

ОНТОЛОГИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА В БЫТОВОЙ КУЛИНАРИИ, СВАРКЕ И ПРОМЫШЛЕННОМ ПЛАВЛЕНИИ: ТОПОЛОГИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ И СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

ст. преподаватель **Ларькина Татьяна Сергеевна**,
доктор техн. наук, профессор **Льготчиков Валерий Вениаминович**,
Смоленский филиал Национального исследовательского
университета «МЭИ»,
г. Смоленск, Российская Федерация

Аннотация. В работе рассматриваются вопросы сущности проектирования систем индукционного нагрева, в частности в бытовой кулинарии и промышленности. В статье представлена минимально возможная функциональная схема построения силового канала систем индукционного нагрева. Выполнено обобщение влияния параметров нагрузки в системах индукционного нагрева. Приведено обобщение структур топологий, модуляций и управления силовыми преобразователями, применяемыми в системах индукционного нагрева. Приведен краткий анализ некоторых недавних исследований, связанных с индукционным нагревом в промышленном и бытовом применениях, с выявлением их особенностей и преимуществ.

Ключевые слова: система управления, индукционный нагрев, преобразователь, нагрев, автоматика.

ONTOLOGY OF DESIGN OF INDUCTION HEATING SYSTEMS IN HOUSEHOLD COOKING, WELDING AND INDUSTRIAL MELTING: TOPOLOGY OF CONVERTERS AND CONTROL SYSTEMS

Senior Lecturer **Larkina Tatyana Sergeevna**,
Doctor of Technical Sciences, Professor **Lgotchikov Valeriy Veniaminovich**,
Branch of the "National Research University "MPEI" in Smolensk,
Smolensk, Russian Federation

Abstract. This paper discusses the essence of the design of induction heating systems, in particular in household cooking and industry. The article presents the minimum possible functional scheme for constructing the power channel of induction heating systems. A generalization of the influence of load parameters in induction heating systems was performed. A generalization of the structures of topologies, modulations and control of power converters used in induction heating systems is given. A brief analysis of some recent studies related to induction heating in industrial and domestic applications is given, with the identification of their features and advantages.

Keywords: control system, induction heating, converter, heating, automation.

С начала XX в. индукционный нагрев использовался в промышленности для плавки металлов. Позже его стали использовать в авиационной и автомобильной промышленности. В настоящее время он используется во многих производственных компаниях для предварительного и последующего нагрева металлов, сварки, отжига, поверхностного нагрева, пайки, пайки, герметизации крышек и т. д.

Системы индукционного нагрева обладают рядом неотъемлемых преимуществ в сравнении с применением традиционных технологий на базе электрических и газовых систем, а именно:

- высокая эффективность;
- возможность применения в атмосфере защитного газа или в других средах (к примеру, в вакууме);
- небольшие массогабаритные показатели;
- отсутствие вредных выделений в атмосферу по причине того, что нагрев происходит за счет электромагнитного излучения;
- высокая скорость процесса нагрева;
- высокая точность;
- возможность достижения равномерного распределения температурного поля;
- меньшая постоянная времени при достижении тепла;
- возможность полной автоматизации технологического процесса;
- в то же время применение технологий индукционного нагрева предполагает утилизацию чистой энергии с более высокой эффективностью [1].

В настоящее время формализация объекта и понятие модели применяются во многих областях техники и науки, которые ставят своей целью решение сложных задач технологии, технологичности и экономики. При изучении свойств и особенностей объектов подобные задачи возникают с целью последующего управления, при создании адаптивных систем, в которых на основе построенной модели объекта вырабатываются оптимальные управляющие воздействия.

На стадии создания и эксплуатации систем управления объектами применяются различные типы моделей рассматриваемых объектов, систем или процессов. Это обуславливает актуальность проблемы построения эффективных моделей объектов технических, технологических, экономических или социальных процессов.

Общими признаками построения систем индукционного нагрева для электрических плит является наличие следующих функциональных узлов:

- силовая часть (силовой канал);
- система управления элементами силовой части;
- система управления технологическим процессом;
- устройство ввода-вывода и отображения информации (панель управления).

