

## ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

DOI: 10.53078/20778481\_2023\_3\_126

УДК 621.365:66

**Т. С. ЛАРЬКИНА**<sup>1</sup>

**Г. С. ЛЕНЕВСКИЙ**<sup>2</sup>, канд. техн. наук, доц.

<sup>1</sup>Научно-исследовательский университет «МЭИ» в г. Смоленске (Смоленск, Россия)

<sup>2</sup>Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

### АНАЛИЗ РАБОТЫ ИНВЕРТОРОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В СИСТЕМАХ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА, ПРИ ПОМОЩИ MATLAB

#### Аннотация

Статья посвящена исследованию работы инверторов, используемых в системах индукционного нагрева, с помощью MATLAB. В рамках работы разработана математическая модель инвертора, которая была протестирована в среде Simulink. Для проведения исследований определены значения параметров нагрузки и инвертора, включая сопротивление, индуктивность, ёмкость, напряжение и ток.

Работа модели проиллюстрирована с помощью графиков тока и напряжения на звене постоянного тока и на нагрузке. Также был проведён гармонический анализ напряжения на нагрузке, что дало возможность более детально изучить работу инвертора в различных режимах.

#### Ключевые слова:

инвертор, индукционный нагрев, MATLAB, моделирование, преобразователь частоты, Simulink, электротехника, электрическая мощность, частота, ток, напряжение, гармонический анализ, диоды, конденсатор, IGBT.

#### Для цитирования:

Ларькина, Т. С. Анализ работы инверторов, используемых в системах индукционного нагрева, при помощи MATLAB / Т. С. Ларькина, Г. С. Ленецкий // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2023. – № 3 (80). – С. 126–133.

В современном мире индукционный нагрев является широко используемой технологией в промышленности и быту. Индукционный нагрев применяется для быстрого нагрева металлов, плавки, затвердевания и термической обработки, а также для обогрева пищи, медицинских препаратов и других материалов. Одним из ключевых элементов системы индукционного нагрева являются инверторы, которые преобразуют постоянный ток сети в переменный ток высокой частоты, необходимый для создания электромагнитного поля, обеспечивающего нагрев материала [1].

В настоящее время существует множество различных методов анализа

работы инверторов в системах индукционного нагрева. Однако в связи с быстро развивающейся технологией возникают новые требования к работе инверторов, и необходимо разработать более точные методы анализа и оптимизации их работы.

Целью статьи является исследование работы инверторов, используемых в системах индукционного нагрева, при помощи MATLAB. Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

- провести обзор существующих методов анализа работы инверторов в системах индукционного нагрева;
- разработать математические

модели инверторов и произвести их тестирование;

- проанализировать работу инверторов на различных режимах нагрузки;
- провести сравнительный анализ результатов моделирования;
- оптимизировать работу инверторов для повышения эффективности систем индукционного нагрева.

Для понимания работы инверторов, используемых в системах индукционного нагрева, необходимо обладать знаниями в области электроники, электротехники и электромагнитных взаимодействий.

Анализ работы инверторов начинается с изучения принципа работы преобразователей постоянного тока в переменный ток (DC-AC) или инверторов. Инверторы могут быть однофазными или трёхфазными и работать на частоте от 20 до 200 кГц. Инверторы представляют собой ключевые элементы системы индукционного нагрева, поскольку они преобразуют постоянный ток сети в переменный ток высокой частоты [2].

Для создания электромагнитного поля, обеспечивающего нагрев материала, используется индукционный нагревательный элемент. Элемент может быть представлен различными формами и размерами, и его электрические параметры зависят от его геометрии и материала. Разработка математической модели индукционного нагревательного элемента является сложной задачей, поскольку он является многопараметрической системой.

