

## ТРАНСФОРМАТОРНО-ИНДУКТОРНЫЙ КОМПЛЕКС С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ ВКЛЮЧЕНИЕМ КОНДЕНСАТОРА В ЦЕПЬ НАГРУЗКИ

Рогинская Л.Э.<sup>1</sup>, Горбунов А.С.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Уфа, Россия (450000, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12), e-mail: freizer-anton@yandex.ru

Дано описание основных элементов индукционных установок. Произведено рассмотрение сравнительных характеристик индукторно-конденсаторного модуля с различными способами компенсации реактивной мощности. Приведены преимущества и недостатки каждого способа компенсации. Предложено применение согласующих высокочастотных трансформаторов с магнитопроводами из аморфных или нанокристаллических сплавов для расширения применения последовательного резонанса (резонанса напряжений) в источниках питания для индукционных установок. Установлено, что данные новые согласующие трансформаторы имеют значительно меньшие магнитные потери, по сравнению с применяемыми ранее согласующими трансформаторами. Произведено моделирование предложенных схем источников питания с IGBT-транзисторами в пакете *Matlab*. Получены результаты моделирования в виде осциллограмм токов и напряжений согласующего высокочастотного трансформатора, подтверждающих работоспособность предложенных схем источников питания для индукционных установок с последовательной компенсацией и новыми согласующими трансформаторами.

Ключевые слова: индукционный нагрев, источник питания, инвертор, индуктор, конденсатор, трансформатор, компенсация реактивной мощности.

## TRANSFORMER AND INDUCTOR COMPLEX WITH SERIES CONNECTION OF THE CAPACITOR IN A LOAD CIRCUIT

Roginskaya L.E.<sup>1</sup>, Gorbunov A.S.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>FSBEI HPE «Ufa State Aviation Technical University», Ufa, Russia (450000, Ufa, K. Marx street, 12), e-mail: freizer-anton@yandex.ru

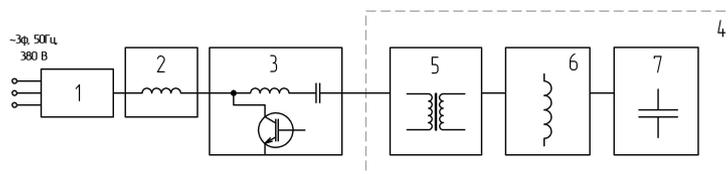
A description of main elements of induction devices are given. We provided a consideration of comparative characteristics of inductor and capacitor module with different methods of reactive power compensation. Advantages and disadvantages of each method of compensation are given. We offered use of high-frequency matching transformers with cores made of amorphous or nanocrystalline alloys for extension of application of a series resonance (voltage resonance) in power supplies for induction devices. These new matching transformers have much lower magnetic losses, compared with previously applied matching transformers. Modeling of the offered schemes of power supplies with IGBT transistors in Matlab software package is made. We got results of modeling in the form of oscillograms of currents and voltages of high-frequency matching transformer, confirming an operability of offered schemes of power supplies for induction devices with series compensation and new matching transformers.

Keywords: Induction heating, power supply, inverter, inductor, capacitor, transformer, reactive power compensation.

### Введение

Современная установка для индукционного нагрева, структурная схема которой приведена на рис. 1, состоит из следующих элементов.

1. Источник питания, в качестве которого могут применяться электромашинный, ламповый генератор, полупроводниковый (тиристорный, транзисторный) преобразователь частоты.
2. Нагрузочный колебательный контур, состоящий из индукторно-конденсаторного контура и согласующего высокочастотного трансформатора.



**Рис. 1.** Структурная схема полупроводникового преобразователя частоты:

1 – трехфазный выпрямитель Ларионова; 2 – сглаживающий дроссель; 3 – инвертор; 4 – нагрузочный колебательный контур; 5 – высокочастотный согласующий трансформатор; 6 – индуктор; 7 – компенсирующая батарея конденсаторов

Наиболее часто [2] индукторно-конденсаторный контур представляет собой параллельное соединение индуктора и конденсатора.

