

УДК 621.365.51

Классификация и область применения систем низкотемпературного индукционного нагрева с разомкнутыми магнитопроводами

А. Н. Качанов*, Н. А. Качанов, Д. А. Коренков

Проанализированы существующие классификации систем «индуктор–загрузка». Предложена классификация индукционных установок с разомкнутыми магнитопроводами.
Ключевые слова: индукционный нагрев, разомкнутый магнитопровод.

Прежде чем приступить к анализу классификационных признаков специального электротермического оборудования, введем понятие системы низкотемпературного индукционного нагрева (СНИН). В данном определении ключевым является слово «система» (*Systema* (греч.) — целое, составленное из частей соединение). В современном научно-техническом значении это понятие имеет широкую область применения, где практически каждый объект может быть рассмотрен как система, поскольку его полное понимание предполагает построение семейства соответствующих определений, как содержательных, так и формальных [1]. Согласно существующим теориям систем рассматриваемая СНИН относится к материальным нелинейным системам неорганической природы происхождения, т. к. в процессе нагрева электрофизические свойства нагреваемых магнитных и немагнитных материалов: удельное электрическое сопротивление, магнитная проницаемость, теплоемкость и др., — меняются, в том числе и в области низких температур (20 – 650 °С).

Для всех разновидностей конструкций устройств

индукционного нагрева характерны наличие в них обмотки индуктора, выполненной проводником определенной конфигурации, по которому течет переменный ток, создающий электромагнитное поле, а также нагреваемой металлической загрузки (объекта), в которой индуцируются вихревые токи, и выделяется тепло по закону Джоуля–Ленца.

Понятие «система», применительно к индукционным нагревательным устройствам при обязательном наличии нагреваемого объекта, используется в работах ряда известных ученых, таких как доцент А. М. Вайнберг [2], профессор А. Б. Кувалдин [3], профессор Э. Кольбе [4] и др., внесших значительный вклад в разработку теоретических основ индукционных нагревательных устройств.

Наиболее точным описанием системы является определение системы «индуктор–загрузка», предложенное проф. А. Б. Кувалдиным, которое предполагает наличие индуктора, загрузки, зазора между ними, пространств снаружи системы и в полости индуктора или загрузки (в определенных случаях). Этому определению в полной мере соответствует принятое автором определение системы низкотемпературного индукционного нагрева. Последнее тождественно известному

* Kan@ostu.ru

определению системы «индуктор–нагреваемый металлический объект», также содержащему все вышеназванные признаки системы.

Система «индуктор–нагреваемый металлический объект» формирует и проявляет свои свойства в процессе взаимодействия с нагреваемой средой, поэтому она может быть рассмотрена как составляющая часть системы более высокого уровня, например, систем электро- и теплоснабжения промышленного предприятия, животноводческого комплекса или птицефабрики, входящих, в свою очередь, в более сложную автоматизированную систему управления технологическим процессом производства готовой продукции.

Многообразие типов конструкций индукционных нагревательных устройств зависит от области их применения, геометрических размеров и формы нагреваемых объектов, что в свою очередь влияет на конфигурацию создаваемого устройством электромагнитного поля — одного из основных факторов классификации.

В общем случае индукционные устройства принято делить по различным признакам, а именно: назначению, уровню мощности, диапазону используемых частот, конструктивным признакам, системам охлаждения обмоток индуктора и др. [2, 5 — 7].

Стремясь создать единообразные методы расчета электрических и энергетических характеристик систем «индуктор–загрузка» А. М. Вайнберг и А. П. Альтгаузен выделяют четыре типа систем: с магнитопроводом и без него, косвенный нагрев с промежуточным нагревателем, индукционно-плазменный. Далее каждый тип систем «индуктор–загрузка» классифицируется, уточнено по трем группам признаков, учитывающих электрофизические свойства и отличительные особенности электромагнитного поля, индуктора и нагреваемой загрузки.

