

На правах рукописи



Дозоров Сергей Анатольевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ИНДУКТИВНО-  
ЕМКОСТНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ**

Специальность 05.09.03 — Электротехнические комплексы и системы

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2013 год

Работа выполнена на кафедре электротехнологической и преобразовательной техники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

**Научный руководитель:** Доктор технических наук, профессор  
Опре Виктор Михайлович

**Официальные оппоненты:** Доктор технических наук, профессор  
Дмитриев Борис Федорович,  
Санкт-Петербургский государственный  
морской технический университет, кафедра  
«Электротехники и электрооборудования  
судов»

Кандидат технических наук  
Пшенкин Сергей Николаевич,  
заместитель генерального директора  
Закрытого акционерного общества научно-  
производственного объединения  
«Тепломаш»

**Ведущая организация:** Открытое акционерное общество  
«Равенство» г. Санкт-Петербург

Защита состоится «13» ноября 2013 г. в 15 часов 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.238.05 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета ЛЭТИ им. В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина).

Автореферат разослан «02» октября 2013 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета, к.т.н.



М.П. Белов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** В современной электротехнике широкое практическое применение находят системы неизменного (стабилизированного) тока, то есть системы распределения и потребления электрической энергии, обеспечивающие независимость тока нагрузки от величины сопротивления нагрузки. Интерес к таким системам обусловлен их особенностью и возможностью применения во многих областях электротехники и инженерной электрофизики, которые условно можно подразделить на технические и экономические.

В электросварочной, электрометаллургической, плазменно-дуговой технологиях новый технический эффект при применении систем стабилизированного тока (ССТ) для питания дуговых разрядов заключается в радикальном повышении статической и динамической устойчивости дуги как рабочего технологического органа, так и в улучшении ее воспроизводимости, условий инициирования, регулирования, увеличении износостойкости электродов. Применение ССТ в электроприводах позволяет получить новый технический эффект: электроприводы обретают оригинальные свойства управляемого «источника момента», что с успехом используется в различных электромеханических устройствах. Именно этим объясняется интенсивное и все увеличивающееся проникновение этих систем в электротехнологическую практику.

Благодаря использованию индуктивно-емкостных преобразователей (ИЕП) ССТ получили значительное распространение в электротехнологической практике. Основные преимущества ИЕП – простота, надежность, экономичность. Однако они имеют и недостатки: недостаточно хорошие массогабаритные показатели, сложность при осуществлении плавного регулирования тока в широких пределах и др. Данные недостатки были решены путем применения трансформаторно-емкостных преобразователей (ТЕП) и новых запатентованных схем регулирования выходного тока нагрузки. Применение ТЕП в качестве источников неизменного тока позволяет существенно снизить массогабаритные показатели ССТ.

В основе теории ИЕП лежат работы ученых П. Бушера, Штейнметца, Виллиса, Бедфорда. Задачи проектирования и расчета ИЕП решались в работах, проведенных А.Н. Миляхом, А.Н. Волковым, Б.Е. Кубышином, И.В. Пентеговым, С.И. Закревским, Л.Р. Слободяном.

Однако существующие работы не охватывают все аспекты проблемы построения и проектирования ИЕП в виду отсутствия методики расчета преобразователей.

В настоящей работе рассмотрены теоретические и практические вопросы разработки, проектирования и исследования ИЕП, ТЕП и способов плавного регулирования выходного тока нагрузки. Решения данных вопросов представляют определенный научный и практический интерес, являются актуальной и своевременной задачей.

**Целью диссертационной работы является** разработка и исследование источников неизменного тока на базе ТЕР, обеспечивающих заданную точность стабилизации выходного тока нагрузки для заданного диапазона изменения сопротивления нагрузки при снижении массогабаритных показателей. Создание методики расчета и проектирования ИЕР и ТЕР, способов регулирования их выходного тока нагрузки.

**Задачи исследования:**

1. Критический анализ современного состояния и направлений развития источников неизменного тока на базе основных схем ИЕР, исследование входных и выходных характеристик преобразователей и их массогабаритных показателей.

2. Определение входных и выходных характеристик источников неизменного тока, выполненных на базе ТЕР.

3. Разработка методики расчета и проектирования однофазных и 3-х фазных ИЕР, и рекомендаций по выбору оптимальных схем для различных видов нагрузок.

4. Разработка методики расчета трансформатора с наперед заданным значением индуктивности намагничивания и рассеяния для ТЕР.

5. Разработка оригинальных способов плавного регулирования выходного тока нагрузки ИЕР и ТЕР.

6. Экспериментальное подтверждение численных расчетов характеристик ИЕР и ТЕР.

**Методы исследования.** Для получения достоверных и обоснованных научных результатов были применены современные аналитические и численные методы расчета. Численный расчет проводился путем моделирования в программе схемотехнического моделирования MicroCap 9.0 и в среде Simulink пакета MATLAB, и результаты были подтверждены экспериментальными исследованиями в лабораторных и производственных условиях.

**Выносимые на защиту результаты:**

1. Научно-обоснованный выбор оптимальных схем ИЕР для различных видов нагрузок с учетом массогабаритных показателей и энергетических характеристик преобразователей.

2. Методики расчета и проектирования индуктивно-емкостных источников питания на базе ИЕР и ТЕР.

3. Оригинальные схемы ТЕР, позволяющие существенно снизить массогабаритные показатели ИЕР.

