

УДК 621.362

И. Ю. Абдулхаков, С. В. Дзлиев

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)*

## **Исследование магнитной связи двух близкорасположенных индукторов при нагреве стальных заготовок**

*Приведены преимущества модульных индукционных систем в задачах группового нагрева с индивидуальными постами питания. Рассмотрена магнитная связь двух близкорасположенных спиральных индукторов при нагреве цилиндрической детали. Разработана компьютерная модель, позволяющая оценить магнитную связь индукторов при их различных расположениях как друг относительно друга, так и относительно самой заготовки. Для количественного определения степени магнитной связи используется безразмерный коэффициент связи. Приводится сравнение магнитной связи индукторов при магнитной и немагнитной заготовке. Показана прямая зависимость коэффициента связи от потока рассеяния между индукторами и заготовкой. В статье описано несколько способов снижения магнитной связи индукторов, которые заключаются в использовании противовитка, короткозамкнутого витка и магнитопроводов различной геометрии. Количественно оценено снижение магнитной связи при применении каждого из приведенных способов.*

### **Групповой высокочастотный нагрев, магнитосвязанные индукторы, помеха для источника питания со стороны нагрузки, модульные индукционные системы**

Все чаще в промышленности появляется потребность в построении модульных индукционных систем. Модульные индукционные системы выгодны не только с точки зрения экономических соображений, но также с точки зрения надежности и возможности унификации. К достоинствам модульных индукционных систем относится возможность реализации различных режимов нагрева заготовки с несколькими индивидуально контролируемыми зонами нагрева [1].

Питание индукторов таких индукционных систем может осуществляться как от единого источника питания, так и от индивидуальных источников для каждого индуктора. Реализация питания многомодульной индукционной системы от одного источника достигается наличием у источника нескольких индивидуальных выходов, подключаемых к своему индуктору. Для задания позиционного управления на источнике питания устанавливаются интервалы времени и мощности его работы на ту или иную зону. После отработки

заданного интервала по программе источник питания автоматически отключается от зоны нагрева с полным снятием питания с нее и автоматически подключается к следующей зоне нагрева. Такой способ не всегда эффективен с точки зрения нагрева ввиду того, что возможно появление существенных неравномерностей на поверхности нагреваемого объекта [2]. К тому же каждая зона должна нагреваться с существенно большей относительно среднего уровня удельной мощностью. Наиболее эффективно индукторы питаются от собственных источников [3], [4], однако этот способ не всегда реализуем, поскольку источники питания могут значительно влиять друг на друга через сильную магнитную связь [5].

Для количественного определения магнитной связи между индукторами была построена компьютерная модель, представленная на рис. 1. Индукторы в модели идентичны друг другу, состоят из медной трубки  $20 \times 20$  мм, количество витков 14,

