

ПРИМЕНЕНИЕ ТОКОВ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ ДЛЯ ПРАВКИ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ СПЛАВОВ АЛЮМИНИЯ

APPLICATION OF HIGH FREQUENCY CURRENTS FOR THE STRAIGHTENING OF THE STRUCTURES OF ALUMINUM ALLOYS

(Санкт-Петербургский Государственный Электротехнический Университет)
(St. Petersburg State Electrotechnical University)

Межотраслевая лаборатория современных электротехнологий (МОЛСЭТ)
Interindustrial laboratory of modern electrotechnologies (ILME)

Тихомиров Илья Сергеевич,

кандидат технических наук, младший научный сотрудник

I. Tihomirov,

candidate of technical sciences, junior researcher

Фадеев Алексей Алексеевич,

младший научный сотрудник

A. Fadeev,

junior researcher

Целикова Елена Николаевна,

аспирант

E. Tselikova,

postgraduate student

Ключевые слова: правка палубы, система контроля температуры, высокочастотный нагрев.

Keywords: straightening of deck, temperature control system, high-frequency heating.

Аннотация: В статье предложено использовать высокочастотный нагрев для правки конструкций из сплавов алюминия. Рассмотрен способ контроля температуры в зоне нагрева. Этот способ подразумевает отслеживание изменения параметров индукционной системы. Описан эксперимент по нагреву алюминиевого листа.

Abstract: We propose to use the high-frequency heating for the straightening of structures of aluminum alloys. The method of the temperature controlling in the heating zone is considered. This method involves the tracking of the parameters changes of the induction system. An experiment on the heating of aluminum sheet is described.

При сварке тонкостенных (толщина листового металла 4...10 мм) металлических конструкций из-за локального перегрева возникают внутренние термические напряжения в металле, которые приводят к его деформации. С такими проблемами сталкиваются на судостроительных предприятиях при сварке палуб и палубных конструкций из сплавов алюминия. Одним из способов правки является нагрев верхнего слоя (толщиной 1-2 мм) алюминиевого настила с помощью газовой горелки. Нагретый металл, расширяясь, встречает противодействие соседних холодных участков и выдавливается наружу. Во время остывания линейные размеры нагретого участка уменьшаются, и происходит стягивание металлического настила.

Замена нагрева газом на нагрев токами высокой частоты позволит значительно упростить и автоматизировать процесс правки деформированных конструкций в условиях промышленных объектов.

В настоящее время в Санкт-Петербургском Государственном Электротехническом Университете в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 г. проводится научно-исследовательская работа по созданию индукционного нагревательного оборудования для правки алюминиевых палуб судов.

Суть правки палубы с применением индукционного нагрева заключается в быстром (0.5 – 3 с.) нагреве локальной зоны металла до температуры пластической деформации 500 – 650 °С.

Из-за высокой скорости нагрева остро встаёт вопрос контроля температуры нагреваемого участка. Алюминий начинает плавиться при температуре 650 °С. Крайне важно определить момент достижения этой температуры и прекратить нагрев. В противном случае произойдёт проплавление листа.

Решить эту задачу можно следующими способами:

1. контролировать температуру металла в зоне нагрева;
2. выключать нагрев по таймеру;
3. отслеживать изменения параметров индукционной системы.

В первом варианте система контроля температуры должна включать в себя измеритель температуры (пирометр) и регулятор, который может воздействовать на нагревательное оборудование и в зависимости от результатов измерения изменять выходную мощность источника питания. К недостаткам этого варианта можно отнести следующие:

1. Незначительный зазор между индуктором и нагреваемой поверхностью составляет не более 2 мм. При такой геометрии проблематично установить измеритель так чтобы он измерял температуру непосредственно нагреваемой части.

2. Этот вариант системы контроля температуры требует дополнительного оборудования (пирометр, регулятор), это усложнит конструкцию высокочастотного нагревательного комплекса и увеличит его стоимость, так как такой прибор как пирометр является сравнительно дорогим.

Второй способ заключается в отключении нагрева по таймеру. Но, поскольку процесс правки подразумевает нагрев близкорасположенных участков листа, то из-за этого начальная температура каждого следующего нагреваемого участка будет выше, чем у предыдущего. В связи с чем невозможно точно выставить необходимое для нагрева время.