4. Схемные решения и способы управления выходным током нагрузки источников неизменного тока.

5. Схемы управляемого заряда емкостных накопителей на базе ИЕР и ТЕР.

**Научная новизна работы** заключается в следующем:

1. Даны рекомендации по выбору оптимальных схем ИЕР для различных видов нагрузок.

2. Разработана методика расчета и проектирования источников неизменного тока, выполненных на базе ИЕП и ТЕП.

3. Разработана методика расчета трансформатора для ТЕП с наперед заданным значением индуктивности намагничивания и рассеяния трансформатора с оптимальными конструктивными показателями.

4. Предложены схемные решения, обеспечивающие плавное регулирование выходного тока нагрузки ИЕП и ТЕП.

5. Разработаны новые схемы заряда емкостных накопителей

**Обоснованность и достоверность** полученных научных результатов и выводов подтверждается корректностью поставленных задач и принятых решений и адекватностью используемых при исследовании численных моделей схем, выполненных в современной программе схемотехнического моделирования MicroCap 9.0, проверкой результатов на экспериментальной установке, качественным и количественным сопоставлением результатов численного моделирования и экспериментальными данными.

**Практическая значимость** полученных в диссертационной работе результатов заключается в следующем:

1. Предлагаемые методики расчета и проектирования источников неизменного тока позволяют существенно упростить расчет ИЕП и снизить время, затрачиваемое на него.

2. ССТ на основе ТЕП позволяют существенно уменьшить массогабаритные показатели индуктивно-емкостных источников питания, и следовательно снизить их себестоимость.

3. Разработана методика и программа расчета трансформатора для ТЕП, позволяющая рассчитать трансформатор с наперед заданной индуктивностью намагничивания и рассеяния с оптимальными массогабаритными показателями.

4. Разработаны схемные решения и способы управления выходным током преобразователей, позволяющее плавно регулировать выходной ток как ИЕП так и ТЕП в широком диапазоне.

5. Разработаны новые схемы управляемого заряда емкостных накопителей энергии с применением ИЕП и ТЕП.

**Реализация и внедрение результатов исследований.** На основе результатов, полученных в ходе выполнения диссертационной работы, ССТ внедрены и более года успешно эксплуатируются на газокompрессорной станции «Краснознаменская» Калининградского линейного производственного управления магистральных газопроводов ОАО «Газпром». В Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина) основные положения работы внедрены в лекционные курсы и лабораторный практикум по дисциплине: «Силовая импульсная техника».

**Апробация работы.** Результаты работы докладывались на четвертой научно-технической конференции с международным участием «Электротехника, электромеханика и электротехнологии (ЭЭЭ-2009)», г. Новосибирск 23-24 октября 2009г), открытом научно-практическом

семинаре молодых работников ООО «Газпром трансгаз Санкт-Петербург», (г. Санкт-Петербург, 07-11 июня 2010г.), 7-ой международной научно-практической конференции, «Найновите постижения на европейската наука», (Болгария, София 2011г.) а также на 61 – 66 научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава СПбГЭТУ «ЛЭТИ» (г. Санкт-Петербург, 2008–2013 гг.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 13 печатных работ, среди них 1 статья в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 1 учебное пособие, 5 патентов РФ на полезную модель и 6 работ в других изданиях.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав с выводами, заключения, списка используемой литературы и изложена на 179 листах машинописного текста, содержит 148 рисунков, 22 таблицы, списка использованных источников из 104 наименований на 11 страницах.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, выделены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** представлен обзор технической литературы по принципу работы, истории развития, возможного применения и классификации ИЕП.

Показано, что в определенных случаях возникает необходимость поддерживать неизменным заданное значение тока нагрузки независимо от изменения ее сопротивления. Исследованы электромагнитные процессы в схемах ИЕП, получивших широкое применение на практике. Поскольку схемы Бушера (рис. 1,а) не получили широкого применения на практике, основные показатели работы ИЕП значительно улучшаются при введении магнитной связи между индуктивными катушками в Т-образной схеме ИЕП (рис. 1,б). Введение такой связи позволяет уменьшить емкости конденсаторов и размеры индуктивных катушек, а, кроме того, магнитная взаимосвязь увеличивает точность стабилизации тока ИЕП.

Наиболее простые, надежные и экономичные из них одно- и трехфазные ИЕП, выполнены в виде симметричной Т-образной и мостовой схем Штейнметца (рис. 1,в).

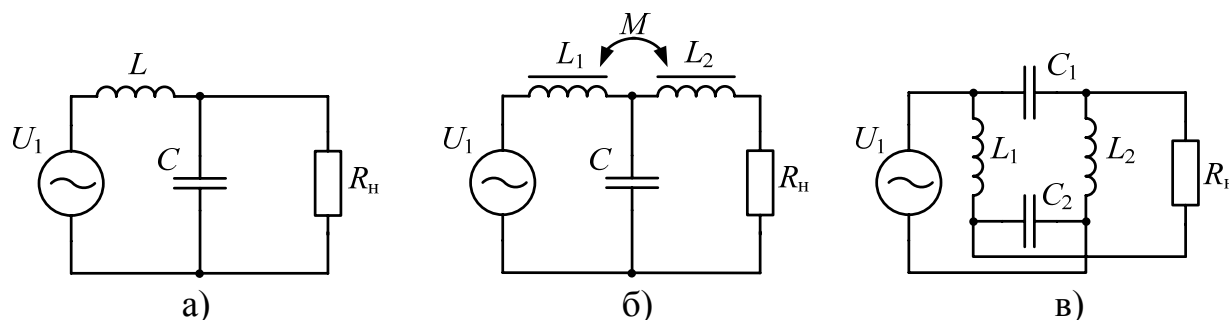


Рисунок 1 – Схема Бушера (а), Т-образная схема (б), Схема Штейнметца (в)  
Основными особенностями и преимуществами ИЕП, которые позволяют

