

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт неразрушающего контроля
Направление подготовки – Электроника и нанoeлектроника
Кафедра промышленной и медицинской электроники

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Резонансный инвертор для формирования рабочего тела лазера на парах металла

УДК _____

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1AM41	Мельников Павел Александрович		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Буркин Е.Ю.	К.Т.Н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Чистякова Н.О.	К.Э.Н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Анищенко Ю.В.	К.Т.Н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ПМЭ	Губарев Ф.А.	к.ф.-м.н		

Томск – 2016 г.

Планируемые результаты обучения по ООП

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
<i>Профессиональные компетенции</i>	
P1	Использовать результаты освоения фундаментальных и прикладных дисциплин ООП магистратуры; понимать основные проблемы в своей предметной области, выбирать методы и средства их решения; демонстрировать навыки работы в научном коллективе, порождать новые идеи;
P2	Анализировать состояние научно-технической проблемы путем подбора, изучения и анализа литературных и патентных источников; определять цели, осуществлять постановку задач проектирования приборов нанoeлектроники, схем и устройств различного функционального назначения с использованием современной элементной базы нанoeлектроники, подготавливать технические задания на выполнение проектных работ
P3	Формулировать цели и задачи научных исследований в соответствии с тенденциями и перспективами развития электроники и нанoeлектроники, а также смежных областей науки и техники, обоснованно выбирать теоретические и экспериментальные методы и средства решения сформулированных задач.
P4	Осваивать принципы планирования и методы автоматизации эксперимента на основе информационно-измерительных комплексов как средства повышения точности и снижения затрат на его проведение, овладевать навыками измерений в реальном времени; разрабатывать физические и математические модели элементов нанoeлектроники, компьютерное моделирование исследуемых физических процессов, приборов, схем и устройств, относящихся к профессиональной сфере
P5	Делать научно-обоснованные выводы по результатам теоретических и экспериментальных исследований, давать рекомендации по совершенствованию устройств и систем, готовить научно-технические отчеты, обзоры, рефераты, публикации по результатам выполненных исследований, доклады на научные конференции и семинары, научные публикации в центральных изданиях и заявки на изобретения
P6	Работать в качестве преподавателя в образовательных учреждениях среднего профессионального и высшего профессионального образования по учебным дисциплинам предметной области данного направления под руководством профессора, доцента или старшего
<i>Универсальные компетенции</i>	
P7	Совершенствовать и развивать свой интеллектуальный и общекультурный уровень. Самостоятельно приобретать и использовать в практической деятельности новые знания и умения, в том числе в новых областях знаний, непосредственно не связанных со сферой деятельности
P8	Использовать знания правовых и этических норм при оценке последствий своей профессиональной деятельности, при разработке и осуществлении социально значимых проектов. Участвовать в проведении технико-экономического и функционально-стоимостного анализа рыночной эффективности создаваемого продукта
P9	Разрабатывать планы и программы инновационной деятельности в подразделении, проявлять инициативу, в том числе в ситуациях риска, брать на себя всю полноту ответственности
P10	Способность использовать на практике умения и навыки в организации исследовательских и проектных работ и проведению экспериментальных исследований с применением современных средств и методов
P11	Обладать способностью к самостоятельному обучению новым методам исследования, к изменению научного и научно-производственного профиля своей профессиональной деятельности

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт неразрушающего контроля

Направление подготовки Электроника и наноэлектроника

Кафедра промышленной и медицинской электроники

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой

_____ Ф.А. Губарев
(Подпись) (Дата)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
1AM41	Мельникову Павлу Александровичу

Тема работы:

Резонансный инвертор для формирования рабочего тела лазера на парах металла

Утверждена приказом директора ИНК (дата, номер)

Срок сдачи студентом выполненной работы:

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе

(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).

Исследовать возможность нагрева рабочего вещества лазера на парах металла индукционным способом. Рассчитать и изготовить макет инвертора с следующими параметрами:

Мощность: до 600 Вт;

Частота тока индуктора: от 100 до 200 кГц;

Регулирование выходной мощности: от 10 до 100% от максимальной.

Питание: однофазное сетевое напряжение 220 В, 50 Гц;

Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i>	1. Обзор литературы; 2. Разработка и расчет принципиальной схемы; 3. Изготовление макета и проведение экспериментов; 4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение; 5. Социальная ответственность.
Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i>	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Чистякова Н.О., зав. кафедрой.
Социальная ответственность	Анищенко Ю.В., доцент.
Раздел на иностранном языке	Мыльникова Т.С., старший преподаватель.
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
Обзор литературы	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	
--	--

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Буркин Е.Ю.	К. Т. Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1AM41	Мельников Павел Александрович		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа _____ 95 _____ с., _____ 21 _____ рис., _____ 25 _____ табл., _____ 31 _____ источник, _____ 1 _____ прил.

Ключевые слова: резонансный инвертор, индукционный нагрев, лазер на парах металлов, последовательно-параллельный колебательный контур, высокочастотный преобразователь

Объектом исследования является процесс индукционного нагрева рабочего вещества лазера на парах меди

Цель работы – с исследовать эффективность индукционного нагрева металла в лазере на парах, рассчитать и собрать макет преобразователя для индукционного нагрева

В процессе исследования проводились обзор существующих решений, разработка структурной и принципиальной схем, подбор компонентов и расчет номиналов используемых компонентов, эксперименты с лазером на парах меди

В результате исследования изготовлен макет резонансного инвертора для индукционного нагрева рабочего вещества лазера на парах металла, проведены испытания на образцах лазерных трубок, реализован индукционный нагрев рабочего вещества лазера до температуры 700-800°C.

Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики: мощность инвертора до 600 Вт, частота выходного напряжения 160- 170 кГц.