Третий способ подразумевает отслеживание изменения таких параметров индукционной системы как активное сопротивление и индуктивность, это позволяет наблюдать за изменением температуры в зоне нагрева и за изменением геометрии системы «индуктор-деталь».

Для разработки системы контроля температуры необходимо исследовать, как ведут себя параметры индукционной системы при нагреве и при изменении геометрии, которое может быть вызвано проплавлением алюминиевого листа. Исследование проводилось с помощью компьютерного моделирования с использованием специального программного обеспечения FEMM 4.2.

Процесс моделирования представляет собой расчёт параметров подводящих шин индуктора и расчет параметров нагревательной части индуктора с учётом обратного проводника.

На рис. 1. показана геометрия компьютерной модели нагревательной части индуктора с обратным проводником. При расчете частота тока индуктора принята равной 66 кГц, амплитудное значение тока 1000 А, зазор между индуктором и алюминиевой плитой 2 мм, толщина алюминиевой плиты 4 мм, нагревательная часть индуктора выполнена из профилированной трубки 12х6 мм с толщиной стенки 1 мм, магнитопровод выполнен из феррита 2500 НМС1, толщина магнитопровода 5 мм, длина нагревательной части 70 мм. Обратный проводник выполнен из профилированной трубки 8х8 мм с толщиной стенки 1мм. Удельное сопротивление меди взято для температуры 20 °С. Размер сетки магнитопровода равен 0.3 мм, размер сетки индуктора и алюминиевого листа равен 0.1 мм. Было сделано три расчёта для разных значений удельного сопротивления алюминия. Результаты расчетов, сведённые в таблицу 1, учитывают активное сопротивление и индуктивность подводящих шин индуктора.

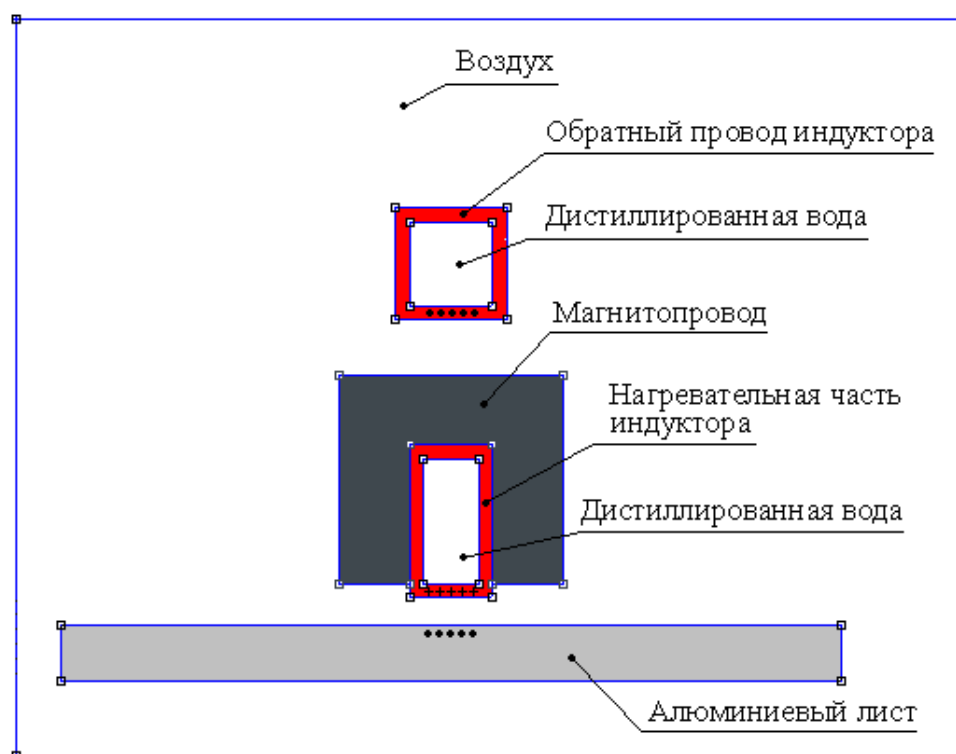


Рис. 1. Геометрические размеры компьютерной модели нагревательной части индуктора с обратным проводником

