



ИНЖЕНЕРИЯ ЖӘНЕ ИНЖЕНЕРЛІК ІС
ИНЖЕНЕРИЯ И ИНЖЕНЕРНОЕ ДЕЛО
ENGINEERING AND ENGINEERING

ЭЛЕКТРОНИКА
ЭЛЕКТРОНИКА
ELECTRONICS

DOI 10.51885/1561-4212_2025_1_40
MPHTI 45.43.01

Д.Г. Инсепов

Казахский национальный исследовательский технический университет
имени К.И. Сатпаева, г. Алматы, Казахстан

E-mail: insepov_dauren83@mail.ru*

ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ ДЛЯ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА НЕФТЕПРОВОДОВ

МҰНАЙ ҚҰБЫРЛАРЫН ИНДУКЦИЯЛЫҚ ҚЫЗУҒА АРНАЛҒАН ЖИІЛІКТІ ТҮРЛЕРДІКТИҢ ЖҰМЫС ПРИНЦИПТЕРІ

PRINCIPLES OF OPERATION OF A FREQUENCY CONVERTER FOR INDUCTION HEATING OF OIL PIPELINES

Аннотация. Статья обеспечивает всестороннее исследование преобразователей частоты и их решающей роли в индукционном нагреве нефтепроводов. В статье подробно изложены основные характеристики преобразователей частоты, включая входную и выходную частоты, номинальную мощность, КПД, номинальное напряжение и ток, тип преобразования, методы управления, функции защиты, а также размеры и вес. Рассмотрены особенности преобразователей частоты, предназначенных для индукционного нагрева нефтепроводов, подчеркивая их значение в регулировании процесса нагрева и обеспечении эффективного использования энергии. Подробно объясняется принцип работы этих преобразователей, который включает преобразование стандартного источника переменного тока в высокочастотный источник переменного тока, что дает четкое представление об их работе. Обсуждаются принципы индукционного нагрева, включая потери на гистерезис и потери на вихревые токи, и то, как эти принципы способствуют эффективному и контролируемому нагреву нефтепровода. Автор также подчеркивает принципы энергосбережения преобразователей частоты, объясняя, как регулирование скорости позволяет эффективно использовать энергию и способствует экономии электроэнергии в процессе нагрева.

Новизна исследования заключается в интеграции технологий ИИ в процесс управления преобразователями частоты, что открывает новые горизонты для повышения энергоэффективности и надежности индукционного нагрева в нефтяной промышленности.

Данная статья представляет интерес для тех, кто интересуется преобразователями частоты и их применением для обогрева нефтепроводов, предлагая полное понимание их роли, принципов работы.

Ключевые слова: преобразователь частоты, индукционный нагрев, нефтепровод, высокочастотная мощность, энергосбережение.

Аңдатпа. Мақалада жиілік түрлендіргіштері және олардың мұнай құбырларын индукциялық жылытудағы маңызды рөлі жан-жақты зерттеледі. Мақалада жиілік түрлендіргіштерінің негізгі сипаттамалары, соның ішінде кіріс және шығыс жиілігі, қуат рейтингі, тиімділік, кернеу мен ток рейтингтері, түрлендіру түрі, басқару әдістері, қорғаныс функциялары, өлшемі мен салмағы қарастырылады. Мақалада мұнай құбырларын индукциялық жылытуға арналған жиілікті түрлендіргіштердің ерекшеліктері қарастырылып, олардың жылу процесін реттеудегі және

энергияны тиімді пайдалануды қамтамасыз етудегі маңыздылығына тоқталады. Стандартты айнымалы ток көзін жоғары жиілікті айнымалы ток көзіне түрлендіруді қамтитын бұл түрлендіргіштердің жұмыс принципі оқырмандарға олардың жұмысы туралы нақты түсінік беретін егжей-тегжейлі түсіндіріледі. Сонымен қатар, мақалада индукциялық қыздыру принциптері, соның ішінде гистерезис шығындары мен құйынды ток шығындары және бұл принциптер мұнай құбырын тиімді және бақыланатын жылытуға қалай ықпал ететіні талқыланады. Сондай-ақ автор жылдамдықты басқарудың энергияны тиімді пайдалануға мүмкіндік беретінін және қыздыру процесінде энергияны үнемдеуге көмектесетінін түсіндіре отырып, ауыспалы жылдамдықты жетектердің энергияны үнемдеу қағидастарын атап көрсетеді.

Зерттеудің жаңалығы мұнай өнеркәсібіндегі индукциялық қыздырудың энергия тиімділігі мен сенімділігін арттыру үшін жаңа көкжиектерді ашатын жиілік түрлендіргіштерін басқару процесіне AI технологияларын біріктіруде.

Бұл мақала жиілікті түрлендіргіштерге және олардың мұнай құбырларын жылытуға арналған қолданылуына қызығушылық танытып, олардың рөлі мен жұмыс принциптерін толық түсінуді ұсынады.

Түйін сөздер: жиілікті түрлендіргіш, индукциялық қыздыру, мұнай құбыры, жоғары жиілікті қуат, энергия үнемдеу.

