

**Индукционный нагрев перед сваркой стальных труб****С. С. Адох<sup>✉</sup>, Ю. Ю. Перевалов**Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия<sup>✉</sup> adocylle@gmail.com

**Аннотация.** В статье рассматривается проблема электромагнитной взаимосвязи индукторов при низкотемпературном индукционном нагреве стальных труб перед сваркой. Эта связь создает помехи со стороны нагрузки для высокочастотных источников питания. Предложено решение, основанное на использовании одного источника питания для двух индукторов с независимым регулированием мощности посредством изменения частоты. Разработан способ распределения полной мощности между индукторами с учетом магнитной связи в их контурах. Полученные результаты позволяют повысить эффективность и устойчивость работы системы нагрева. По результатам проделанных исследований были сформулированы рекомендации для более широкого применения предложенной системы.

**Ключевые слова:** индукционный нагрев, регулирование мощности, магнитная связь, перестройка частоты, независимость регулирования, низкочастотный контур

**Для цитирования:** Адох С. С., Перевалов Ю. Ю. Индукционный нагрев перед сваркой стальных труб // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2026. Т. 19, № 5. С. 57–64. doi: 10.32603/2071-8985-2026-19-5-57-64.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

**Induction Heating Before Steel Pipe Welding****S. S. Adoh<sup>✉</sup>, Yu. Yu. Perevalov**

Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

<sup>✉</sup> adocylle@gmail.com

**Abstract.** This article examines the problem of electromagnetic coupling between inductors during low-temperature induction heating of steel pipes prior to welding. This coupling creates loading interference for high-frequency supply sources. A solution is proposed based on the use of a single power source for two inductors with independent power control via frequency variation. A method for distributing the total power between the inductors is developed, taking into account the magnetic coupling within their circuits. The obtained results allow for increased efficiency and stability of the heating system.

**Keywords:** induction heating, power regulation, magnetic coupling, frequency hopping, independent regulation, low-frequency circuit

**For citation:** Adoh S. S., Perevalov Yu. Yu. Induction Heating Before Steel Pipe Welding // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2026. Vol. 19, no. 5. P. 57–64. doi: 10.32603/2071-8985-2026-19-5-57-64.

**Conflict of interests.** The authors declare no conflicts of interests.

**Введение.** Индукционный нагрев двух близко расположенных деталей из магнитной стали от двух независимых источников питания затруднен из-за сильной магнитной связи индукторов, которая приводит к взаимным наводкам в каждом индукторе ЭДС на частоте тока соседнего индуктора. Такие наводки, возникающие в нагрузочной цепи источника на частотах, не совпадающих с частотой работы источника, создают ток помехи, который протекает по всей высокочастотной цепи источника, в том числе через силовые транзисторы. Это нарушает условия коммутации, которые, как правило, формируются системой управления в предположении отсутствия таких помех.

Практический опыт показывает, что при наличии сильной магнитной связи индукторов устойчивая работа источников питания на базе транзисторных инверторов напряжения удается обеспечить лишь при существенном снижении мощности каждого источника – до 40–50 %. Это негативно влияет как на технические, так и на экономические показатели процесса нагрева, поскольку служит существенным препятствием для использования данной технологии.

Альтернативный способ индукционного нагрева кольцевой зоны сварки заключается в использовании одного индуктора, покрывающего обе области нагрева и запитанного от одного источника удвоенной мощности. Этот способ наиболее распространен на практике, так как прост в применении, а также при необходимости дает возможность перераспределения мощности между зонами нагрева за счет механического смещения индуктора относительно кольцевого шва. Однако при таком способе области нагрева имеют неопределенный размер, и при существенной разнице в начальных температурах свариваемых участков труб не обеспечивается необходимая точность поддержания температуры. Кроме того, для управления температурой нагрева двух областей может быть использован только один датчик температуры (термопара), место установки которого существенно влияет на процесс и качество нагрева из-за отсутствия тепловой связи между областями нагрева до сварки [1].

