

УДК 621.316

ИНДУКЦИОННЫЕ НАГРЕВАТЕЛИ С ЧАСТОТНЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ INDUCTION HEATERS WITH FREQUENCY REGULATION

И.И. Кирилук

Научный руководитель – Счасный В.П., к.т.н., доцент
Белорусский национальный технический университет
г. Минск, Республика Беларусь

val.sc@mail.ru

I.I. Kiriluk

Supervisor – V. Schasniy, Candidate of Technical Sciences, Docent
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Аннотация: *индукционные нагреватели с частотным регулированием, их применение на производственных объектах, устройство и принцип работы.*

Abstract: *Induction heaters with frequency control, their application at production facilities, design and principle of operation.*

Ключевые слова: *индукционная катушка, генератор частоты, LC-генератор, RC-генератор.*

Keywords: *induction coil, frequency generator LC- generator, RC- generator.*

Введение

Индукционные нагреватели с частотным регулированием представляют собой современное и высокоэффективное оборудование, которое позволяет точно контролировать процесс нагрева за счёт изменения частоты переменного тока, подаваемого на индукционную катушку. Такие нагреватели широко применяются на ТЭЦ и других промышленных объектах, где требуется высокая точность и гибкость в управлении температурными процессами.

Их работа заключается в преобразовании электрической энергии в тепловую за счёт генерации вихревых токов в проводящих материалах. Частотное регулирование позволяет точно управлять процессом нагрева, изменяя глубину проникновения электромагнитного поля и интенсивность тепловыделения. Основу работы таких нагревателей составляют физические процессы, включая электромагнитную индукцию, скин-эффект и джоулев нагрев.

Основная часть

Основными компонентами индукционного регулятора такого типа являются **индукционная катушка и генератор частоты.**

Принцип действия индукционных нагревателей с частотным регулированием начинается с подачи переменного тока на индукционную катушку, которая создаёт переменное магнитное поле. Это поле, в свою очередь, индуцирует вихревые токи в проводящем материале, помещённом в зону действия катушки. Вихревые токи возникают вследствие изменения магнитного потока через материал, что приводит к выделению тепла (джоулевый нагрев) за счёт сопротивления материала протеканию этих токов.

Важно учитывать производителей индукционных катушек, которые предлагают оборудование, адаптированное для работы в энергетической отрасли.

Среди производителей из стран СНГ можно выделить российские компании, такие как «Термотехника» (Москва), специализирующаяся на промышленных индукционных системах, и «Элтехника» (Санкт-Петербург), разрабатывающая решения для металлообработки и энергетики. Украинский производитель «Индукционные технологии» (Киев) также предлагает индукционные катушки, которые могут быть использованы для подогрева теплоносителей и других задач на ТЭЦ. В Беларуси компания «БелТермоПласт» (Минск) производит индукционное оборудование, включая катушки, для нагрева и плавки металлов, что может быть адаптировано для нужд энергетики.

Выбор производителя индукционных катушек для ТЭЦ должен основываться на таких критериях, как соответствие оборудования техническим требованиям, наличие сертификатов качества, возможность адаптации под конкретные задачи, а также доступность технической поддержки и обслуживания. Указанные производители предлагают решения, которые могут быть успешно интегрированы в системы нагрева на ТЭЦ, обеспечивая высокую энергоэффективность и надёжность.

Простейшая индукционная катушка представлена на рисунок 1.