Abstract. The article provides a comprehensive study of frequency converters and their critical role in induction heating of oil pipelines. The article details the main characteristics of frequency converters, including input and output frequency, power rating, efficiency, voltage and current ratings, conversion type, control methods, protection functions, and size and weight. The article discusses the features of frequency converters designed for induction heating of oil pipelines, emphasizing their importance in regulating the heating process and ensuring efficient use of energy. The working principle of these converters, which involves converting a standard AC source into a high frequency AC source, is explained in detail, giving readers a clear understanding of their workings. In addition, the article discusses the principles of induction heating, including hysteresis losses and eddy current losses, and how these principles contribute to efficient and controlled heating of an oil pipeline. The author also highlights the energy-saving principles of variable speed drives, explaining how speed control allows for efficient use of energy and helps save energy during the heating process.

The novelty of the study lies in the integration of AI technologies into the process of controlling frequency converters, which opens up new horizons for improving the energy efficiency and reliability of induction heating in the oil industry.

This article is of interest to those interested in frequency converters and their application for heating oil pipelines, offering a complete understanding of their role, operating principles.

Keywords: frequency converter, induction heating, oil pipeline, high-frequency power, energy saving.

Введение. Актуальность изучения представленной темы значительна в современном промышленном ландшафте. Преобразователи частоты являются неотъемлемой частью нефтяной промышленности, особенно при индукционном нагреве нефтепроводов. Этот процесс жизненно важен для поддержания потока нефти, особенно в холодном климате, где нефть может загустеть и замедлиться. Понимая принципы работы преобразователя частоты, мы можем более эффективно и результативно управлять процессом индукционного нагрева. Такое понимание может привести к существенной экономии энергии, поскольку преобразователь частоты способен регулировать процесс нагрева в зависимости от конкретных потребностей трубопровода.

С экологической точки зрения эта тема также актуальна. Эффективное использование энергии в нефтяной промышленности может помочь снизить общий углеродный след отрасли.

Более того, принципы работы преобразователей частоты не ограничиваются нефтяной промышленностью. Они также могут применяться в других отраслях, где требуется управление электрической частотой.

Изучение этой темы не только актуально, но и крайне важно для специалистов нефтяной отрасли, инженеров-электриков и исследователей, интересующихся преобразователями частоты и их применением.

Материалы и методы исследования. В данной статье применяется несколько методов исследования. Автор провел обзор существующей литературы, посвященной преобразователям частоты и их применению для индукционного нагрева нефтепроводов. Это видно из подробного объяснения принципов работы преобразователей частоты и их характеристик. А также провел технический анализ, в котором рассмотрены компоненты преобразователя частоты и то, как они взаимодействуют при выполнении функции индукционного нагрева.

Результаты и их обсуждение. Преобразователь частоты представляет собой электронное или электромеханическое устройство, которое преобразует переменный ток одной частоты в переменный ток другой частоты. Это устройство используется для управления частотой входного сигнала в зависимости от требований (Цыба, 2018).

В табл. 1 представлены основные характеристики преобразователей частоты (Wang, 2020).

Таблица 1. Основные характеристики преобразователей частоты

№	Наименование	Функции характеристики
1.	Входная и выходная частоты	Основная функция преобразователя частоты – изменение частоты входного сигнала. Входная частота – исходная частота, которую необходимо преобразовать, выходная частота – желаемая частота после преобразования.
2.	Номинальная мощность	Это максимальная мощность, с которой он может справиться. Обычно она измеряется в ваттах (Вт) или киловаттах (кВт).
3.	КПД	Представляет собой отношение выходной мощности к входной мощности. Обычно оно выражается в процентах. Высокая эффективность означает, что преобразователь тратит меньше энергии в процессе преобразования.
4.	Номинальное напряжение и ток	Представляют собой максимальное напряжение и ток, которые он может выдержать. Эти показатели важны с точки зрения безопасности и производительности.
5.	Тип преобразования	Преобразователи частоты могут выполнять прямое преобразование (из переменного тока в переменный) или косвенное преобразование (из переменного тока в постоянный, а затем из постоянного в переменный). Тип преобразования влияет на сложность и эффективность преобразователя.
6.	Методы управления	Преобразователи частоты могут управляться вручную или автоматически. Ручное управление предполагает регулировку настроек вручную, тогда как автоматическое управление использует систему управления для корректировки настроек в соответствии с требованиями системы.
7.	Функции защиты	Многие преобразователи частоты имеют встроенные функции защиты, предотвращающие повреждение устройства или системы, к которой оно подключено. Эти функции могут включать защиту от перенапряжения, защиту от перегрузки по току и тепловую защиту.
8.	Размер и вес	Размер и вес преобразователя частоты могут влиять на его пригодность для определенных применений. Меньшие и более легкие преобразователи легче устанавливать и использовать в портативных приложениях, тогда как более крупные и тяжелые преобразователи могут быть более подходящими для стационарных приложений.
<i>Примечание – составлено автором или составлено автором на основе (Wang, 2020)</i>		

Преобразователь частоты – это универсальное устройство, которое можно использовать в широком спектре применений: от силовой электроники до телекоммуникаций. Его основные характеристики определяют его производительность, эффективность и пригодность для различных применений (Understanding, 2024).