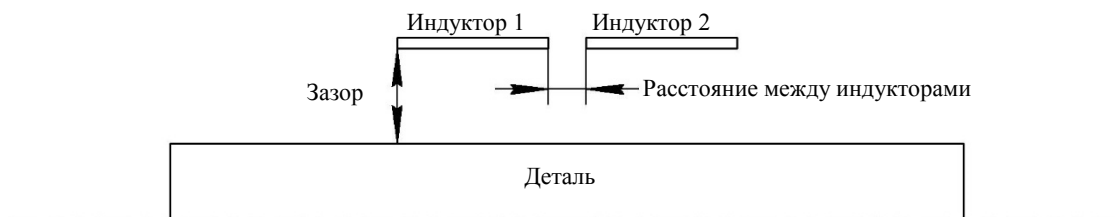


Рис. 1

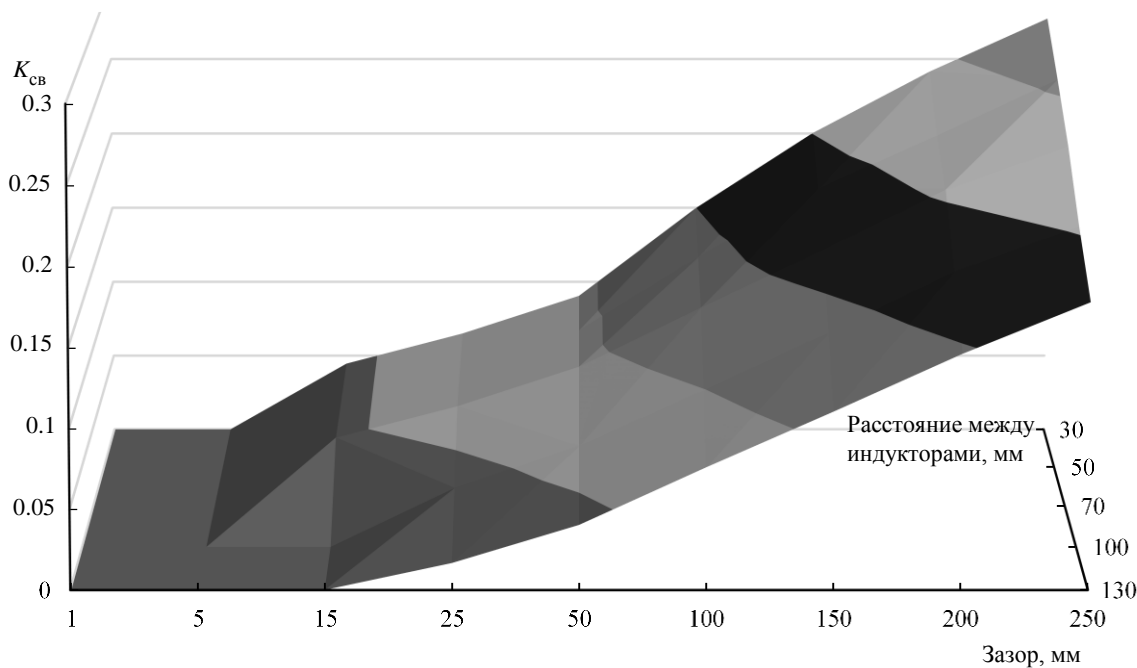


Рис. 2

длина индуктора 400 мм. Деталь представляет собой стальную заготовку с внешним радиусом 200 мм, толщиной 100 мм и длиной 2100 мм. Все элементы в модели – тела вращения относительно продольной оси симметрии.

Количественно определяет магнитную связь коэффициент связи ( $K_{св}$ ), и именно им будем далее оперировать в статье. Коэффициент связи можно определить двумя способами: косвенным, когда через один из индукторов протекает ток, а второй индуктор включен в режиме холостого хода и на нем наводится ЭДС – отношение наведенной ЭДС и протекаемого тока определяет индуктивное сопротивление взаимной индуктивности; далее, исходя из значений собственных индуктивностей обоих индукторов и взаимной, определяется коэффициент связи [6]; прямым, исходя из реактивных сопротивлений одного из индукторов при замкнутом и разомкнутом втором индукторе [7].

На рис. 2 изображена зависимость коэффициента связи индукторов в зависимости от зазора при различных расстояниях между индукторами в слу-

чае, когда материал детали – это немагнитная сталь. Таким образом, данные зависимости применимы для технологий индукционного нагрева, в которых в детали выделяются большие плотности мощности – индукционная закалка, индукционный кузнечный нагрев и т. п. При больших плотностях мощности та часть детали, через которую проходит магнитный поток, даже если она магнитная, насыщается, и магнитная проницаемость практически снижается до значений, равных магнитной проницаемости воздуха [8].

Видно, что при малых зазорах связь между индукторами практически отсутствует. Это объясняется тем, что раз отсутствует поток рассеяния между индуктором и деталью, то отсутствует и магнитный поток, охватывающий соседний индуктор. С увеличением же расстояния  $K_{св}$  нарастает практически линейно. Так же линейна и зависимость  $K_{св}$  от расстояния между индукторами.

На рис. 3 изображена зависимость коэффициента связи индукторов в зависимости от зазора при различных расстояниях между индукторами в случае, когда материал детали – это магнитная