Таблица 1: Результаты компьютерного моделирования

№	Температура, для которой принято значение удельного сопротивления алюминия ($t, ^\circ\text{C}$).	Эквивалентное активное сопротивление индукционной системы ($r_3, \text{Ом}$).	Эквивалентная индуктивность индукционной системы ($L_3, \text{мкГн}$).	№ кривой на рис. 4.
1	20	0.00173	0.0821	1
2	300	0.00185	0.0821	2
3	650	0.00198	0.0821	3

На рис. 2. показана геометрия компьютерной модели в момент, когда происходит проплавление алюминиевого листа. Было сделано два расчёта для разных глубин проплавления. Результаты расчётов сведены в таблицу 2. В них учтены активное сопротивление и индуктивность подводящих шин.

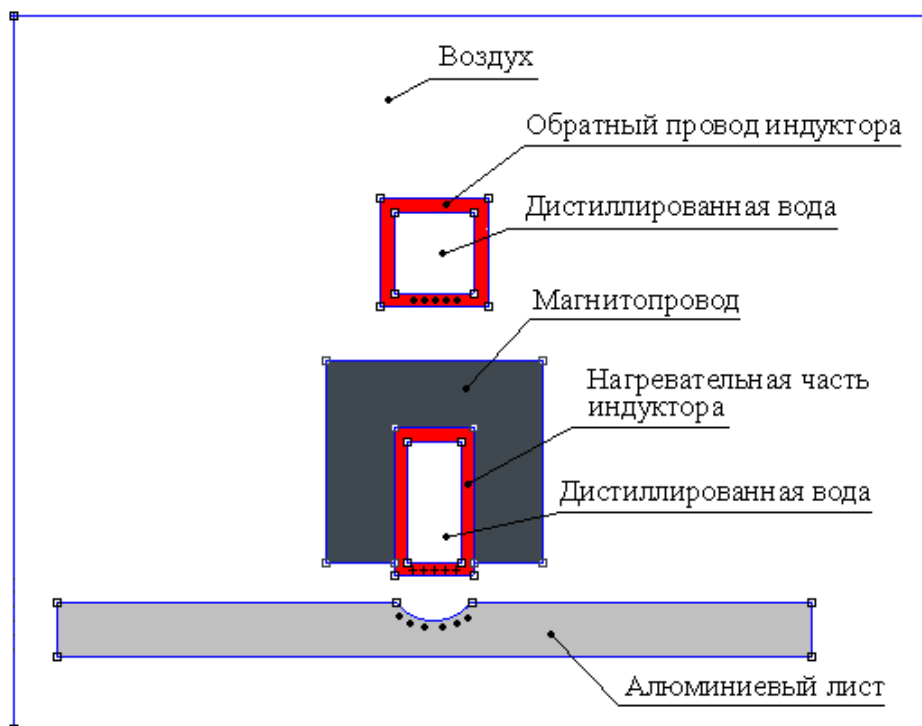


Рис. 2. Геометрические размеры модели в момент, когда происходит расплавление алюминиевого листа (глубина проплавления 1.5 мм)

Таблица 2: Результаты компьютерного моделирования

№	Глубина проплавления алюминиевого листа (мм).	Эквивалентное активное сопротивление индукционной системы ($r_3, \text{Ом}$).	Эквивалентная индуктивность индукционной системы ($L_3, \text{мкГн}$).	№ кривой на рис. 4.
1	0.5	0.00198	0.0841	4
2	1.5	0.00197	0.0851	5

Рассматриваемый индуктор предполагается использовать с высокочастотным генератором ТГИ40/100-4 мощностью 35 кВт и согласующим устройством БС-4. Согласующее устройство состоит из высокочастотного трансформатора с коэффициентом трансформации 54 и компенсирующего конденсатора ёмкостью 40 мкФ, который установлен на низкой стороне трансформатора последовательно с индуктором. Для анализа режима работы генератора ТГИ и согласующего устройства БС на описанную выше нагрузку была разработана упрощённая компьютерная модель этой системы рис. 3. Для этого использовалось программное обеспечение LTspice IV.