В данной статье подробно рассмотрим преобразователи частоты, предназначенные для индукционного нагрева нефтепровода.

Преобразователи частоты, предназначенные для индукционного нагрева нефтепроводов (рис. 1), играют решающую роль в регулировании процесса нагрева и обеспечении эффективного использования энергии. Эти преобразователи специально разработаны для удовлетворения требований данного применения и включают в себя принципы и компоненты, которые обеспечивают точный контроль над процессом индукционного нагрева (Isembergenov, 2020).

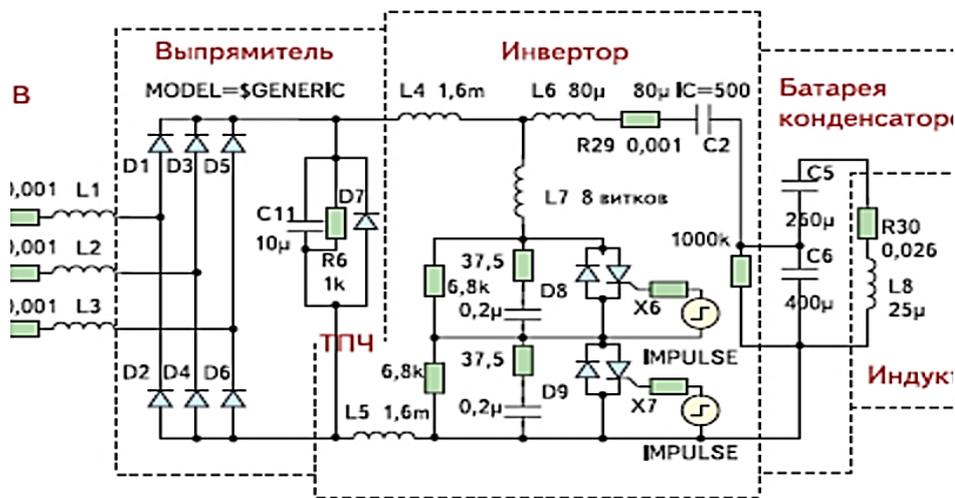


Рисунок 1. Схематическая модель тиристорного преобразователя частоты

Примечание – рисунок заимствован из источника (Валлулина, 2007)

Устройства индукционного нагрева, предназначенные для нагрева нефтепроводов, обычно работают в определенном диапазоне частот. Радиочастотные (РЧ) индукционные генераторы работают в диапазоне от 100 кГц до 10 МГц, тогда как большинство устройств индукционного нагрева с индукционным контролем частоты имеют диапазон частот от 100 кГц до 200 кГц. Выходная мощность обычно варьируется от 2,5 до 40 кВт для небольших компонентов и приложений и от 50 до 500 кВт для средних и крупных компонентов и приложений (Инсепов, 2016).

Принцип работы преобразователя частоты с индукционным нагревом заключается в преобразовании стандартной мощности переменного тока в высокочастотную мощность переменного тока (рис. 2). Это происходит с помощью схемы преобразования мощности, включающей полумостовую топологию повышающего инвертора (рис. 3). Такая конструкция обеспечивает эффективный и действенный индукционный нагрев, работающий непосредственно от однофазной сети в заданном диапазоне частот от 80 до 200 кГц. Система включает в себя преобразователь постоянного тока в постоянный, сконфигурированный как управляемый источник тока, питающий резонансный инвертор нагрузки постоянного и переменного тока путем управления параллельной цепью резонансной нагрузки. Эта цепь нагрузки состоит из катушки индукционного нагрева и

конденсатора коррекции коэффициента мощности, что обеспечивает точный контроль процесса индукционного нагрева (Зинин, 2014).

Принцип работы преобразователя частоты основан на выработке высокочастотной мощности переменного тока, которая необходима для индукционного нагрева. Схема преобразования мощности, включающая топологию повышающего полумостового инвертора, обеспечивает эффективное преобразование стандартного источника переменного тока в высокочастотный источник переменного тока. Этот процесс имеет решающее значение для достижения точного контроля над процессом индукционного нагрева, обеспечивая оптимальную и эффективную работу в указанном диапазоне частот (Inverter, 2024).

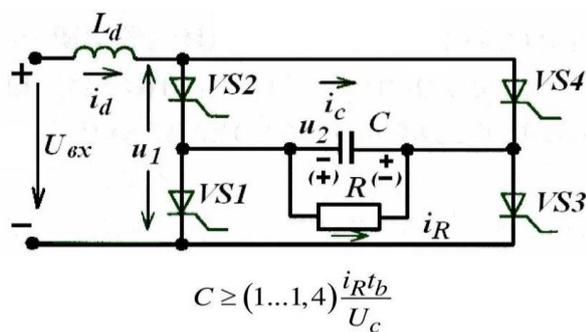


Рисунок 2. Инвертор тока

Примечание – рисунок заимствован из источника (Зинин, 2014)