В статье предложен способ нагрева двух близко расположенных областей стальных магнитных деталей от одного источника питания с независимой регулировкой мощности в каждой из них. Такой способ позволяет перераспределять мощность одного источника между двумя индук-

торами за счет переключения выходной частоты источника на разнесенные резонансные частоты нагрузочных контуров индукторов и введение коэффициента трансформации, что приводит к импульсному нагреву каждым индуктором.

Цель данного исследования заключается в оценке процесса передачи полной выходной мощности от одного источника на два высокодобротных индукционных нагрузочных контура, настроенных на различные резонансные частоты, при наличии магнитной связи между индукторами.

**Способ перестройки частоты в нагрузочном контуре.** Индукционная система состоит из двух индукторов, расположенных над двумя зонами нагрева вблизи места сварки труб. Для контроля температуры в каждой зоне нагрева установлены две термодары, размещенные между индуктором и поверхностью трубы. Источником питания системы служит инвертор напряжения на силовых транзисторах. Каждый индуктор, совместно с последовательно подключенным конденсатором, образует последовательный резонансный контур, который подключен к общему источнику питания [2].

На рис. 1 приведена эквивалентная схема установки индукционного нагрева, разработанная для схемотехнического моделирования в математической программе Pspice. Схема состоит из двух индукторов с магнитной связью, которые получают питание от одного источника. Важным параметром служит линейный коэффициент связи между индуктивностями  $K$ , а также частота  $f$ . Моделирование позволяет исследовать параметры системы, такие как распределение электромагнитного поля, тепловые характеристики и энергетическую эффективность.

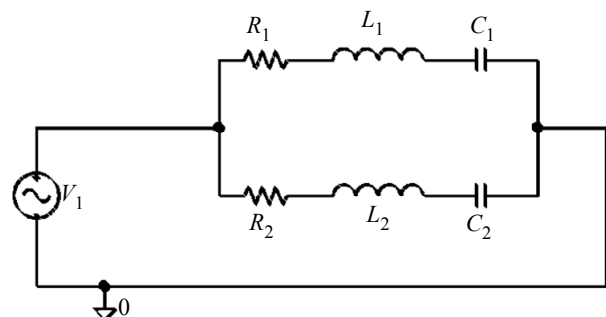


Рис. 1. Эквивалентная схема установки индукционного нагрева с питанием от одного источника двух индукторов с магнитной связью ( $K = 0, f = 92$  кГц)  
Fig. 1. Equivalent scheme of induction heating plant with power supply from one source of two magnetically coupled inductors ( $K = 0, f = 92$  kHz)

На рис. 1 каждый индуктор представлен эквивалентной последовательной схемой замещения  $L_1, R_1$  и  $L_2, R_2$ . При этом между индуктивностями  $L_1$  и  $L_2$  присутствует магнитная связь, т. е. коэффициент связи  $K$ . Для компенсации реактивной мощности индукторов последовательно с ними подключены конденсаторы  $C_1$  и  $C_2$ . Два образовавшихся при этом индукционных нагрузочных контура имеют различные резонансные частоты и обладают высокой добротностью, характерной для индукторов, греющих магнитную стальную деталь. Оба нагрузочных контура подключены к одному источнику синусоидального напряжения  $V_1$ , действующее значение напряжения которого равно 450 В. Этот источник напряжения является эквивалентной схемой транзисторного инвертора напряжения с резонансной нагрузкой, которая пригодна при исследовании энергетических характеристик индукционной системы. На рис. 2 представлены амплитудно-частотные характеристики двухчастотного контура, отражающие распределение

мощности, выделяемой в индукторах при условии отсутствия магнитной связи между ними.

В результате были получены два экстремума с одинаковым значением мощности – 51 кВт, возникающие на разной резонансной частоте. Это соответствует парциальным частотам резонанса, наблюдаемым в случае отсутствия магнитной связи между контурами [3].

Предполагается, что при работе на частоте, близкой к резонансной частоте одного из контуров, искажение выходного тока источника, вызванное наличием второго контура на выходе инвертора, настолько незначительно, что не оказывает влияния на процессы коммутации силовых транзисторов инвертора. Однако это предположение неверно, так как связь между контурами осуществляется через общий магнитный поток, что подразумевает наличие магнитной связи между индукторами.

