

Научная статья

УДК 621.365.5+621.785.545

DOI 10.48012/1817-5457_2025_2_161-168

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ИНДУКЦИОННОЙ ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Лекомцев Петр Леонидович✉, Олин Николай Львович, Артамонова Людмила Петровна
Удмуртский ГАУ, Ижевск, Россия
lekomcev@yandex.ru

Аннотация. Технологии высокочастотного индукционного нагрева получили широкое распространение в процессах сверхчистой бесконтактной плавки, сварки металлов и термообработки деталей машин сложной формы, при обработке мелких деталей, которые могут повредиться при газопламенном или дуговом нагреве. Цель исследования – разработка и исследование характеристик индукционной электронагревательной установки. Задачи исследования – разработать структурную и принципиальную схемы индукционной установки, провести экспериментальные исследования ее характеристик. Для исследования режимов индукционного нагрева была разработана лабораторная установка, позволяющая измерять температуру нагреваемой заготовки и индуктора; регулировать частоту тока; измерять токи первичного звена и индуктора; устанавливать режим максимальной эффективности. В ходе эксперимента были проведены измерения температурной характеристики в зависимости от времени при разных диаметрах заготовки и разных токах индуктора; измерение скорости нагрева в зависимости от диаметра заготовки при разных токах индуктора. Анализ исследований позволяет сделать вывод, что с увеличением диаметра заготовки увеличивается время ее прогрева до установленных температур (в пределах 150...350 °С, в зависимости от диаметра заготовки). Увеличение тока индуктора в начальный момент нагрева до 120 с незначительно повышает температуру заготовки. С увеличением времени нагрева повышение тока индуктора с 15 до 30 А увеличивает температуру заготовки на 30 °С. Скорость нагрева на заготовке диаметром 17 мм при повышении тока индуктора на 1 А увеличивается на 0,01 °С/с, а на заготовке диаметром 10 мм – на 0,08 °С/с. Таким образом, разработанная лабораторная установка позволяет исследовать основные режимные параметры индукционного нагрева, в том числе температурные характеристики нагрева в зависимости от диаметра заготовки и тока индуктора. Полученные результаты могут использоваться для проектирования и выбора режимных параметров установок индукционного нагрева.

Ключевые слова: индукционный нагрев, индуктор, ток индуктора, удельная мощность.

Для цитирования: Лекомцев П. Л., Олин Н. Л., Артамонова Л. П. Разработка и исследование характеристик индукционной электронагревательной установки // Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии. 2025. № 2(82). С. 161-168. https://doi.org/10.48012/1817-5457_2025_2_161-168.

Актуальность. Технологии высокочастотного индукционного нагрева получили широкое распространение в процессах сверхчистой бесконтактной плавки, сварки металлов и термообработки деталей машин сложной формы, при обработке мелких деталей, которые могут повредиться при газопламенном или дуговом нагреве. Поверхностная закалка после индукционного нагрева значительно повышает износостойкость изделий по сравнению с тепловой обработкой в печах. Индукционный нагрев используется для обеззараживания медицинского инструмента, прямоочного нагрева жидкостей, сушки древесины и т. д. [1, 2, 8, 10, 16].

Достоинства индукционного нагрева заключаются в том, что это высокоскоростной нагрев любого электропроводящего материала, он возможен в любой среде, допускает использование

защитных камер из стекла, цемента, пластмасс, дерева, которые остаются холодными при работе индуктора. Индукционный нагреватель удобен в эксплуатации за счет небольшого размера, его индуктор можно изготовить любой формы, и с помощью такого нагревателя легко провести местный и избирательный нагрев, а также автоматизировать процесс. Кроме того, индукционный нагрев наиболее экологичный и безопасный [6, 9, 14].

Наряду с расширением применения индукционного нагрева получают развитие и сами установки: повышается мощность и КПД, увеличивается точность поддержания заданных параметров, внедряются современные системы автоматизации, повышается надежность установок. Разработчикам индукционных нагревателей ставятся задачи совершенствования су-

ществующих комплексов нагрева и разработки установок для новых сфер использования [5, 8, 11, 12].

В нашей работе приводятся результаты испытания лабораторной установки, с помощью которой были исследованы режимы индукционного нагрева.

Цель исследования – разработка и исследование характеристик индукционной электронагревательной установки.

Задачи исследования: разработать структурную и принципиальную схемы индукционной установки, провести экспериментальные исследования ее характеристик.