их рекомендовать для использования во многих отраслях электротехники как основу для создания систем питания неизменного тока являются:

- 1) схемная и конструктивная простота, обеспечивающая высокую эксплуатационную надежность;
- 2) высокие энергетические показатели - к.п.д. и коэффициент мощности;
- 3) возможность выполнения ССТ практически на любые предельные токи, напряжения и частоты, встречающиеся в электротехнической практике;
- 4) нечувствительность к коротким замыканиям в цепи нагрузки, а при соответствующем расчете - и к режиму холостого хода;
- 5) возможность параллельной работы блоков ИЕП на различные номинальные токи и мощности, позволяет расширить их возможности как в регулировании, так и резервировании;

Вместе с тем ясно, что обеспечение всех этих преимуществ возможно лишь при тщательной проработке теории ИЕП как своеобразного класса электрических цепей.

**Во второй главе** произведен анализ электромагнитных процессов в ИЕП, в частности произведены исследования точности стабилизации тока нагрузки и значения коэффициента мощности от величины сопротивления нагрузки. В качестве исследуемых схем были выбраны Т-образная схема (рис. 1,б), Т-образная схема с емк. (рис. 2, а), Схема Штейнметца (рис. 1,в) и П-образная схема (рис. 2,б)

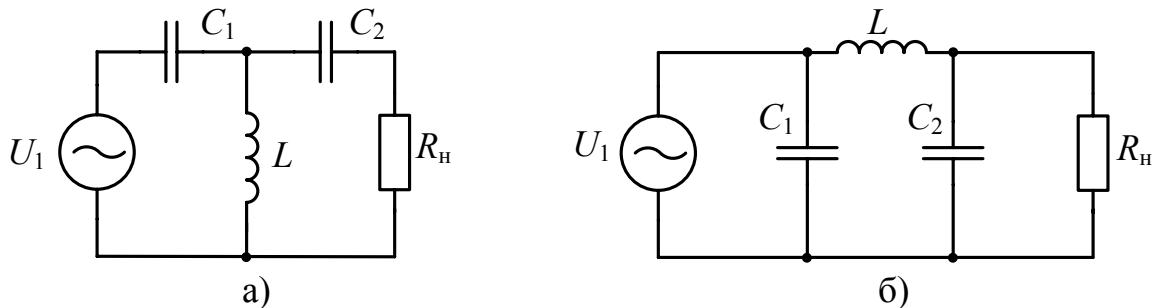


Рисунок 2 – Т-образная схема с емк.(а), П-образная схема (б)

С помощью программы схемотехнического моделирования MicroCap 9 были получены зависимости действующего значения тока нагрузки от величины сопротивления нагрузки, которые позволили далее рассчитать коэффициент отклонения действующего значения тока нагрузки  $k_I$ , определяемый по формуле:

$$k_I = \frac{\Delta I_d}{I_\rho} \cdot 100\%,$$

где  $\Delta I_d = I_{d\max} - I_{d\min}$  - диапазон изменение действующего значение тока нагрузки,  $I_\rho$  - действующее значение тока нагрузки при значении сопротивления нагрузки равном эквивалентному волновому сопротивлению схемы. Результаты расчетов занесены в табл. 1

Исследования производились для трех диапазонов изменения

величины сопротивления нагрузки  $R_H$  :

- а) от 0,1ρ до 1ρ,
- б) от 1ρ до 5ρ
- в) от 0,1ρ до 5ρ.

На рис. 3 представлены действующие значения токов нагрузки в зависимости от величины сопротивления нагрузки для Т-образного ИЕП при значении эквивалентного волнового сопротивления 10,6 Ом и изменении величины сопротивления нагрузки от 1 до 10 Ом с шагом 1 Ом. Аналогичным образом определялся диапазон нестабильности выходного тока нагрузки для других диапазонов изменения величины сопротивления нагрузки и других исследуемых схем.

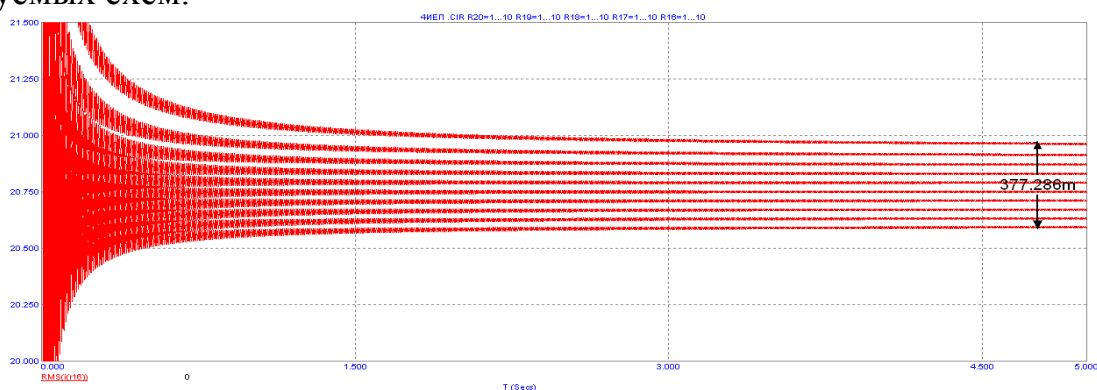


Рисунок 3 – Зависимость действующего значения тока нагрузки от величины сопротивления нагрузки

Таблица 1.