Для анализа работы инверторов используются различные методы, включая аналитические методы, методы численного моделирования и экспериментальные исследования. Аналитические методы основаны на математическом анализе принципов работы инверторов и их компонентов. Методы численного моделирования позволяют проводить более точный анализ работы инверторов с помощью компьютерных

программ, такие как MATLAB. Экспериментальные исследования позволяют проверить результаты, полученные при помощи аналитических и численных методов.

Одной из основных проблем, с которыми сталкиваются при анализе работы инверторов, является эффективность их работы. Низкая эффективность инверторов может привести к потере энергии и повышенному расходу электричества. Поэтому одним из главных фокусов данной работы является анализ эффективности работы инверторов, используемых в системах индукционного нагрева. Оценка эффективности производится посредством анализа показателей, таких как коэффициент мощности, КПД и общее потребление энергии. Это важно, т. к. повышение эффективности работы инверторов может привести к снижению затрат на электроэнергию и уменьшению эксплуатационных расходов [3–5].

Рассмотрим основные компоненты инверторов, такие как транзисторы и диоды, и изучим их влияние на работу инверторов. Особое внимание будет уделено разработке математической модели инвертора, которая позволит оценить его работу в различных режимах и условиях.

Для расчёта математической модели инвертора необходимо определить характеристики нагрузки, включая сопротивление, индуктивность и ёмкость. В данном случае рассмотрим нагрузку с сопротивлением 10 Ом, индуктивностью 0,5 Гн и ёмкостью 10 мкФ.

На основании параметров нагрузки можно определить параметры инвертора. Для расчёта математической модели инвертора будем использовать преобразование частоты. Для этого необходимо определить частоту сигнала, которую будем использовать в инверторе.

В работе будет применён пакет прикладных программ MATLAB для проведения численного моделирования

ния работы инверторов. MATLAB позволяет создавать математические модели и проводить их моделирование, что даёт возможность оценить работу инверторов в различных условиях, включая изменение частоты, нагрузки и температуры.

Исходя из вышеприведенных параметров можно составить математическую модель инвертора и произвести её моделирование в MATLAB Simulink.

Математическая модель инвертора включает в себя уравнения, описывающие его работу. Она основывается на следующих принципах:

- инвертор состоит из ключевых компонентов, включая транзисторы и диоды, которые управляются сигналами с контроллера;
- ток в нагрузке определяется как функция напряжения на ней и величинами параметров инвертора;
- нагрузка представляется как параллельное соединение сопротивления и индуктивности.

Математическая модель инвертора может быть представлена в виде системы уравнений [6]:

$$V_{in}(t) = L \frac{di(t)}{dt} + R \cdot i(t) + V_{out}(t);$$

$$V_{out}(t) = \frac{1}{C} \int i(t) dt;$$

$$i(t) = I_{max} \sin(2\pi ft);$$

$$V_{in}(t) = V_{dc} + V_{ac} \sin(2\pi ft), \quad (1)$$

где  $V_{in}$  – входное напряжение;  $L$  – индуктивность нагрузки;  $R$  – сопротивление нагрузки;  $V_{out}$  – выходное напряжение;  $C$  – ёмкость нагрузки;  $i(t)$  – ток в нагрузке;  $I_{max}$  – максимальный ток;  $f$  – частота;  $V_{dc}$  – постоянное напряжение;  $V_{ac}$  – переменное напряжение.

Математическая модель на рис. 1, собранная из блоков в Simulink, представляет собой цепь из нескольких звеньев, каждое из которых выполняет определённую функцию.