Материал и методы. Суть индукционного нагрева заключается в следующем. В проводящем теле, помещенном в изменяющееся магнитное поле, создаются вихревые токи. Изменение магнитного потока можно вызвать двумя способами: перемещением тела относительно постоянного магнитного поля или использованием переменного магнитного поля при неподвижном теле. Соответствующие механизмы возникновения индуцированных вихревых токов называют индукцией движения и трансформаторной индукцией [9, 14].

Связь между напряженностью E вихревого электромагнитного поля, индукцией B и скоростью движения v данного объема относительно магнитного поля равна:

$$\text{rot} E = -dB / dt + \text{rot}(vB). \quad (1)$$

Мгновенное значение ЭДС e , возникающей в контуре, охватывающем поток Φ , равно:

$$e = -d\Phi / dt. \quad (2)$$

Под действием этой ЭДС возникает ток i , вызывающий нагрев тела в соответствии с законом Джоуля – Ленца.

Протекающие в теле вихревые токи создают собственные магнитные поля, которые, складываясь с внешним полем, образуют результирующее поле [9, 13, 14]. Одновременно вихревые токи, взаимодействуя друг с другом и с исходным полем, создают электродинамические усилия, приводящие при наличии соответствующих степеней свободы к перемещению тел или их вибрации.

Индукция движения практически не используется для промышленного нагрева, так как требует больших скоростей перемещения нагреваемого тела и сложных установок для реализации такой схемы.

Наибольшее распространение нашли устройства индукционного нагрева, основанные на использовании переменного магнитного поля, не имеющие вращающихся частей и состоящие в общем случае из нагреваемого тела, индуктирующей обмотки, источника питания, системы охлаждения индуктора. Кроме того, в состав установок входят конструктивные и дополнительные элементы, служащие для крепления и перемещения нагреваемого изделия, подачи охлаждающей воды, создания защитной атмосферы и т. д.

Источниками питания устройства индукционного нагрева, в зависимости от назначения нагревательной установки, служат трансформатор промышленной частоты, машинные или тиристорные преобразователи средней частоты, или ламповые генераторы. Также источники питания обеспечиваются схемами согласования и защиты, системой контроля и управления.

По назначению индукционные нагревательные устройства подразделяют на плавильные, нагревательные и специальные [9, 14].

Особенностями плавильных устройств является движение расплавленного материала под действием электродинамических и конвективных сил. Воздействие этих сил приводит к выравниванию температурного поля за счет теплопереноса, изменению формы расплава и другим специфическим эффектам.

Требования к расчету и проектированию плавильных устройств существенно отличаются от требований к нагревательным устройствам. Однако при известной конфигурации расплава значительная часть методов электромагнитных расчетов может быть применена и к плавильным устройствам.

Нагревательные устройства служат для прямого или косвенного нагрева материалов в твердом, жидком или газообразном состоянии. При прямом индукционном нагреве теплота выделяется за счет поглощения энергии электромагнитного поля непосредственно нагреваемым (рабочим) телом. При косвенном нагреве теплота выделяется в промежуточном нагревателе, от которого передается нагреваемым телам теплопередачей.

При помощи прямого нагрева выполняется большинство операций по термической обработке (поверхностная и объемная закалка, отжиг, отпуск) и пластической деформации (прокатка, штамповка, прессование, волочение, гибка) металлических изделий. Для них характерны использование больших удельных

мощностей для обеспечения требуемого температурного поля, малая тепловая инерция, достижимость практически любых температур. Эти качества и определяют в основном преимущества индукционного нагрева перед другими способами.

Устройства косвенного нагрева характеризуются небольшими удельными мощностями и малыми температурами, ограниченными жаростойкостью промежуточного нагревателя. Однако эти устройства обеспечивают высокую равномерность нагрева (индукционные термостаты). Появляется возможность нагрева непроводящих материалов при высоких КПД и коэффициентах мощности. К этому типу относятся устройства для обогрева технологического оборудования в химической промышленности.

Величины напряжения и частота тока индукционного нагрева определяются геометрией заготовки и индуктора, а также электрическими свойствами нагреваемого материала. Эти параметры необходимо знать и учитывать для согласования выхода источника питания с используемым индуктором [3, 4, 7, 10, 15].