Как известно из [7], напряжение на выходе полупроводниковых преобразователей частоты нестандартно и отличается от номинальных напряжений индукторов. Согласующие высокочастотные трансформаторы применяются в полупроводниковых преобразователях частоты для согласования нестандартного выходного напряжения источника питания и номинального напряжения индукторно-конденсаторного контура.

Недостатком параллельной компенсации является наличие нескольких резонансных контуров, каждый из которых имеет свою частоту.

Целью настоящей статьи является:

- 1) рассмотрение сравнительных характеристик индукторно-конденсаторного модуля с параллельной и последовательной компенсацией;
- 2) повышение энергетических показателей и расширение функциональных возможностей индукционных установок на базе трансформаторов, являющихся частью последовательного индукторно-конденсаторного резонансного контура.

### **Сравнение способов компенсации реактивной мощности в индукторно-конденсаторных резонансных контурах**

Применяемые для высокочастотного нагрева индукторы в полупроводниковых преобразователях частоты имеют коэффициент мощности 0,35-0,05 для средних частот и не более 0,01 для высоких частот.

Применение компенсирующей батареи конденсаторов позволяет значительно повысить коэффициент мощности нагрузки, вследствие чего реактивная мощность будет компенсироваться в колебательном контуре индуктор – компенсирующая батарея конденсаторов и не потребляется от инвертора, что существенно снизит значения токов через полупроводниковые приборы и остальные элементы преобразователя частоты.

В настоящее время применяются различные способы компенсации [2].

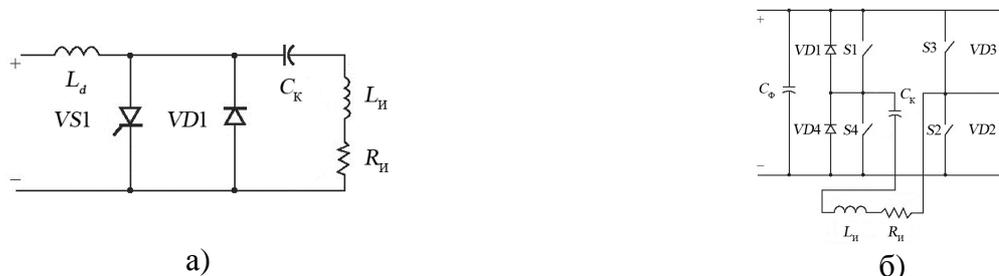
1. Параллельная компенсация. При этом компенсирующая батарея конденсаторов подключается параллельно нагрузке. Напряжение источника питания равно напряжению

индуктора, а ток источника меньше тока индуктора. Согласующие трансформаторы, если они применяются, в этом случае предназначаются для получения выходного напряжения, равного расчетному напряжению индуктора, при заданном выходном напряжении инвертора, т.е. трансформатор является устройством, дополняющим нагрузочный контур при сохранении параллельной компенсации. Параллельная компенсация может также применяться в бестрансформаторных схемах повышения напряжения источника питания. К ним относятся автотрансформаторная схема и схема с емкостным делителем.

Данные схемы определяют режим, близкий к резонансу токов в нагрузочном контуре.

2. Последовательная компенсация. При этом компенсирующая батарея конденсаторов подключается последовательно с нагрузкой, номинальный ток источника питания равен номинальному току индуктора, а выходное напряжение ниже напряжения на индукторе.

Последовательная компенсация реактивной мощности индуктора в настоящее время применяется редко, так как напряжение применяемых источников питания значительно выше активной составляющей напряжения индуктора. Данная компенсация возможна только в том случае, когда имеется равенство выходного напряжения инвертора активной составляющей номинального напряжения индуктора. При этом выходное напряжение инвертора должно быть достаточно низким и составлять 25...100 В. Ряд зарубежных компаний, например *Inductoheat* (США) (рис. 2), *Inductotherm corp.* (США) и др. [4; 8], иногда выпускают индукционные установки с последовательным способом компенсации.