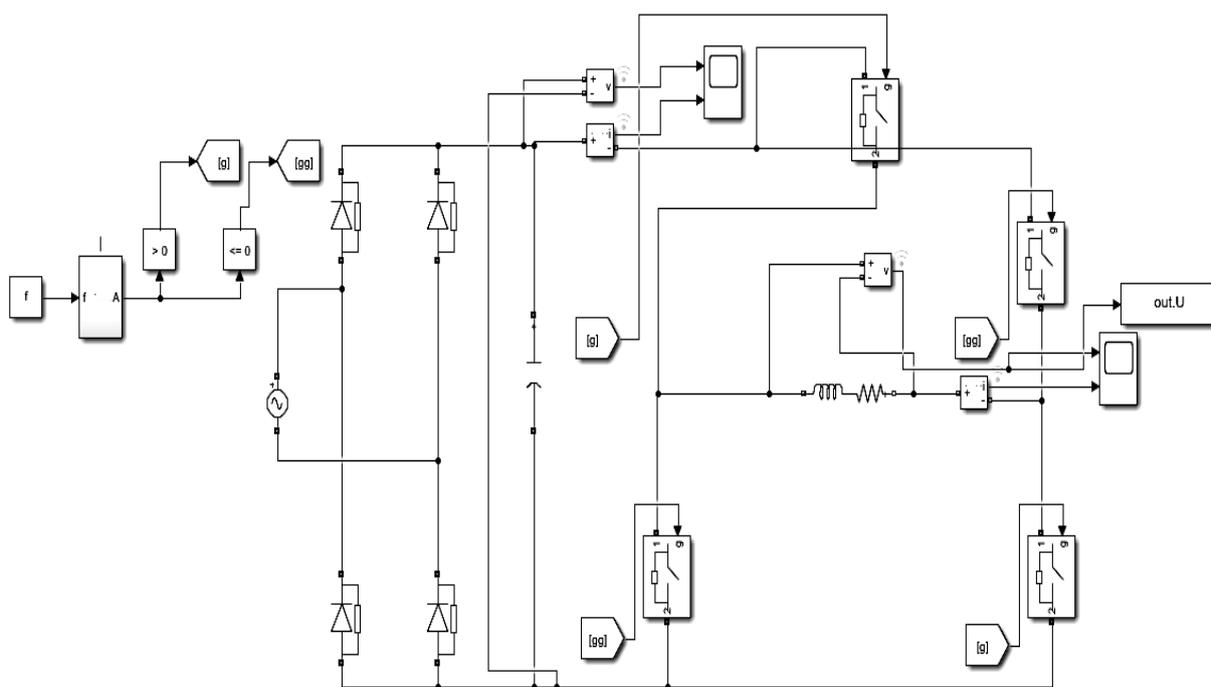


Рис. 1. Математическая модель инвертора индукционного нагрева

Первым звеном является питающий инвертор, преобразующий переменный ток сети в переменный ток определённой частоты, который затем поступает на следующее звено.

Следующее звено – это звено постоянного тока, которое состоит из выпрямителя на диодах и конденсатора для сглаживания напряжения. В этом звене переменный ток преобразуется в постоянный.

Далее идёт преобразователь частоты, реализованный на IGBT-транзисторах. Он используется для изменения частоты переменного тока, поступающего на нагрузку.

Нагрузка также является частью модели и представляет собой некоторое устройство, которое должно быть нагрето при помощи технологии индукционного нагрева [7, 8].

Таким образом, представленная модель собрана из трех основных звеньев: питающего инвертора сети переменного тока, звена постоянного тока и преобразователя частоты на IGBT-транзисторах, а также с учётом нагрузки, представленной схемой замещения индуктора, которая должна быть нагрета. Эта модель позволяет изучать и анализировать работу инвертора в системе индукционного нагрева в прикладной среде MATLAB.

Основными допущениями представленной модели являются следующие.

1. Идеализация компонентов: все компоненты модели рассматриваются как идеальные, без учета их реальных физических свойств, таких как внутреннее сопротивление, индуктивность, ёмкость и т. д.

2. Упрощённая математическая модель: модель представляет собой упрощённую математическую схему, которая не учитывает многие физические процессы, происходящие в реальной системе, такие как потери мощности, электромагнитные помехи и т. д.