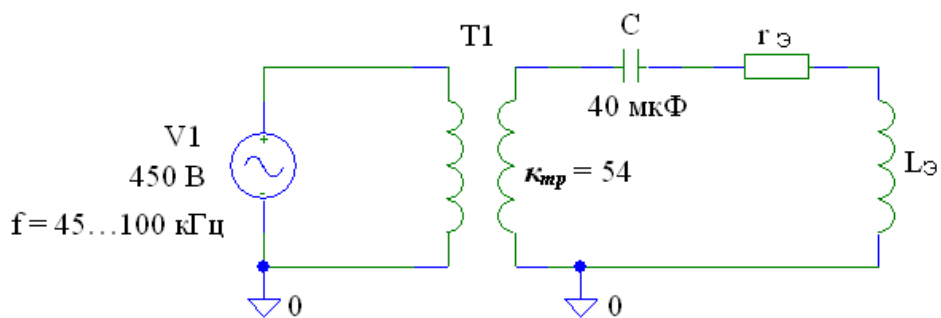


Рис. 3. Упрощённая компьютерная модель индукционной установки

V1 – модель источника питания ТГИ (выходное напряжение 450 В, частотный диапазон 45 ÷ 100 кГц); **T1** – модель высокочастотного согласующего трансформатора ($K_{mp} = 54$); **C** – модель компенсирующего конденсатора ($C = 40$ мкФ); $r_{э}$ – эквивалентное активное сопротивление индукционной системы, (значения были взяты из таблиц 1 и 2); $L_{э}$ – эквивалентная индуктивность индукционной системы, (значения были взяты из таблиц 1 и 2). После расчёта в частотной области были получены следующие зависимости выходной мощности генератора от частоты рис. 4.