Большинство систем индукционного нагрева и источников их питания разрабатываются для реализации определенного технологического процесса и для конкретного индуктора (или набора индукторов). Важными факторами также являются конструктивные особенности оборудования и его расположение, производственные площади.

Для одних установок преимущественно используется компактная блочная конструкция источника питания, содержащая трансформатор для согласования с нагрузкой и компенсирующие конденсаторы. Это, как правило, высокоавтоматизированные установки с несколькими постами для закалки и отпуска заготовок [3, 7].

Для других установок, имеющих большие расстояния между источником питания и индуктором, нагревательная станция или блок согласования с нагрузкой могут быть отделены от преобразовательной части источника питания и расположены в нагрузочном посту в непосредственной близости от индуктора.

Понимание принципов функционирования различных схем источников питания, используемых для индукционного нагрева, необходимо при выборе наиболее эффективного схемного решения для реализации конкретного технологического процесса или оценки его пригодности для использования в конкретном процессе [8, 9, 14].

Для исследования режимов индукционного нагрева была разработана лабораторная установка, обеспечивающая следующий режим работы:

- включение;
- прогрев (включение вспомогательного оборудования и измерительных приборов);
- выбор режима работы (в зависимости от типа нагреваемой заготовки);
- визуальная оценка режима работы;
- регистрация значений тока, частоты, температуры;
- возможность безопасного автоматического выключения на любом этапе работы;
- завершение работы, выключение.

Приведенный алгоритм позволит измерять температуру нагреваемой заготовки и спирали индуктора; регулировать частоту в пределах, необходимых для оценки возможностей индукционного нагрева; измерять токи первичного звена и на индукторе; устанавливать режим максимальной эффективности (режим резонанса).

Реализация разработанного алгоритма работы возможна по следующей функциональной схеме (рис. 1).

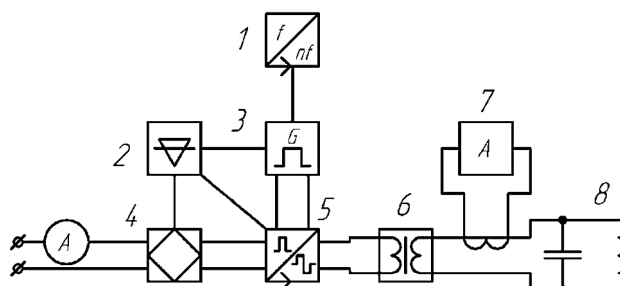


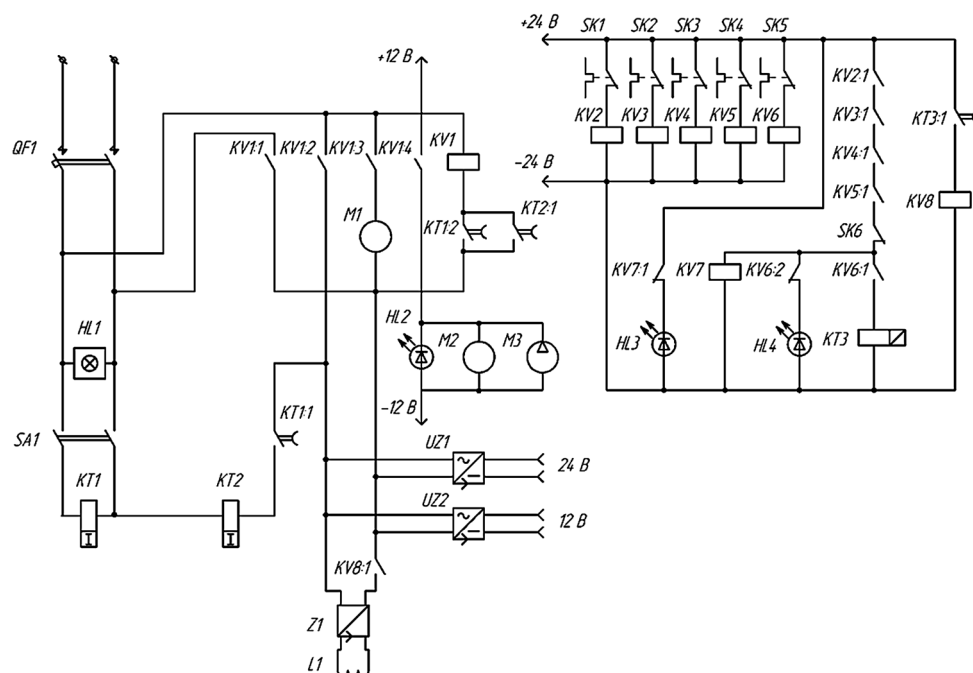
Рисунок 1 – Функциональная схема лабораторного стенда:

- 1 – регулятор частоты, 2 – система управления, 3 – генератор импульсов, 4 – источник питания, 5 – инвертор, 6 – выходной трансформатор, 7 – индикация работы индуктора, 8 – индуктор

Принципиальная схема установки реализована на готовых типовых решениях с добавлением системы защиты от работы в нештатном режиме (рис. 2).