3. Отсутствие внешних воздей-

ствий: модель не учитывает внешние воздействия на систему, такие как изменение температуры окружающей среды, влияние соседних электромагнитных полей и т. д.

4. Идеализация нагрузки: нагрузка рассматривается как идеальная, без учёта её динамических изменений во времени, возможных перепадов напряжения и т. д.

Все эти допущения позволяют упростить математическую модель и ускорить процесс её моделирования, но также могут сказаться на точности результатов моделирования.

Исследование работы инвертора будет на частотах 2 и 8 кГц в связи с их практической значимостью и распространённостью в системах индукционного нагрева. Частота 2000 Гц является стандартной и широко используется в различных промышленных приложениях. Однако современные технологические требования могут потребовать более высоких частот для достижения более точного и эффективного нагрева [9]. Поэтому мы также рассматриваем частоту 8000 Гц, которая представляет собой более высокий уровень частоты и может быть полезной для специализированных приложений, где требуется повышенная точность и скорость нагрева. Исследование на обоих частотах позволяет нам сравнить и оценить влияние частоты инвертора на качество и эффективность индукционного нагрева, что имеет практическое значение для оптимизации работы систем индукционного нагрева в различных областях применения.

Результаты моделирования работы инвертора с помощью разработанной математической модели в среде Simulink приведены на рис. 2–5.

На рис. 2 и 4 представлены графики тока и напряжения на звене постоянного тока и на нагрузке. Заданная частота инвертора составляет 2 и 8 кГц соответственно.