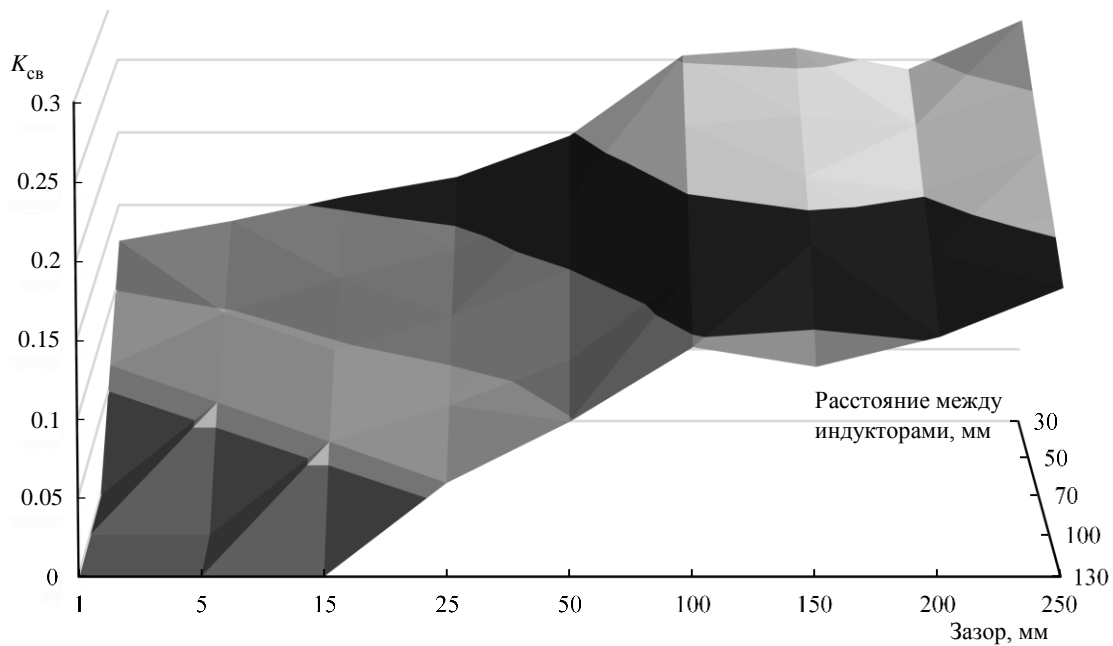


Рис. 3

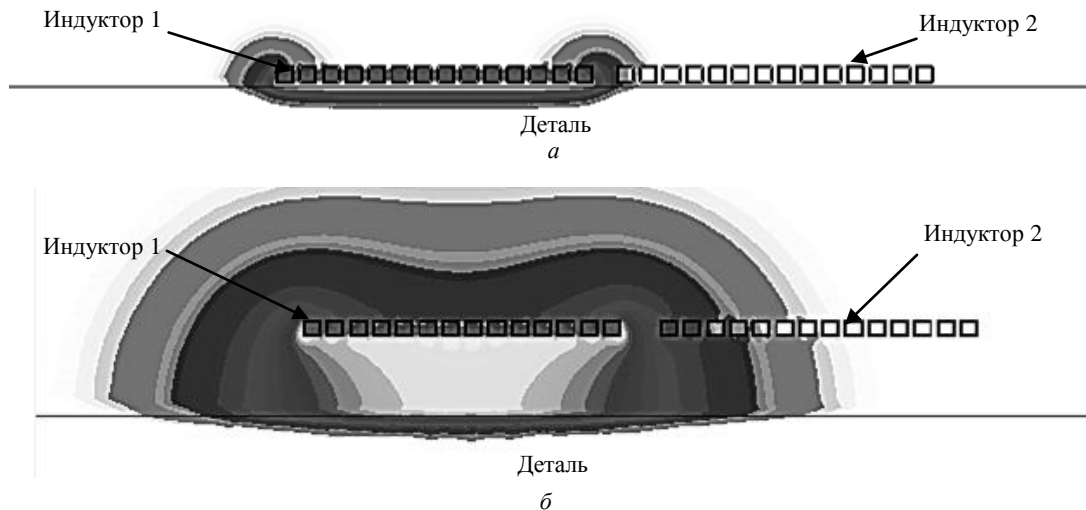
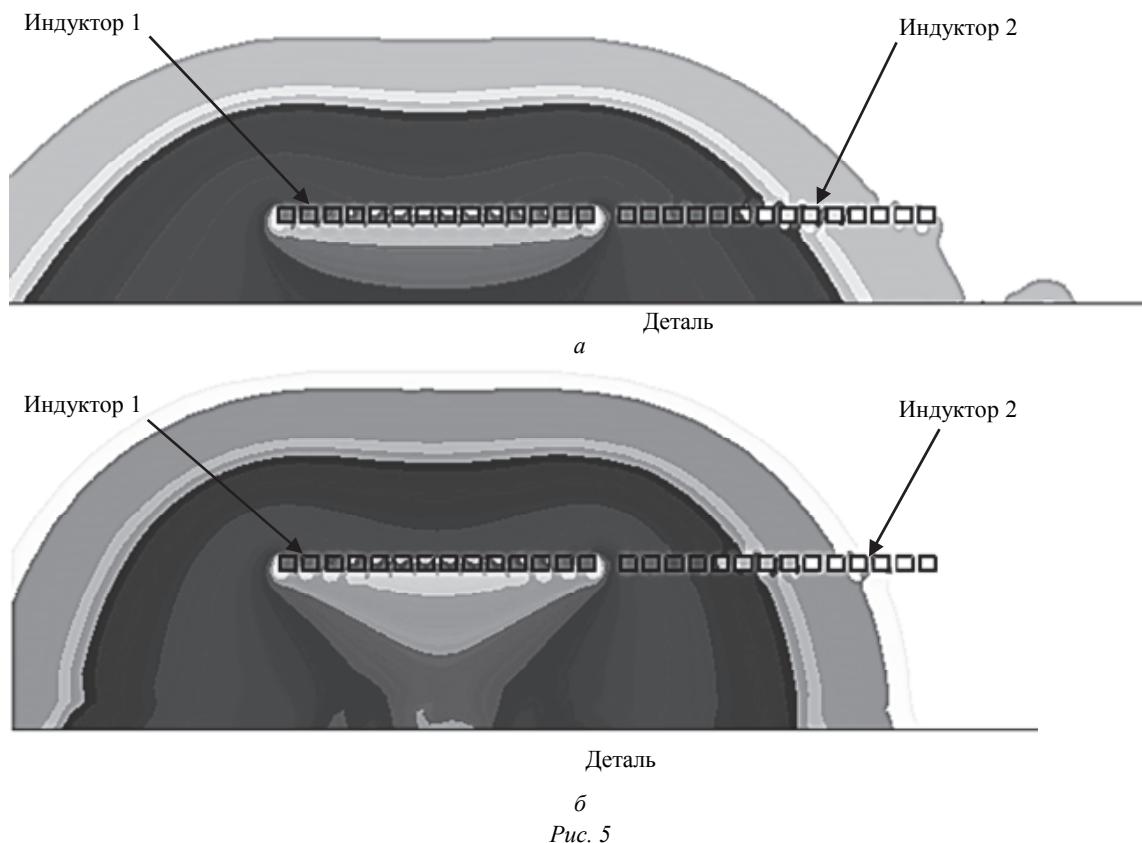