На рис. 3 представлены схемы способов намотки катушек индукторов в двух магнитно-связанных контурах в математической программе Pspice с коэффициентом связи  $K_{св}$  и частотой  $f$ .

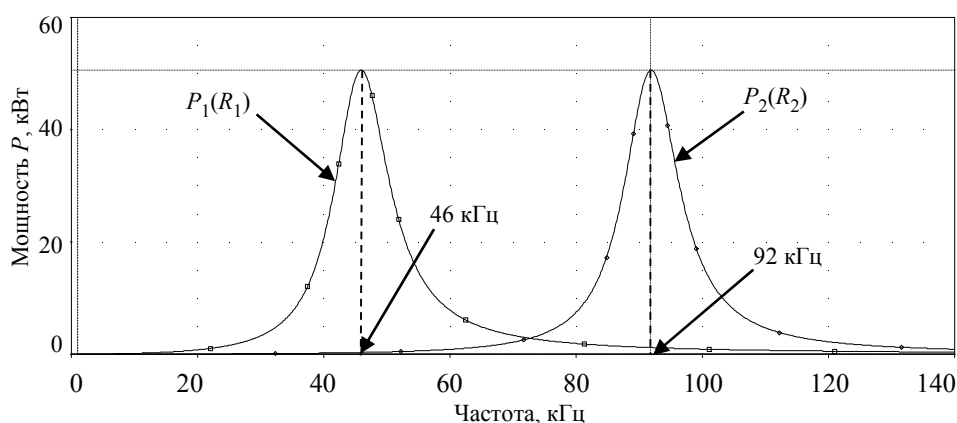


Рис. 2. Частотная характеристика нагрузки при отсутствии магнитной связи ( $K_{св} = 0$ )

Fig. 2. Frequency response of the load with no magnetic coupling ( $K_{св} = 0$ )

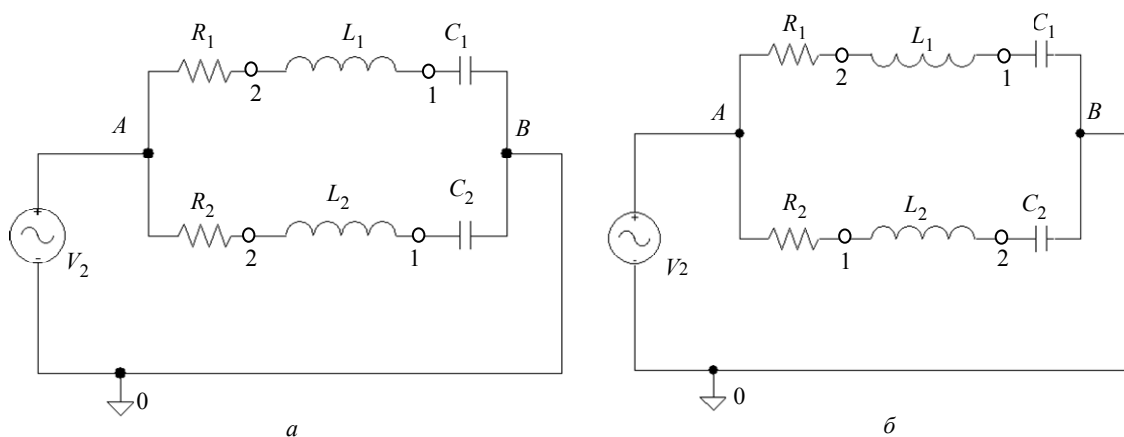


Рис. 3. Схемы способ обмотки ( $K = 0.1, f = 92$  кГц):

$a$  – противоположное направление;  $b$  – одно направление

Fig. 3. Winding method diagram ( $K = 0.1, f = 92$  kHz):  $a$  – the opposite direction;  $b$  – one direction

При дальнейшем анализе взаимная связь между индукторами в нагрузочном контуре рассматривается как трансформаторная индуктивная связь. Из-за магнитной связи индукторы могут наводить друг на друга ЭДС. Взаимная ЭДС в этой системе наводится на индуктор и может влиять на работу источников со стороны индуктора, нагрузки.