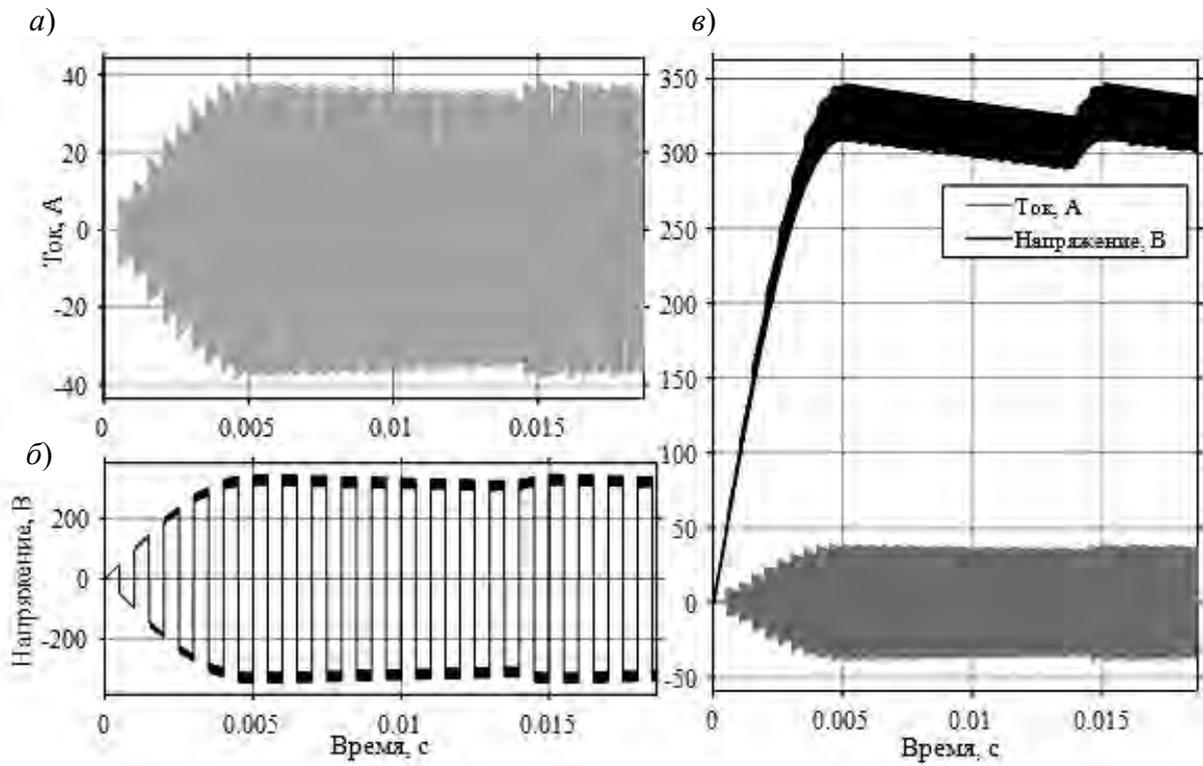


Рис. 2. Результаты моделирования при частоте инвертора 2 кГц: а – ток индуктора; б – напряжение на индукторе; в – ток и напряжение на сглаживающем конденсаторе

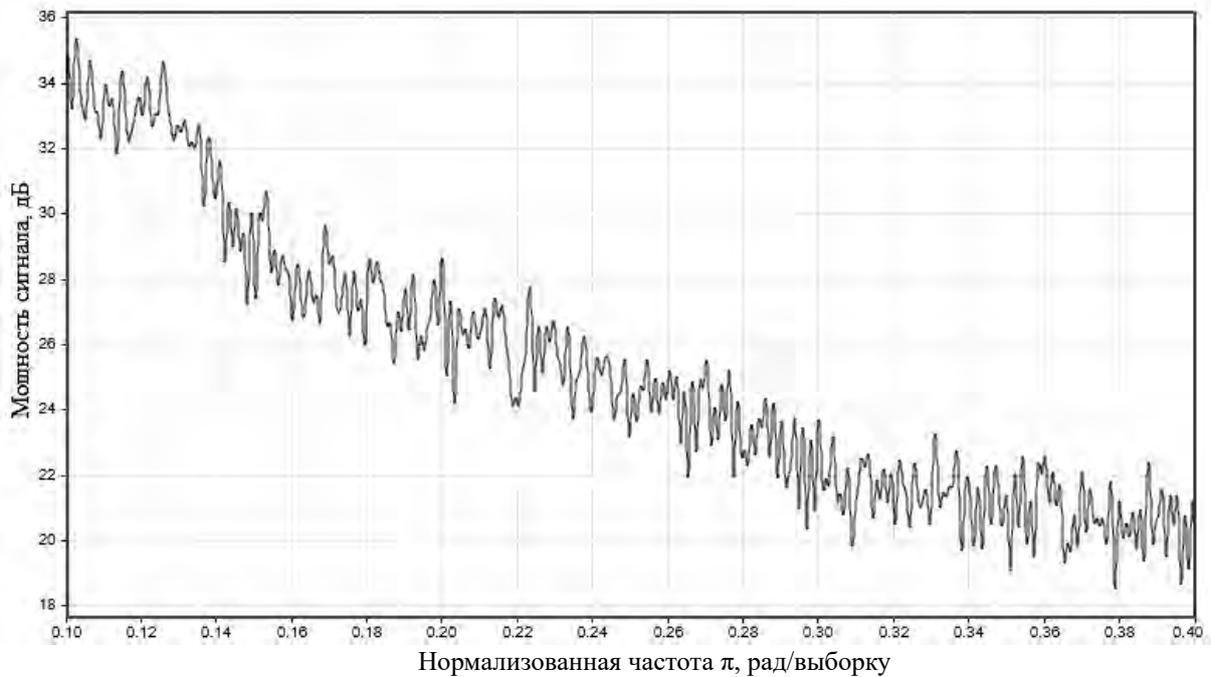


Рис. 3. Изменение мощности сигнала на выходе коммутационных ключей инвертора от нормализованной частоты (2 кГц)