Область применения: исследования лазеров на парах металлов

Экономическая эффективность/значимость работы расширение функциональности и повышение срока службы существующих лазеров на парах металлов

В будущем планируется повысить температуру нагрева до 1500 °С, исследовать влияние магнитного поля на процессы происходящие в лазере, разработать систему стабилизации температурного режима лазера на парах меди

Оглавление

Введение.....	9
1 Обзор литературы.....	10
1.1 Способы нагрева рабочего вещества лазеров на парах металлов.....	10
1.2 Индукционный нагрев	13
1.3 Преобразователи для индукционного нагрева.....	14
1.4 Управления мощностью и частотой преобразователя	20
2 Объект и методы исследования	22
3 Анализ и расчет инвертора.....	23
3.1 Анализ LLC резонансного инвертора	23
3.2 Расчет L-LC контура	33
3.3 Расчет согласующего трансформатора	37
3.4 Расчет последовательного включенного дросселя L-LC контура	40
3.5 Расчет понижающего преобразователя напряжения	43
3.6 Расчет выпрямителя и фильтра.....	46
4 Результаты работы.....	48
5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	54
6 Социальная ответственность.....	70
Заключение	80
Список использованных источников	81
Приложение А	85

Введение

На сегодняшний день лазеры на парах металлов являются одним из важных классов газовых лазеров. Главное достоинство таких лазеров –это возможность генерации излучения от ультрафиолетовой до инфракрасной области спектра при относительно высоком КПД [1].

Лазеры на парах металлов применяются в устройствах дистанционного зондирования атмосферы, навигации, прецизионной обработки материалов, проекционных микроскопах, медицинских системах. Также данные лазеры используются для накачки лазеров на красителях, усиление яркости изображения и скоростной фотографии.

Для обеспечения работы лазера на парах металла, одной из основных задач является нагрев рабочего материала до необходимой температуры, чтобы обеспечить требуемую концентрацию паров металла. Изучив существующие способы нагрева рабочей среды лазера был предложен индукционный способ нагрева. Данный метод в настоящее время широко применяется для плавки металлов, закалки, отпуска, пайки и др., однако для нагрева лазерных сред его не применяли. Предполагается, что индукционный нагрев позволит нагревать рабочее тело лазера независимо от импульсов накачки, обеспечит развязку источников нагрева и накачки, упростит схему питания лазера.

Цель данной работы – разработать резонансный инвертор для формирования рабочего тела лазера на парах металлов путем индукционного нагрева, испытать его работоспособность на примере лазера на парах меди.

Решение этой задачи является актуальным, так как позволит улучшить эксплуатационные характеристики лазера и расширить функциональные возможности: увеличит срок службы лазера; обеспечит ускоренный выход на рабочий режим, дежурного режима, позволит стабилизировать температуру лазера при изменении параметров выходного излучения.

1 Обзор литературы

1.1 Способы нагрева рабочего вещества лазеров на парах металлов.

Для работы лазеров на парах металла, прежде всего необходимо обеспечить нужную концентрацию атомов рабочего вещества. Так как рабочее давление паров атомов металлов составляет в этих лазерах 0,3-0,5 мм рт.ст. (плотность атомов около 10^{15} см⁻³), то температуры стенок газоразрядных трубок, соответствующие такому значению насыщенного давления паров, должны достигать от 650-950⁰С для лазеров на парах таллия и свинца до 1500-1600⁰С для лазеров на парах меди и золота.

В первых работах [2–4] для получения паров металла, использовалась конструкция активного элемента, включающая керамическую трубку, нагреваемую коаксиальной печью. С помощью такой печи нагревалась обычно только средняя часть разрядной трубки, окна и электроды располагались вне нагреваемой зоны. Рабочий металл помещался в специальные отростки или просто на стенку трубки. Такая конструкция относительно просто реализуется для активных сред с рабочей температурой ниже температуры плавления кварца. Для более высоких рабочих температур необходимо использовать вакуумноплотную керамику и осуществлять герметичные спаи металл - керамика. Кроме этого нагреватель и ГРТ находятся под разными электрическими потенциалами, что требует высокопотенциального конструктивного исполнения ГРТ или нагревателя. Еще одним недостатком данной конструкции является то, что высокотемпературная вакуумноплотная керамика плохо переносит быстрые изменения температуры, поэтому время разогрева до рабочей температуры, также, как и время остывания до комнатной температуры для этих ГРТ было очень большим, около 8 часов. К тому же использование высокотемпературной печи с высокой электрической мощностью существенно снижало эффективность всего лазера. Технические и

технологические трудности изготовления таких ГРТ ограничили область их использования в лазерах на парах металлов.

В прогресс развития этого класса лазеров, был предложен более простой и эффективный способ получения паров рабочего вещества, получивший название – саморазогревной способ возбуждения [5]. В конструкции такого лазера нагревательная печь отсутствовала, а рабочая температура ГРТ достигалась за счёт энергии импульсного разряда, который возбуждал генерацию. В саморазогревном лазере внутренняя высокотемпературная (необязательно вакуумноплотная) керамическая разрядная трубка фиксируется во внешней низкотемпературной вакуумноплотной трубе, металл помещается внутрь керамической трубы на её стенки. Для предотвращения нагрева внешней трубки до высокой температуры внутренняя труба теплоизолируется с помощью высококачественного теплоизолятора. Время разогрева ГРТ до рабочих температур определяется мощностью, вводимой в плазму разряда, и тепловой инерцией ГРТ. Обычно, для лазеров небольшой мощности это время составляет 30-40 минут. При длительной работе такого лазера на оптимальной частоте поддерживается постоянная температура стенок ГРТ, что позволяет получать стабильную мощность генерации. Однако часто требуется регулировать параметры генерации, но при изменении частоты следования импульсов изменяется энерговклад в ГРТ, что приводит к изменению температуры активной среды, а вместе с тем и концентрации паров металла. Таким образом при уменьшении частоты следования импульсов энергии становится недостаточно для получения нужной концентрации паров металла. Для поддержания температуры рабочей среды на требуемом уровне, увеличивают амплитуду импульса накачки или перед каждым импульсом возбуждения формируют один или несколько дополнительных импульсов, которые нагревают рабочую среду, не вызывая генерации [6]. Изменяя длительность или количество дополнительных импульсов можно компенсировать энергию недостающих

импульсов возбуждения, и общая мощность, вкладываемая в разряд, остается неизменной.