**Рис. 2.** Инверторы фирмы *Inductoheat*: а) несимметричный одноячейковый инвертор тока; б) мостовой инвертор напряжения

Несимметричный одноячейковый инвертор тока (рис. 2а) имеет номинальное выходное напряжение 250...400 В, а мостовой инвертор напряжения (рис. 2б) имеет выходное напряжение, равное выходному напряжению выпрямителя, в качестве которого обычно применяется выпрямитель Ларионова, и в таком случае выходное напряжение инвертора равно 520 В. Применение данных инверторов при последовательной компенсации приводит к возникновению чрезмерно больших напряжений на индукторе и компенсирующем конденсаторе, что может привести к выходу из строя инвертора и всей установки для индукционного нагрева металлов. Из-за указанных недостатков последовательная компенсация практически не применяется.

Однако применение параллельной компенсации приводит к сложной конструкции индукционной установки ввиду того, что электромагнитные процессы в инверторах с параллельной компенсацией реактивной мощности индуктора определяются тремя резонансными контурами: нагрузочным, коммутирующим и фильтровым. При применении параллельной компенсации реактивной мощности индуктора требуется большое количество высокочастотного электротехнического оборудования, например наличие двух конденсаторов, двух дросселей, индуктора, что значительно удорожает индукционную установку. Другим недостатком параллельной компенсации реактивной мощности индуктора является большая требуемая емкость компенсирующего конденсатора, так как при параллельной компенсации реактивной мощности индуктора напряжение на компенсирующем конденсаторе равно выходному напряжению источника питания, которое может составлять значения 250...900 В для различных схем инверторов [3].

Применение последовательной компенсации позволяет значительно упростить схему индукционной установки путем сокращения количества резонансных контуров в источниках питания для индукционного нагрева, объединив нагрузочный и коммутирующий контуры, что соответствует использованию в инверторе только одного конденсатора для компенсации реактивной мощности индуктора, при этом имеется возможность объединить коммутирующий дроссель и индуктор в одном элементе. Необходимая для работы инвертора коммутирующая индуктивность соответствует индуктивности нагрузки.

С целью устранения указанных недостатков последовательной компенсации, а именно для уменьшения значений напряжений на индукторе и компенсирующем конденсаторе и тем самым увеличения ресурса работы в источниках питания, нами предлагается применение согласующих высокочастотных трансформаторов с магнитопроводами из аморфных или нанокристаллических сплавов, подключаемых к выходным зажимам инвертора, с подключением нагрузки к вторичной обмотке трансформатора [3], при этом мощность трансформатора равна активной мощности индуктора. Предлагаемые трансформаторы позволяют преобразовать выходное напряжение применяемых источников питания для индукционных установок, которое может составлять значения 250...900 В до значений 50...100 В, с возможностью широкого регулирования выходного напряжения с целью обеспечения согласования параметров нагрузки и источника питания.

Применение в согласующих высокочастотных трансформаторах магнитопроводов на базе аморфных или нанокристаллических сплавов позволяет значительно повысить технико-экономические показатели данных трансформаторов и источников питания. Данные магнитные материалы имеют высокую индукцию насыщения по сравнению с магнитодиэлектриками и ферритами, низкие удельные магнитные потери, например

нанокристаллический сплав ГМ 414 имеет индукцию насыщения 1,15 Тл [6]. Вследствие этого согласующие трансформаторы с магнитопроводами на базе аморфных или нанокристаллических сплавов имеют значительно меньшие массогабаритные показатели, меньшие потери, меньший нагрев при работе, что также улучшает источники питания для индукционных установок.