Рис. 4

сталь. Магнитная проницаемость материала детали задана равной 1000. Такая магнитная проницаемость соответствует технологиям индукционного нагрева при малых плотностях мощности в детали индукционному отпуску, горячей посадке и т. д. [8]. Видно, что при зазоре 150 мм  $K_{св}$  имеет локальный максимум, так как при расстояниях 50...150 мм магнитные свойства заготовки усиливают магнитную связь индукторов, которая даже лучше, чем при отсутствии детали. Т. е. наблюдается растягивание магнитного поля вдоль поверхности детали, благодаря чему улучшается связь между индукторами. К тому же, при близких расстояниях  $K_{св}$  не начинается с нулевых значений, как в случае, рассмотренном для немагнитной детали.

На рис. 4 изображена напряженность магнитного поля при зазоре 5 мм (а) и 100 мм (б). Деталь при этом имеет немагнитные свойства. На индуктор 1 подается ток, а индуктор 2 разомкнут, т. е. его контакты отсоединены друг от друга и не подключены к источнику тока. Видно, что при маленьком зазоре поле практически полностью сосредоточено вокруг индуктора и не проходит через соседний индуктор. Дополнительно можно говорить, что отсутствует даже поток рассеяния, проходящий через сам индуктор, поскольку благодаря эффекту близости ток стягивается ближе к детали и эффективная высота индуктора сильно снижается. При увеличении зазора поле начинает проходить через соседний индуктор, вследствие чего коэффициент связи возрастает. При этом поток, проходящий через соседний индуктор, и рас-



стояние между этими индукторами практически равно потоку рассеяния индуктора, который создает поток. Таким образом можно говорить, что коэффициент связи индукторов напрямую зависит от потока рассеяния системы индуктор-деталь и именно он образует магнитную связь между индукторами.

На рис. 5 изображены напряженность магнитного поля при зазорах 100 мм (а) и 200 мм (б) при магнитных свойствах заготовки. При наличии у детали магнитных свойств при малых зазорах магнитное поле существенно растягивается вдоль поверхности детали, что в свою очередь улучшает связь между индукторами. При увеличении зазора поле все больше стягивается к индуктору. Т. е. благодаря магнитным свойствам детали наблюдается усиление магнитной связи между индукторами.

На рис. 6 изображены различные конфигурации индукторов, позволяющие снизить магнитную связь индукторов. Представленные изменения позволяют снизить магнитную связь между индукторами. На рис. 6, а изображен индуктор 1 с противовитком на конце, в котором протекает ток, противоположный по направлению току индуктора, тем самым создавая поток, противоположенный потоку остальных витков индуктора.

На рис. 6, б изображены 2 индуктора, между которыми установлен короткозамкнутый виток из трубки тех же размеров, что и у индукторов. Короткозамкнутый виток благодаря наведенному в нем току индуктора призван ограничить магнитное поле. Благодаря противовитку распространение поля вдоль детали будет существенно уменьшено.