Достоинства саморазогревного способа получения паров металлов заключается в простоте конструкции ГРТ. Однако дополнительные "подогревающие" импульсы отрицательно влияют на состояние активной среды, что приводит к снижению значения максимальной ЧСИ излучения КПД лазера. Кроме того, в саморазогреевных лазерах сокращается общий срок службы из-за перегрузки коммутаторов, подключённых нелинейной нагрузке, которую представляет собой газоразрядная плазма. Чтобы обеспечить эффективную работу лазера в широком диапазоне ЧСИ, требуются дополнительные внешние нагреватели, но для таких металлов как медь и золото использование печей в качестве источника нагрева себя не оправдывает. Их недостатки описаны ранее. Устранить эти недостатки позволила конструкция ГРТ с встроенным нагревателем описанная в [7]. Данная конструкция отличается от саморазогревной тем, что на внутреннюю керамическую трубку намотана спираль нагревателя из тугоплавкого материала, которая соединяется с электродами ГРТ. В такой конфигурации нагреватель одновременно выполняет роль шунтирующей индуктивности в схеме накачки лазера. Так как нагреватель соединен с ГРТ, то нагреватель находится под тем же потенциалом что и ГРТ. Это значительно упрощает конструкцию лазера, и по сложности она сравнима с саморазогревной. Нагрев рабочей среды осуществляется от дополнительного низковольтного источника питания. Данный способ нагрева позволяет более быстро выводить лазер на рабочий режим и обеспечивает работу лазера в дежурном режиме не перегружая высоковольтные коммутаторы, тем самым увеличивая их срок службы.

Существенные проблемы реализации данного метода заключается в том, что нагреватель подключен непосредственно к электродам ГРТ, и дополнительный источник оказывается под высоковольтным импульсным потенциалом источника возбуждения. Требуются меры, обеспечивающие

развязку источника накачки и источника дополнительного нагрева. Для этой цели применяют развязывающие фильтры, что усложняет схему накачки лазера.

1.2 Индукционный нагрев

Исходя из рассмотренных способов нагрева рабочей среды лазера был предложен индукционный способ нагрева. Данный метод в настоящее время широко применяется для плавки металлов, закалки, отпуска, пайки и др. Однако для нагрева лазерных сред его не применяли. Предполагается, что индукционный нагрев позволит нагревать рабочее тело лазера независимо от импульсов накачки, обеспечит развязку источников нагрева и накачки. Кроме того, для реализации данного способа нагрева не требуются изменения конструкции газоразрядной трубки существующих лазеров, дополнительный индукционный нагрев можно будет осуществлять и на основе саморазогревной конструкции лазера. Благодаря тому, что тепло выделяется непосредственно в металле, обеспечится наименьшая инерционность нагрева, что позволит выводить лазер на рабочий режим на меньшее время.

1.2.1 *Принцип работы и преимущества индукционного нагрева*

В основе процесса индукционного нагрева лежат два физических явления: вихревые токи и магнитный гистерезис [8]. Наводимый в нагреваемом образце вихревой ток противодействует изменению магнитного потока, именно он и нагревает образец согласно закону Джоуля-Ленца. Это обычно главный источник тепла в процессе индукционного нагрева. Кроме этого, за счет магнитного гистерезиса выделяется дополнительное тепло в процессе перемагничивания ферромагнитных материалов. Типовые рабочие частоты для систем индукционного нагрева варьируется от сетевой до нескольких мегагерц в зависимости от задач.

Среди преимуществ индукционного нагрева отмечают следующие:

- **Скорость нагрева:** В процессе индукционного нагрева тепло выделяется непосредственно в нагреваемом образце, что снижает тепловые потери и как следствие уменьшает время нагрева.
- **Эффективность:** Системы индукционного нагрева могут достигать эффективности более 90%. Благодаря снижению тепловых потерь через окружающие элементы, достигается более высокая температура при тех же энергозатратах.
- **Удобство управление нагревом:** Мощность, передаваемая в нагреваемую делать может быть точно задана подходящей конструкцией индуктора и мощностью частотного преобразователя. Это позволяет организовать такие удобные функции как локальный нагрев, нагрев по заданному температурному профилю и др.
- **Улучшенный технологический процесс:** Индукционный нагрев обеспечивает постоянство и повторяемость параметров, что улучшает продуктивность и качество нагрева. Кроме того, так как нагрев происходит без непосредственного контакта с индуктором, можно нагревать материалы в различных газовых средах или в вакууме. Это же позволяет теплоизолировать индуктор, и минимизировать влияние нагреваемого объекта на сам индуктор.
- **Экологичность и безопасность:** Максимальная температура при индукционном нагреве достигается в самом нагреваемом образце, температура окружающих предметов вблизи нагреваемой области существенно ниже. Это предотвращает возгорание других материалов. Ещё одно достоинство индукционного нагрева заключается в отсутствии вредных выбросов, имеющих место при сжигании топлива.

1.3 Преобразователи для индукционного нагрева

Для питания индуктора требуется источник переменного напряжения. Рисунок 1.1 отражает основную топологию силовых преобразователей, используемых в системах индукционного нагрева [9].



Рисунок 1.1 –Упрощенная схема преобразователей для индукционного нагрева.