Результаты расчета коэффициента  $k_I$  при  $\rho = 10,6$  Ом.

Параметр	Исследуемая схема				
	Т-образный ИЕП	Т-образный ИЕП с емк.	Схема Штейнметца	П-образный ИЕП	
$I_\rho, A$	20,567	20,536	20,546	20,945	
$R_H = 1-10, Ом$	$\Delta I_d, A$	0,377	0,350	0,355	0,147
	$k_I, \%$	1,823	1,704	1,728	0,702
$R_H = 10-50, Ом$	$\Delta I_d, A$	1,570	1,591	1,589	1,336
	$k_I, \%$	7,634	7,747	7,734	6,379
$R_H = 1-50, Ом$	$\Delta I_d, A$	1,945	1,941	1,944	1,483
	$k_I, \%$	9,457	9,452	9,462	7,080

С помощью программы схемотехнического моделирования MicroCap9.0 были получены зависимости значения коэффициента мощности от величины сопротивления нагрузки (рис. 4), доказывающие, что все



симметричные ИЕП имеют коэффициент мощности близкий к единице.

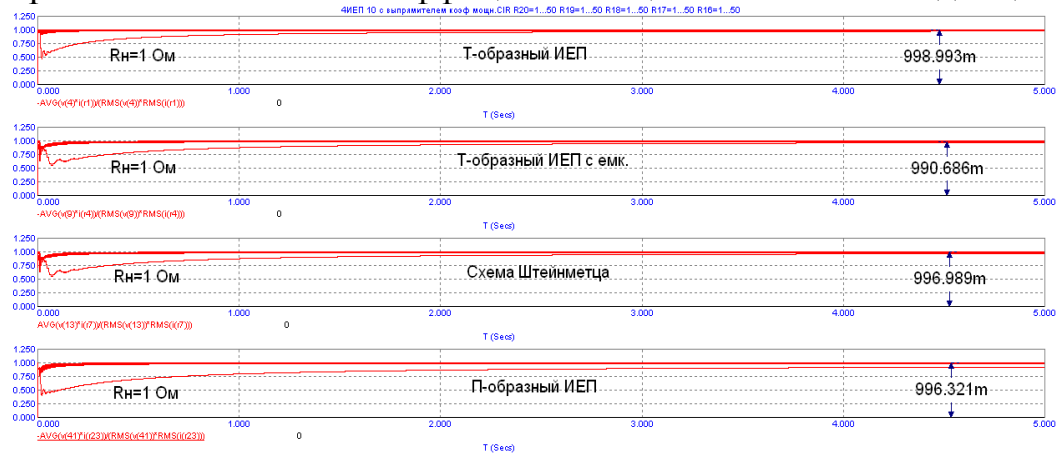


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента мощности от величины сопротивления нагрузки при  $\rho = 10,6$  Ом и работе на мостовой выпрямитель. Средства MicroCap 9.0 позволили произвести исследования электромагнитных процессов в ИЕП при заряде больших аккумуляторных батарей и емкостных накопителей.

Было установлено, что при нагрузке, представляющей собой противо-э.д.с., во всех однофазных схемах, кроме П-образной, форма тока, потребляемого от сети (рис.5) и гармонический состав входного тока (рис.6), существенно отличается от синусоидальной.

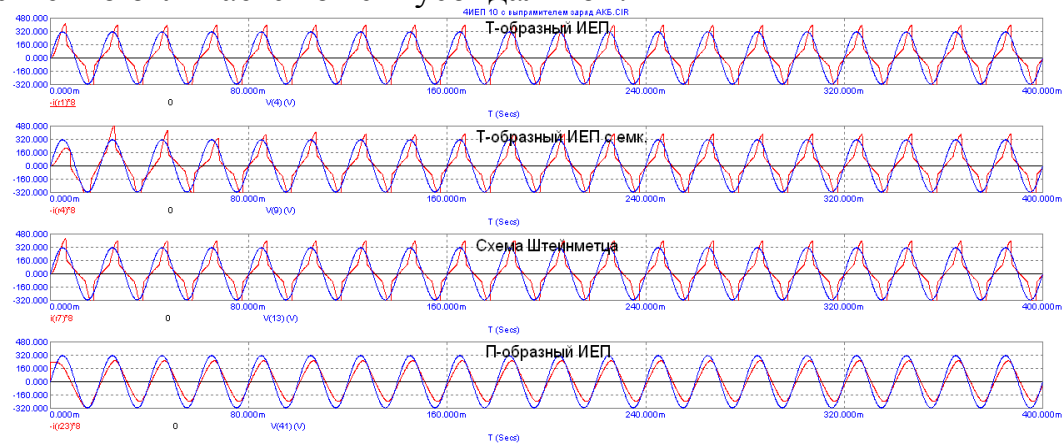


Рисунок 5 – Временные зависимости напряжений и токов на входе ИЕП при нагрузке в виде противо-э.д.с.