Исходя из алгоритма работы и функциональной схемы, питание установки реализовано по трем независимым линиям. Линия переменного тока 220 В для питания вентиляторов воздушного охлаждения и регистрирующих приборов, линия постоянного тока 24 В – источник питания для работы схемы защиты, линия постоянного тока 12 В – питание измерительных приборов, воздушного охлаждения корпуса и световой индикации.

Рисунок 2 –
Электрическая
принципиальная
схема
лабораторного
стенда



Принципиальная схема содержит следующие основные блоки: источники питания на 12 и 24 В, генератор прямоугольных импульсов регулируемой частоты, система управления генератором, преобразователь частоты, контроллер широтно-импульсной модуляции, резонансный контур (индуктор-конденсатор).

Лабораторная установка выполнена в виде прямоугольного параллелепипеда, стенки которого прозрачны (рис. 3).

Для снижения температуры индуктора в установке предусмотрено два охлаждающих контура, в первом контуре циркулирует охлаждающая вода, во втором – воздух. Первичный водяной контур, включающий бесщеточную помпу, радиатор и расширительный бак, охлаждает индуктор и отдает теплоту радиатору. Вторичный воздушный контур с помощью вен-

тилятора охлаждает радиатор. Радиатор имеет большую площадь теплообмена для эффективного теплосъема с помощью вынужденной конвекции.

Индуктор выполнен в виде спирали из медной трубки диаметром 6 мм, намотанной на керамический тигель. На индукторе установлена термопара для контроля температуры.

Измерительная аппаратура содержит два блока измерителя-регулятора Овен ТРМ01, адаптированных для измерения тока и температуры. Ток индуктора контролируется аналоговым амперметром GB/7676-96.

Принцип работы установки следующий: напряжение на установку подается путем включения автоматического выключателя, после чего переключатель на передней панели установки переводится в положение «вкл». Запу-



Рисунок 3– Индукционный нагреватель. Лабораторный стенд

скаются первичный и вторичный охлаждающие контуры. Правильность работы установки подтверждается световой сигнализацией. После выхода установки на рабочий режим загорается светодиод, сигнализирующий о начале работы индуктора. С помощью потенциометра выбирается режим работы, устанавливается частота резонансного контура. В процессе работы показания приборов регистрируются согласно плану эксперимента.

По окончании исследований переключатель ставится в положение «выкл», после чего установка переходит в режим охлаждения, который сигнализируется соответствующим индикатором. После завершения охлаждения световая сигнализация отключается и установку можно обесточить автоматическим выключателем.

Во время работы со стендом необходимо соблюдать требования безопасности при работе в электроустановках до 1000 В. Кроме того, нельзя допускать перегрева заготовки свыше 300 °С во избежание выхода из строя индуктора. О нештатном режиме работы свидетельствует задымление, посторонние шумы, резкий запах, установку при этом необходимо немедленно обесточить.

Результаты и обсуждение. В ходе эксперимента были проведены следующие испытания:

- измерение температурной характеристики в зависимости от времени при разных диаметрах заготовки и разных токах индуктора;
- измерение скорости нагрева в зависимости от диаметра заготовки при разных токах индуктора.

Измерение тока и напряжения производилось с помощью универсального прибора Овен

ТРМ01. Измерение температуры заготовок проводилось с помощью пирометра Center 350 Series.

Результаты измерения зависимости температуры заготовки от времени при разных диаметрах заготовки и разных токах индуктора представлены на рисунке 4.

Анализ зависимостей позволяет сделать вывод, что с увеличением диаметра заготовки увеличивается время ее прогрева до установленной температуры. Увеличение тока индуктора в начальный момент нагрева до 120 °С незначительно повышает температуру заготовки. С увеличением времени нагрева повышение тока индуктора с 15 до 30 А увеличивает температуру заготовки на 30 °С.