Удельные магнитные потери в магнитопроводе из нанокристаллического сплава ГМ 414, согласно [6], при индукции  $B_m=0,2$  Тл, на частоте  $f=50000$  Гц составляют

$$p_M = 5,5 \cdot 10^{-6} \cdot f^{1,7} \cdot B_m^2 = 5,5 \cdot 10^{-6} \cdot 50000^{1,7} \cdot 0,2^2 = 21,4 \text{ Вт/кг} \quad (1)$$

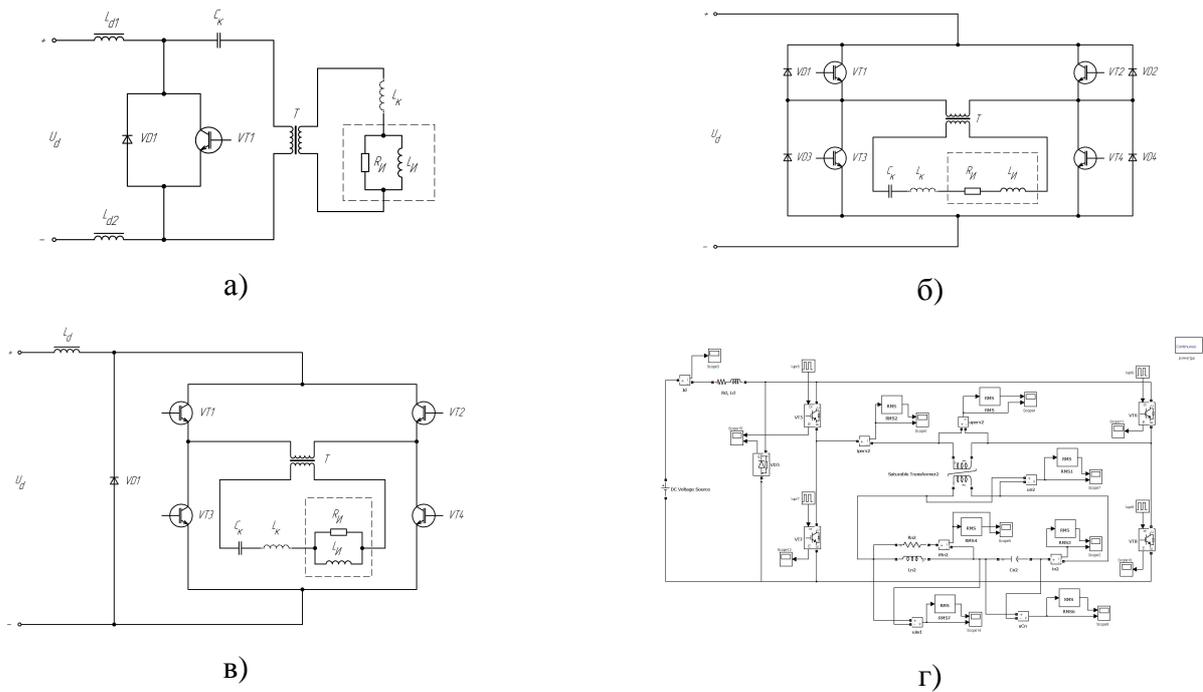
Удельные магнитные потери в магнитопроводе из электротехнической стали Э350, с толщиной листа 0,02 мм, согласно рисункам, приведенным в справочной литературе, при индукции  $B_m=0,2$  Тл, на частоте  $f=50000$  Гц составляют около  $p_M=300$  Вт/кг.

Как видно, удельные потери в магнитопроводе из нанокристаллического сплава ГМ 414 в 14 раз меньше, чем в магнитопроводе из электротехнической стали Э350.

На рис. 3 а-в представлены схемы предлагаемых источников питания (инверторов) для индукционных установок с новыми согласующими трансформаторами.

В этих инверторах применены *IGBT*-транзисторы, которые могут работать на более высоких частотах переключения, по сравнению с тиристорами, так как транзисторам требуется значительно меньшее время для восстановления их управляющих свойств. Инверторы с *IGBT*-транзисторами могут работать на частотах до 50 кГц [8].