Первый элемент – это сетевой фильтр, он обеспечивает электромагнитную совместимость преобразователя, подавляет помехи, поступающие в сеть. Затем идет выпрямитель – преобразователь переменного напряжения в постоянное, обеспечивающий питанием инвертор. Выпрямительная часть может быть, как не управляемой, так и управляемой. В последнем случае становится возможным дополнительное регулирование выходных параметров преобразователя. Схема преобразователя переменного напряжения в постоянное, может основываться на управляемом выпрямителе на тиристорах [10] или на простом диодном выпрямителе с преобразователем постоянного напряжения [11]. В зависимости от применения в некоторых преобразователях для индукционного нагрева, выпрямительная часть также включает в себя корректор коэффициента мощности для повышения напряжения и обеспечения синусоидальности входного тока [12].

Преобразователь постоянного напряжения в переменное, также известен как инвертор – это наиболее важная часть преобразователя, именно он питает индуктор током повышенной частоты. Обычно частота работы инвертора выбирается больше чем 20 кГц (для предотвращения слышимого шума) и может достигать свыше 1 МГц в зависимости от области применения. На сегодня, большинство инверторов подразделяют на резонансные инверторы тока и напряжения [8]. Нагрузка инвертора обычно представляется в виде эквивалентного резистора и индуктивности (Рисунок 1.2.а), которые могут быть соединены последовательно или параллельно в зависимости от модели и дополнительных внешних дросселей или конденсаторов, образующих колебательный контур. Исходя из конструкции инверторов для индукционного

нагрева, их можно классифицировать в зависимости от типа резонансного контура или количества используемых коммутирующих элементов.

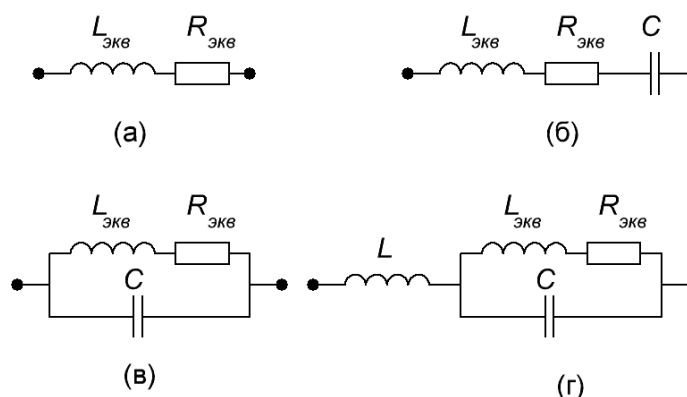


Рисунок 1.2 – Схема замещения индуктора с нагрузкой (а) и основные типы резонансных контуров: последовательный (б), параллельный (в), последовательно – параллельный (г).

1.3.1 Типы резонансных контуров

Среди колебательных контуров, используемых в схемах индукционного нагрева, наиболее часто используют звенья второго порядка: последовательный (Рисунок 1.2.б) или параллельный резонансный контур (Рисунок 1.2.в), и третьего порядка – последовательно-параллельный контур, более известный как L-LC (Рисунок 1.2.г).

Последовательный колебательный контур обычно используют в инверторах напряжения [13, 14]. В такой конфигурации, при работе инвертора на резонансной частоте контура, обеспечивается мягкое переключение ключей в момент, когда ток инвертора близок к нулю. Такой режим работы значительно уменьшает потери энергии при коммутации.

Параллельный колебательный контур наоборот обычно используют в инверторах тока [15, 16]. Использование параллельного колебательного контура позволяет снизить ток через коммутирующие элементы и, при работе инвертора

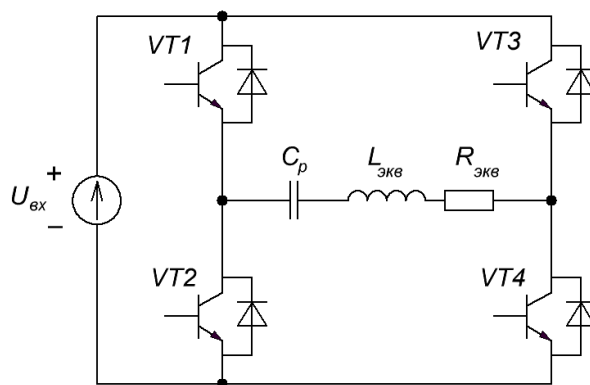
на резонансной частоте, обеспечить переключение ключей в нулевые моменты напряжения на инверторе, что опять же снижает коммутационные потери. Кроме того, данный тип инвертора имеет защиту от короткого замыкания в нагрузке, так как ток ограничивается входным дросселем.

Что касается последовательно-параллельного контура, то он включает в себя достоинства параллельного резонансного контура, но используется обычно совместно с инверторами напряжения, как и последовательные колебательные контуры. Благодаря наличию последовательного дросселя в таком преобразователе, обеспечивается дополнительная защита от короткого замыкания в нагрузке [17, 18]. Такую топологию часто применяют в мощных индукционных установках.

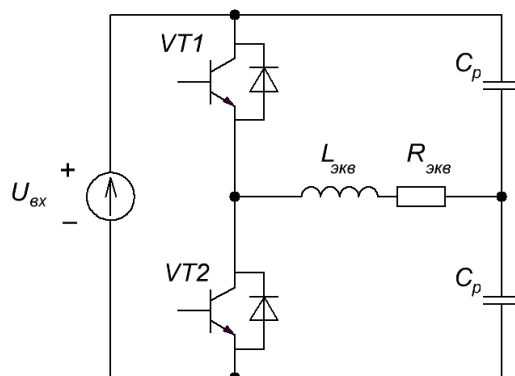
Все данные резонансные инверторы могут включать в себя трансформатор для развязки и согласования с сопротивлением нагрузки.