Для обеспечения принципа работы индукционного нагрева минимально необходимая структура преобразования электрической энергии должна включать следующие звенья [2]:

- устройство силового ввода;
- сетевой фильтр;
- выпрямитель;
- инвертор;
- индуктор.

На рисунке 1 приведена минимально возможная функциональная схема построения силового канала систем индукционного нагрева.

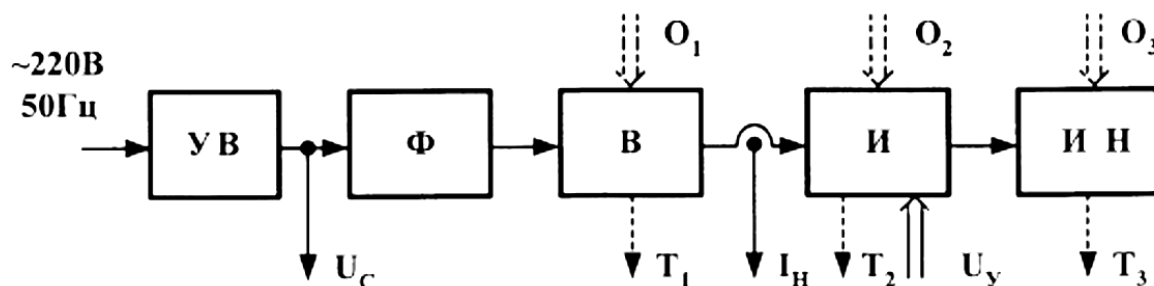


Рисунок 1. Минимально возможная функциональная схема построения силового канала систем индукционного нагрева: УВ – устройство силового ввода; Ф – сетевой фильтр; В – выпрямитель; И – инвертор; И Н – индуктор;

O_1 – охлаждение выпрямителя; O_2 – охлаждение инвертора;

O_3 – охлаждение индукционного нагревателя; U_c – измерение напряжения питающей сети; T_1 – измерение температуры выпрямителя; I_H – измерение тока нагрузки; T_2 – измерение температуры инвертора; U_y – управление инвертором;

T_3 – измерение температуры индукционного нагревателя

В данной системе стоит отметить присутствие следующих физических явлений, таких как: ток Фуко (вихревой высокочастотный ток) и потери на магнитный гистерезис [3]. В случае нагрева заготовки, протекание тока Фуко возникает на поверхности нагрузки при коротком замыкании заготовки и нагревании материала по закону Джоуля.

Иной способ нагрева, связанный с применением индукционных систем, может быть реализован за счет эффекта гистерезиса с использованием соответствующего ферромагнитного материала.

В обоих случаях потери и величина тепла напрямую зависят от частоты подачи. Следовательно, выбор диапазона рабочей частоты влияет на величину результирующего тепла и, в свою очередь, на соответствующее применение: условно, несколько кГц для бытового и промышленного применения и несколько МГц для медицинского и мощного промышленного применения.

Выбор топологии силового преобразователя, частоты переключения и их рабочих характеристик определяет их соответствие конкретному применению.

Общая структура топологий и модуляций силовых преобразователей, применяемых в системах индукционного нагрева, показана на рисунке 2.