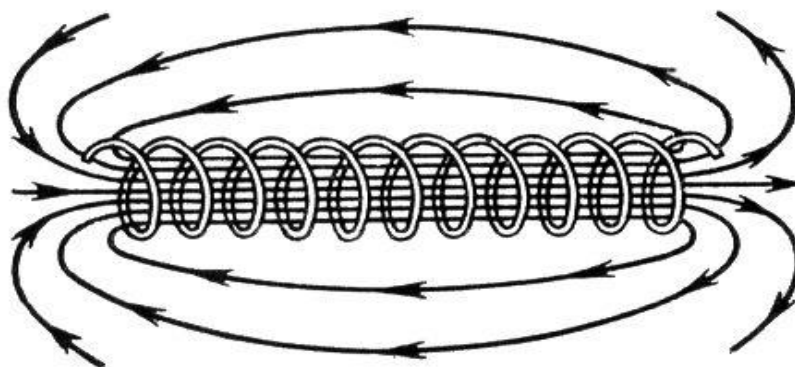


Рисунок 1 – Индукционная катушка

Интенсивность нагрева в индукционных системах напрямую связана с частотой переменного тока, подаваемого на индукционную катушку. При увеличении частоты уменьшается глубина проникновения электромагнитного поля в материал, что обусловлено явлением, известным как скин-эффект. Суть скин-эффекта заключается в том, что переменный ток высокой частоты распространяется преимущественно в поверхностном слое проводника, практически не затрагивая его внутренние области. Это позволяет локально нагревать поверхность материала, обеспечивая высокую точность контроля температуры и минимизируя тепловое воздействие на соседние участки. Такая особенность делает индукционный нагрев особенно эффективным в задачах, где требуется избирательное воздействие на материал, например, при обработке металлов, нагреве тонких слоёв или в процессах, где важно избежать перегрева внутренних структур. Частотное регулирование обеспечивается генератором высокой частоты, который преобразует стандартный промышленный ток (50 Гц) в ток высокой частоты (от 1 кГц до нескольких МГц). Это достигается с использованием полупроводнико-

вых ключей и резонансных контуров. Резонансные явления позволяют минимизировать потери энергии и максимизировать эффективность нагрева. Генератор частоты регулирует не только частоту, но и мощность тока, что позволяет точно управлять температурой нагрева. Простейшая схема генератора частоты представлена на рисунке. 2 [1].

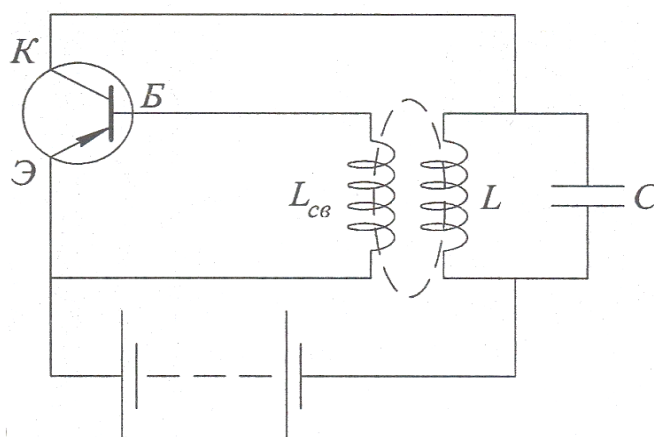


Рисунок 2 – Схема генератора частоты

При выборе генератора частоты для индукционных нагревателей на ТЭЦ необходимо учитывать такие параметры, как диапазон частот, мощность, надёжность, энергоэффективность и возможность интеграции в существующие системы. Указанные производители предлагают решения, которые могут быть успешно применены для нагрева теплоносителей, подогрева масел и других процессов на ТЭЦ, обеспечивая высокую производительность и долговечность оборудования.

Генераторы частоты, используемые в индукционных нагревателях, можно классифицировать на несколько типов в зависимости от их конструкции, принципа работы и области применения. Одним из наиболее распространённых типов являются **LC-генераторы**, которые используют колебательный контур, состоящий из катушки индуктивности (L) и конденсатора (C). Такие генераторы отличаются простотой конструкции и высокой стабильностью частоты, что делает их подходящими для задач, где требуется точное поддержание заданных параметров. Другим типом являются **RC-генераторы**, в которых частота определяется резисторами (R) и конденсаторами (C). Они менее стабильны по сравнению с LC-генераторами, но обладают меньшими габаритами и стоимостью, что делает их привлекательными для маломощных систем. Для высокочастотных применений широко используются **генераторы на основе кварцевых резонаторов**, которые обеспечивают высокую точность и стабильность частоты благодаря пьезоэлектрическому эффекту.