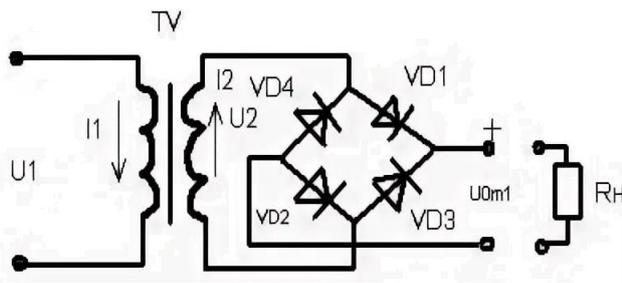


Рисунок 3. Мостовой выпрямитель

Примечание – рисунок заимствован из источника (Зинин, 2014)

Резонансный инвертор нагрузки постоянного тока, работающий от управляемого источника тока преобразователя постоянного тока, играет центральную роль в выработке высокочастотной мощности переменного тока, необходимой для индукционного нагрева. Благодаря использованию параллельной цепи резонансной нагрузки, состоящей из катушки индукционного нагрева и конденсатора коррекции коэффициента мощности, преобразователь частоты обеспечивает точный контроль и регулирование процесса индукционного нагрева. Такая конфигурация позволяет эффективно и результативно использовать высокочастотную мощность переменного тока для нагрева, способствуя повышению общей производительности и надежности системы индукционного нагрева (Shaikh, 2023).

Таким образом, принцип работы преобразователя частоты с индукционным нагревом включает преобразование стандартной мощности переменного тока в высокочастотную мощность переменного тока с помощью схемы преобразования мощности, которая включает топологию полумостового повышающего инвертора. Такая конструкция

обеспечивает эффективный и действенный индукционный нагрев, работающий непосредственно от однофазной сети в заданном диапазоне частот. Компоненты и принципы работы системы тщательно разработаны, чтобы обеспечить точный контроль и регулирование процесса индукционного нагрева, что способствует общей эффективности и производительности системы.

В высокочастотных системах индукционного нагрева для нагрева используются два принципа нагрева: потери на гистерезис и потери на вихревые токи (рис. 4). Гистерезисные потери возникают, когда нагреваемый объект представляет собой магнитный материал, тогда как потери на вихревые токи возникают как в магнитных, так и в немагнитных материалах. Переменный ток генерирует вихревые токи в магнитном поле за счет электромагнитной индукции, приводящие к выделению джоулева тепла и тепловым потерям электромагнитной энергии. Эти принципы используются для достижения эффективного и контролируемого нагрева нефтепровода в процессе индукционного нагрева (Lim, 2021).

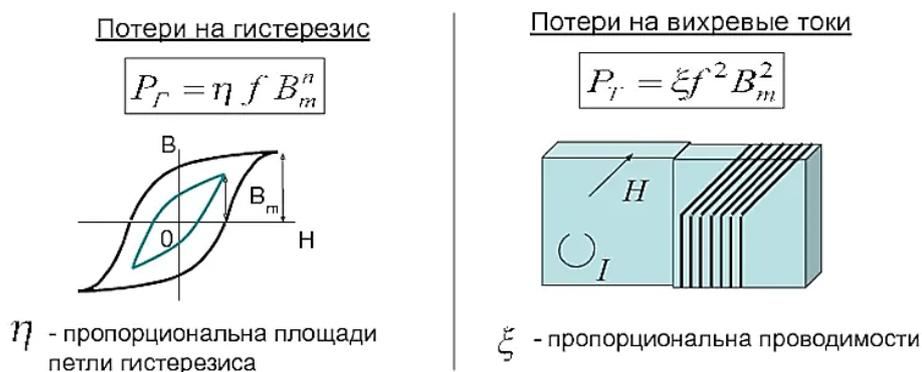


Рисунок 4. Принципы нагрева

Примечание – рисунок заимствован из источника (Lim, 2021)

Преобразователи частоты, предназначенные для индукционного нагрева нефтепроводов, также ориентированы на принципы энергосбережения. Применение регулирования скорости преобразователем частоты позволяет эффективно использовать энергию, способствуя экономии электроэнергии в процессе нагрева. Точно контролируя частоту и выходную мощность, эти преобразователи оптимизируют процесс индукционного нагрева, обеспечивая энергоэффективность и экономичность.

Преобразователи частоты, предназначенные для индукционного нагрева нефтепроводов, работают в определенных диапазонах частот и на определенных уровнях выходной мощности, используя передовые схемы преобразования мощности и принципы работы, позволяющие эффективно и точно контролировать процесс индукционного нагрева. Используя принципы гистерезисных потерь, потерь на вихревые токи и методы энергосбережения, эти преобразователи играют жизненно важную роль в обеспечении энергоэффективного и эффективного обогрева нефтепроводов (Isembergenov, 2021).

В состав основных узлов преобразователя частоты для индукционного нагрева нефтепроводов входят следующие ключевые элементы (Isembergenov, 2021):

1. Источник питания является основным компонентом преобразователя частоты, обеспечивающим необходимую электрическую энергию для процесса индукционного нагрева. Он играет решающую роль в преобразовании стандартного источника переменного тока в высокочастотную мощность переменного тока, что необходимо для

эффективного и действенного индукционного нагрева.

2. Схема согласования импеданса является неотъемлемой частью системы индукционного нагревателя, обеспечивая эффективную передачу мощности от источника питания к индукционной катушке. Он предназначен для оптимизации передачи энергии и максимизации эффективности процесса индукционного нагрева.