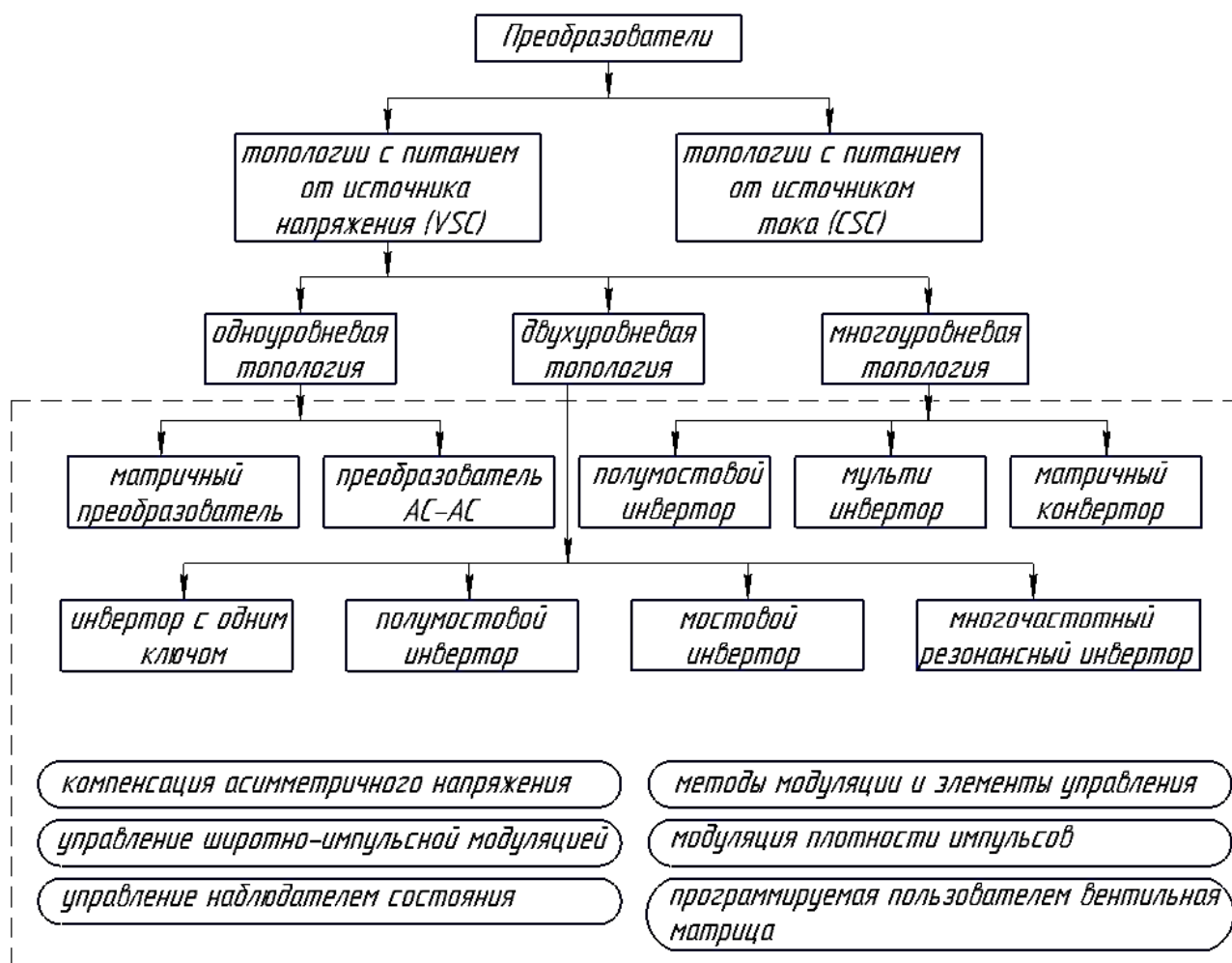


Рисунок 2. Общая структура топологий и модуляций силовых преобразователей, применяемых в системах индукционного нагрева

Питание систем осуществляется переменным током промышленной частотой 50 Гц, который требует преобразования в высокочастотный ток Фуко. Таким образом, имеют место применения различных методов преобразования энергии. Считается, что двухкаскадные схемы преобразования мощности обладают такими преимуществами, как высокое регулирование напряжения и хорошая стабильность, что заявляют многие исследователи [4; 5; 6].

Первая ступень преобразования (содержащая две ступени) обычно реализуется по мостовой схеме, в которой сеть переменного тока частотой 50 Гц выпрямляется с помощью неуправляемого диодного мостового выпрямителя. На втором этапе высокочастотный инвертор преобразует постоянный ток в переменный ток высокой частоты. На обоих этапах конструкция фильтров имеет жизненно важное значение для повышения общей эффективности и соответствия требованиям к качеству электроэнергии.

