

УДК 621.365.5

**КЛЮЧЕВЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ  
ИНДУКЦИОННЫХ НАГРЕВАТЕЛЕЙ\****Л.С. Зимин, А.С. Егиазарян*Самарский государственный технический университет  
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

*Указываются основные проблемы, возникающие при проектировании, электрооборудовании, электроснабжении и эксплуатации индукционных нагревательных установок. Анализируются продольный и поперечный краевые эффекты. Рассматриваются электродинамические явления при индукционном нагреве. Раскрываются особенности трехфазных индукторов как в отношении равномерности нагрева, так и в отношении электромагнитной совместимости индукционных нагревателей с системой электроснабжения. Даются рекомендации по оптимизации системы электроснабжения электротермических производств с индукционными установками. Анализируются методики расчета индукторов, применяемых в прокатном и прессовом производствах. Указываются особенности использования электромагнитной индукции при нагреве алюминиевых сплавов. Показан комплексный подход к проектированию индукционных нагревательных установок.*

**Ключевые слова:** индуктор, деформация, нагрев, проектирование, электроснабжение, электродинамические силы.

Участок индукционных нагревательных установок (ИНУ), предназначенных для обработки металла давлением (ОМД), где наиболее характерными являются прокатка и прессование, можно условно представить в виде двух транспортных потоков: металл и электроэнергия. В глобальной постановке задачи повышения эффективности электротермического производства необходимо стремиться к комплексной оптимизации этих потоков с целью получения максимума дохода при условии выполнения заданной программы в срок и с заданным качеством [1] и учитывать ряд проблем, которые являются специфическими для индукционного способа нагрева [3].

Наиболее целесообразен единый системный подход к разработке энергоэффективных технологий индукционного нагрева [2, 4]. При этом решаются электромагнитные, электродинамические и тепловые задачи, возникающие при проектировании и эксплуатации ИНУ, а также задачи электромагнитной совместимости ИНУ с системой электроснабжения. В настоящей работе акцент делается на алюминиевые сплавы, широко представленные в металлургическом и машиностроительном производствах и одновременно являющиеся проблемными для индукционного способа нагрева [10].

В последние годы значительно повысился интерес к разработке методов проектирования индукторов [15]. Это объясняется двумя причинами: во-первых, вследствие существенного расширения области промышленного применения ин-

---

*\*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 15-08-03053).*

*Лев Сергеевич Зимин (д.т.н., проф.), профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».*

*Александра Сергеевна Егиазарян (к.т.н.), доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».*

дукционного нагрева возросли потребности в расчетах такого рода; во-вторых, коренным образом изменились возможности их реализации благодаря быстрому развитию компьютерных технологий.

Методика проектирования индукторов может быть представлена в аналитическом (формульном) или алгоритмическом виде. Под алгоритмом понимают точное предписание, определяющее вычислительный процесс от варьируемых исходных данных к искомому результату. Описание алгоритмов допускает различную степень детализации.

Конечный результат аналитического решения задачи, т. е. формулу, можно трактовать, вообще говоря, как сжатое символическое обозначение вычислительного алгоритма. Преимущество аналитического решения заключается в возможности применения хорошо разработанного аппарата эквивалентных преобразований, в результате которых сложный исходный алгоритм (соответствующий, например, дифференциальным или интегральным уравнениям) сводится к значительно более простому – к формуле, содержащей элементарные или специальные, но хорошо табулированные функции.

Удачным сочетанием аналитического решения и экспериментальных исследований удалось получить более четкие закономерности для исследования краевых эффектов при индукционном нагреве прямоугольных заготовок, например слябов перед прокаткой. Как известно, в этом случае дополнительно к продольному краевому эффекту возникает так называемый поперечный краевой эффект, который не существует при нагреве цилиндрических заготовок [6, 13].

Однако преимущества аналитического решения сохраняются только до тех пор, пока окончательные формулы (если их вообще можно получить) допускают компактную и легко обозримую запись [5]. В настоящее время имеется несколько методик расчета прямоугольных индукторов, использующих в основном представление системы «индуктор – заготовка» в виде воздушного трансформатора.

Аналитический расчет может быть использован лишь в качестве прикидочного. Для точного расчета мощных ИНУ промышленной частоты для нагрева слябов весом 3–4 т, когда затраты на изготовление весьма велики, необходим более надежный метод расчета. Таким методом может быть метод физического моделирования с использованием геометрического подобия.

Авторами для моделирования использовалась частота 2500 Гц, что позволило проводить эксперименты на модели, имеющей размеры в 7,07 раз меньше, чем индуктор промышленной частоты.

Основным фактором, препятствующим широкому внедрению мощных индукционных установок для нагрева тел прямоугольной формы, например слябов, является сильная вибрация обмотки индуктора, которая сопровождается шумом, превышающим санитарные нормы, и может привести к разрушению установки. Суть проблемы заключается в следующем. В случае индукционного нагрева тел с резко изменяющейся кривизной поверхности, к которым в первую очередь относятся слябы, электромагнитные процессы в системе «индуктор – металл» характеризуются выделением тепловой энергии в заготовке и индукторе; кроме того, в этом случае необходимо учитывать объемную плотность электромагнитного поля и связанные с ней электродинамические усилия [11, 12]. Эта проблема острее проявляется при индукционном нагреве прямоугольных заготовок, особенно из немагнитных металлов. Авторами разработаны методы расчета электродинамических и виброакустических характеристик индукторов для нагрева

прямоугольных заготовок, которые можно использовать уже на стадии проектирования.