На рис. 6, в изображены индукторы, над которыми располагаются магнитопроводы. На рис. 6, г изображены индукторы с магнитопроводами между индукторами, практически полностью заполняя расстояние между индукторами, высота магнитопроводов при этом равна высоте индукторов. На рис. 6, д изображены индукторы с магнитопроводами Г-образной формы. Магнитопроводы призваны сконцентрировать магнитное поле вокруг индуктора, тем самым уменьшив магнитную связь между индукторами.

На рис. 7 изображены напряженности поля с представленным на рис. 6 конфигурациями индукторов. При этом для определения связи ток подается только на индуктор 1, а индуктор 2 при этом разомкнут. Способы для наглядности приведены в последовательности уменьшения магнитной связи между индукторами. На рис. 7, а для сравнения представлены индукторы без применения способов снижения взаимного влияния.

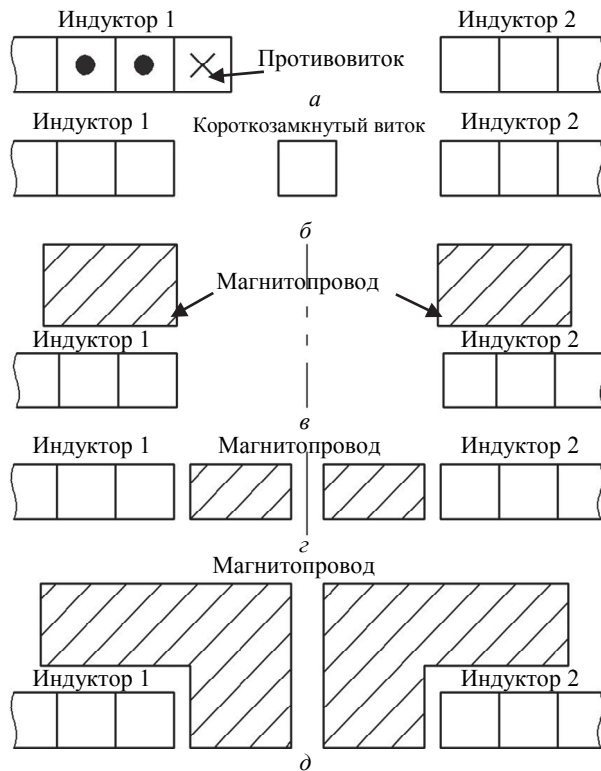


Рис. 6

На рис. 7, б представлено поле с противовитком, подключенным к индуктору 1. Поскольку противовиток создает только малую часть потока от общего значения потока самого индуктора, эта мера наименее эффективна и коэффициент связи остается значительным.

На рис. 7, в показано поле с применением магнитопроводов, установленных над индукторами. Видно, что поле охватывает соседний индуктор практически так же, как и в случае на рис. 7, б. Ввиду того, что в пространство, пронизываемое полем, вносится магнитное тело с отличной от остального пространства магнитной проницаемостью, поле искажается. При этом на торцах магнитопроводов наблюдается выпучивание магнитного поля, что может приводить даже к улучшению магнитной связи индукторов, так как магнитный поток будет лучше охватывать соседний индуктор.

На рис. 7, г изображено поле с применением магнитопроводов, установленных между индукторами. Конечно, как и в случае рис. 7, в, магнитопроводы вносят искажение в магнитное поле, однако в данной конфигурации магнитопроводы лучше концентрируют на себе магнитное поле. Выпучивание поля при этом не столь существенно сказывается на магнитной связи индукторов, как в случае рис. 7, в.

На рис. 7, д представлено поле с применением короткозамкнутого витка между индукторами. Видно, что короткозамкнутый виток практически полностью ограничивает распространение поля за индуктором 1. Существенный минус применения данного способа – то, что в короткозамкнутом витке индуцируются сильные токи. Приблизительно можно оценить наведенные токи в короткозамкнутом витке, равные току индуктора 1, умноженному на число витков индуктора 1. Т. е. при одновременной работе двух индукторов наведенный ток в короткозамкнутом витке будет равен сумме токов индукторов 1 и 2, умноженной на число витков этих индукторов соответственно. Приведенное определение тока, индуцируемого в короткозамкнутом витке, конечно, не учитывает поле рассеяния индукторов с короткозамкнутым витком, однако наглядно демонстрирует наведенные в нем токи. Таким образом, в короткозамкнутом витке выделяются значительные потери, что может существенно снизить общий КПД системы и потребует дополнительного его охлаждения. Следует отметить, что несмотря на то что в рассмотренном случае напряжение подается только на индуктор 1 и, следовательно, ток, наводимый в короткозамкнутом витке, имеет параметры, соответствующие току индуктора 1, а индуктор 2 при этом разомкнут. Несмотря на это при одновременной работе обоих индукторов исходя из принципа суперпозиции общий ток короткозамкнутого витка будет компенсировать поток обоих индукторов.