3. Цепь бака, включающая параллельный набор конденсаторов и катушек индуктивности, является ключевым компонентом системы индукционного нагрева. Он служит резервуаром электростатической и электромагнитной энергии, облегчая преобразование энергии при сильном токе. Такое преобразование энергии при высоком токе через катушку обеспечивает эффективную передачу энергии от индукционной катушки к заготовке, способствуя процессу нагрева.

4. Индукционная катушка, также известная как аппликатор, является жизненно важным компонентом системы. Она отвечает за создание переменного магнитного поля, необходимого для индукции переменного тока в материале, тем самым нагревая заготовку. Конструкция и конфигурация индукционной катушки имеют решающее значение для достижения точного и контролируемого индукционного нагрева.

5. Резонансный преобразователь нагрузки постоянного тока в переменный, приводимый в действие управляемым источником тока от преобразователя постоянного тока в постоянный, необходим для генерации высокочастотной мощности переменного тока, необходимой для индукционного нагрева. Он играет центральную роль в преобразовании мощности постоянного тока в высокочастотную мощность переменного тока, обеспечивая эффективный и действенный обогрев нефтепровода.

6. Конденсатор коррекции коэффициента мощности является важным компонентом цепи нагрузки, работающим совместно с катушкой индукционного нагрева. Это способствует обеспечению точного управления процессом индукционного нагрева, оптимизации коэффициента мощности и повышению общей эффективности системы.

В совокупности эти компоненты составляют основу преобразователя частоты для индукционного нагрева нефтепроводов, обеспечивая эффективное преобразование стандартной мощности переменного тока в высокочастотную мощность переменного тока и точный контроль над процессом индукционного нагрева.

Процесс преобразования частоты индуктора включает в себя расчет величины реактивного сопротивления или проводимости индуктора на заданной частоте. Индуктивное реактивное сопротивление (X_L) и индуктивная проводимость (B_L) катушки индуктивности можно определить по формуле (1):

$$X_L = 2\pi fL \quad (1)$$

где: X_L – индуктивное реактивное сопротивление; f – частота напряжения питания; L – индуктивность.

Импеданс индуктора, который является мерой его сопротивления проходящему сигналу, изменяется в зависимости от частоты сигнала. Индукторы имеют более высокий импеданс для сигналов более высокой частоты и более низкий импеданс для сигналов более низкой частоты. Реактивное сопротивление катушки индуктивности прямо пропорционально частоте сигнала и индуктивности. Собственная резонансная частота индуктора – это частота, на которой резонирует его индуктивность с распределенной емкостью, и за пределами этой частоты индуктор не функционирует как индуктор. Процесс выбора дросселя для высокочастотных цепей и модулей включает в себя рассмотрение собственной резонансной частоты и других соответствующих параметров, чтобы обеспечить надлежащую функциональность в желаемом диапазоне частот (Выбор, 2021).

Индуктивный адмиттанс (B_L) является обратной величиной индуктивного реактивного

сопротивления и рассчитывается по формуле (2):

$$BL = 1/XL \quad (2)$$

где: BL – индуктивный адмиттанс.

Индуктивная проводимость дает представление о способности индуктора проводить переменный ток заданной частоты. При проектировании высокочастотных цепей и модулей важно учитывать собственную резонансную частоту индуктора, поскольку работа за пределами этой частоты может привести к потере функциональности индуктора как индуктора (Induction, 2021).

Таким образом, процесс преобразования частоты индуктора включает понимание индуктивного реактивного сопротивления и проводимости индуктора на заданной частоте, а также рассмотрение поведения индуктора в зависимости от частоты проходящего через него сигнала. Правильный учет собственной резонансной частоты индуктора и других соответствующих параметров имеет решающее значение для обеспечения его функциональности в желаемом диапазоне частот в высокочастотных цепях и модулях.

Влияние преобразователя частоты на индукционный нагрев нефтепровода многогранно и включает в себя различные факторы, которые способствуют эффективности, результативности и практическому применению технологии индукционного нагрева.

Выбор подходящей частоты для индукционного нагрева играет решающую роль в эффективном нагреве электропроводящих материалов, например, используемых в нефтепроводах. Различные частоты используются для конкретных применений в процессе индукционного нагрева. На выбор частоты влияют такие факторы, как размер заготовки, необходимая глубина нагрева и желаемая скорость нагрева. Преобразователь частоты позволяет точно контролировать и регулировать частоту нагрева, тем самым оптимизируя процесс индукционного нагрева в соответствии с конкретными требованиями нагрева нефтепровода (Nikolsky, 2017).

Высокочастотный индукционный нагрев, обычно в диапазоне от 100 кГц до 2 МГц, особенно актуален для применений, требующих быстрого нагрева мелких деталей или глубокого проникновения в более крупные детали. Использование высокочастотного электричества для индукционного нагрева обеспечивает быстрый и эффективный нагрев электропроводящих материалов, а также минимизирует риск загрязнения благодаря отсутствию физического контакта между источником нагрева и заготовкой.