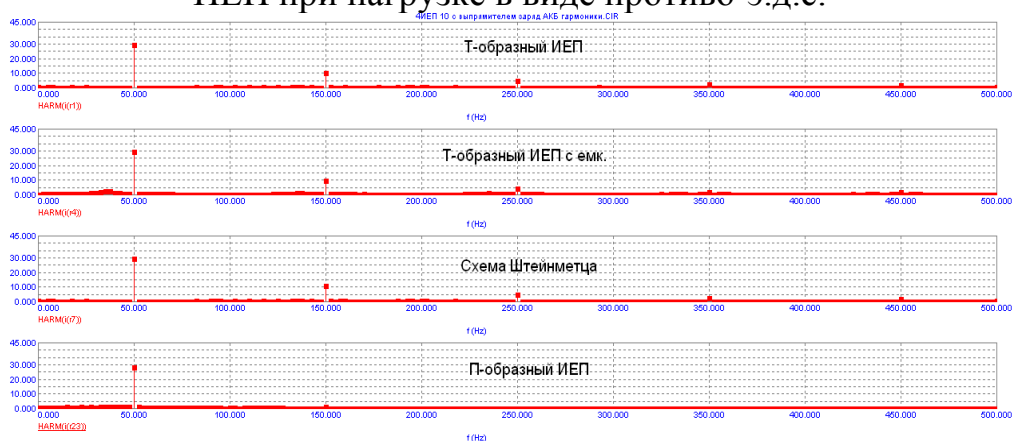


Рисунок 6 – Гармонический состав сетевых токов ИЕП.

Так же показано, что при заряде больших емкостных накопителей все ИЕП обеспечивают линейный рост напряжения заряда (рис. 7).

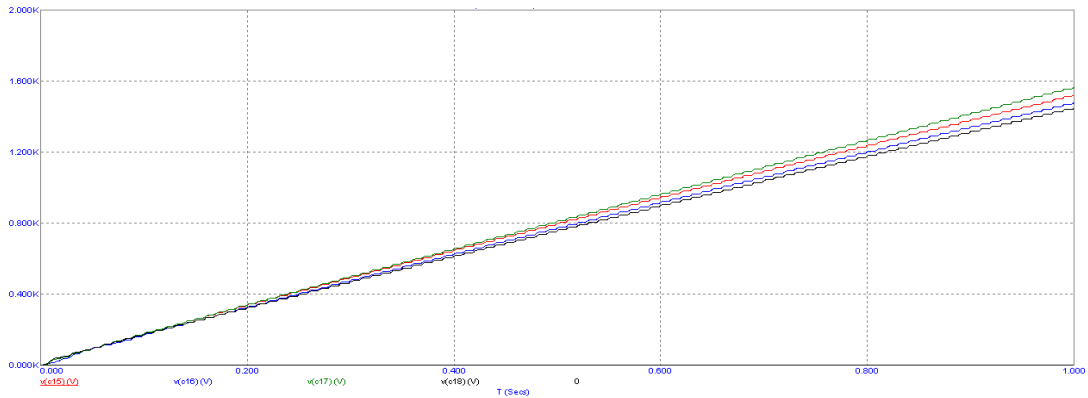


Рисунок 7 – Временные зависимости напряжений заряда.

При этом в процессе заряда форма токов сети у всех схем, кроме П-образной схемы, также существенно отличается от синусоидальной (рис.8).

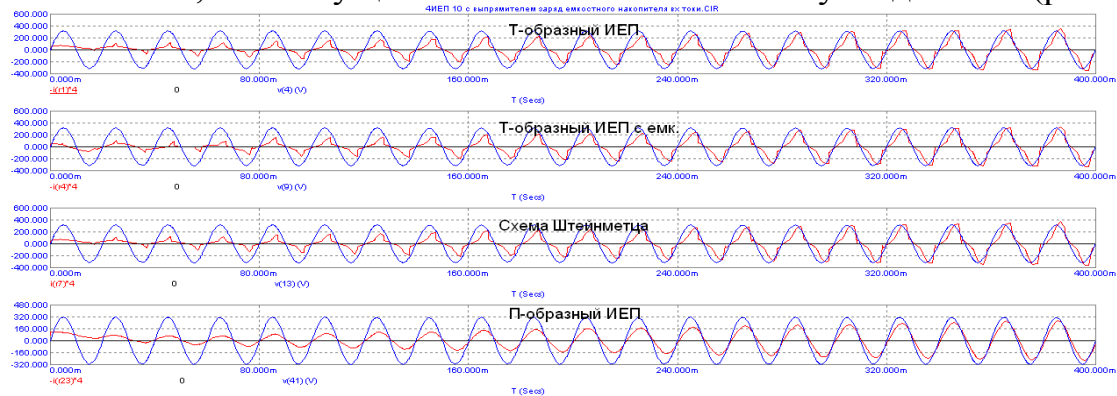


Рисунок 8 – Временные зависимости напряжений и токов на входе ИЕП при заряде емкостных накопителей.

Все схемы, за исключением П-образной, кроме основной гармоники, имеют так же 3, 5 и 7 гармоники (рис. 9).



