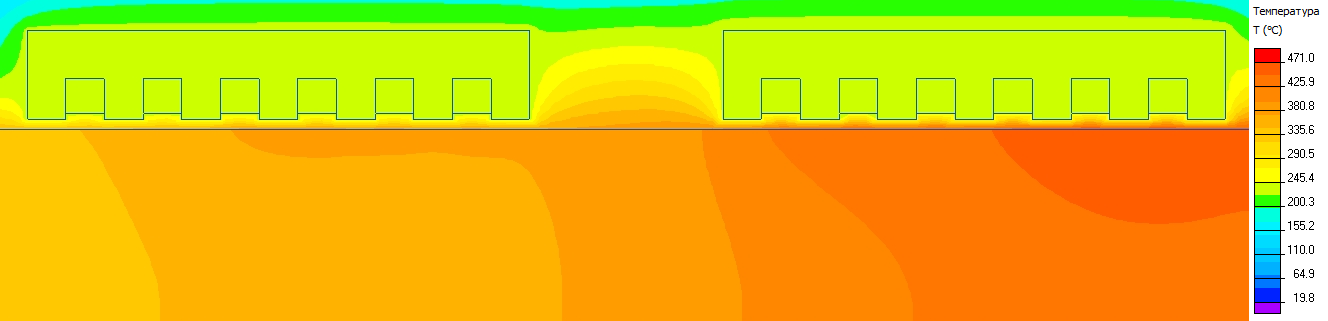
*Рисунок 7 – Картина распределения температуры по сечению загрузки при согласном включении индукторов*

Так как нагрев идёт на промышленной частоте, то обеспечивается глубинный нагрев, поэтому разница температур по объёму составляет 5 °С. Также заметны большие утечки тепла в окружающее пространство, поэтому необходимо применение теплоизоляционных материалов для уменьшения тепловых потерь.

На втором этапе исследовано распределение электромагнитных и тепловых полей в загрузке при одинаковых значениях тока в индукторах и их встречном включении. На рисунке 8 представлена картина распределения плотности тока по сечению загрузки, а на рисунке 9 представлена картина распределения температуры во время нагрева. Значение плотности тока в загрузке, по сравнению с согласным включением увеличилось на 4 %. Температура загрузки за один и тот же промежуток времени увеличилась на 30 %. Разница температур по объёму составляет не более 5 °С, т.е. нагрев можно считать однородным.



*Рисунок 8 – Картина распределения плотности тока по сечению загрузки при встречном включении индукторов*



*Рисунок 9 – Картина распределения температуры по сечению загрузки при встречном включении индукторов*

Список литературы

1. Патент 187731 РФ, МПК C21D 1/10, H05B 6/36, C21D 9/38. Индуктор для закалки валков прокатных станов / Демидович В.Б., Ситько П.А., Перевалов Ю.Ю., Абдулхаков И.Ю.; патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина)» – №2018120568; заявл. 04.06.2018; опубл. 15.03.2019, Бюл. №8 – 6 с.: ил.

2. Патент 159953 РФ, МПК C21D 1/10, C21D 9/38. Устройство индукционного нагрева и закалки прокатных валков / Сергеев В.А., Ергин А.Н., Кабалин Е.И., Герасимов А.В., Титченко Л.Н.; Акционерное общество "Научно- производственное объединение «Центральный научно-исследовательский институт технологии машиностроения» АО НПО «ЦНИИТМАШ» – №2015136179/02; заявл. 26.08.2015; опубл. 20.02.2016, Бюл. №5 – 8 с.: ил.

3. Веселовский О.Н. Линейные асинхронные двигатели / О.Н. Веселовский, А.Л. Коняев, Ф.Н. Сарапулов. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 255 с.

4. Качанов А.Н., Миронов Е.А., Селиверстова О.С. Исследование индукционного устройства для нагрева плоских металлических изделий в бегущем электромагнитном поле в программной среде ELCUT // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия технические науки. №3, 2019, С. 63–67.