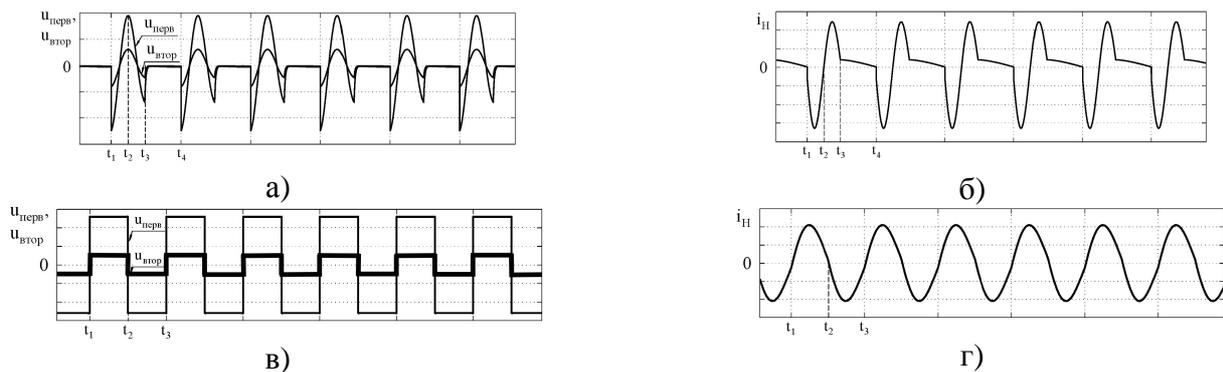
Для анализа электромагнитных процессов в предлагаемых источниках питания для индукционных установок с новыми согласующими трансформаторами применялось моделирование в пакете *Matlab*, библиотеках *Simulink* и *SimPowerSystems*. При этом с помощью блоков из указанных библиотек были созданы имитационные модели предлагаемых источников питания, в соответствии со схемами на рис. 3 а-в. На рис. 3г представлена модель мостового инвертора тока, соответствующая схеме на рис. 3в. В данной модели система управления *IGBT*-транзисторами моделировалась упрощенно в виде четырех источников прямоугольных импульсов. Трехфазный выпрямитель Ларионова упрощенно представлен в виде идеального источника постоянного напряжения 520 В. Сглаживающий дроссель представлен в виде последовательно соединенных активного сопротивления  $R_d$  и индуктивности  $L_d$ . Реальная характеристика намагничивания предлагаемых магнитных материалов магнитопровода согласующего трансформатора учитывалась в блоке *Saturable Transformer*. Индуктор представлен в виде параллельно соединенных активного сопротивления  $R_n$  и индуктивности  $L_n$ . Компенсирующая емкость представлена в виде конденсатора  $C_k$ , соединенного последовательно с индуктором.



**Рис. 3.** Инверторы с согласующими высокочастотными трансформаторами:

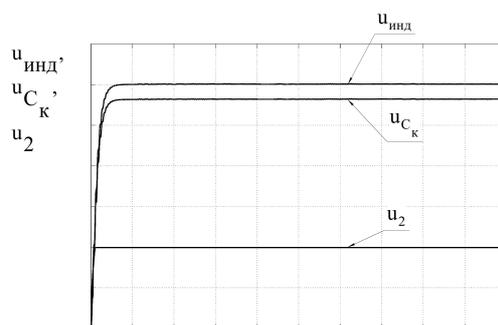
- а) несимметричный одноячейковый инвертор тока; б) мостовой инвертор напряжения;
- в) мостовой инвертор тока; г) модель мостового инвертора тока

На рис. 4 приведены полученные в результате моделирования осциллограммы первичных и вторичных напряжений, вторичных токов согласующих высокочастотных трансформаторов. На рис. 5 приведены осциллограммы действующих значений вторичного напряжения, напряжения на индукторе и напряжения на компенсирующем конденсаторе в мостовом инверторе.



**Рис. 4.** Мгновенные значения токов и напряжений согласующего трансформатора:

- а) первичное и вторичное напряжения в одноячейковом инверторе; б) вторичный ток одноячейкового инвертора;
- в) первичное и вторичное напряжения в мостовом инверторе напряжения; г) вторичный ток мостового инвертора напряжения



**Рис. 5.** Действующие значения вторичного напряжения на индукторе, компенсирующем конденсаторе и на вторичной обмотке согласующего трансформатора в мостовом инверторе