К первой группе относятся такие характерные признаки как наличие или отсутствие в рассматриваемой системе магнитопроводов и электромагнитных экранов, значение частоты и уровня напряженности магнитного поля.

Вторая группа признаков, относящихся к обмотке индуктора — конфигурация, форма сечения индуктирующего токопровода, число слоев обмотки, относительная толщина индуктирующего провода (по отношению к глубине проникновения тока в металл), а также коэффициент заполнения обмотки.

Третья группа признаков, относящихся к загрузке (нагреваемому телу) — ее геометрическая форма (одно- или многослойное нагреваемое изделие), электрофизические свойства материала, ориентация в рабочем зазоре индуктора по отношению к силовым линиям электромагнитного поля с учетом глубины проникновения тока в металл.

Анализ приведенных классификационных признаков показал, что они не в полном объеме учитывают все возможные факторы, а, следовательно, классифи-

кация на их основе страдает известным схематизмом. Кроме того, в работах вышеназванных авторов не учитывалась конфигурация магнитного поля, что снижает ценность разработанной ими классификации.

Классификация, предложенная проф. А. Б. Кувалдиным, свободна от указанных выше недостатков (рис. 1). В ней все устройства для индукционного низкотемпературного нагрева объединены в шесть групп. Там же [7] имеется информация об удельной поверхностной мощности, рекомендуемой температуре нагрева объекта, площади нагреваемой поверхности (как единичной мощности устройства, деленной на удельную поверхностную мощность). Эти сведения представляют практический интерес для специалистов, занятых в областях исследований, проектирования и эксплуатации систем «индуктор–загрузка».

Поскольку теория и практика индукционного нагрева постоянно совершенствуется, то известные классификации требуют корректировки. В частности, приведенная на рис. 1, *з* индукционная установка с разомкнутым магнитопроводом может быть использована только для нагрева металлических изделий в поперечном электромагнитном поле, тогда как все известные индукционные устройства с разомкнутыми магнитопроводами, описанные в отечественной и зарубежной технической литературе целесообразно объединить в следующие три группы [8 — 11]:

устройства для нагрева плоских металлических изделий в поперечном электромагнитном поле;

примыкающий индуктор;

устройства для нагрева плоских металлических изделий в бегущем электромагнитном поле.

На рис. 2 представлена классификация СНИН с разомкнутыми магнитопроводами. При ее разработке были дополнительно учтены следующие признаки: особенность конструкции магнитопровода и его расположение в пространстве с учетом размещения силовых линий магнитного поля относительно поверхности нагреваемого плоского объекта, а также характер электромагнитного поля (переменное или бегущее). Общим характерным признаком для всех типов устройств является то, что они предназначены для работы в сети трехфазного переменного тока напряжением 220/380 В, частотой 50 Гц.

В первую группу входят системы «индуктор–плоский нагреваемый металлический объект», в которых нагреваемый плоский объект находится в рабочем зазоре индуктора между торцевыми частями С-образного разъемного магнитопровода. Обмотка с индуктирующим проводом может располагаться как на стержне магнитопровода (рис. 2, *а*), так и на полюсных наконечниках с обеих сторон рабочего зазора индуктора. Создаваемый индуктором магнитный поток пронизывает нагреваемый плоский объект перпендикулярно его поверхности. Устройства такого типа получили название устройств для нагрева плоских металлических