Объясняется это увеличением интенсивности магнитного поля и, как следствие, усилением вихревых токов в заготовке. На заготовке диаметром 10 мм наблюдается перелом в кривых нагрева в области 60 °С, связанный с быстрым поверхностным нагревом заготовки и охватом зоной нагрева большей площади поперечного сечения заготовки, что приводит к поддержанию большой скорости нагрева. При увеличении времени нагрева усиливается теплоотдача от заготовки в окружающую среду и скорость нагрева уменьшается.

Зависимости скорости нагрева от диаметра заготовки при разных токах индуктора приведены на рисунке 5. Анализ экспериментальных данных второго опыта показывает, что наибольшую скорость нагрева имеет заготовка диаметром 10 мм. Связано это с быстрой передачей температуры внутрь заготовки и выравниванием температурного поля по сечению заготовки. Повышение тока индуктора увели-

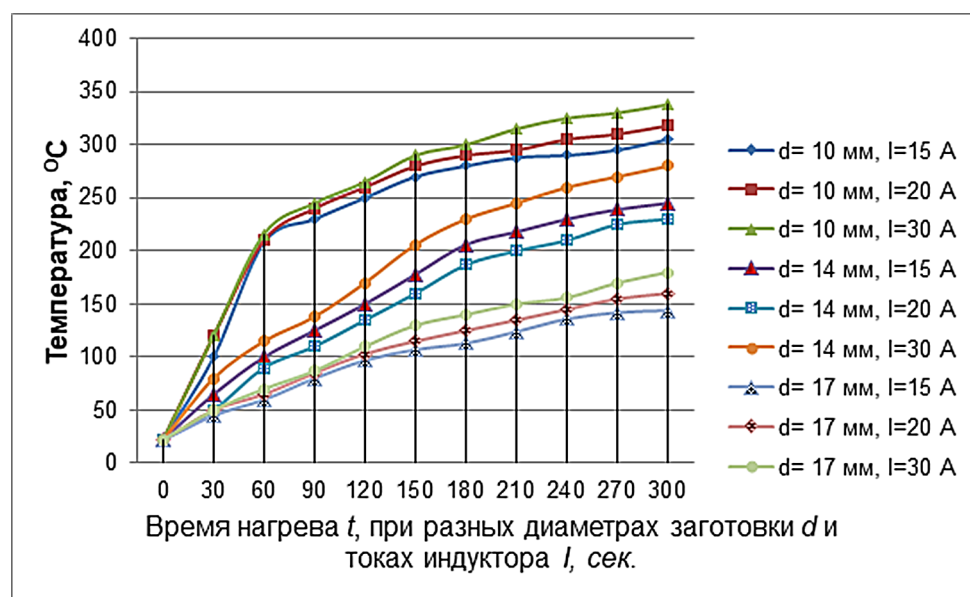


Рисунок 4 –
Зависимости температуры заготовки от ее диаметра при разных токах нагрева

чивает скорость нагрева вследствие усиления магнитного поля индуктора.

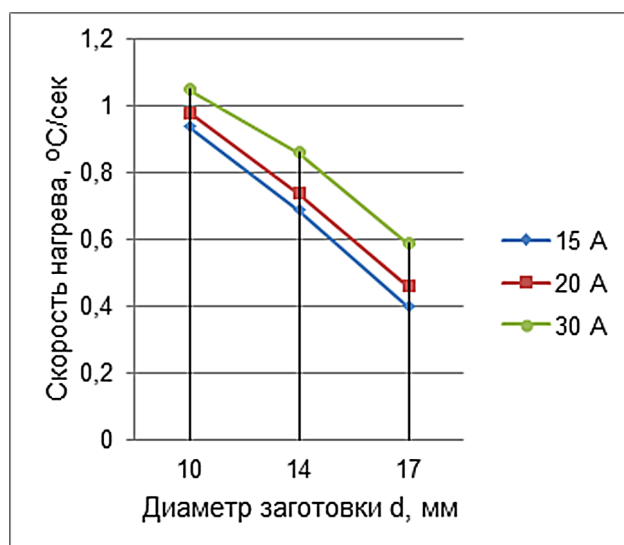


Рисунок 5 – Зависимость скорости нагрева от диаметра заготовки при разных токах нагрева

Повышение тока индуктора на 1 А увеличивает скорость нагрева на заготовке диаметром 17 мм на 0,01 °C/с, а на заготовке диаметром 10 мм – на 0,08 °C/с.