Во многих исследовательских работах рассматриваются проблемы подавления скачков напряжения и другие вопросы качества электроэнергии для обеспечения электромагнитной совместимости [5; 6]. Для повышения эффективности системы и уменьшения количества полупроводниковых переключателей разработаны однокаскадные топологии систем индукционного

нагрева с фильтрами ЭМС и без них [4; 5; 6]. Из литературы очевидно, что стремление предложить новый алгоритм управления, способный уменьшить коммутационные потери и точно регулировать мощность, имеет большое значение.

Инновации в силовой электронике в значительной степени способствовали развитию технологии индукционного нагрева [6]. Сердцем топологии индукционного нагрева является инвертор.

Довольно часто используются двухступенчатые преобразования, когда входной переменный ток преобразуется для регулирования постоянного тока на первом этапе, а затем инвертируется на втором этапе.

В некоторых применениях переменное напряжение напрямую подается на систему индукционного нагрева, и эта схема называется одноступенчатым преобразованием мощности.

Генерация вихревых токов, необходимая для индукционного нагрева, извлекается из инвертора, который изменяет фиксированную частоту, фиксированную величину напряжения на переменное напряжение и переменную частоту.

Изменение частоты оказывает прямое влияние на величину вихревого тока [2]. Поскольку вихревой ток зависит от частоты, для индукционного нагрева, как правило, выбирают частоту выше 20 кГц, чтобы избежать звукового шума, и повышают до 1 МГц в зависимости от применения.

Различают два типа инверторов, а именно: инвертор с источником напряжения и инвертор с источником тока. Они используются для приложений индукционного нагрева для получения высокой удельной мощности.

Нагрузка индукционного нагрева моделируется как эквивалентный резистор R_{eq} и эквивалентный индуктор L_{eq} . Практическое представление нагрузки индукционного нагрева представляет собой последовательное соединение R_{eq} и L_{eq} .

Используемый источник питания, геометрия катушки и ток, протекающий через катушку, определяют нагрев катушки.

Кроме того, на эффективность индукционного нагрева влияет расстояние между размещением рабочей катушки и рабочим телом (обрабатываемой деталью, нагреваемой поверхности и т. д.) и применяемая частота. Влияние этих параметров нагрузки при индукционном нагреве приведено в таблице 1.

Таблица 1 – Влияние параметров нагрузки в системах индукционного нагрева

<i>Параметр</i>	<i>Влияние на нагрев</i>	<i>Примечание</i>
Геометрия катушки индуктивности	Зависит от плотности магнитного потока.	Геометрия катушки индуктивности должна быть спроектирована с учетом проблемы нагрева.
Частота	Эффективность скорости нагрева зависит от частоты.	Силовые полупроводники могут иметь более высокие потери при переключении, что приводит к снижению эффективности.

<i>Параметр</i>	<i>Влияние на нагрев</i>	<i>Примечание</i>
Расстояние между размещением рабочей катушки и рабочим телом	Эффект нагрева будет выше при меньшем расстоянии.	Опасность перегрева при однородной нагрузке.
Концентраторы магнитного потока	Как правило, предпочтительнее для высокотемпературных приложений.	Приводит к опасному повышению температуры для неоднородной нагрузки.
Индуктивный ток	Более высокое значение тока индуктора приводит к быстрому нагреву.	Для небольшой системы может произойти перегрев.

Регулирование частоты индукционного нагрева становится более грамотным при использовании резонансных преобразователей.

Резонансный резервуар RLC образован добавлением в цепь дополнительного резонансного конденсатора C_r . Основное назначение этого конденсатора – генерировать синусоидальный высокочастотный переменный ток для нагрева нагрузки.

Основываясь на расположении C_r последовательно или параллельно по отношению к нагрузке, схема называется последовательным резонансным инвертором или параллельным резонансным инвертором. Как правило, последовательный резонансный контур RLC чаще всего используется для системы индукционного нагрева с питанием от инвертора напряжения, что гарантирует, что средний ток, протекающий через индуктор, равен нулю из-за последовательного конденсатора.