Знание о способе направления намотки витков индукторов принципиально, поскольку определяет знак наведенной ЭДС: вклад взаимной индукции может быть как положительным, так и отрицательным. На рис. 3, а представлена схема двухчастотного контура с параллельным соединением индукторов, в которой витки индукторов контуров намотаны в противоположенном направлении. Для этой схемы используются системы уравнений в комплексной форме согласно законам Кирхгофа:

$$U_{AB1} = \frac{1}{C_1} \int I_1 dt + R_1 I_1 + L_1 \frac{dI_1}{dt} + M \frac{dI_2}{dt};$$

$$U_{AB2} = \frac{1}{C_2} \int I_2 dt + R_2 I_2 + L_2 \frac{dI_2}{dt} - M \frac{dI_1}{dt};$$

$$I = I_1 + I_2,$$

где  $U_{AB1}, U_{AB2}; I_1(t), I_2(t)$  – напряжения и силы токов в первом и втором контурах соответственно.

В этом случае амплитуда мощности в первом контуре превышает мощность во втором контуре, что видно из рис. 4, а. На рис. 3, б представлена схема, на которой витки индукторов контуров намотаны в одном направлении. Для такой схемы получены следующие системы уравнений в комплексной форме согласно законам Кирхгофа [4]:

$$U_{AB1} = \frac{1}{C_1} \int I_1 dt + R_1 I_1 + L_1 \frac{dI_1}{dt} + M \frac{dI_2}{dt};$$

$$U_{AB2} = \frac{1}{C_2} \int I_2 dt + R_2 I_2 + L_2 \frac{dI_2}{dt} + M \frac{dI_1}{dt}.$$

На рис. 4 представлена амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) системы для различных способов намотки катушек индукторов в двух магнитной связанных контурах при коэффициенте связи  $K_{св} = 0.1$  и рабочей частоте  $f = 92$  кГц. На рис. 4, а приведена АЧХ нагрузки в случае, когда направления намотки индукторов в связанных контурах противоположны. В данном режиме наблюдается перераспределение мощности по