В нефтепроводах преобразователи частоты используются в целях энергосбережения и регулирования расхода. Регулирование скорости преобразователем частоты реализуется как метод оптимизации потока сырой нефти по трубопроводу. Регулируя скорость преобразователя частоты, можно эффективно регулировать поток масла, что способствует экономии энергии и повышению эксплуатационной эффективности.

Технология индукционного нагрева, поддерживаемая преобразователями частоты, становится все более популярной в нефтегазовой промышленности для нагрева трубопроводов с теплоносителем. Эта технология обеспечивает энергоэффективность, снижение эксплуатационных расходов и возможность поддерживать постоянный нагрев теплоносителей, таких как сырая нефть и природный газ. Влияние преобразователей частоты проявляется в использовании магнитно-индукционного нагрева для нагрева трубопроводов, что обеспечивает альтернативу традиционным методам нагрева (Васильев, 2018).

Таким образом, влияние преобразователей частоты на индукционный нагрев нефтепроводов включает в себя выбор оптимальных частот, эффективное применение высокочастотного индукционного нагрева, настройку процессов термообработки, энергосбережение и регулирование расхода, а также внедрение технологии индукционного

нагрева трубопроводов теплоносителя. В совокупности эти факторы демонстрируют значительное влияние преобразователей частоты на повышение эффективности, результативности и практического применения индукционного нагрева в контексте нагрева нефтепроводов.

С учетом изложенного, рассмотрим основные схемы инверторов (рис. 5), которые могут быть использованы для индукционного нагрева, их преимущества и недостатки.

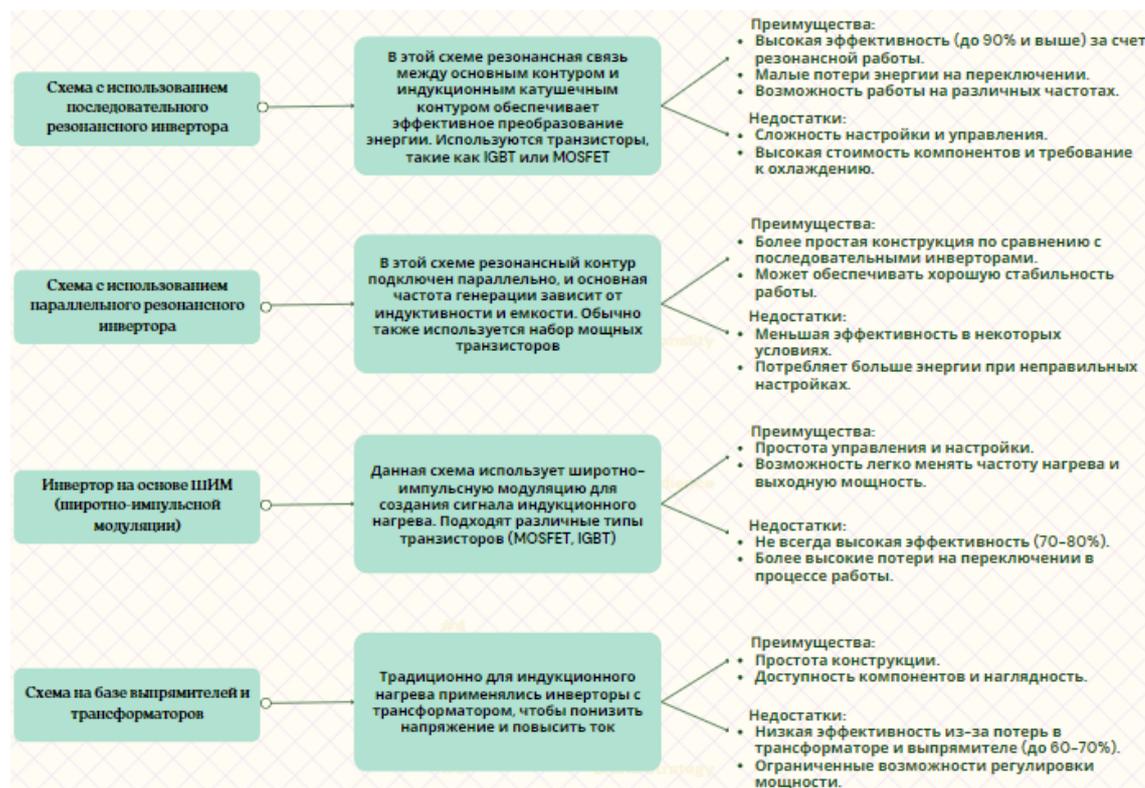


Рисунок 5. Основные схемы инверторов, применяемых при индукционном нагреве

Примечание – составлено автором на основе (Turps, 2024)

На основании представленных схем был выполнен сравнительный анализ, результаты которого приведены в табл. 2.

Таблица 2. Сравнительный анализ схем инверторов

Тип инвертора	Эффективность, (%)	Экономичность	Сложность устройства	Применение
Последовательный резонансный	90-95	Высокая	Высокая	Промышленные приложения, где требуются высокая мощность и скорость нагрева
Параллельный резонансный	80-90	Средняя		Небольшие и средние коммерческие процессы
Инвертор на ШИМ	70-80	Доступная	Средняя	Лабораторные исследования, мелкое производство
Инвертор на базе трансформаторов	60-70	Низкая	Низкая	Общее применение, стыковка с существующими системами

Примечание – составлено автором

Таким образом, выбор схемы инвертора для индукционного нагрева зависит от конкретных требований приложения, доступного бюджета и желаемой эффективности. Последовательные резонансные инверторы являются самыми эффективными, но их стоимость и сложность могут быть проблемой для небольших производств. Параллельные инверторы и схемы на ШИМ предлагают более простые решения с умеренной эффективностью.