**Качанов Александр Николаевич** – д-р техн. наук, профессор, академик АЭН РФ, заведующий кафедрой «Электрооборудование и энергосбережение» ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева»; адрес: 302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29, тел. 8(4862)419853; e-mail: kan@ostu.ru.

**Юрьев Юрий Николаевич** – генеральный директор ООО «ИНТЕР РАО – Орловский энергосбыт»; адрес: 302020, г. Орел, ул. Полесская, 28к, тел. 8(4862)735151; e-mail: yurev\_yn@interrao-orel.ru.

**Миронов Евгений Андреевич** – магистр, ассистент кафедры «Электрооборудование и энергосбережение» ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева»; адрес: 302020 г. Орел, ул. Наугорское шоссе, д. 29; тел. 89066612444; e-mail: gen996@mail.ru.

**INVESTIGATION OF INDUCTION DEVICES WITH A TRAVELING ELECTROMAGNETIC FIELD FOR HEAT TREATMENT OF ROLLING MILLS WORK ROLLS**

**Kachanov A.N., Yuryev Y.N., Mironov E.А.**

*Russia, Oryol, FGBOU VO «OSU named by I.S. Turgenev»*

*Russia, Oryol, LLC «INTER RAO – Orel energy distribution»*

*The article presents the results of a study of induction devices with a traveling electromagnetic field for heat treatment of work rolls of rolling mills. The distribution patterns of electromagnetic and temperature fields obtained in the ELCUT software environment are presented.*

*Key words: induction heat treatment, preheating, traveling electromagnetic field, ELCUT software product.*

Bibliography

1. Patent 187731 RF, IPC C21D 1/10, H05B 6/36, C21D 9/38. Inductor for hardening rolls of rolling mills / Demidovich V.B., Sitko P.A., Perevalov Yu.Yu., Abdulkhakov I.Yu.; Patentee Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "St. Petersburg State Electrotechnical University" LETI "named after V.I. Ulyanov (Lenin)" - No. 2018120568; dec. 06/04/2018; publ. 03/15/2019, Bull. No. 8 - 6 p.: ill.

2. Patent 159953 RF, IPC C21D 1/10, C21D 9/38. Device for induction heating and hardening of rolling rolls / Sergeev V.A., Ergin A.N., Kabalin E.I., Gerasimov A.V., Titchenko L.N.; Joint Stock Company "Scientific and Production Association "Central Research Institute of Engineering Technology" JSC NPO "CNIITMASH" - No. 2015136179/02; dec. 08/26/2015; publ. 02/20/2016, Bull. No. 5 - 8 pp.: ill.

3. Veselovsky O.N. Linear asynchronous motors / O.N. Veselovsky, A.L. Konyaev, F.N. Sarapulov. – M.: Energoatomizdat, 1991. – 255 p.

4. Kachanov A.N., Mironov E.A., Seliverstova O.S. Investigation and calculation of induction mass heating devices in the elcut program environment // Bulletin of the Tver State Technical University. Series of technical sciences. No. 3, 2019, pp. 63–67.

**Kachanov Alexander Nikolaevich** – Doctor of technical sciences, Professor, Academician of the AES RF, Head of the Department of Electrical Equipment and Energy Saving, FSBEI HE "OSU named after I.S. Turgenev"; address: 302020, Orel, Naugorskoe shosse, 29, tel. 8(4862)419853; e-mail: kan@ostu.ru.

**Yuryev Yury Nikolaevich** – General manager of LLC «INTER RAO – Orel energy distribution»; address: 302020, Orel, st. Polesskaya, 28k, tel. 8(4862)735151; e-mail: yurev\_yn@interrao-orel.ru.

**Mironov Evgeniy Andreevich** – Master, Assistant of the Department of Electrical Equipment and Energy Saving, FSBEI HE"OSU named after I.S. Turgenev"; address: 302020 Orel, Naugorskoe shosse, 29; tel. 89066612444; e-mail: gen996@mail.ru.