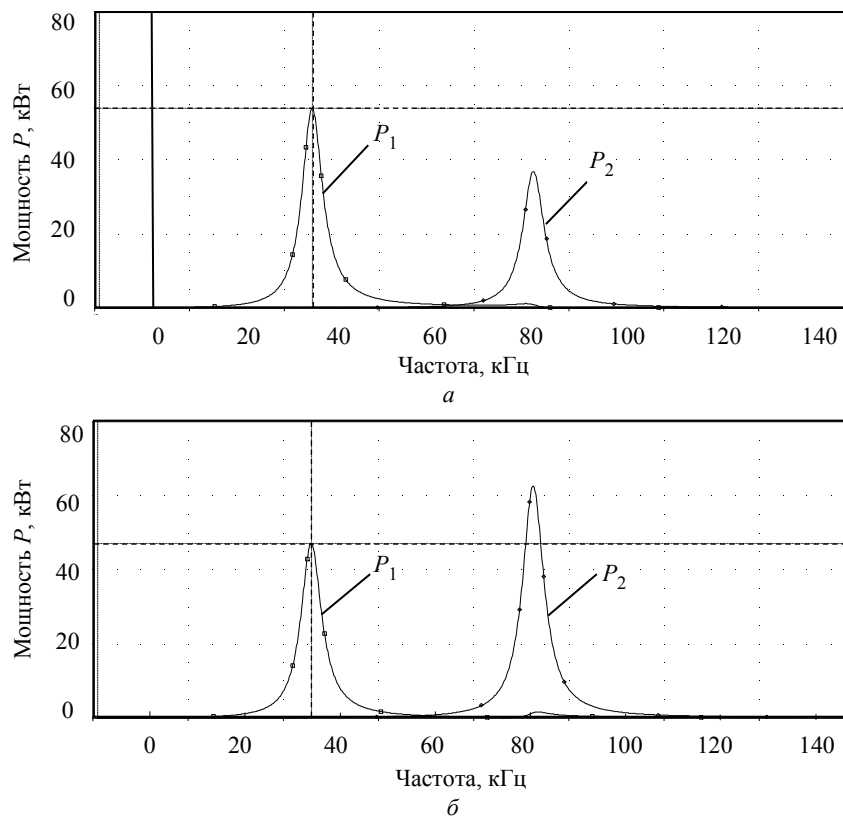


Рис. 4. Частотные характеристики при разных подключениях обмотки в контурах:  
а –  $P_1 = 53.9$  кВт,  $P_2 = 36.8$  кВт; б –  $P_1 = 47.2$  кВт,  $P_2 = 62.6$  кВт

Fig. 4. Frequency characteristics for different winding connections in contours:  
а –  $P_1 = 53.9$  kW,  $P_2 = 36.8$  kW; б –  $P_1 = 47.2$  kW,  $P_2 = 62.6$  kW

спектру: мощность низкочастотной составляющей ( $P_1$ ) превышает мощность высокочастотной составляющей ( $P_2$ ) при фиксированных значениях коэффициента связи и частоты.

На рис. 4, б представлена амплитудно-частотная характеристика системы при сонаправленной намотке витков индукторов в магнитно связанных контурах. В данном случае наблюдается увеличение мощности  $P_2$ , передаваемой во второй контур. Это свидетельствует о перераспределении полной мощности между контурами в зависимости от взаимной ориентации намоток индукторов, что обусловлено изменением знака и значения взаимной индуктивности и, как следствие, условий энергообмена в системе.

В результате амплитуда мощности на первом контуре снижается, а на втором – возрастает, что видно из рис. 4, б. Следует отметить, что при изменении направления намотки витков индукторов низкочастотная составляющая амплитудно-частотной характеристики остается неизменной, а высокочастотная составляющая изменяется в 1.5 раза (рис. 4).

Данное исследование направлено на решение задачи независимого управления мощностью в двух близко расположенных областях с магнитной связью. Влияние магнитных связей между двумя индукторами подробно описано в [5], обеспечивающего возможность управления коэффициентом электромагнитной связи между индукторами. Из вышесказанного следует, что при наличии магнитной связи невозможно передать полную мощность источника в каждую из зон.

На основе проведенных исследований и результатов, приведенных в [5], показано, что рассматриваемая зависимость сохраняется во всем диапазоне изменения коэффициента связи.

Согласно [6], компенсация потерь ЭДС служит необходимым условием обеспечения устойчивой передачи мощности в нагрузочных контурах систем индукционного нагрева.

Для снижения взаимного влияния магнитно связанных контуров и обеспечения заданного распределения мощности предложено применение последовательно включенных согласующих трансформаторов. Их использование в низкочастотном и высокочастотном контурах позволяет уменьшить влияние взаимной индукции и стабилизировать энергетические параметры системы при распределении мощности между контурами.

Ниже приведена схема (рис. 5), на которой видно подключение повышающего трансформатора  $Tr_1$  в низкочастотном контуре и непосредственное гальваническое подключение высокочастотного контура, либо подключение согласующего трансформатора  $Tr_2$  с коэффициентом трансформации, равным единице.  $L_{u1}, R_{u1}, L_{u2}, R_{u2}$  – индуктивности и сопротивления нагрузки первого и второго контуров.