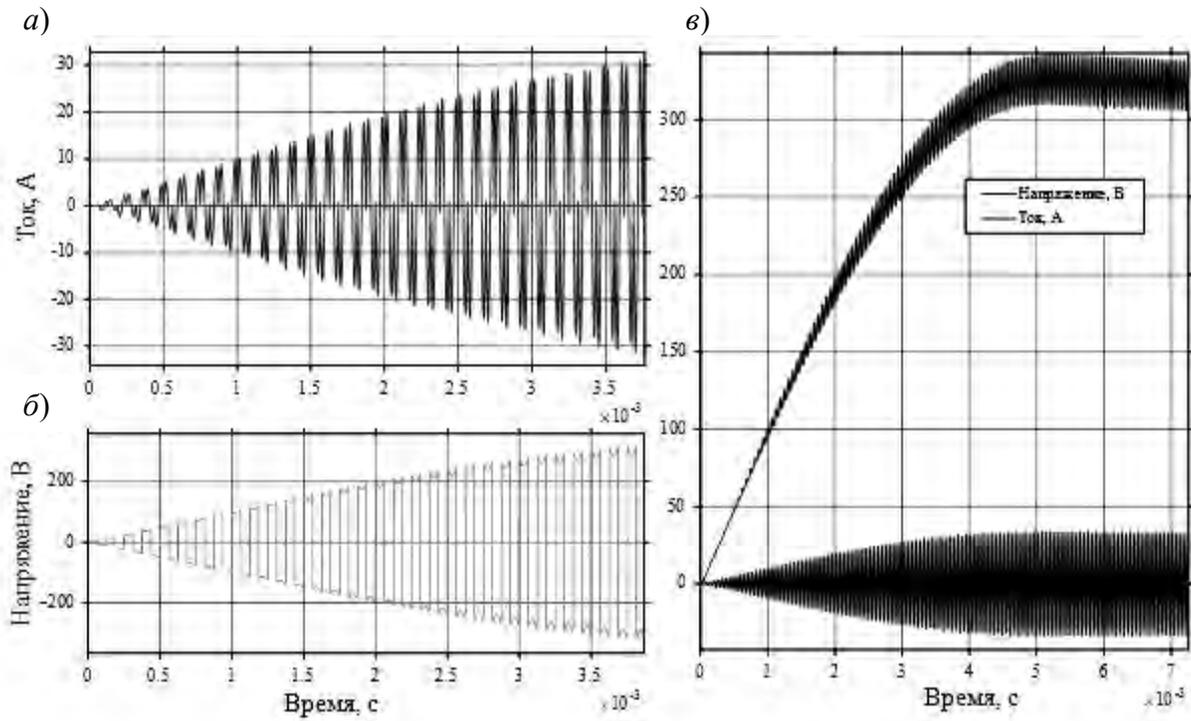


Рис. 4. Результаты моделирования при частоте инвертора 8 кГц: а – ток индуктора; б – напряжение на индукторе; в – ток и напряжение на сглаживающем конденсаторе