На рис. 7, е представлено поле с применением Г-образных магнитопроводов, установленных над индукторами. Выступы магнитопроводов практически полностью заполняют расстояние между индукторами, как и в случае рис. 7, в, а высота магнитопровода над индуктором такая же, как в случае рис. 7, в. Таким образом, данный способ есть комбинация способов рис. 6, в и г. Хотя в пространство, через которое проходит магнитное поле, вносится объект с отличными от остального пространства характеристиками, данные магнитопроводы Г-образной формы не вносят столь значительных искажений в магнитное поле. Данные магнитопроводы практически полностью концентрируют поле рассеяния индукторов друг на друге. Однако коэффициент связи не снижается до нуля, но в сравнении со способом, представленным на рис. 6, б более предпочтительнее.

лен ввиду меньших энергитических затрат. Существенный минус данного способа – это сложность геометрии данных магнитопроводов по сравнению с рис. 6, в и г, что усложняет их изготовление.

При расчете магнитопроводов разработчику можно приблизительно определить поток, который проходит через них в любых из представленных в работе конфигураций индукторов. Магнитный поток, пронизывающий магнитопроводы, можно считать приблизительно равным сумме

потоков рассеивания каждого из индукторов с деталями. Наиболее точные результаты, конечно, даст компьютерное моделирование, однако точность (Слухоцкий), достаточная для первой итерации расчетов, позволит сократить время расчетов разработчика.

На рис. 8 изображена гистограмма со сравнением значений коэффициента связи при различных конфигурациях индукторов. Расстояние между индукторами и зазор приняты равными 50 мм. Длина индукторов и количества их витков оставались