Для индукционного обогрева нефтепровода, следуя из представленной выше информации, наиболее подходящими являются последовательные резонансные инверторы. Они обеспечивают высокую эффективность (90-95 %) и подходят для промышленного применения, где требуются высокая мощность и скорость нагрева. Несмотря на то, что они более сложные и дорогие, они обеспечивают наилучшую производительность для крупных промышленных приложений, таких как нагрев нефтепроводов.

В качестве примера рассмотрим расчет параметров представленной схемы, таких как индуктивное реактивное сопротивление и индуктивная проводимость, применяя формулы (1) и (2).

Например, частота $f = 150\text{ГГц} = 150 \cdot 10^9 \text{Гц}$ (среднее значение для индукционного нагрева), а индуктивность $L = 100 \text{нГн} = 100 \cdot 10^{-9} \text{Гн}$ (типичное значение для индукционных катушек).

$$XL = 2 \cdot 3,14 \cdot 150 \cdot 10^9 \cdot 100 \cdot 10^{-9} = 94,250 \text{ м}$$

$$BL = 1/94,25 \approx 0,0106 \text{ см}$$

Таким образом, выбор последовательного резонансного инвертора обусловлен его высокой эффективностью и способностью обеспечивать необходимую мощность для индукционного нагрева нефтепроводов. Расчет параметров схемы, таких как индуктивное реактивное сопротивление и проводимость, позволяет оптимизировать процесс нагрева и обеспечить его эффективность.

Для улучшения эффективности индукционного нагрева нефтепроводов за счет динамической настройки параметров работы преобразователя в реальном времени на основе анализа данных о состоянии системы автором предлагается внедрение адаптивного управления частотой и мощностью преобразователей частоты на основе искусственного интеллекта (ИИ).

Адаптивное управление подразумевает использование алгоритмов машинного обучения для анализа данных, получаемых от датчиков, установленных на нефтепроводах. Эти датчики могут отслеживать температуру, давление, вязкость нефти и другие параметры, влияющие на процесс нагрева. На основе полученных данных ИИ будет в состоянии предсказывать оптимальные настройки частоты и мощности преобразователя частоты.

Преимущества данного внедрения следующие:

– Энергоэффективность – автоматическая настройка параметров позволит существенно сократить энергозатраты, так как система будет работать только в необходимом режиме, избегая избыточного нагрева.

– Повышение надежности – система адаптивного управления сможет предотвращать перегрев и другие потенциальные неисправности, улучшая безопасность эксплуатации.

– Улучшение производительности – быстрая реакция на изменения в условиях эксплуатации позволит поддерживать оптимальную температуру и вязкость нефти, что, в

свою очередь, улучшает поток нефти в трубопроводе.

Для реализации данного подхода потребуется установка датчиков, способных собирать данные о состоянии трубопровода, разработка алгоритмов машинного обучения, которые будут анализировать собранные данные и предсказывать оптимальные параметры работы преобразователя, а также интеграция ИИ с существующими системами управления, что позволит обеспечить автоматическую настройку и регулирование работы преобразователей частоты.

Внедрение адаптивного управления частотой и мощностью преобразователей частоты на основе ИИ представляет собой уникальное и перспективное решение для повышения эффективности индукционного нагрева нефтепроводов. Этот подход не только будет способствовать экономии энергии, но и улучшит общую надежность и производительность системы, что делает его актуальным для современных требований нефтяной промышленности.

Заключение. В ходе исследования было установлено, что преобразователи частоты играют ключевую роль в процессе индукционного нагрева нефтепроводов, обеспечивая эффективный и контролируемый процесс нагрева. Основные характеристики преобразователей, такие как входная и выходная частоты, номинальная мощность, КПД, а также методы управления, оказывают значительное влияние на производительность и эффективность системы. Разработанные схемы инверторов и их сравнительный анализ показали, что выбор подходящей схемы инвертора является важным аспектом для достижения оптимального результата в индукционном нагреве.

Внедрение адаптивного управления частотой и мощностью преобразователей частоты на основе искусственного интеллекта (ИИ) открывает новые горизонты для повышения энергоэффективности и надежности системы. Использование алгоритмов машинного обучения для анализа данных о состоянии трубопроводов позволит не только оптимизировать параметры нагрева, но и значительно сократить энергозатраты, предотвращая перегрев и повышая безопасность эксплуатации.

Кроме того, внедрение таких технологий поможет снизить углеродный след нефтяной отрасли, что является важным аспектом в условиях современных экологических требований. Энергоэффективные решения, как адаптивное управление, становятся неотъемлемой частью стратегии устойчивого развития в нефтяной промышленности.