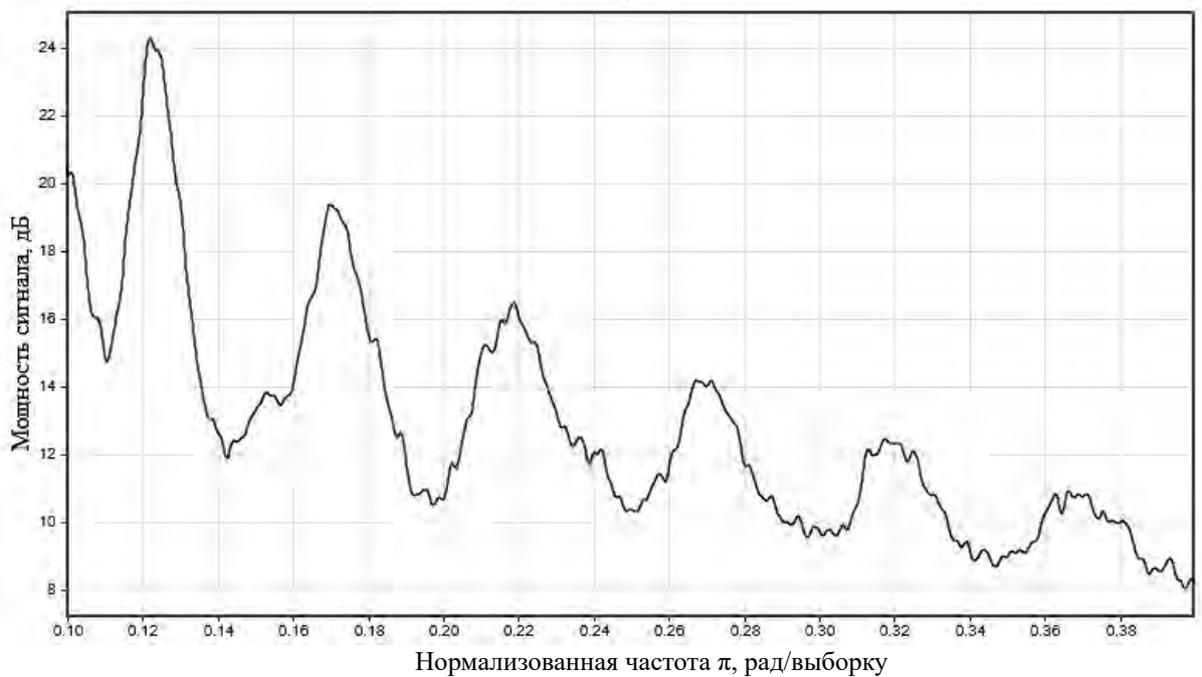


Рис. 5. Изменение мощности сигнала на выходе коммутационных ключей инвертора от нормализованной частоты (8 кГц)

На рис. 3 и 5 представлены изменения мощности сигнала на выходе коммутационных ключей инвертора от нормализованной частоты, что даёт возможность более детально изучить работу инвертора в различных режимах.

В процессе проведения гармонического анализа изучено изменение амплитуды гармонических составляющих напряжения на нагрузке при работе инвертора на частотах 2 кГц (см. рис. 3) и 8 кГц (см. рис. 5). Результаты анализа показали, что при увеличении частоты инвертора до 8 кГц амплитуда гармонических составляющих значительно уменьшается, что указывает на улучшение качества выходного напряжения. Это имеет важное значение для приложений, где требуется более стабильное и точное напряжение для эффективного индукционного нагрева [11].

Однако нужно учесть, что с увеличением частоты инвертора возрастает значение общего гармонического искажения выходного напряжения. Это может иметь отрицательное влияние на эффективность системы, т. к. увеличение гармонических искажений может привести к дополнительным потерям мощности и снижению КПД. Поэтому при выборе частоты инвертора необходимо учитывать баланс между каче-

ством выходного напряжения и энергетической эффективностью системы.

### Выводы

Проведено исследование работы инвертора, используемого в системе индукционного нагрева, при помощи MATLAB Simulink. Разработана математическая модель инвертора, учитывающая основные допущения, такие как отсутствие потерь в инверторе и упрощённый расчёт влияния индуктивности и ёмкости нагрузки на инвертор. С помощью разработанной модели промоделирована работа инвертора на частотах 2 и 8 кГц и получены графики тока и напряжения на звене постоянного тока и на нагрузке. Проведен гармонический анализ напряжения на нагрузке при заданных частотах, который показал, что при частоте 8 кГц уровень искажений намного ниже, чем при частоте 2 кГц.