Вывод. Разработанная лабораторная установка позволяет исследовать основные режимные параметры индукционного нагрева, в том числе температурные характеристики нагрева в зависимости от диаметра заготовки и тока индуктора. Полученные результаты могут использоваться для проектирования и выбора режимных параметров установок индукционного нагрева.

Благодарность. Авторы выражают благодарность инженеру Кутянову Олегу Борисовичу за помощь в сборке и наладке индукционной электронагревательной установки

Список источников

1. Абашев Д. Т., Лекомцев П. Л. Индукционный электронагрев в сельском хозяйстве // Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии. 2011. № 4(29). С. 57-58. EDN QBUFWZ.
2. Алиферов А. И., Луци С. Индукционный и электроконтактный нагрев металлов: моногр. Новосибирск: НГТУ, 2011. 410 с.
3. Бланк А. В., Азанов А. В. Магнитоэлектрические установки индукционного нагрева и их электротепловые расчеты на базе каскадных схем замещения // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2012. № 6. С. 65-69.
4. Демидович В. Б. Компьютерное моделирование и оптимальное проектирование энергосберега-

ющих технологий индукционного нагрева металлов // Изв. РАН. Энергетика. 2012. № 6. С. 48–63.

5. Демидович В. Б. О точности вычисления температурных полей при индукционном нагреве // Индукционный нагрев. 2013. №1(23). С. 46 EDN PXQSIJ.

6. Инженерный расчет индукционных водонагревателей / П. Л. Лекомцев [и др.] // Инженерный вестник Дона. 2016. № 3. <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n3y2016/3679>

7. Инкин А. И., Алиферов А. И., Бланк А. В. Электротепловые расчеты установок электронагрева на основе универсальных каскадных схем замещения: моногр. Новосибирск: НГТУ, 2013. 202 с.

8. Качанов А. Н., Качанов Н. А., Коренков Д. А. Классификация и область применения систем низкотемпературного индукционного нагрева с разомкнутыми магнитопроводами // Вестник Московского энергетического института. 2016. № 2. С. 36–40.

9. Кувалдин А. Б. Индукционный нагрев ферромагнитной стали. Москва: Энергоатомиздат, 1988. 284 с.

10. Лекомцев П. Л., Корепанов А. С., Соловьев А. С. Расчет и моделирование плоского индукционного нагревателя // Инновации в сельском хозяйстве. 2016. № 5(20). С. 173-178. EDN VJQYKN.

11. Лекомцев П. Л., Соловьев А. С., Корепанов А. С. Расчет вихревого индукционного нагревателя // Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии. 2015. № 4 (45).

12. Лекомцев П. Л., Соловьев А. С., Корепанов А. С. Расчет цилиндрического индукционного водонагревателя без магнитопровода // Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии. 2014. № 4 (41). С. 34-37.

13. Некоторые аспекты распространения электромагнитного поля в токопроводящих материалах индукционных нагревателей / Р. И. Гаврилов [и др.] // Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии. 2022. № 2 (70). С. 63-69.

14. Немков В. С., Демидович В. Б. Теория и расчет устройств индукционного нагрева. Ленинград: Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1988. 280. С. 6-9.

15. Поляков В. Д., Чаколья Э. Высокочастотный генератор для индукционного нагрева // Электротехника. 2000. № 12. С. 31-34.

16. Korepanov A. S., Lekomtsev P. L., Niyazov A. M. Energy characteristics of induction water heater // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. V. 433, № 1.

References

1. Abashev D. T., Lekomcev P. L. Indukcionnyj elektronagrev v sel'skom xozyajstve // Vestnik Izhevskoj gosudarstvennoj sel'skoxozyajstvennoj akademii. 2011. № 4(29). S. 57-58. EDN QBUFWZ.