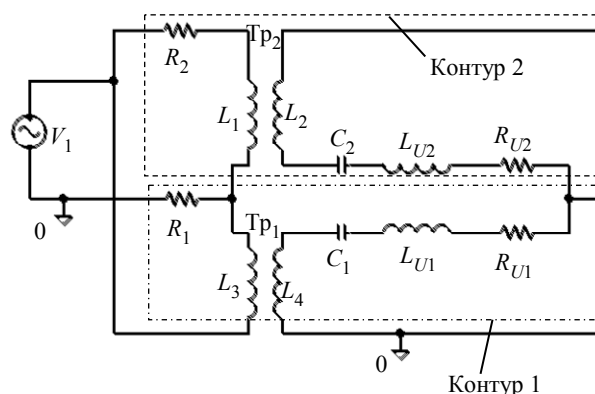


Рис. 5. Эквивалентная схема установки индукционного нагрева с питанием от одного источника двух индукторов с магнитной связью и со согласующим трансформатором  
 Fig. 5. Equivalent circuit of an induction heating plant with a single-source supply of two magnetically coupled inductors with a matching transformer

В схему последовательно включен повышающий трансформатор в низкочастотный контур, тогда как во втором контуре установлен трансформатор с единичным коэффициентом трансформации. Результаты компьютерного моделирования работоспособности предложенной компенсационной системы отражены на графиках амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) нагрузки, представленных на рис. 6.

Амплитудно-частотные характеристики системы при различных значениях коэффициента связи и коэффициента трансформации представлены на рис. 6. Так, при  $K_{св} = 0.1$  и  $K_{Tr1} = 0.85$  (рис. 6, а) показано, что в резонансном режиме амплитуды мощности низкочастотной и высокочастотной составляющих выравниваются ( $P_1 = 65.5$  кВт,  $P_2 = 65.2$  кВт).

Аналогичный результат получен при  $K_{св} = 0.15$  и  $K_{Tr1} = 0.8$  (рис. 6, б), где также наблюдается выравнивание мощностей в контурах ( $P_1 = 73.1$  кВт,  $P_2 = 72.8$  кВт).