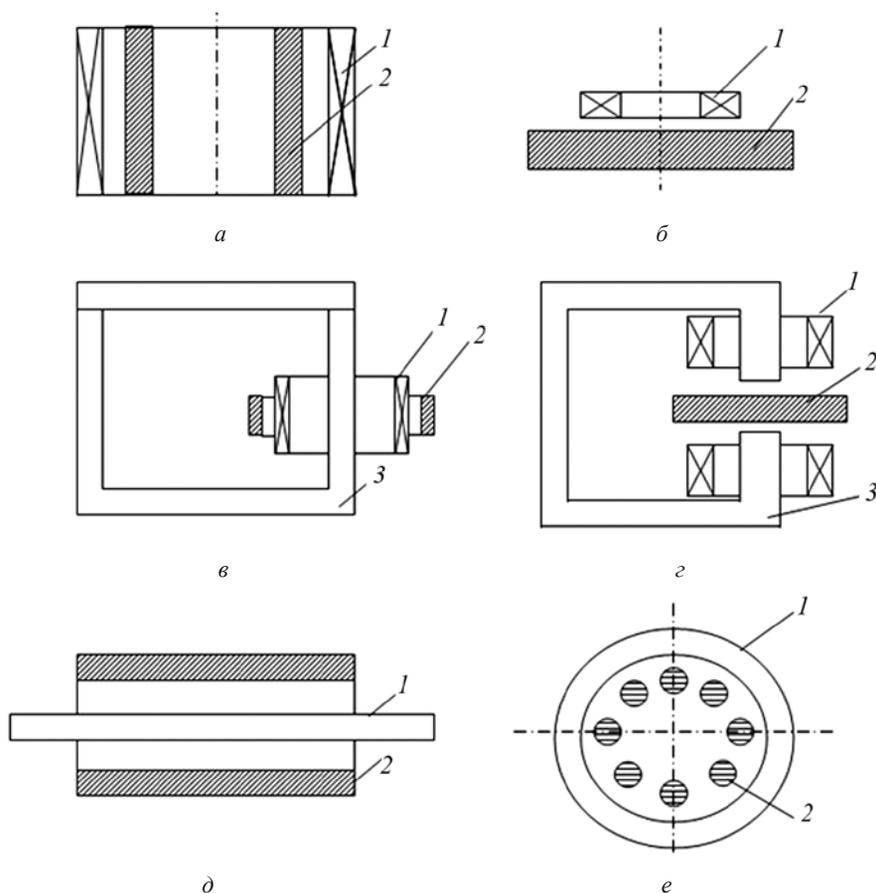


Рис. 1. Основные типы систем «индуктор–загрузка» устройств индукционного нагрева ферромагнитной стали:

1 — индуктор; 2 — загрузка; 3 — магнитопровод

изделий в поперечном электромагнитном поле (ПЭМП). Электрический КПД установок может достигать значений 0,9 — 0,98 даже при нагреве материалов с малым удельным сопротивлением (алюминий, медь и т.п.). По принципу действия система «индуктор–плоский нагреваемый металлический объект» аналогична трансформаторам с дисковыми обмотками. Фактор глубины проникновения тока в металл для устройств ПЭМП не является решающим, поэтому подобные устройства могут быть рекомендованы для нагрева листового материала, толщина которого много меньше глубины проникновения тока в металл.

Вторая группа – система «индуктор–плоский нагреваемый металлический объект» с тремя возможными вариантами размещения примыкающих индукторов (рис. 2, б — г) относительно нагреваемого плоского объекта.

Вариант рис. 2, б предназначен для одностороннего нагрева примыкающим индуктором плоских изделий, толщина которого существенно влияет на энергетические характеристики системы.

Варианты рис. 2, в, г предназначены для двустороннего нагрева примыкающими индукторами плоских металлических объектов. В данном случае толщина пластины так же оказывает существенное влияние на

характер протекания электромагнитных процессов. Кроме того, регулируя конфигурацию электромагнитных полей, можно нагреть плоское изделие как согласно текущими, так и встречно текущими вихревыми токами (см. соответственно варианты рис. 2, в, г).

Результаты экспериментальных исследований показали, что для устройств второй группы характерно неравномерное распределение внутренних источников тепла по поверхности и толщине нагреваемого плоского объекта, приводящее к его неравномерному нагреву.

Системы «индуктор–нагреваемый плоский металлический объект», относящиеся к третьей группе представлены на рис. 2, д — ж. Их отличительная особенность заключается в том, что трехфазная обмотка, размещена в пазах магнитопровода определенным образом для создания бегущего электромагнитного поля, которое наводит в металлической пластине не только вихревые токи, но и вызывает появление механических сил, действующих на нагреваемый объект.