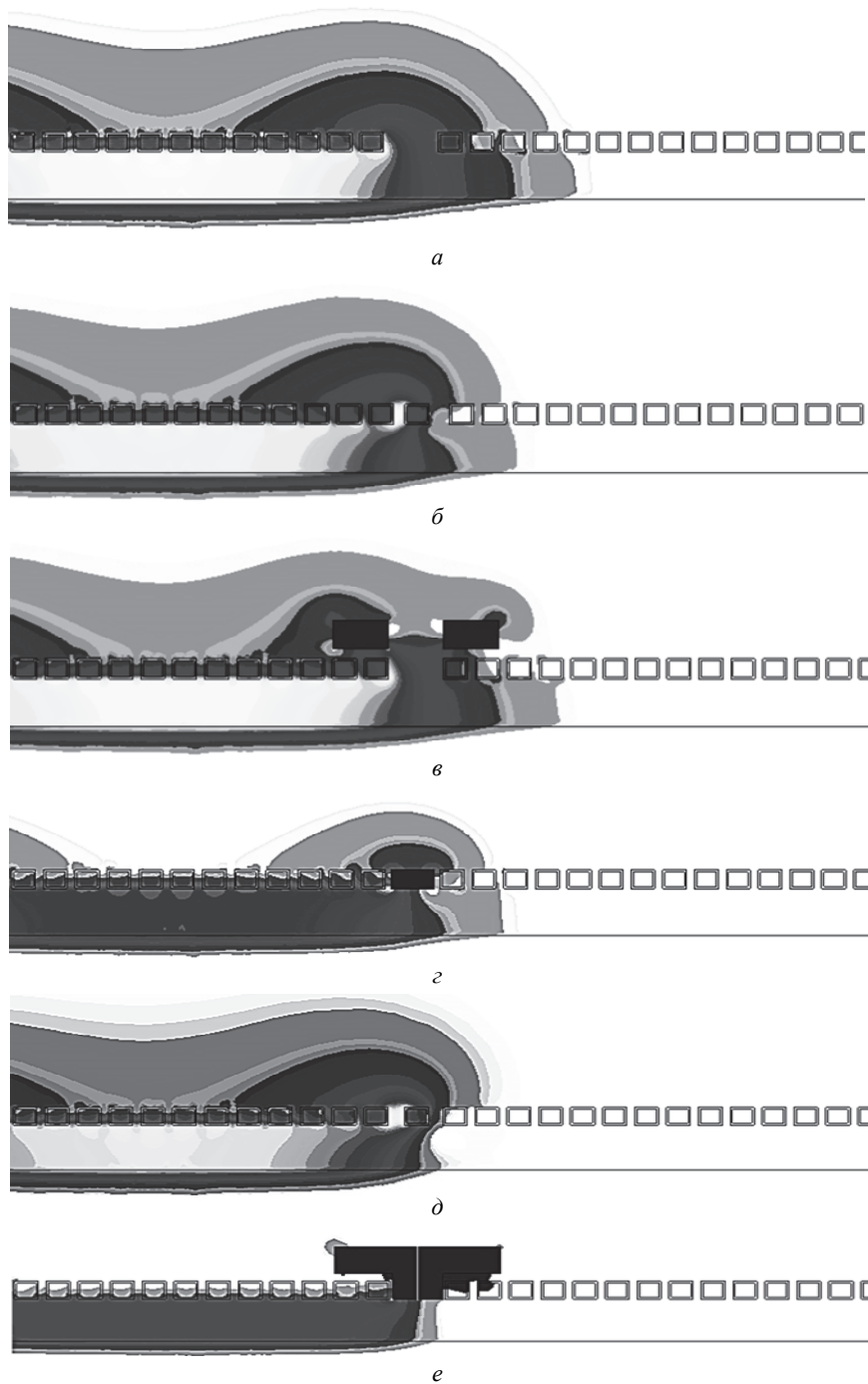


Рис. 7

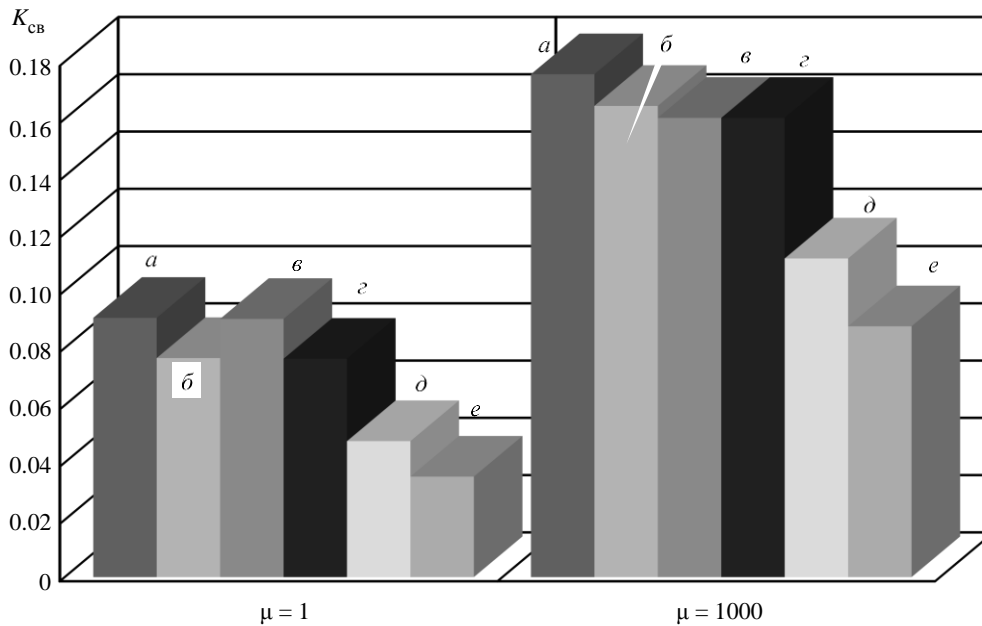


Рис. 8

неизменными. Коэффициент связи рассчитывался для случаев, когда магнитная проницаемость  $\mu$  детали равна 1 и 1000: *a* – индуктор без изменений, *б* – индуктор с противовитком, *в* – магнитопровод над индуктором, *г* – магнитопровод между индукторами, *д* – Г-образный магнитопровод, *e* – короткозамкнутый виток между индукторами.

Из рис. 8 видно, что в обоих случаях магнитной проницаемости детали при различных конфигурациях индукторов удается снизить магнитную связь приблизительно в 2 раза. При этом максимальное снижение коэффициента связи позволяет добиться применения короткозамкнутого витка, расположенного между индукторами.

Использование модульной структуры индукционных нагревателей имеет очевидные преимущества в некоторых технологиях индукционного нагрева. Однако такие индукционные системы при питании каждого из индукторов от собственного источника питания не всегда реализуемы на практике ввиду значительного взаимного влияния источников питания друг на друга через магнитную связь.