Рисунок 9 – Гармонический состав сетевых токов ИЕП при заряде емкостных накопителей.

На основе исследований схем в базисных величинах было установлено, что Т-образная схема с магнитной связью и схема Штейнметца обладают лучшими массогабаритными показателями, но требуют изготовления двух индуктивностей, причем в первом случае размещенных на общем магнитопроводе. Окончательный выбор схемы ИЕП может быть сделан в результате конструктивных расчетов дросселей.

Схемы трехфазных ИЕП образованы путем включения системы однофазных преобразователей в трехфазную сеть и нагруженных на трехфазный трансформатор с выпрямителем. Из всего разнообразия трехфазных ИЕП в работе анализируются две основных схемы: Т-образный ИЕП и П-образный ИЕП, как наиболее показательные. При этом выяснилось, что параметры трехфазных преобразователей существенно зависят от схем включения составляющих их однофазных преобразователей. Можно выделить две основных схемы включения – фазное включение и линейное, когда входы однофазных преобразователей подключены к линейным напряжениям сети.

На основе полученных результатов анализа схем трехфазных ИЕП был сделан вывод о том, что наиболее оптимальной трехфазной схемой при работе на активную нагрузку и заряд емкостных накопителей является П-образная схема с фазным включением конденсаторов, но она имеет в  $\sqrt{3}$  раз меньше действующее значение выходного тока, чем П-образная схема с линейным подключением конденсаторов. П-образная схема с фазным подключением конденсаторов хорошо стабилизирует выходной ток нагрузки и имеет линейную характеристику заряда емкостного накопителя.

**В третьей главе** произведен анализ электромагнитных процессов в запатентованной схеме ТЕП (рис. 10) при работе на различные виды нагрузок. Так же представлены различные способы регулирования выходного тока нагрузки ТЕП и ИЕП, различные схемы управляемого заряда емкостных накопителей.

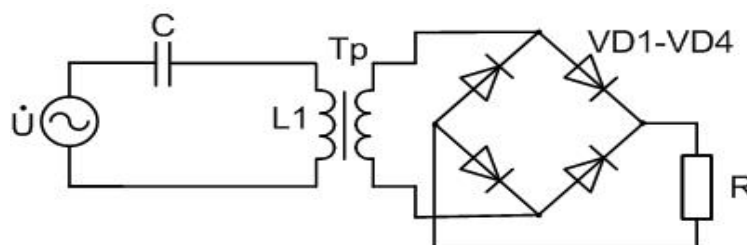


Рисунок 10 – Эквивалентная схема ТЕП

На рис. 11 показано, как изменяется действующее значение выходного тока нагрузки при изменении сопротивления нагрузки от 1 Ом до 50 Ом с шагом в 5 Ом

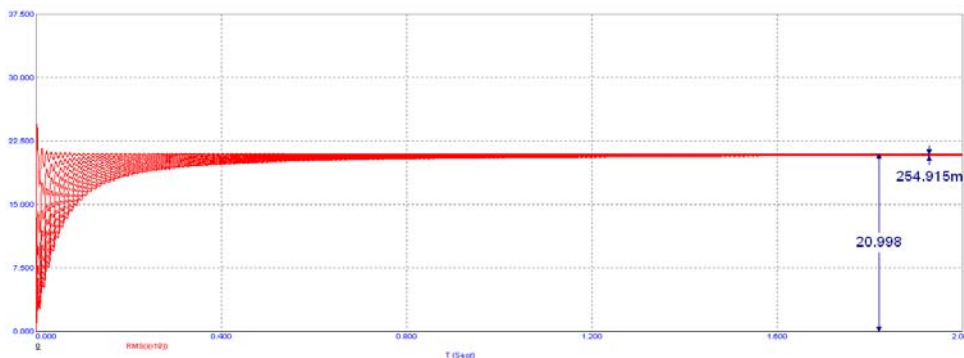


Рисунок 11 – Действующие значения токов нагрузки  
Результаты расчета  $k_f$  для ТЕП представлены в табл.2.

Таблица 2.

Результаты расчета коэффициента  $k_I$  при  $\rho = 10,6$  Ом.

Параметр		Исследуемая схема		
		Схема Штейнметца	П-образный ИЕП	ТЕП
$I_p, A$		20,552	20,946	20,998
$R_H = 1-10, \text{ Ом}$	$\Delta I_d, A$	0,357	0,146	0,155
	$k_I, \%$	1,737	0,697	0,740
$R_H = 10-50, \text{ Ом}$	$\Delta I_d, A$	1,589	0,937	0,977
	$k_I, \%$	7,732	4,473	4,663
$R_H = 1-50, \text{ Ом}$	$\Delta I_d, A$	1,946	1,083	1,132
	$k_I, \%$	9,469	5,170	5,402

На основе данных исследований можно сделать вывод о том, что ТЕП хорошо стабилизирует выходной ток нагрузки.

Анализ электромагнитных процессов в ТЕП при заряде больших емкостных накопителей показал, что по входным характеристикам ТЕП уступает П-образному ИЕП и полностью аналогичен Т-образному, у ТЕП как и у Т-образного ИЕП присутствуют 3-я, 5-я, 7-я и 9-я гармоники. ТЕП при заряде емкостных накопителей обеспечивает линейный заряд. В процессе заряда форма тока ТЕП существенно отличается от синусоидальной.