1.3.2 Основные схемы инверторов

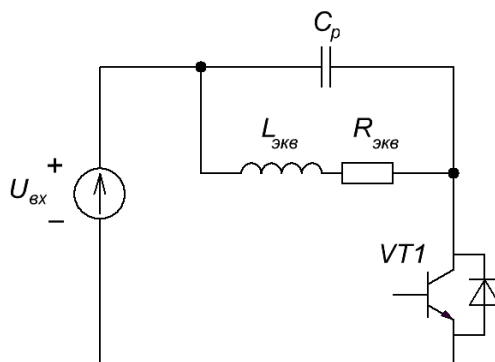
Исходя из количества ключевых элементов, широко используемые инверторы подразделяются на мостовые, полумостовые и одноключевые (ячейковые или четвертьмостовые). На рисунке 1.3 представлены примеры инверторов напряжения с последовательным колебательным контуром различных конфигураций. Принимая во внимание экономические и технические аспекты можно выделить рекомендации по выбору того или иного инвертора для различных задач. Мостовые инверторы обычно используются при построении преобразователей мощностью более пяти киловатт, такие инверторы являются самыми распространенными для промышленного применения [19]. Полумостовую схему предпочтительно использовать при требуемой выходной мощности инвертора до пяти киловатт [20, 21], а одноключевую – в небольших преобразователях мощностью менее двух киловатт [22]. Последние две схемы часто находят применение в бытовых индукционных плитах.



(а)



(б)



(в)

Рисунок 1.3 – Базовые схемы инверторов напряжения, применяемых в преобразователях для индукционного нагрева: мостовая (а), полумостовая (б), одноключевая (в).

1.3.3 Полупроводниковые приборы преобразователей

В зависимости от области применения и нагреваемого материала частота выходного напряжения преобразователя варьируется от нескольких герц для индукционных плавильных систем, до сотен килогерц, как например, в системах поверхностной закалки. Исходя из требуемой частоты при построении инверторов используют различные полупроводниковые приборы. Тиристоры находят применение при частотах до десяти килогерц, IGBT транзисторы применяются в преобразователях, выходная частота которых достигает несколько десятков килогерц, MOSFET транзисторы более эффективно используются на частотах в несколько сотен килогерц. На рисунке 1.4 представлены области применения полупроводников в зависимости от частоты мощности и конфигурации резонансного контура [23].

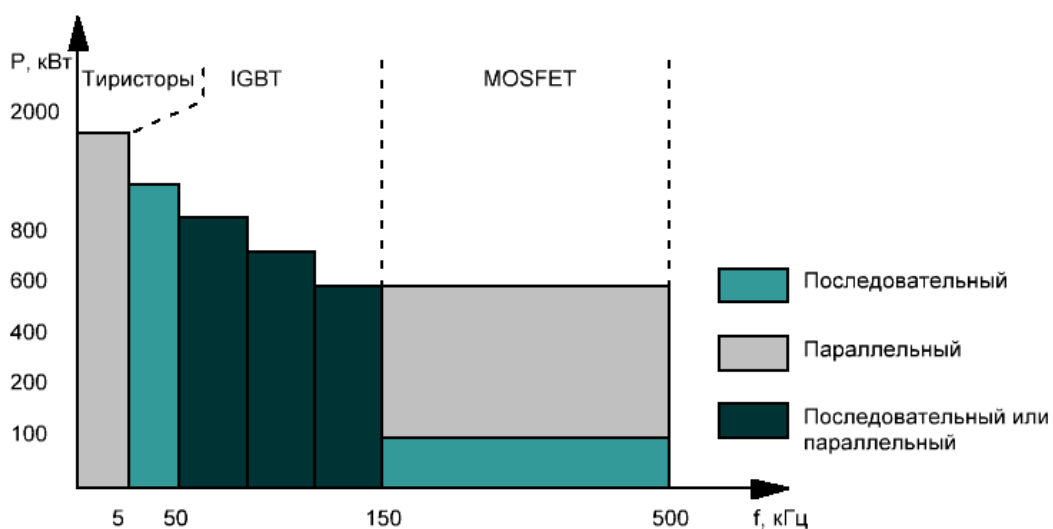


Рисунок 1.4 – Полупроводниковые приборы, используемые преобразователях для систем индукционного нагрева. Управление мощностью индукционного нагрева

1.4 Управление мощностью и частотой преобразователя

1.4.1 Регулирование мощности инвертора

Управление мощностью позволяет нагревать образцы с необходимой скоростью и поддерживать нужную температуру. Основное требование, которое предъявляется почти ко всем системам индукционного нагрева, это возможность регулирования выходной мощности преобразователя в широком диапазоне, при изменяющихся электрических параметрах нагрузки в процессе нагрева. Для точного регулирования и поддержания требуемого уровня мощности в нагрузке успешно применяются различные алгоритмы модуляции выходного напряжения инвертора: частотная модуляция [14, 25, 24], широтно-импульсная модуляция [14, 18], плотностно-импульсная модуляция [27,13, 26]. Принцип частотного регулирования основан на том, что на резонансной частоте выделяемая в нагрузке мощность максимальна, а при удалении от нее уменьшается. При широтно-импульсной модуляции мощность регулируется за счет изменения коэффициента заполнения управляющего сигнала. Недостатком этих двух методов заключается в невозможности обеспечить мягкое переключение ключей инвертора, если потребляется мощность меньше максимальной. Плотностно-импульсная модуляция имеет преимущества при работе на резонансной частоте, так как способна обеспечить переключение ключей в нулевые моменты тока во всем диапазоне регулирования мощности. Управление мощностью осуществляется путем изменения времени работы инвертора. В простейшем случае это выглядит как включение и выключение инвертора на какое-то число периодов его собственных колебаний [13], в более эффективной реализации интервалы вынужденных колебаний чередуются с интервалами свободных колебаний тока в нагрузке [27]. В последнем случае вынуждающие импульсы распределяются равномерно во времени, тем самым обеспечивая непрерывный ток в нагрузке и снижая его пульсации.