2. Aliferov A. I., Lupi S. Indukcionnyj i èlektrokontaktnyj nagrev metallov: monogr. Novosibirsk: NGTU, 2011. 410 s.
3. Blank A. V., Azanov A. V. Magnitoèlektricheskie ustanovki indukcionnogo nagreva i ix èlektroteplovye raschety na baze kaskadnyx sxem zameshheniya // Izvestiya vysshix uchebnyx zavedenij. Èlektromexanika. 2012. № 6. S. 65-69.
4. Demidovich V. B. Komp'yuternoe modelirovanie i optimal'noe proektirovanie ènergoberegayushix tehnologij indukcionnogo nagreva metallov // Izv. RAN. Ènergetika. 2012. № 6. S. 48–63.
5. Demidovich V. B. O tochnosti vychisleniya temperaturnyx polej pri indukcionnom nagreve // Indukcionnyj nagrev. 2013. №1(23). S. 46 EDN PXQSIJ.
6. Inzhenernyj raschet indukcionnyx vodonagrevatelej / P. L. Lekomcev [i dr.] // Inzhenernyj vestnik Dona. 2016. № 3. <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n3y2016/3679>
7. Inkin A. I., Aliferov A. I., Blank A. V. Èlektroteplovye raschety ustanovok èlektronagreva na osnove universal'nyx kaskadnyx sxem zameshheniya: monogr. Novosibirsk: NGTU, 2013. 202 s.
8. Kachanov A. N., Kachanov N. A., Korenkov D. A. Klassifikaciya i oblast primeneniya sistem nizkotemperaturnogo indukcionnogo nagreva s razomknuty mi magnitoprovodami // Vestnik Moskovskogo ènergeticheskogo instituta. 2016. № 2. S. 36–40.
9. Kuvaldin A. B. Indukcionnyj nagrev ferromagnitnoj stali. Moskva: Ènergo-atomizdat, 1988. 284 s.
10. Lekomcev P. L., Korepanov A. S., Solov'ev A. S. Raschet i modelirovanie ploskogo indukcionnogo nagrevatelya // Innovacii v sel'skom xozyajstve. 2016. № 5(20). S. 173-178. EDN VJQYKN.
11. Lekomcev P. L., Solov'ev A. S., Korepanov A. S. Raschet vixrevogo indukcionnogo nagrevatelya // Vestnik Izhevskoj gosudarstvennoj sel'skoxozyajstvennoj akademii. 2015. № 4 (45).
12. Lekomcev P. L., Solov'ev A. S., Korepanov A. S. Raschet cilindricheskogo indukcionnogo vodonagrevatelya bez magnitoprovoda // Vestnik Izhevskoj gosudarstvennoj sel'skoxozyajstvennoj akademii. 2014. № 4 (41). S. 34-37.
13. Nekotorye aspekty rasprostraneniya èlektromagnitnogo polya v tokoprovodyashhix materialax indukcionnyx nagrevatelej / R. I. Gavrilov [i dr.] // Vestnik Izhevskoj gosudarstvennoj sel'skoxozyajstvennoj akademii. 2022. № 2 (70). S. 63-69.
14. Nemkov V. S., Demidovich V. B. Teoriya i raschet ustroystv indukcionnogo nagreva. Leningrad: Ènergo-atomizdat. Leningradskoe otdelenie, 1988. 280. S. 6-9.
15. Polyakov V. D., Chakol'ya E. Vy'sokochastotnyj generator dlya indukcionnogo nagreva // Èlektrotexnika. 2000. № 12. S. 31-34.
16. Korepanov A. S., Lekomtsev P. L., Niyazov A. M. Energy characteristics of induction water heater // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. V. 433, № 1.

Сведения об авторах:

П. Л. Лекомцев[✉], доктор технических наук, профессор, <https://orcid.org/0000-0002-9554-7636>;

Н. Л. Олин, старший преподаватель, <https://orcid.org/0000-0002-9554-7636>;

Л. П. Артамонова, кандидат экономических наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0003-1534-4714>