Из осциллограмм на рис. 4 и 5 видно, что предложенные согласующие трансформаторы позволяют снизить напряжения на индукторе и компенсирующем конденсаторе до требуемых значений, например понизить напряжение от 1000 до 400 В, при котором не будет происходить пробой изоляции индуктора или диэлектрика компенсирующего конденсатора. При этом, как видно из рис. 5, вторичное напряжение согласующего трансформатора намного меньше напряжения на индукторе и компенсирующем конденсаторе и равно активной составляющей напряжения индуктора, то есть установленная мощность данных трансформаторов соответствует активной мощности индуктора, поэтому данные трансформаторы имеют малые габариты и малые потери. Также можно отметить, что предлагаемые трансформаторы работают, не насыщаясь при значениях магнитной индукции до 1 Тл, что намного превышает значения рабочих индукций трансформаторов с магнитопроводами из ферритов и магнитодиэлектриков, составляющих значения до 0,1 Тл.

В мостовом инверторе напряжения форма кривой вторичного тока (рис. 4г) близка к синусоиде, в отличие от кривых вторичных токов в инверторах тока, где имеются токовые паузы, связанные с протеканием тока, заряжающего компенсирующий конденсатор. Однако использование предлагаемых согласующих трансформаторов позволяет значительно расширить применение инверторов тока с последовательной компенсацией для индукционного нагрева. Таким образом, применение согласующих высокочастотных трансформаторов с магнитопроводами из аморфных или нанокристаллических сплавов позволяет значительно расширить область применения последовательного резонанса (резонанса напряжений) для компенсации реактивной мощности в источниках питания для индукционного нагрева.

### **Выводы**

1. Последовательный резонанс на индукторно-конденсаторном модуле позволяет повысить энергетические показатели и расширить функциональные возможности индукционных установок, а также расширить область устойчивой работы установки благодаря уменьшению количества резонансных контуров.

2. Применение высокочастотных согласующих трансформаторов с магнитопроводами из аморфных или нанокристаллических сплавов, являющихся частью последовательного индукторно-конденсаторного резонансного контура, позволяет повысить энергетические показатели и расширить функциональные возможности индукционных установок, а также расширить область устойчивой работы установки благодаря уменьшению количества резонансных контуров.
3. Исследование электромагнитных процессов в индукционных установках с последовательной компенсацией с помощью имитационных моделей подтвердило возможность применения последовательной компенсации как в схемах с инверторами напряжения, так и в схемах с инверторами тока.

### **Список литературы**

1. Антонов И.Ф., Зинин Ю.М., Ройзман Ю.П. Основы проектирования автоматизированных установок индукционного нагрева токами повышенной частоты : учеб. пособие. – Уфа : Изд-во УГАТУ, 1996. - 79 с.
2. Индукционные установки / Ф.Ш. Абсалямов [и др.]. - М. : Энергоатомиздат, 2009. - 103 с.
3. Рогинская Л.Э., Горбунов А.С., Гусаков Д.В. Инвертор (варианты) : Патент России № 131538.2013. Бюл. № 23.
4. Силкин Е.М. Автономные несимметричные одноключевые инверторы с закрытым входом для новых электротехнологических систем // Силовая электроника. - 2008. - № 2. - С. 110-116.
5. Слухоцкий А.Е. Индукторы / под ред. А.Н. Шамова. - 5-е изд., перераб. и доп. - Л. : Машиностроение, 1989. - 69 с. (Б-чка высокочастотника-термиста; Вып. 12).
6. Стародубцев Ю.Н. Теория и расчет трансформаторов малой мощности. - М. : ИП РадиоСофт, 2005. - 320 с.
7. Тиристорные преобразователи частоты / А.К. Белкин [и др.]. - М. : Энергоатомиздат, 2000. - 263 с.
8. Steel heat treatment: equipment and process design / ed. by G. E. Totten. Boca Raton [etc.]: CRC Press [etc.], 2007. - 714 p. (Steel heat treatment handbook, second edition).

### **Рецензенты:**

Саттаров Р.Р., д.т.н., профессор кафедры «Электромеханика» ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет», г. Уфа.

Шапиро С.В., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой физики ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный университет экономики и сервиса», г. Уфа.