В статье рассмотрена количественно магнитная связь между двумя однослойными индукторами,

работающими от собственных источников питания. Приведена и проанализирована зависимость коэффициента связи близко расположенных индукторов от расстояния между ними и зазора до детали. Показано, что коэффициент связи между продольно чередующимися над деталью индукторами пропорционален их зазору и обратно пропорционален расстоянию между ними. Приведены, проанализированы и сравнены между собой 5 способов снижения коэффициента связи, поочередно расположенных над деталью двух индукторов. Магнитная связь может быть практически нивелирована при малых зазорах между индуктором и деталью (объектом, который он непосредственно нагревает). Наиболее эффективная мера снижения взаимного влияния индукторов при ненулевом зазоре – применение короткозамкнутого витка, расположенного между индукторами, однако даже эта мера не абсолютно эффективна и, к тому же, имеет существенный недостаток в виде значительных наведенных токов в таком витке. Наиболее предпочтительно, с точки зрения авторов, применение Г-образного магнитопровода над индукторами, при этом его длина не обязательно должна покрывать весь индуктор.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ситько П. А. Исследование и разработка автоматизированных модульных индукционных нагревателей стальных изделий: автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. 16 с.
2. Inductotherm Corp.: сайт производителя. URL: <http://inductotherm.com>.
3. Перевалов Ю. Ю. Моделирование и разработка автоматизированной индукционной закалочной

установки крупногабаритных валков прокатных станов / автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2017. 16 с.

4. Модульные индукционные установки для непрерывного нагрева заготовок перед обработкой давлением / В. Б. Демидович, Ф. В. Чмиленко, П. А. Ситько, В. В. Андрушкевич, Ю. Ю. Перевалов // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2016. № 7. С. 34–37.



5. Абдулхаков И. Ю. Повышение помехоустойчивости транзисторных генераторов с инверторами напряжения при сильной магнитной связи индукционных систем // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2018. № 1. С. 55–62.

6. Основы теоретической электротехники: учеб. пособие для вузов / Ю. А. Бычков, В. М. Золотницкий, Э. П. Чернышев, А. Н. Белянин. СПб.: Лань, 2009. 592 с.

7. Бердников Д. Измерение индуктивности рассеяния в трансформаторах импульсных преобразователей с помощью LRC-метра // Совр. электроника. 2008. № 8. С. 58–61.

8. Слухоцкий А. Е., Рыскин С. Е. Индукторы для индукционного нагрева. Л.: Энергия, 1974. 264 с.

I. Yu. Abdulkhakov, S. V. Dzljev  
Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

## STUDY OF THE MAGNETIC COUPLING OF TWO CLOSELY LOCATED INDUCTORS DURING HEATING OF STEEL BILLETS

*The advantages of modular induction systems in problems of group heating with individual power posts are given. The magnetic coupling of two closely spaced spiral inductors is considered when heating a cylindrical part. A computer model has been developed that makes it possible to evaluate the magnetic coupling of inductors at their different locations, both relative to each other and relative to the workpiece itself. To quantify the degree of magnetic coupling, a dimensionless coupling coefficient is used. A comparison of the magnetic coupling of inductors with magnetic and nonmagnetic blanks is given. A direct dependence of the coupling coefficient on the scattering flux between the inductors and the workpiece is shown. The article describes several ways to reduce the magnetic coupling of inductors, which consist in using a counterthread, a short-circuited coil and magnetic circuits of various geometries. Quantitative assessment of the decrease in magnetic coupling in the application of each of the above methods.*

**Group high-frequency heating, magnetically coupled inductors, interference to the power supply from the load side, modular induction systems**

УДК 621.314.263

М. В. Пронин, А. С. Григорян  
ПАО «Силовые машины»

А. Г. Воронцов  
ООО «НПЦ СЭС»

Г. И. Прокофьев  
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

## Анализ структур источника напряжения с мощным многотактным ШИП на модулях IGBT

*Рассмотрены структуры низковольтных источников напряжения с многотактными ШИП на модулях IGBT, дросселями и фильтрами на входе и выходе. Построены модели систем, выполнен анализ режимов работы. Отмечены особенности этих установок при работе в установившихся режимах холостого хода и нагрузки, а также в переходных режимах при набросе и сбросе нагрузки. Для обеспечения требуемых характеристик источника при работе на холостом ходу и ограничения перенапряжений в переходных режимах работы рекомендована структура ШИП, в которой передача энергии осуществляется не только от входа к выходу ШИП, но и в обратном направлении, рекомендовано применение защитных цепей с чопперами и резисторами на входе и выходе ШИП. Указана возможность снижения стоимости оборудования при выполнении только части параллельно включенных ветвей ШИП двунаправленными. Рекомендовано также повышение частоты опорных напряжений ШИП с одновременным уменьшением индуктивностей дросселей.*

**Широтно-импульсный преобразователь, многотактный, перенапряжение, рекуперация энергии, моделирование, расчет, затраты машинного времени**

Источники напряжения с широтно-импульсными преобразователями (ШИП) используются

во многих областях техники – в системах возбуждения электрических машин [1]–[5], в обратимых