Таким образом, результаты данного исследования подчеркивают важность и необходимость дальнейших исследований и разработок в области применения преобразователей частоты в индукционном нагреве нефтепроводов. Внедрение современных технологий, включая ИИ, в процессы управления преобразователями частоты может значительно повысить эффективность и надежность систем, что имеет критическое значение для устойчивого развития нефтяной отрасли в будущем.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

«Уведомление об использовании генеративного ИИ и технологиях с его помощью в процессе написания рукописи». «При подготовке данной работы автор использовал gpt-орепс с целью улучшения читаемости.

Список литературы

- Induction Heating. (2024). <https://www.geeksforgedeks.org/induction-heating/>
- Isembergenov N.T., Sagyndikova A.Zh., Daskalov P. (2020) Induction metod for heating oil in low production wells. Scientific journal "Bulletin of NAS RK", no.3, 103-110.
- Inverter Circuit (DC To AC Converter) Know How Does It Work. (2024). https://www.academia.edu/20566667/Utility_AC_Frequency_to_High_Frequency_AC_Power_Conversi

- on_Circuit_with_Soft_Switching_PWM_Strategy.
- Lim M., Lee Ch. (2021). Evaluation of Heating Technique of Deformed Reinforcement Using High-Frequency Induction Heating System. Appl. Sci, no. 11, 2-32. <https://doi.org/10.3390/app11114947>.
- Nikolsky V., Oliynyk O., Yaris V., Reshetnya K. (2017). Application of electromagnetic fields for intensification of heat and mass exchange in combined gas-liquid processes. Energy-saving technologies and equipment, no.3, 33-40. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.103868>.
- Shaikh A., Dhayagonde S., Jadhav R., Ohol H. (2023). High frequency converter for induction heating application. International Journal of Innovations in Engineering Research and Technology, Vol. 10, no. 4, 4-10. <https://doi.org/10.17605/OSF.IO/KEB2A>.
- Types of Inverters. (2024). <https://www.geeksforgEEKS.org/types-of-inverters/>
- Understanding the Role of Frequency Converters in Modern Industry. (2024). https://medium.com/@Craber_4482/the-pulse-of-progress-understanding-the-role-of-frequency-converters-in-modern-industry-59ed2e62724e.
- Wang Y., Lucia, O. Zhe Zhang et. al. (2020). A Review of High Frequency Power Converters and Related Technologies. Journal of the Industrial Electronics Society. <https://doi.org/10.1109/OJIES.2020.3023691>.
- Валлиулина З., Зинин Ю. (2007). Исследование тиристорных преобразователей частоты для установок индукционного нагрева металлов. Силовая электроника. – № 2. https://power-e.ru/wp-content/uploads/2007_02_93.pdf // Valliulina Z., Zin'in Yu. (2007). Issledovanie tiristornykh preobrazovateleychastoty dlya ustanovok induktsionnogo nagrevametallov. Silovayaelektronika. – № 2. https://power-e.ru/wp-content/uploads/2007_02_93.pdf.
- Васильев И.В. (2018). Совершенствование индукционного нагревательного комплекса для термообработки вязких жидкостей. Дисс. на соиск. уч. ст. к.т.н. Самара, 130. // Vasil'yev I.V. (2018). Sovershenstvovanie induktsionnogo nagrevatel'nogo kompleksa dlya termo obrabotki vyazkikhzhidkostey. Diss. nasoisk. uch. st. k.t.n. Samara, 130.
- Выбор силовых дросселей. (2021). <https://www.symmetron.ru/articles/vybor-silovykh-drosseley/> // Vybor silovykh drosselyey. (2021). <https://www.symmetron.ru/articles/vybor-silovykh-drosseley/>
- Зинин Ю.К. (2014). Тиристорные преобразователи частоты для индукционного нагрева труб большого диаметра. Силовая Электроника. – № 6, 104-111 // Zinin Yu.K. (2014). Tiristornyye preobrazovateli chastoty dlya induktsionnogo nagreva trub bol'shogodiametra. Silovaya Elektronika. – № 6, 104-111.
- Инсепов Д.Г. (2016). Высокочастотный индукционный нагрев нефтепровода. Электрификация транспорта, №12, 103-106 // Insepov D.G. (2016). Vysokochastotnyy induktsionnyy nagrev nefteprovoda. Elektrifikatsiya transportu. – №12, 103-106.
- Цыба Ю.А., Кузьмин Ю.В., Даркенбаева Э.Б. (2018). Элементы автоматизированного электропривода. Учебное пособие (для студентов высших учебных заведений специальности «Электроэнергетика») / Цыба Ю.А., Кузьмин Ю.В., Даркенбаева Э.Б. – Алматы: АУЭС, 120. // Tsiba Yu.A., Kuz'min Yu.V., Darkenbaeva E.B. (2018). Elementy avtonomirovannogo elektroprivoda. Uchebnoe posobie (dlya studentov vysshikh uchebnykh zavedeniy spetsial'nosti «Elektroenergetika») / Tsiba Yu.A., Kuz'min Yu.V., Darkenbaeva E.B. Almaty: AUES, 120.

Information about authors

Insepov Dauren Galimzhanovich – PhD student, Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpayev, Almaty, Kazakhstan, E-mail: insepov_dauren83@mail.ru, ORCID: 0000-0001-7098-4824, +7 707 419 43 75