В промышленных индукционных нагревателях часто применяются **генераторы на полупроводниковых элементах**, которые позволяют регулировать частоту и мощность в широких пределах, обеспечивая высокую энергоэффективность и надёжность. Отдельно стоит выделить **цифровые генераторы частоты**, которые используют микропроцессоры для формирования сигнала. Они обладают высокой

гибкостью, позволяя программировать частоту и форму сигнала, что делает их идеальными для задач, требующих сложного управления. Каждый из этих типов генераторов имеет свои преимущества и ограничения, что позволяет выбирать наиболее подходящее решение в зависимости от конкретных требований, таких как диапазон частот, мощность, точность и условия эксплуатации.

Среди производителей из стран СНГ можно отметить российские компании, такие как «Термотехника» (Москва), специализирующаяся на разработке и производстве генераторов частоты для промышленных индукционных систем, включая решения для энергетики. В Беларуси компания «БелТермоПласт» (Минск) разрабатывает генераторы частоты для индукционных систем, подходящие для интеграции в оборудование ТЭЦ.

Среди зарубежных производителей выделяются компании с мировым опытом, такие как **Inductoheat Inc.** (США), предлагающая высокочастотные генераторы для промышленного применения, включая энергетику. Немецкая компания **EFD Induction** производит генераторы частоты, которые могут быть использованы для индукционного нагрева жидкостей и других процессов на ТЭЦ. В Китае компании **Jinlai Electromechanical** и **Shenzhen Shuangping** предлагают генераторы частоты по конкурентоспособным ценам, которые могут быть адаптированы для систем нагрева на ТЭЦ.

Система управления индукционного нагревателя обеспечивает точный контроль температуры за счёт обратной связи. Датчики температуры, такие как термопары или инфракрасные сенсоры, передают данные о температуре нагреваемого объекта в систему управления, которая регулирует частоту и мощность тока. Микроконтроллеры или программируемые логические контроллеры обеспечивают автоматизацию процесса, поддерживая заданную температуру и отключая нагреватель при достижении целевых параметров. Тепловая передача энергии в индукционных нагревателях происходит за счёт кондукции, конвекции и излучения. Тепло, выделяемое в поверхностном слое материала, передаётся вглубь за счёт теплопроводности. В случае нагрева жидкостей или газов дополнительно учитываются конвективные потоки и тепловое излучение. Отличительные особенности индукционного нагрева с частотным регулированием востребованы в ряде отраслей промышленного производства [2].

Одной из важных задач на теплоэлектроцентрали (ТЭЦ) является эффективный нагрев теплоносителей, масел, воды и других рабочих сред. Традиционные методы нагрева, такие как использование газовых или электрических печей, имеют ряд недостатков, включая низкий КПД, высокие эксплуатационные расходы и экологические проблемы. В связи с этим всё большее внимание уделяется индукционным нагревателям. Например, для подогрева мазута перед подачей в горелки котлов индукционная катушка устанавливается вокруг трубопровода, а генератор частоты подаёт ток высокой частоты, что обеспечивает быстрый и равномерный нагрев.

Индукционные нагреватели нашли широкое применение в различных отраслях промышленности:

1. В **металлургии** индукционные нагреватели используются для плавки металлов, закалки и термообработки деталей. Например, в производстве стальных изделий индукционный нагрев позволяет быстро и равномерно нагревать заготовки до требуемой температуры, что улучшает качество конечного продукта и снижает энергозатраты.

2. В **машиностроении** индукционные нагреватели применяются для сборки и разборки узлов, таких как подшипники и втулки, за счёт локального нагрева, который облегчает процесс монтажа и демонтажа.

3. Ещё одной областью применения является **пищевая промышленность**, где индукционные нагреватели используются для стерилизации оборудования, нагрева жидкостей и приготовления пищи.

Заключение

Индукционные нагреватели с частотным регулированием представляют собой высокоэффективные устройства, основанные на принципах электромагнитной индукции с генерацией переменного магнитного поля, индукцией вихревых токов и преобразованием электрической энергии в тепловую. Использование частотного регулирования позволяет точно контролировать процесс нагрева, что в совокупности делает их незаменимыми для применения при производстве продукции в ряде отраслей.

Литература

1. Описание принципов работы, математических моделей и применения [сайт]. -Режим доступа : <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/induction-heating> - (дата обращения 25.02.2025).
2. Разделы: "How Induction Heating Works", "Industries Served" [сайт]. - URL: <https://www.inductoheat.com/induction-heating/> - (дата обращения 25.02.2025).