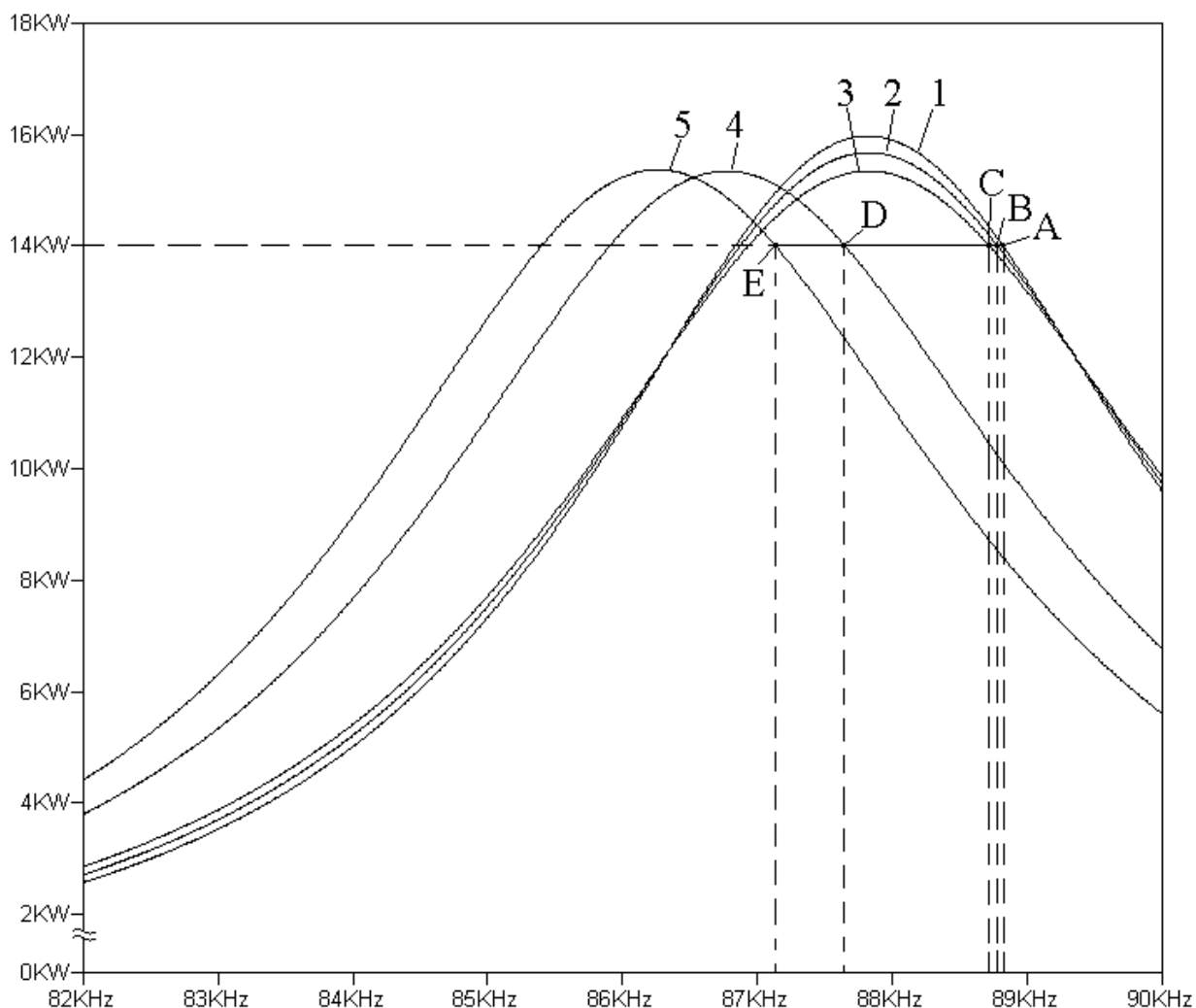


Рис. 4. Зависимость мощности генератора от частоты

С увеличением температуры алюминиевого листа увеличивается его удельное сопротивление, это приводит к увеличению эквивалентного активного сопротивления индукционной системы [1,2]. С началом расплавления нагреваемой зоны возрастает зазор между индуктором и деталью, это приводит к снижению эквивалентного активного сопротивления и увеличению эквивалентной индуктивности индукционной

системы [1,2]. При нагреве в режиме стабилизации выходной мощности частота выходного напряжения генератора будет снижаться. Генератор будет плавно переходить с одной характеристики на другую. Например, при уровне стабилизации выходной мощности в 14 кВт траектория рабочей точки преобразователя совпадёт с линией АЕ рис. 4. Таким образом, отслеживая изменение частоты выходного напряжения инвертора можно контролировать температуру алюминиевого листа и глубину его проплавления.

Для проверки результатов моделирования был проведён эксперимент. Для эксперимента использовался высокочастотный транзисторный генератор ТГИ40/100-4 мощностью 35 кВт с частотным диапазоном 45÷100 кГц и согласующее устройство БС-4 (коэффициент трансформации высокочастотного трансформатора равен 54, ёмкость компенсирующего конденсатора равна 40 мкФ). Геометрия индукционной системы повторяет геометрию, использованную при компьютерном моделировании. В качестве нагреваемого объекта использовался лист из сплава Д16 толщиной 4 мм. При нагреве осуществлялась запись электрических параметров (выходной мощности, частоты, выходного тока) генератора. Полученные зависимости показаны на рис. 5.