Схемы трехфазных ТЕП образованы путем включения трех однофазных ТЕП в трехфазную сеть и нагруженных на выпрямитель.

Разработана и запатентована схема регулирования выходного тока нагрузки с помощью ШИР, в которой к выходу источника неизменного тока подключается регулятор к выходу, которого в свою очередь подключается нагрузка (рис. 12). В качестве источника неизменного тока могут применяться как ИЕП так и ТЕП.

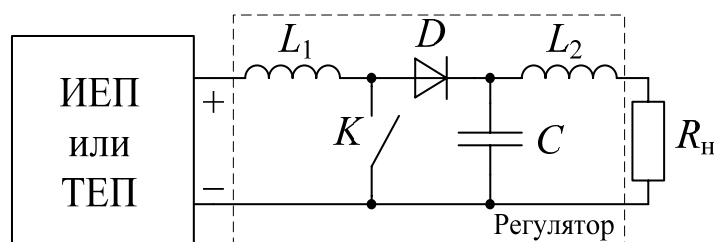
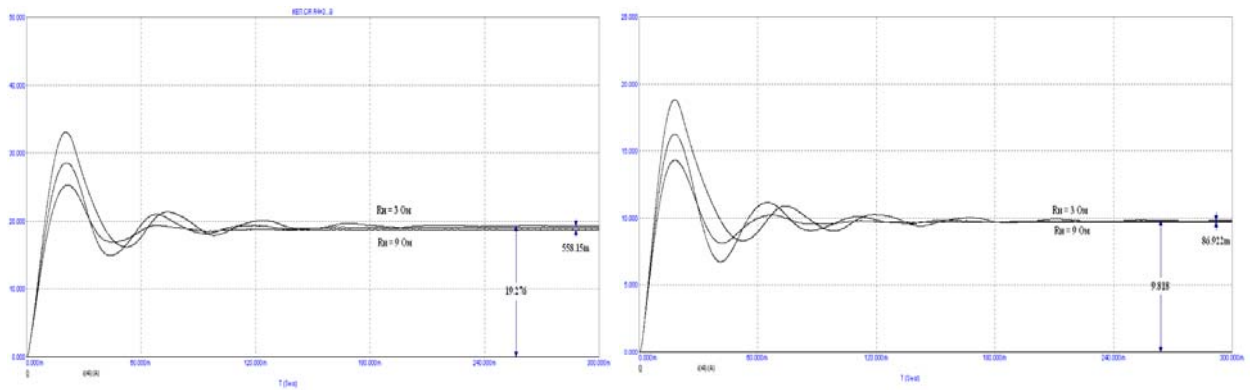


Рисунок 12 – Источник неизменного тока с ШИР регулятором.

На рис. 13 представлены временные зависимости выходного тока нагрузки для различных значений коэффициента заполнения  $D$  полностью управляемого ключа  $K$  при изменении величины сопротивления нагрузки  $R_H$  в 3 раза (с 3 Ом до 9 Ом), доказывающие работоспособность предлагаемого способа регулирования тока нагрузки. Из рис. 13 видно, что при увеличении времени включенного состояния ключа (увеличении коэффициента заполнения  $D$ ) ток нагрузки снижается, стабилизирующие свойства при этом сохраняются.



а) временные зависимости тока нагрузки при  $D = 50\%$ .

б) временные зависимости тока нагрузки при  $D = 75\%$ .

Рисунок 13 – Регулирование выходного тока нагрузки

Для повышения надежности работы и защиты высокочастотного транзистора (ключа  $K$ ) была разработана и запатентована схема защиты [патент 90625], шунтирующая входную индуктивность  $L_1$ , включающая последовательно подключенные диод  $D_2$  и варистор  $U$  (рис. 14).

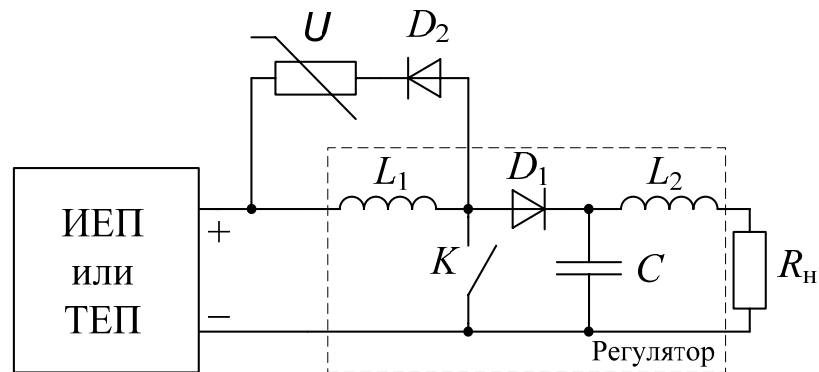


Рисунок 14 – Защитная  $DU$  цепь.

Для решения задач по управляемому заряду емкостных накопителей с помощью ТЕП были разработаны и запатентованы две схемы заряда. В первой схеме в ТЕП вводится дополнительная низковольтная обмотка с управляемым ключом  $K$  (рис. 15).