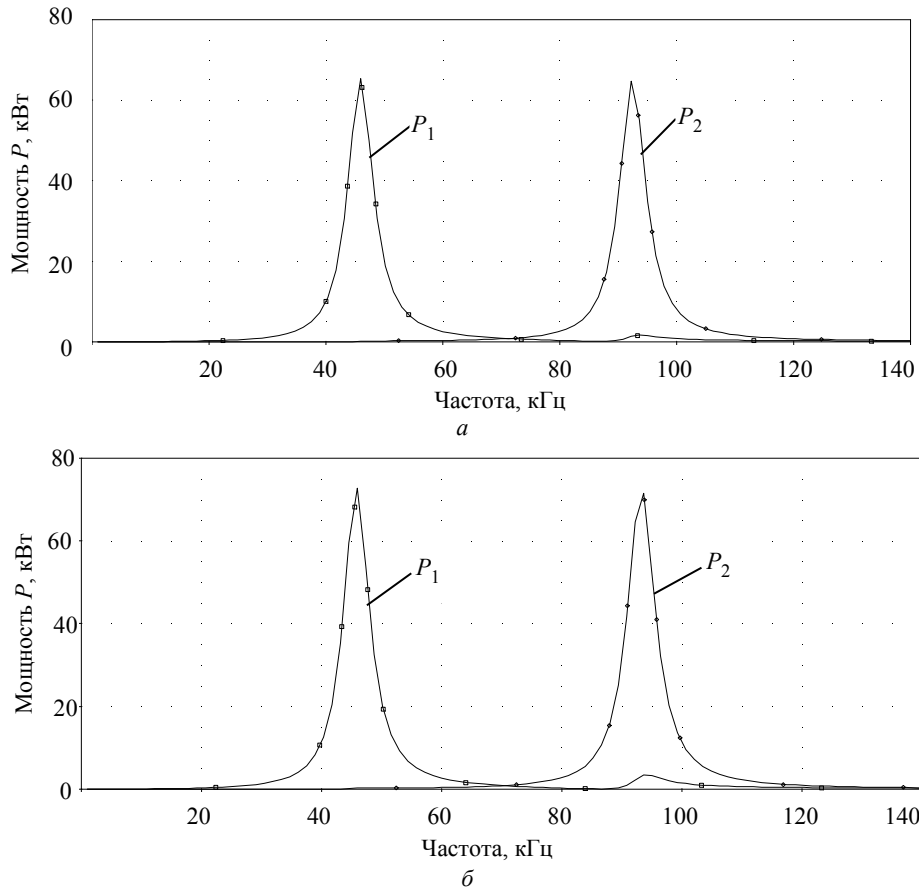


Рис. 6. Частотная характеристика нагрузки при изменении коэффициент трансформации на низкочастотный контур: а –  $K_{св} = 0.1$ ,  $K_{Тр1} = 0.85$ ,  $P_1 = 65.5$  кВт,  $f_1 = 45.9$  кГц,  $P_2 = 65.2$  кВт,  $f_2 = 92.4$  кГц; б –  $K_{св} = 0.15$ ,  $K_{Тр1} = 0.8$ ,  $P_1 = 73.1$  кВт,  $f_1 = 45.8$  кГц,  $P_2 = 72.8$  кВт,  $f_2 = 93.2$  кГц

Fig. 6. Frequency response of the load when changing the transformation ratio to f low-frequency circuit: а –  $K_{св} = 0.1$ ,  $K_{Тр1} = 0.85$ ,  $P_1 = 65.5$  kW,  $f_1 = 45.9$  kHz,  $P_2 = 65.2$  kW,  $f_2 = 92.4$  kHz; б –  $K_{св} = 0.15$ ,  $K_{Тр1} = 0.8$ ,  $P_1 = 73.1$  kW,  $f_1 = 45.8$  kHz,  $P_2 = 72.8$  kW,  $f_2 = 93.2$  kHz

Полученные результаты подтверждают возможность обеспечения равномерного распределения мощности между контурами за счет выбора значений коэффициента связи и коэффициента трансформации.

Результаты моделирования показали, что при  $K_{св} = 0.1$  полная передача мощности при частотной перестройке достигается за счет увеличения индуктивности вторичной обмотки повышающего трансформатора в низкочастотном контуре на 14 % (с  $L_1 = 200$  мкГн до  $L_2 = 275$  мкГн). При этом мощности в контурах практически выравниваются, что согласуется с данными, представленными на рис. 6, а.

При увеличении коэффициента связи до  $K_{св} = 0.15$  для обеспечения аналогичного режима требуется повышение индуктивности вторичной обмотки до  $L_2 = 315$  мкГн (при сохранении  $L_1 =$

$= 200$  мкГн), что также приводит к выравниванию мощностей в контурах.

На основании полученных результатов установлено, что применение повышающего трансформатора в низкочастотном контуре позволяет:

- обеспечить независимое регулирование мощности в каждой зоне;
- реализовать перераспределение мощности между нагрузочными контурами;
- компенсировать влияние изменения коэффициента связи при частотной перестройке.

**Выводы.** По результатам проделанных исследований можно сформулировать следующие рекомендации для более широкого применения предложенной системы:

1. Рекомендуется наматывать витки индукторов в одном направлении для обеспечения однозначности их включения.

2. Зависимость мощности в низкочастотном контуре от коэффициента связи имеет монотонно возрастающий характер. Установлено, что индукционная система демонстрирует устойчивую работу при коэффициенте связи в интервале 0.05...0.15. Для корректировки уровня мощности в указанном диапазоне целесообразно применять трансформатор, оснащенный переключаемыми отводами. Данный эффект обусловлен изменением взаимной индуктивности и перераспределением энергии между контурами.

3. Для обеспечения передачи полной мощности на каждую зону при перестройке частоты в нагруженном контуре рекомендуется:

– в низкочастотном контуре применять повышающий трансформатор, компенсирующий падение ЭДС в контуре;

– в высокочастотном контуре осуществлять прямое подключение, либо использовать трансформатор с коэффициентом трансформации, равным единице. Такая конфигурация позволит минимизировать потери мощности за счет адаптации к изменяющимся импедансным характеристикам системы.

4. Для уменьшения коэффициента связи на практике можно использовать способ разнесения индуктора или способ расположения короткозамкнутого витка между индукторами.