Регулировать мощность можно не только инвертором, также широко применяется управление мощностью со стороны выпрямительной части. Чаще

всего, при данном методе регулирования, в качестве источника питания инвертора используется сочетание неуправляемого выпрямителя и понижающего преобразователя [11]. Таким образом ключи инвертора могут постоянно работать на резонансной частоте в режиме мягкого переключения.

1.4.2 Способы настройки инвертора на резонансную частоту

Также в системах индукционного нагрева, часто требуется подстройка частоты инвертора на резонанс с нагрузкой, так как в процессе нагрева резонансная частота нагрузки может существенно изменяться, особенно это выражено при нагреве ферромагнитных материалов. Для этих целей широко применяются схемы с фазовой автоподстройкой частоты (ФАПЧ) [18, 28]. Схема ФАПЧ стремится свести разность фаз между входными сигналами к нулю, изменяя выходную частоту. На резонансной частоте ток и напряжение колебательного контура совпадают по фазе. Таким образом, если входными сигналами схемы ФАПЧ будут ток и напряжение колебательного контура, обеспечится автоматическая подстройка частоты инвертора на резонанс с нагрузкой.

Другой метод – это автогенераторный режим работы инвертора [29]. Сигнал, соответствующий фазе тока нагрузки, после преобразования используется в качестве управляющего сигнала для драйверов инвертора. При обеспечении положительной обратной связи инвертор настроится на резонансную частоту, за счет частотной избирательности нагрузки.

Еще один способ подстройки инвертора заключается в измерении резонансной частоты контура. Например, по максимуму потребляемого тока, однако в таком случае обычно предполагают, что в процессе работы резонансная частота не будет значительно изменяться. Другой вариант более гибкий – измерять частоту собственных колебаний контура. Для этого предусматривают паузы в штатной работе инвертора, в эти промежутки времени вместо вынужденных наблюдаются собственные колебания, частота которых измеряется, а затем воспроизводится задающим генератором.

2 Объект и методы исследования

Объектом исследования является индукционный нагрев в лазерах на парах металлов. В качестве исследуемого лазера используется лазер на парах меди, так как это самый один из самых эффективных лазеров в данном классе. Кроме того, для лазера на парах чистой меди требуется достаточно высокая температура, и если удастся реализовать данный способ нагрева для этого лазера, то это можно будет сделать и для других лазеров на парах металлов.

Основным методом исследования будет экспериментальная проверка эффективности индукционного нагрева металла в лазерной трубке.

Для равномерного нагрева газоразрядного канала в него помещена стальная пластинка, на которой в свою очередь располагаются кусочки меди. Температура плавления стали намного выше чем меди, поэтому пластина не будет существенно изменять свои геометрические размеры и форму, что обеспечит лучшую стабильность электрических свойств нагрузки. Кроме того, требуемая частота магнитного поля для нагрева стали существенно ниже, и осуществить её нагрев легче.

Так как параметры нагрузки инвертора точно не известны, зададимся мощностью инвертора с запасом. Для лазеров с дополнительным нагревом мощность, потребляемая источником подогрева составляет от 250 до 500 Вт [7]. Для согласования инвертора с нагрузкой, её сопротивление требуется определить экспериментально.

Таким образом, требуется спроектировать и собрать макет инвертора для индукционного нагрева со следующими параметрами:

Мощность: до 600 Вт;

Частота тока индуктора: от 100 до 200 кГц;

Регулирование выходной мощности: от 10 до 100% от максимальной.

Питание: однофазное сетевое напряжение 220 В, 50 Гц;

3 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

3.1 Предпроектный анализ

3.1.1 *Потенциальные потребители результатов исследования*

Результатом исследования является макет резонансного инвертора, узкоспециализированного прибора, необходимого для создания рабочего тела лазера на парах меди путём индукционного нагрева

В России существует несколько организация, которой необходимы подобные исследования. Одной из таких организация является Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук (ИОА СО РАН). В его составе есть научное подразделение, занимающееся разработкой лазеров на парах металлов и устройств на их основе для научных исследований и специальных применений.

3.1.2 *Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения*

Существует несколько способов создать рабочую среду лазера (пары меди). Рассмотрим два основных варианта технического решения:

1. Саморазогревная газоразрядные трубка;
2. Дополнительный резистивный нагреватель встроенный в газоразрядную трубку.

С помощью оценочной карты по таблице 3.1 проведем анализ технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

Таблица 3.1 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерий оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентно-способность		
		Бф	Бк1	Бк2	Кф	Кк1	Кк2
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Скорость разогрева	0,2	5	4	2	1	0,8	0,4
2. Массогабаритные параметры	0,1	4	3	5	0,4	0,3	0,5
3. Энегроэкономичность	0,1	5	4	3	0,5	0,4	0,3
4. Возможность управления энергетическими характеристиками лазера	0,2	5	4	2	1	0,8	0,4
5. Простота конструкции газоразрядной трубки	0,1	5	3	5	0,5	0,3	0,5
Экономические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Стоимость изготовления	0,05	3	4	5	0,15	0,2	0,25
2. Конкурентоспособность	0,05	5	3	2	0,25	0,15	0,1
3. Послепродажное обслуживание	0,1	5	3	5	0,5	0,3	0,5
4. стоимость эксплуатации	0,1	4	4	3	0,4	0,4	0,3
Итого	1	41	32	32	4,7	3,65	3,25

Анализ технических решений определяется по формуле:

$$K_i = \sum B_i \cdot B_i \quad (3.1)$$

где К – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

B_i – вес показателя (в долях единицы);

B_i – балл i -го показателя.

Анализ технических решений показал, что данная разработка имеет более высокую конкурентоспособность, по сравнению с уже существующими техническими решениями.