В результате исследования выявлено, что для обеспечения более стабильной и эффективной работы системы индукционного нагрева необходимо использовать инверторы с более высокими частотами. Однако следует учитывать, что с увеличением частоты инвертора увеличивается риск перегрева компонентов системы, а также возрастает сложность контроля параметров системы.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ларькина, Т. С. Параметрический идентификационный метод для системы косвенного индукционного нагрева жидкости / Т. С. Ларькина, В. В. Лыготчиков, Г. С. Ленецкий // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2018. – № 3(60). – С. 70–76.
2. Михеев, М. А. Основы теплопередачи / М. А. Михеев, И. М. Михеев. – Москва: Энергия, 1977. – 344 с.: ил.
3. Рапопорт, Э. Я. Оптимальное управление температурными режимами индукционного нагрева / Э. Я. Рапопорт, Ю. Э. Плешивцева. – Москва: Наука, 2012. – 309 с.
4. Дилигенская, А. Н. Аналитические условия оптимальности в обратных задачах теплопроводности / А. Н. Дилигенская, Э. Я. Рапопорт // ТВТ. – 2021. – Вып. 59:3. – С. 401–410.
5. Плешивцева, Ю. Э. Метод последовательной параметризации управляющих воздействий в краевых задачах оптимального управления системами с распределенными параметрами / Ю. Э. Плешивцева, Э. Я. Рапопорт // Изв. РАН. Теория и системы управления. – 2009. – № 3. – С. 22–33.
6. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: учебник / Л. А. Бессонов. – 12-е изд., испр. и доп. – Люберцы: Юрайт, 2016. – 701 с.
7. Лыготчиков, В. В. Синтез системы автоматического регулирования температуры жидкости с улучшенными динамическими показателями / В. В. Лыготчиков, Т. С. Ларькина // Вестн. МЭИ. – 2019. – № 5. – С. 73–80.

8. **Льготчиков, В. В.** Алгоритм работы контроллера управления электромагнитным процессом в длинной линии / В. В. Льготчиков, В. Н. Денисов, Т. С. Ларькина // Программные продукты и системы / Software & Systems. – 2018. – № 4 (31). – С. 798–802.

9. **Рапопорт, Э. Я.** Структурно-параметрический синтез оптимальных по быстродействию систем управления с распределенными параметрами в условиях интервальной неопределенности характеристик объекта / Э. Я. Рапопорт, И. С. Левин // Автометрия. – 2015. – Т. 51, № 5. – С. 3–16.

10. **Рапопорт, Э. Я.** Оптимизация процессов индукционного нагрева металла / Э. Я. Рапопорт. – Москва: Металлургия, 1993. – 279 с.

11. **Рапопорт, Э. Я.** Оптимальное управление системами с распределенными параметрами / Э. Я. Рапопорт. – Москва: Высшая школа, 2009. – 677 с.

*Статья сдана в редакцию 12 мая 2023 года*

Контакты:

tatyana.larkina.2015@yandex.ru (Ларькина Татьяна Сергеевна);

emos@rambler.ru (Леневский Геннадий Сергеевич).

***T. S. LARKINA, G. S. LENEVSKY***

## **ANALYSIS OF THE OPERATION OF INVERTERS IN INDUCTION HEATING SYSTEMS USING MATLAB**

### **Abstract**

The article presents the investigation of operation of inverters used in induction heating systems carried out through MATLAB. As part of the work, a mathematical model of the inverter was developed and tested in the Simulink environment. To conduct the research, the values of load and inverter parameters were determined, including resistance, inductance, capacitance, voltage, and current.

The performance of the model was illustrated by current and voltage graphs on the DC link and the load. Also, a harmonic analysis of the voltage on the load was conducted, which made it possible to carry out a more detailed study of the inverter performance under different modes.

### **Keywords:**

inverter, induction heating, MATLAB, modeling, frequency converter, Simulink, electrical engineering, electrical power, frequency, current, voltage, harmonic analysis, diodes, capacitor, IGBT.

### **For citation:**

Larkina, T. S. Analysis of the operation of inverters in induction heating systems using MATLAB / T. S. Larkina, G. S. Lenevsky // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2023. – № 3 (80). – P. 126–133.