### Список литературы

1. Индукционный нагрев при сварке кольцевых швов труб / С. С. Адох, С. В. Дзлиев, В. В. Ткач, К. Е. Пищалева // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2022. Т. 15, № 4. С. 56–62. doi: 10.32603/2071-8985-2022-15-4-56-62.

2. Perevalov Y., Demidovich V. Induction heat treatment of large rolls with two independent power sources // IOP Conf. Series: Materials Sci. and Engin. IOP Publishing, 2020. Vol. 950, no. 1. P. 012013. doi: 10.1088/1757-899X/950/1/012013.

3. Осипов А. В. Синтез двухчастотного тока параллельно-последовательным резонансным LCLC-преобразователем с многократной широтно-импульсной модуляцией // Журн. Докл. ТУСУР. 2021. Т. 24, № 1. С. 75–82. doi: 10.21293/1818-0442-2021-24-1-75-82.

4. Основы теории колебаний / В. В. Мигулин, В. И. Медведев, Е. Р. Мустель, В. Н. Парыгин. М.: Наука, 1978. 392 с.

5. Абдулхаков И. Ю., Дзлиев С. В. Исследование магнитной связи двух близкорасположенных индукторов при нагреве стальных заготовок // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2019. № 1. С. 52–59.

6. Рэй Л. Кук, Дон Л. Лавлесс Согласование с нагрузкой в современных системах индукционного нагрева / пер. с англ. Ю. Болотовский, Г. Таназлы // Силовая электроника. 2007. № 12. С.88–93.

### Информация об авторах

**Адох Суру Сирилл** – аспирант кафедры электротехнологической и преобразовательной техники СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: adocylle@gmail.com

**Перевалов Юрий Юрьевич** – канд. техн. наук, доцент кафедры электротехнологической и преобразовательной техники СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: yyperevalov@gmail.com

### References

1. Indukcionnyj nagrev pri svarke kolcevnyh shvov trub / S. S. Adoh, S. V. Dzliev, V. V. Tkach, K. E. Pishhalev // Izv. SPbGJeTU «LJeTI». 2022. T. 15, № 4. S. 56–62. doi: 10.32603/2071-8985-2022-15-4-56-62. (In Russ.).

2. Perevalov Y., Demidovich V. Induction heat treatment of large rolls with two independent power sources // IOP Conf. Series: Materials Sci. and Engin. IOP Publishing, 2020. Vol. 950, no. 1. P. 012013. doi: 10.1088/1757-899X/950/1/012013.

3. Osipov A. V. Sintez dvuhchastotnogo toka parallelno-posledovatelnyim rezonansnym LCLC-preobrazovatelem s mnogokratnoj shirotno-impulsnoj moduljaciej

// J. Dokl. TUSUR. 2021. T. 24, № 1. S. 75–82. doi: 10.21293/1818-0442-2021-24-1-75-82. (In Russ.).

4. Osnovy teorii kolebanij / V. V. Migulin, V. I. Medvedev, E. R. Mustel', V. N. Parygin. M.: Nauka, 1978. 392 s. (In Russ.).

5. Abdulhakov I. Ju., Dzliev S. V. Issledovanie magnitnoj svjazi dvuh blizkoraspolzhenykh induktorov pri nagreve stalnyh zagotovok // Izv. SPbGJeTU «LJeTI». 2019. №1. S. 52–59. (In Russ.).

6. Rfej L. Kuk, Don L. Lavless Soglasovanie s nagruzkoj v sovremennyh sistemah indukcionnogo nagreva / per. s angl. Ju. Bolotovskij, G. Tanazly // Silovaja Jelektronika. 2007. № 12. S.88–93. (In Russ.).

Information about the authors

**Suru S. Adoh** – postgraduate student of Department of Electrotechnological and Transformational Engineering, Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: adocylle@gmail.com

**Yury Yu. Perevalov** – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of Department of Electrotechnological and Transformational Engineering, Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: yyperevalov@gmail.com

Статья поступила в редакцию 19.01.2026; принята к публикации после рецензирования 28.03.2026; опубликована онлайн 25.05.2026.

Submitted 19.01.2026; accepted 28.03.2026; published online 25.05.2026.

---