3.1.3 Оценка готовности проекта к коммерциализации

Таблица 3.2 – Бланк оценки степени готовности научного проекта к коммерциализации

Наименование	Степень проработанности научного проекта	Уровень имеющихся знаний у разработчика
1. Определен имеющийся научно-технический задел	3	3
2. Определены перспективные направления коммерциализации научно-технического задела	3	3
3. Определены отрасли и технологии (товары, услуги) для предложения на рынке	4	5
4. Определена товарная форма научно-технического задела для представления на рынок	2	3
5. Определены авторы и осуществлена охрана их прав	2	2
6. Проведена оценка стоимости интеллектуальной собственности	1	1

Продолжение таблицы 3.2

7. Проведены маркетинговые исследования рынков сбыта	3	3
8. Разработан бизнес-план коммерциализации научной разработки	1	1
9. Определены пути продвижения научной разработки на рынок	3	3
10. Разработана стратегия (форма) реализации научной разработки	2	2
11. Проработаны вопросы международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок	1	1
12. Проработаны вопросы использования услуг инфраструктуры поддержки, получения льгот	1	1
13. Проработаны вопросы финансирования коммерциализации научной разработки	1	1
14. Имеется команда для коммерциализации научной разработки	1	1
Итого	25	27

По данным в таблице 3.2 можно сделать выводы, что перспективность данной разработки к коммерциализации ниже среднего. Необходима большая проработка теоретических вопросов и привлечение специалистов в области лазерных технологий.

3.2 Инициация проекта

Устав проекта

Устав проекта отображен в таблицах 3.3 и 3.4.

Таблица 3.3 – Заинтересованные стороны проекта

Заинтересованные стороны проекта	Ожидание заинтересованных сторон
Институт оптики атмосферы Сибирского отделения Российской академии наук (ИОА СО РАН)	Изготовление макета устройства, реализующего нагрев активной среды лазера индукционным способом.
Физический институт имени П.Н.Лебедева Российской академии наук (ФИАН)	Изготовление макета устройства, реализующего нагрев активной среды лазера индукционным способом

Таблица 3.4 – Цели и результат проекта

Цели проекта	Реализовать индукционный нагрев рабочего тела лазера на парах меди, тем самым повысить эффективность накачки лазера, что приведет к увеличению мощности его излучения при неизменной той же схеме накачки.
Ожидаемые результаты	Создание макета устройства меньших размеров чем аналоги, с малым потреблением питания.
Критерии приемки результатов	Обеспечивается быстрый и эффективный нагрев меди до требуемой температуры
Требования к результату проекта	Работоспособность макета
	Устойчивость к электромагнитным помехам
	Увеличение эффективности лазера на парах меди
	Возможность работы с существующими газоразрядными трубками

Организационная структура проекта

Таблица 3.5 – Рабочая группа проекта

ФИО, место работы, должность	Роль в проекте	Функции	Трудозатраты, норма-ч.
Мельников Павел Александрович, ТПУ, студент	Исполнитель проекта	Обзор литературы и существующих аналогов, проектирование и изготовление макета	180
Буркин Евгений Юрьевич, ТПУ, доцент	Руководитель проекта	Обеспечение необходимыми материальными средствами и рабочим местом, консультации по возникающим вопросам	25
Итого:			205

Ограничения и допущения проекта

Таблица 3.6 – Ограничения проекта

Фактор	Ограничения/допущения
Бюджет	До 300000 руб.
Время использования газоразрядной трубки	С 18.04.16 до 21.04.16
Дата завершения проекта	До 1.06.2016

3.3 Планирование управления научно-техническим проектом

3.3.1 Приведем иерархическую структуру работ на рисунке 3.1



Рисунок 3.1– Иерархическая структура работ по проекту

3.3.2 Контрольные события проекта

Таблица 3.7 – Контрольные события проекта

Контрольное событие	Дата	Результат (документ)
Определить принцип действия устройства	1.12.15	Отчет
Определить основные части устройства	1.02.16	Структурная схема
Полный состав устройства	24.02.16	Принципиальная схема
Закупка элементов	25.02.16	
Работающий макет	10.04.16	

3.3.3 План проекта

Таблица 3.8 – Календарный план проекта

№	Название	Длительность, дни	Начало работ	Окончание работ	Участники
1	Постановка задачи	16	15.11.15	1.12.15	Мельников П.А. Буркин Е.Ю.
2	Подбор и изучение материалов по тематике	20	1.12.16	20.12.16	Мельников П.А. Буркин Е.Ю.
3	Выбор структурной и принципиальной схемы устройства	14	20.12.16	1.02.16	Мельников П.А. Буркин Е.Ю.
4	Расчет принципиальной схемы устройства	24	1.02.16	24.02.16	Мельников П.А.
5	Сборка макета устройства	70	25.02.16	10.04.16	Мельников П.А.
6	Проведение экспериментов	36	11.04.16	15.05.16	Мельников П.А.
	Итого:	180			

Таблица 3.9 – Календарный план-график проведения НИОКР

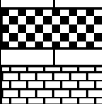
№	Вид работ	Исполнители	Т _к , кал. д.	Продолжительность выполнения работ																				
				Ноя.			Дек.			Янв.			Фев.			Март			Апр.			Май		
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1.	Постановка задачи	Мельников П.А. Буркин Е.Ю.	16																					
2.	Подбор и изучение материалов по тематике	Мельников П.А. Буркин Е.Ю.	20																					
3.	Выбор структурной и принципиальной схемы устройства	Мельников П.А. Буркин Е.Ю.	14																					
4.	Расчет принципиальной схемы устройства	Мельников П.А.	24																					
5.	Сборка макета устройства	Мельников П.А.	70																					
6.	Проведение экспериментов	Мельников П.А.	36																					

Таблица 3.10 – Группировка затрат по статьям

Вид раб.	Сырье, ма- териалы, покупные изделия и полуфабри- каты, руб	Специальное оборудование для научных (экспери- ментальных) работ, руб	Основная заработная плата, руб	Дополни- тельная заработная плата, руб	Отчисления на социальные нужды, руб	Накладные рас- ходы, руб	Итого плановая себестоимость, руб
1	3130,0	56600	103116,64	10311,66	30934,99	82493,31	286586,6

3.3.4 Бюджет научного исследования

Расчет затрат на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ

Таблица 3.11 – Затраты на специальное оборудование.