Коммутация нулевого напряжения реализуется в инверторных ключах при работе выше резонансной частоты.

Параллельный резонансный контур RLC используется для топологий индукционного нагрева с питанием от источника тока, что снижает ток, протекающий через переключатели. В этом инверторе реализована коммутация нулевого тока. Параллельный резонансный инвертор выбирают для систем, требующих высокого тока.

Таким образом, мягкое переключение, то есть переключение при нулевом напряжении или переключение при нулевом токе, приводит к меньшим потерям при переключении, что повышает общую эффективность системы индукционного нагрева.

Номинальные характеристики силовых полупроводниковых переключателей, используемых в промышленности, показаны на рисунке 3. В зависимости от номинальной мощности и частоты переключения можно выбрать соответствующие полупроводниковые переключатели.

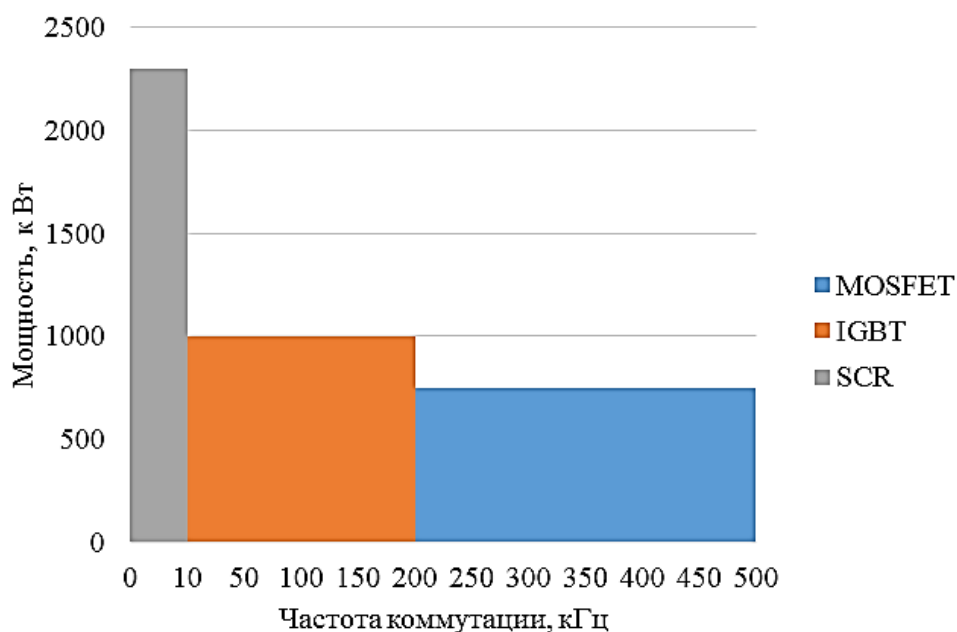


Рисунок 3. Рейтинг силовых полупроводниковых переключателей, используемых в промышленных системах

Некоторые из недавних исследований, связанных с индукционным нагревом в промышленных применениях, показаны в таблице 2 [7; 8].

Таблица 2 – Некоторые недавние исследования, связанные с индукционным нагревом в промышленном и бытовом применениях

Топология преобразователя	Область применения	Система управления	Рабочая частота	Анализ
<i>в промышленном применении</i>				
Мостовой инвертор с тремя последовательными соединениями	Машина индукционного нагрева постоянного тока	ШИМ управление	1,5 кГц	- Анализ методом конечных элементов выполняется для определения передачи энергии между токами индуктора и нагреваемой деталью. - Жесткая коммутация - Контроль температуры не осуществляется
Полномостовой мультимодулированный преобразователь	Многоуровневый преобразователь для нагрева проковша	Непрерывный текущий контроль тока	1 кГц	- Трехфазный переменный ток преобразуется в однофазный переменный ток. - Для изменения частоты используется контур фазовой автоподстройки частоты. - Реализована схема контроля баланса тока. - Используется большее количество переключателей. - Более высокая стоимость и коммутационные потери - Сложное управление.