Действительно энергоэффективный технологический комплекс «ИНУ – деформация» можно спроектировать только с учетом его системы электроснабжения (СЭС). Под энергоэффективным проектированием СЭС комплекса ИНУ понимается построение наиболее экономичного ее варианта при соблюдении технических условий, накладываемых как элементами СЭС, так и потребителями – ИНУ. В качестве экономического критерия энергоэффективности целесообразно принимать суммарные приведенные затраты на СЭС, которые определяются технологическими, электротехническими и топологическими элементами системы электроснабжения [7, 8, 9, 14].

К технологическим относятся: технологическая схема процесса «ИНУ – деформация» с указанием режимов работы, количество и мощность ИНУ, частота тока, требования к надежности электроснабжения и регулированию мощности; к электротехническим: напряжение и число фаз (при частоте 50 Гц) ИНУ, количество и мощность источников питания, компенсирующих устройств, конструктивное исполнение сети; к топологическим: координаты расположения ИНУ, источников питания, компенсирующих устройств, а также конфигурация сети.

С ростом мощности ИНУ при их однофазном исполнении возникает проблема электромагнитной совместимости ИНУ с обычными потребителями, т. е. симметрирование группы ИНУ согласованием их одновременной работы затруднительно, а применение симметрирующих устройств становится неэкономичным. Поэтому целесообразными представляются два альтернативных решения: раздельное питание ИНУ и других потребителей или применение ИНУ в трехфазном исполнении. Следовательно, параметр числа фаз, имеющий одно из двух значений, целесообразно определять путем, независимым от задачи энергоэффективности. При фиксированном расположении технологического оборудования, а соответственно ИНУ и конденсаторных установок, проектируемыми топологическими параметрами будут лишь координаты расположения источников питания – трансформаторных подстанций. Поскольку расположение подстанций в цехе приходится выбирать в условиях территориальных ограничений, то целесообразно искать их координаты не на непрерывном множестве значений, а на дискретном, без ограничений. При радиальной схеме питания ИНУ длина линий может определяться приближенно для одной из двух конфигураций трассы сети, выполненной или по кратчайшему расстоянию между подстанцией и ИНУ, или с участками, параллельными координатным осям здания цеха.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Егиазарян А.С., Зимин Л.С.* Повышение эффективности индукционного нагрева металла под деформацию // Индукционный нагрев. – СПб.: КОМЛИЗ-ПОЛИГРАФИЯ, 2012. – № 22. – С. 41-43.
2. *Егиазарян А.С., Зимин Л.С.* Комплексный подход к оптимальному проектированию индукционных установок // Известия вузов. Электромеханика. – 2014. – № 5. – С. 63-67.
3. *Егиазарян А.С., Зимин Л.С.* Особенности индукционного нагрева под деформацию // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2015. – № 3 (47). – С. 128-135.
4. *Егиазарян А.С.* Возможные подходы к проектированию индукторов // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2015. – № 1 (45). – С. 194-198.
5. *Егиазарян А.С., Зимин Л.С.* Аналитические исследования при индукционном нагреве // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2009. – № 1 (23). – С. 152-159.

6. Егиазарян А.С., Зимин Л.С. Поперечный краевой эффект при индукционном нагреве // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2010. – № 7 (28). – С. 231-233.
7. Егиазарян А.С., Зимин Л.С. Анализ режимов электроснабжения индукционных установок // Известия вузов. Электромеханика. – 2011. – № 3. – С. 74-76.
8. Егиазарян А.С., Зимин Л.С., Федотов М.Е. Электромагнитная совместимость систем электроснабжения с индукционными установками // Известия вузов. Электромеханика. – 2007. – Спецвыпуск. – С. 75.
9. Егиазарян А.С., Зимин Л.С. Оптимизация электроснабжения индукционных установок // Известия вузов. Электромеханика. – 2009. – Спецвыпуск. – С. 34.
10. Зимин Л.С., Егиазарян А.С. Особенности индукционного нагрева алюминиевых сплавов // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2016. – № 2 (50). – С. 203-208.
11. Зимин Л.С., Егиазарян А.С. Электродинамические процессы при индукционном нагреве // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2016. – № 1 (49). – С. 156-160.
12. Зимин Л.С., Егиазарян А.С. Виброзащита мощных индукторов // Вестник Самарского государственного архитектурно-строительного университета. Градостроительство и архитектура. – 2016. – № 3 (24). – С. 135-139.
13. Зимин Л.С., Егиазарян А.С. Проектирование прямоугольных индукторов // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2016. – № 3 (51). – С. 151-154.
14. Егиазарян А.С., Зимин Л.С. Анализ режимов электроснабжения индукционных установок // Известия вузов. Электромеханика. – 2011. – № 3. – С. 74-76.
15. Егиазарян А.С., Зимин Л.С. Особенности проектирования индукционных нагревательных установок // Известия вузов. Электромеханика. – 2016. – № 6 (548). – С. 44-48.

*Статья поступила в редакцию 13 января 2017 г.*

## **KEY PROBLEMS DURING USE INDUCTION HEATERS**

***L.S. Zimin, A.S. Yeghiazaryan***

Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

*The main problems in the design, electrical equipment, power supply and operation of the equipment for induction heating are shown. The longitudinal and transverse edge effects are analyzed. Electromagnetic phenomena during induction heating is considered. The peculiarities of the three-phase inductors both in terms of heating uniformity, and electromagnetic compatibility of induction heaters with power supply system are shown. Optimization recommendations of the power supply system in industry with induction electrothermal units are given. The calculation method of the inductors used in the rolling and forging industry are analyzed. The advantages of the electromagnetic induction use at aluminum alloys heating are given. The integrated approach to the design of the induction heating equipment is shown.*

***Keywords:*** inductor, deformation, heat, design, electricity, electrodynamic force installations.

---

*Lev S. Zimin (Dr. Sci. (Techn.)), Professor .  
Alexandra S. Yeghiazaryan (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.*