Наименование	Стоимость, руб.
1. ЭВМ	30000
2. Осциллограф	20000
3. Паяльная станция	1600
4. Источник питания	5000
Итого	56600

Сырье, материалы, комплектующие изделия и покупные полуфабрикаты

Таблица 3.12 – Сырье, материалы, комплектующие изделия

Наименование детали	Название	К _д	Цена за единицу, руб
1. MOSFET транзисторы	24n60c3	2	250
2. Индуктор		1	150
3. Конденсатор		20	20
4. Сердечник	E65/32/27	2	280
5. Микросхема ШИМ-контроллер	к1156ey2	1	120
6. Драйвер транзисторов		1	500
7. Источник питания		1	800
8. Плата	Макетная плата 100x100 мм.	1	100
Итого:	3130		

Основная заработная плата

Рассчитывается по следующим формулам:

$$C_{3П} = 3_{ОСН} + 3_{ДОП} \quad (3.2)$$

$$3_{ОСН} = 3_{ДН} \cdot T_{раб} \quad (3.3)$$

$$3_{ДН} = \frac{3_M \cdot M}{F_D} \quad (3.4)$$

$$3_M = 3_б \cdot (k_{пр} + k_d) \cdot k_p \quad (3.5)$$

$$3_{ДОП} = k_{доп} \cdot 3_{ОСН} \quad (3.6)$$

Где:

$3_{ОСН}$ – основная заработная плата;

$3_{ДОП}$ - дополнительная заработная плата;

$T_{раб}$ - продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн.;

$3_{ДН}$ - среднедневная заработная плата работника, руб.;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года;

$3_б$ – базовый оклад (Мельников П.А. – 6595,7 руб., Буркин Е.Ю. – 23264,86 руб.);

$k_{пр}$ – премиальный коэффициент (0);

k_d – добавочный коэффициент (0);

k_p – районный коэффициент (1.3);

$k_{доп}$ – дополнительный коэффициент (0.1);

Таблица 3.13 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Мельников П.А.	Буркин Е.Ю.
Количество календарных дней	180	50
Нерабочие дни	62	12
Рабочие дни	118	38

Таблица 3.14 – Расчёт основной заработной платы

Исполнители	З_б, руб.	З_м, руб.	З_{дн}, руб.	Т_р, раб. дн.	З_{осн}, руб.
Мельников П.А..	6595,7	8574,41	320,76	118	37850,10
Буркин Е.Ю.	23264,86	30244,32	1470,85	38	55892,3

Таблица 3.15– Заработная плата исполнителей НТИ

Заработная плата	Мельников П.А.	Буркин Е.Ю.
Основная, руб	37850,10	55892,30
Дополнительная, руб	3785,01	5589,23
Общая, руб	41635,11	61481,53
Итого по статье Сзп , руб	103116,64	

Отчисления на социальные нужды

$$C_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot C_{\text{зп}} \quad (3.7)$$

$k_{\text{внеб}}$ - коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (0,3)

$$C_{\text{внеб}} = 30934,99 \text{ руб.}$$

Накладные расходы

$$C_{\text{накл}} = k_{\text{накл}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}) \quad (3.8)$$

$k_{\text{накл}}$ - коэффициент накладных расходов (0,8)

$$C_{\text{накл}} = 82493,31 \text{ руб.}$$

3.4 Оценка сравнительной эффективности исследования

Таблица 3.16 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Критерии	Весовой коэффициент	Текущий проект	Аналог 1	Аналог 2
1. Способствует росту производительности труда пользователя	0.15	4	4	3
2. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0.25	5	4	2
3. Помехоустойчивость	0.20	4	4	5
4. Энергосбережение	0.15	5	4	2
5. Надежность	0.15	4	4	4
6. Материалоемкость	0.1	5	3	4

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

()

$$I_{\Phi}^p = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}}$$

Где Φ_{pi} стоимость i-го варианта исполнения

Φ_{max} максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить следующим образом:

(3.9)

$$I_m^p = \sum_{i=1}^n a_i b_i^p$$

(3.10)

$$I_m^a = \sum_{i=1}^n a_i b_i^a$$

Где I_m – интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов

a_i – весовой коэффициент i -го параметра;

b_i^a, b_i^p – бальная оценка i -го параметра для аналога и разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания

n – число параметров сравнения

$$I_m^p = 4,5$$

$$I_m^{a1} = 3,9$$

$$I_m^{a2} = 3,2$$

Интегральный показатель эффективности разработки и аналога определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формулам:

$$I_{\text{финир}}^p = \frac{I_m^p}{I_{\text{ф}}^p} \quad (3.11)$$

$$I_{\text{финир}}^a = \frac{I_m^a}{I_{\text{ф}}^a} \quad (3.12)$$

Сравнение интегрального показателя эффективности текущего проекта и аналогов позволит определить сравнительную эффективность проекта.

$$\Xi_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{финир}}^p}{I_{\text{финир}}^a} \quad (3.13)$$

Таблица 3.17 – Сравнительная эффективность разработки

Показатели	Текущий проект	Аналог 1	Аналог 2
Интегральный финансовый показатель разработки	0,9	1	0,85
Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,5	3,9	3,2
Интегральный показатель эффективности	5,00	3,90	3,76
Сравнительная эффективность вариантов исполнения		1,28	1,33

По результатам анализа текущий проект эффективнее аналога 1 в 1,28 раза, а по сравнению с аналогом 2 в 1,33 раза.