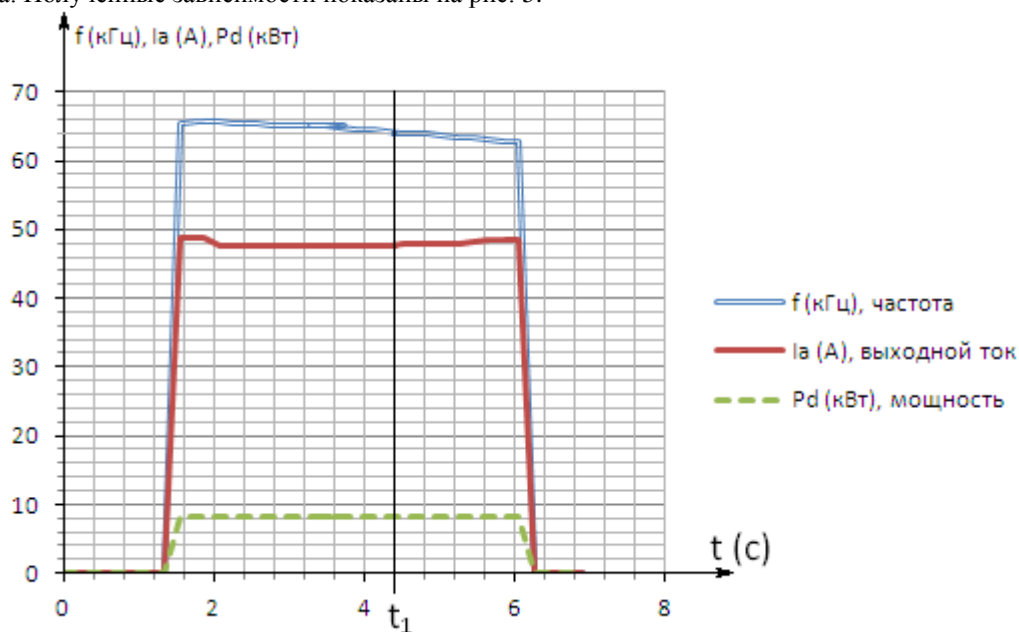


Рис. 5. Зависимость частоты, тока и мощности генератора от времени

Из графиков видно, что при постоянной мощности происходит изменение выходного тока и частоты. Частота снижается на протяжении всего процесса. Снижение выходного тока в начале процесса обусловлено тем, что при нагреве увеличивается удельное сопротивление металла. В момент времени t_1 выходной ток начинает увеличиваться.



(а) (б)

Рис. 6. Картины нагрева

Это обусловлено тем, что начинается проплавление поверхности нагреваемого листа рис. 6 (а), зазор между индуктором и деталью увеличивается и вследствие этого снижается эквивалентное сопротивление индукционной системы. Для получения технологического эффекта необходимо остановить нагрев чуть раньше момента времени t_1 и тогда картина нагрева будет выглядеть следующим образом рис. 6 (б). Видно, что в месте нагрева появилось утолщение.

Таким образом, контролируя изменения частоты и силы выходного тока генератора, можно контролировать температуру в зоне нагрева и отслеживать изменение геометрии системы «индуктор-деталь».

Для реализации этой идеи необходимо дополнить систему управления генератора ТГИ40/100-4 блоком, который позволял бы отключать нагрев, когда частота работы снижается до заданной величины. Эта величина будет зависеть от материала нагреваемого листа. Её можно определить экспериментальным способом перед началом правки на реальном объекте.

Для практического осуществления технологии индукционной правки необходимо оборудование в состав которого может входить генератор ТГИ40/100-4, дополненный блоком контроля частоты, согласующее устройство БС-4 и индуктор с геометрией близкой к описанной в начале статьи. Перед началом правки алюминиевой конструкции необходимо определить частоту, при которой должен прекращаться нагрев. Это можно сделать с помощью этого же оборудования дополненного ноутбуком. На черновом образце осуществляется нагрев с записью выходных параметров генератора. Мощность нагрева выбирается в зависимости от толщины нагреваемого листа, так чтобы время нагрева не превышало 3-5 с. Например, при толщине листа 4 мм выходная мощность генератора задавалась на уровне 8 кВт. После построения графиков аналогичных графикам на рис. 5 определяется частота, при которой начинает увеличиваться выходной ток. Это значение частоты задаётся на блоке контроля частоты генератора. Осуществляется пробный нагрев в режиме контроля частоты. После отключения нагрева под индуктором на алюминиевом листе должно образоваться утолщение. Если произошло проплавление листа необходимо увеличить частоту, при которой нагрев отключается, если утолщение не образовалось то уменьшить частоту. После настройки режима осуществляется нагрев деформированных зон алюминиевого настила.

Из вышеизложенного можно сделать вывод, что индукционный способ правки алюминиевых палуб представляется достаточно эффективным и вполне способным заменить собой правку с помощью газопламенного нагрева. Индукционный способ правки обладает меньшей пожароопасностью. Автоматическое отслеживание температуры нагреваемого участка и отключение нагрева не допускают проплавления палубы, которое вполне возможно при газопламенном нагреве.

Список литературы

1. Установки индукционного нагрева: Учебное пособие для вузов/А. Е. Слухоцкий, В. С. Немков, Н. А. Павлов, А. В. Бамунер; Под ред. А. Е. Слухоцкого. – Л.: Энергоиздат. Ленингр. Отд-ние, 1981.- 328 с., ил.
2. Слухоцкий А. Е., Рыскин С. Е. Индукторы для индукционного нагрева. Л.: Энергия, 1974. - 264 с.