Удмуртский ГАУ, ул. Студенческая, 11, Ижевск, Россия, 426069

lekomcev@yandex.ru

Original article

DEVELOPMENT AND CHARACTERISTICS ANALYSIS OF INDUCTION ELECTRIC HEATING UNIT

Petr L. Lekomtsev[✉], **Nikolay L. Olin**, **Lyudmila P. Artamonova**

Udmurt State Agricultural University, Izhevsk, Russia

lekomcev@yandex.ru

Abstract. High-frequency induction heating technologies are widely used in the processes of ultra-clean contactless melting, metal welding and heat treatment of complex machine parts, when processing small parts that can be damaged by gas flame or arc heating. The purpose of the study is to develop and study the characteristics of an induction electric heating unit. The objectives of the study are to develop a structural and basic diagram of the induction unit, and to conduct experimental studies of its characteristics. To study the induction heating modes, a laboratory setup was developed that allows measuring the temperature of the heated workpiece and the inductor; adjusting the current frequency; measuring the currents of the primary link and inductor; setting the maximum efficiency mode. During the experiment, the measurements of the temperature characteristic depending on time at different diameters of the workpiece and different inductor currents, and the measurements of the heating rate depending on the diameter of the workpiece at different inductor currents were carried out. The analysis of the studies allows us to conclude that with an increase in the diameter of the workpiece, the time of its heating to the set temperatures increases (within 150...350°C depending on the diameter of the workpiece). An increase in the

inductor current at the initial moment of heating to 120 s slightly increases the temperature of the workpiece. With an increase in the heating time, an increase in the inductor current from 15 to 30 A increases the temperature of the workpiece by 30°C. The heating rate on a workpiece with a diameter of 17 mm with an increase in the inductor current by 1 A increases by 0.01°C/s, and on a workpiece with a diameter of 10 mm – by 0.08°C/s. Thus, the developed laboratory setup allows us to study the main operating parameters of induction heating, including the temperature characteristics of heating depending on the diameter of the workpiece and the inductor current. The results obtained can be used for designing and selecting the operating parameters of induction heating units.

Key words: induction heating, inductor, inductor current, specific power.

For citation: Lekomtsev P. L., Olin N. L., Artamonova L. P. Development and characteristics analysis of induction electric heating unit. The Bulletin of Izhevsk State Agricultural Academy. 2025; 2 (82): 161-168. (In Russ.). https://doi.org/10.48012/1817-5457_2025_2_161-168.

Authors:

P. L. Lekomtsev[✉], Doctor of Technical Sciences, Professor, <https://orcid.org/0000-0002-9554-7636>;

N. L. Olin, Senior Lecturer, <https://orcid.org/0000-0002-9554-7636>;

L. P. Artamonova, Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, <https://orcid.org/0000-0003-1534-4714>
Udmurt State Agricultural University, 11 Studencheskaya St., Izhevsk, Russia, 426069
lekomcev@yandex.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: the authors declare that they have no conflicts of interest.

Статья поступила в редакцию 27.03.2025; одобрена после рецензирования 17.04.2025;

принята к публикации 29.05.2025.

The article was submitted 27.03.2025; approved after reviewing 17.04.2025; accepted for publication 29.05.2025.

Научная статья

УДК 631.314.02

DOI 10.48012/1817-5457_2025_2_168-174

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО РЕГУЛИРОВАНИЮ НАГРУЗКИ НА РАБОЧИЙ ОРГАН ПРИКАТЫВАЮЩЕГО АГРЕГАТА

**Щитов Сергей Васильевич, Кривуца Зоя Федоровна[✉], Поликутина Елена Сергеевна,
Безверхая Марина Владимировна, Щитова Виктория Андреевна**

ФГБОУ ВО Дальневосточный ГАУ, Благовещенск, Россия

zfk20091@mail.ru

Аннотация. Основа будущего урожая возделываемых сельскохозяйственных культур во многом зависит от плотности почвы. Для ее поддержания используются специальные сельскохозяйственные агрегаты – катки, которые позволяют за счет изменения нагрузки на рабочий орган создавать ту или иную плотность. При этом очень часто для регулирования нагрузки на рабочий орган используются всевозможные догрузжатели, как активные, так и пассивные (балласт). В небольших крестьянско-фермерских хозяйствах Амурской области в большинстве случаев используются водоналивные катки с так называемым пассивным догрузжением нагрузки на рабочий орган (каток) за счет изменения его массы. Это накладывает определенные трудности при необходимости изменения массы (нагрузки на рабочий орган) для достижения необходимой плотности почвы. Цель работы – разработать и обосновать техническое решение по возможности адаптации прицепных водоналивных катков к автоматическому регулированию нагрузки на рабочий орган. Исследования проводились как в лабораторных, так и в производственных условиях КФХ Жуковин С. А. Амурской области. Измерение величины влажности почвы осуществляли с помощью цифрового влагомера PMS-710. Плотность почвы определяли общеизвестным способом с использованием режущего цилиндра. Твердость почвы определяли с помощью цифрового измерителя твердости почвы TYD-2. При определении нагрузки на рабочий орган прикатывающего агрегата