Топология преобразователя	Область применения	Система управления	Рабочая частота	Анализ
<i>в бытовом применении</i>				
Резонансный двухвыходной последовательный инвертор с общим конденсатором	Индукционная готовка	ШИМ-управление	30 кГц	- Сокращает количество компонентов, размер и стоимость. - Используется общий резонансный конденсатор. - Сложная независимая регулировка мощности. - Большие коммутационные потери.
Одноступенчатый полномостовой повышающий инвертор	Высокочастотное применение	ШИМ со сдвигом фазы	40 кГц	- Прямое преобразование энергии. - Высокая эффективность. - Меньшие потери при переключении - Инжекция высших гармоник.
Многочастотный резонансный инвертор	Резонансное переключение	Непрерывный текущий контроль тока	50 кГц	- Используется трансформатор с центральным отводом. - Выходная частота на стороне нагрузки вдвое превышает частоту коммутации. - Больше вихревых токов на нагрузке. - Больше потерь на стороне нагрузки. - Сложность расчета резонансной частоты.

В бытовой технике широко используются системы на основе индукционного нагрева, в том числе индукционные плиты, индукционные нагреватели и т. д. Поскольку нет необходимости в отдельной системе охлаждения, общий КПД системы зависит только от производительности силового преобразователя и параметров нагрузки. Поэтому исследования различных топологий силовых преобразователей и их расширение до высокоэффективных многowychодных схем с компактными нагрузочными катушками вызвали интерес в исследовательском сообществе. Еще одна интересная перспектива этого исследования заключается в эффективном использовании горячей поверхности за счет увеличения общей площади нагрева, чтобы рабочее тело можно было разместить на любой части поверхности. Некоторые из недавних исследований, связанных с индукционным нагревом в кулинарии, показаны в таблице 2.

Из всего вышеизложенного становится очевидным, что системы индукционного нагрева играют значительную роль во многих областях. Хотя это хорошо зарекомендовавшая себя технология, важным воплощением которой является силовой электронный интерфейс, для повышения ее производительности все же необходимо решить некоторые дополнительные

вопросы. Кроме того, прогресс в расширении возможностей технологий и применения создает новые исследовательские интересы.

Список литературы:

1. Sarnago H., Lucía O., Burdio J. M. A Versatile Resonant Tank Identification Methodology for Induction Heating Systems // IEEE Trans. Power Electron. 2018. P. 1897-1901.
2. Vishnuram P., Sridhar R., Suresh P., Sureshkumar A. A. Simple Digital Control for Mitigating Voltage Stress on Single Switch Resonant Inverter for Induction Cooking Applications // Int. J. Electron. Lett. 2019. Vol. 8. P. 162-169.
3. Лыготчиков, В. В., Ларькина, Т. С. Синтез системы автоматического регулирования температуры жидкости с улучшенными динамическими показателями / В. В. Лыготчиков, Т. С. Ларькина. – Текст : непосредственный // Вестник МЭИ. – 2019. – № 5. – С. 73-80.
4. Ларькина, Т. С. Параметрическая идентификация параметров среды системы косвенного индукционного нагрева жидкости / Т. С. Ларькина, В. В. Лыготчиков, Г. С. Ленеvский. – Текст : непосредственный // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2022. – № 3 (76). – С. 117-125.
5. Acero J., Lope I., Carretero C., Burdio J. M. Adapting of Non-Metallic Cookware for Induction Heating Technology via Thin-Layer Non-Magnetic Conductive Coatings // IEEE Access. 2020.
6. Meziane B., Zeroug H. Comprehensive Power Control Performance Investigations of Resonant Inverter for Induction Metal Surface Hardening // IEEE Trans. Ind. Electron. 2016.
7. Lin B.-R. Bidirectional Resonant Converter for DC Microgrid Applications // Processes. 2021. Vol. 9. 1664 p.
8. Lin B.-R. Analysis and Implementation of a Bidirectional Converter with Soft Switching Operation // Processes. 2022. Vol. 10. 561 p.

© Ларькина Т. С., Лыготчиков В. В., 2022