Вариант на рис. 2, д обеспечивает односторонний нагрев и заданное перемещение плоского объекта.

Варианты рис. 2, е, ж также обеспечивают нагрев и перемещение плоского металлического объекта. Скорость движения объекта можно регулировать путем

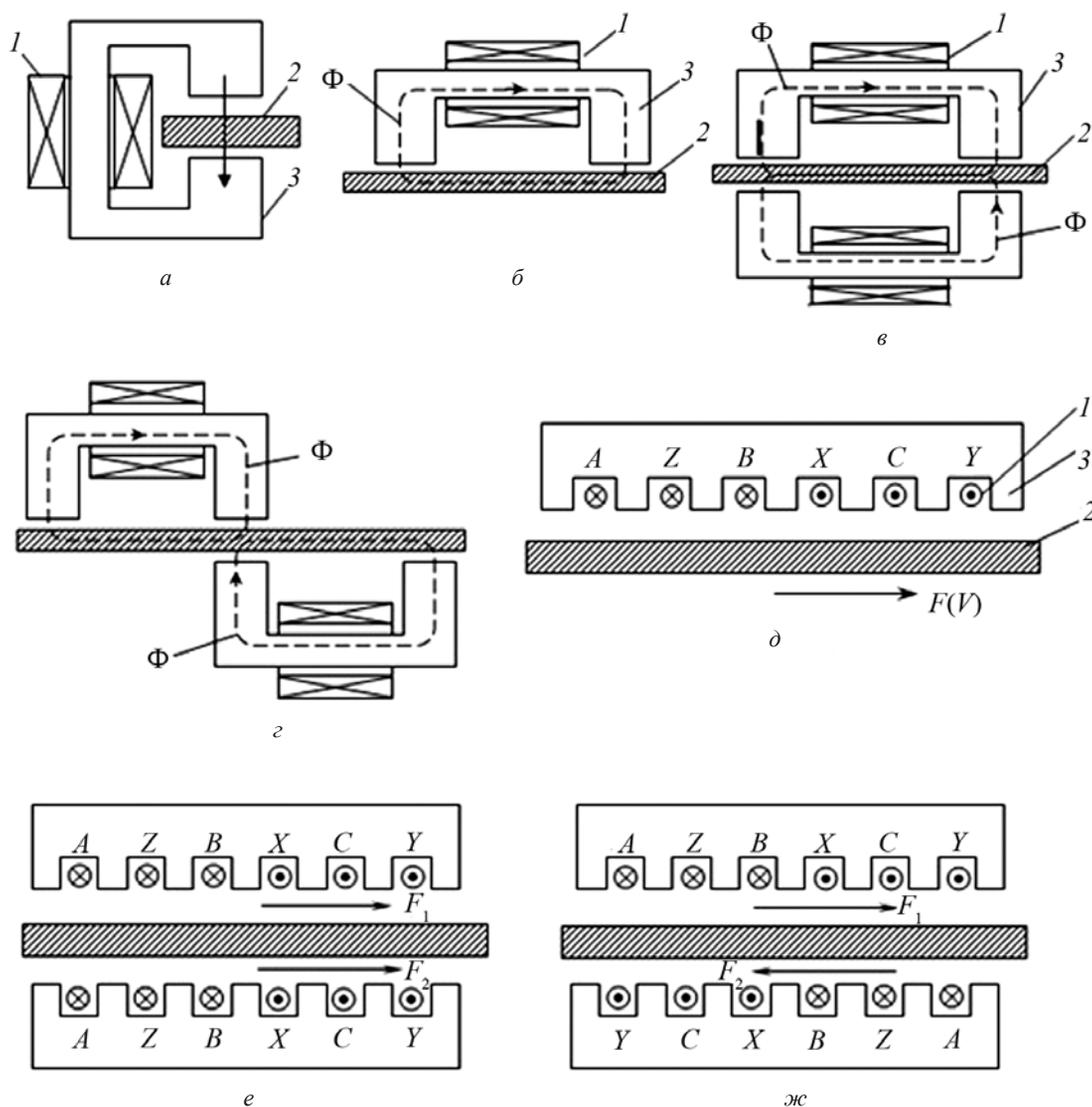


Рис. 2. Основные типы систем «индуктор с разомкнутым магнитопроводом—плоский нагреваемый металлический объект»:

1 – индуктор; 2 – нагреваемый объект; 3 – магнитопровод

изменения соотношения механических сил F_1 и F_2 (согласное и встречное включение обмоток, расположенных в верхнем и нижнем магнитопроводах). Индукционные устройства этой группы имеют относительно высокие значения КПД (0,7 — 0,9) и коэффициента мощности (0,2 — 0,7 — без устройств компенсации реактивной мощности). Как потребители электрической энергии они представляют собой практически равномерную нагрузку для питающей сети, а также обеспечивают равномерный нагрев изделия за счет его движения и наличия бегущего магнитного поля.

Рассмотренная в статье классификация может быть полезна специалистам, занятым в области проектирования и эксплуатации систем низкотемпературного индукционного нагрева, работающих на промышленной частоте, для различных отраслей экономики. Конфигурация магнитного поля для рассмотренных выше СНИН не одинакова, следовательно, для каждого кон-

кретного случая требуется разработка своей математической модели, описывающей электромагнитные и тепловые процессы, протекающие в системе с учетом нелинейности среды в области низких температур.

Учитывая, что техника индукционного нагрева продолжает развиваться, то предложенная в статье классификация СНИН «индуктор—нагреваемый плоский объект» может быть в дальнейшем уточнена и дополнена.

Литература

1. Садовский В.Н. Система // БСЭ. М.: Советская энциклопедия. 1976. Т. 23. С. 463 — 464.
2. Вайнберг А.М. Индукционные плавильные печи. М.: Энергия, 1967.
3. Кувалдин А.Б. Индукционный нагрев ферромагнитной стали. М.: Энергоатомиздат, 1988.

4. **Kolbe E., Kuwaldin A.B.** Induktions Erwärmung // TНI. Sektion Elektrotechnik und KDT. Hochschulektion, 1982.

5. **Электротермическое** оборудование: Справочник / под общ. ред. А.П. Альтгаузена. М.: Энергия, 1980.

6. **Альтгаузен А.П.** Применение электронагрева и повышение его эффективности. М.: Энергоатомиздат, 1987.

7. **Кувалдин А.Б.** Низкотемпературный индукционный нагрев стали. М.: Энергия, 1976.

8. **Качанов А.Н., Кувалдин А.Б.** Характеристики индукционного устройства для нагрева металлической ленты в поперечном магнитном поле // Современное электротермическое оборудование для термообработки металлических материалов. М.: МДНТП им. Ф.Э. Дзержинского, 1979. С. 29 — 33.

9. **Качанов А.Н., Качанов Н.А.** Применение систем низкотемпературного индукционного нагрева в

крестьянских и фермерских хозяйствах республики Казахстан // Рекомендации. ЦНТР при акиме Павлодарской области и Министерстве науки — Академии наук Р. Казахстан. КазгосИНТИ, 1998.

10. **Качанов А.Н., Голда А.В., Карнаухова Л.Н.** Исследование электромагнитного поля в системе «примыкающий индуктор–плоский нагреваемый объект» // Энерго- и ресурсосбережение — XXI век: Сб. материалов X Междунар. науч.-практ. интернет-конференции / под. ред. В.А. Голенкова. Орел: Госуниверситет–УНПК, 2012. С. 146 — 148.

11. **Качанов А.Н., Качанов Н.А., Голда А.В.** Расчет распределения основных параметров электромагнитного поля в металлической загрузке при однофазном индукционном нагреве // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2012. № 6. С. 35 — 40.

Статья поступила в редакцию 11.11.2015