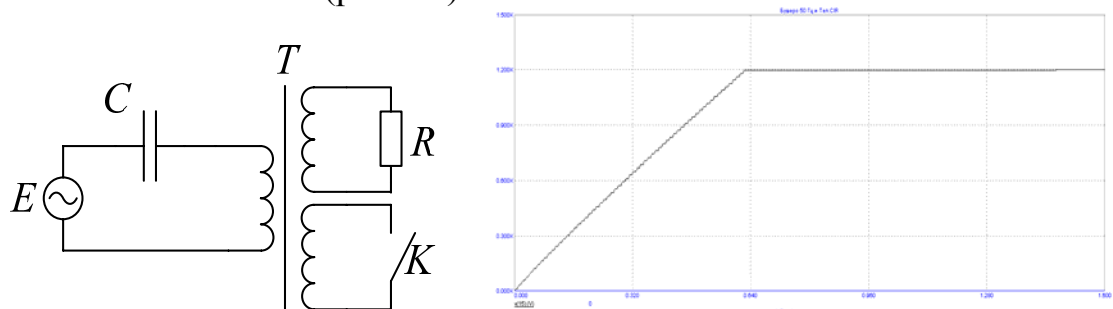


Рисунок 15 – Ограничение заряда емкостного накопителя

При включении ключа  $K$  заряд емкостного накопителя прекращается.

Во второй схеме параллельно конденсатору  $C_1$  подключен управляемый ключ  $K$  (рис. 16).

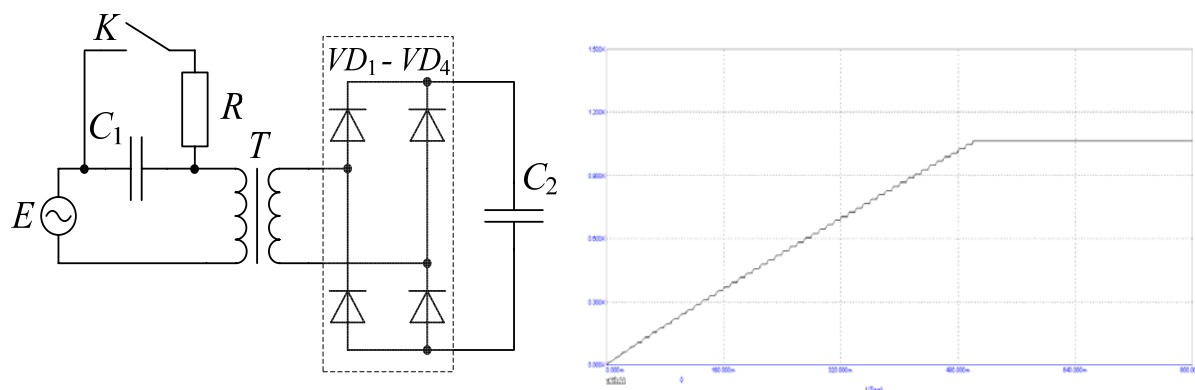


Рисунок 16 – Управляемый заряд емкостного накопителя

В момент окончания заряда емкостного накопителя  $C_2$  включается ключ  $K$  и резистор  $R$  шунтирует резонансный конденсатор  $C_1$  нарушая работу ТЕП, заряд емкостного накопителя прекращается. Величина сопротивления  $R$  должна быть примерно равна эквивалентному волновому сопротивлению  $\rho$ .

**В четвертой главе** представлены методики расчета и проектирования однофазных и трехфазных ИЕП, расчет согласующих трансформаторов и дросселей для ИЕП, расчет и проектирование трансформаторов для ТЕП, а так же экспериментальные исследования ИЕП и ТЕП.

Для расчета любой из схем однофазных ИЕП следует ввести ограничение, при котором максимальное напряжение на первичной обмотке согласующего трансформатора  $U_1$ , соответствующее максимальному напряжению на переменной нагрузке  $U_{max}$ , не должно превышать стандартной величины 220 или 380 В. Для резистивных нагрузок  $U_{max}=I_n R_{max}$ , для аккумуляторных батарей  $U_{max}=U_{зар}$  (напряжение заряда), для емкостных накопителей это максимальное напряжение заряда  $U_{max}$ . Величины этих напряжений должны быть приведены к первичной обмотке с учетом коэффициента трансформации  $K_{тр}$ , то есть  $U_1 = U_{max} / K_{тр}$  для повышающих трансформаторов. Это ограничение связано с тем, что в качестве согласующих трансформаторов обычно используются серийные силовые трансформаторы требуемой мощности с заданным коэффициентом трансформации и стандартными напряжениями первичных обмоток.

В конечном итоге можно рекомендовать следующий алгоритм расчета ИЕП.

1. Для резистивной нагрузки задаются величины действующего значения тока нагрузки  $I_n$ , сопротивления нагрузки  $R_n$  и диапазон изменения нагрузки  $\Delta R = R_{max} - R_{min}$ . Для нагрузки в виде емкостных накопителей и АКБ задается среднее значение тока нагрузки  $I_{ср}$ .
2. Находится действующее значение напряжения на резистивной нагрузке  $U_d = I_n R_{max}$ , напряжение вторичной обмотки трансформатора принимается равным  $U_2 = U_d / 0,9$ .
3. Определяется коэффициент трансформации  $K_{тр} = U_2 / U_1$ , где  $U_1$  – напряжение первичной обмотки трансформатора. При использовании стандартных серийных трансформаторов напряжение  $U_1$  принимается равным 220 В. Тогда  $K_{тр} = U_2 / 220$ .

4. Мощность трансформатора в предварительных оценках  $P_{тр} = U_1 I_1$ , где  $I_1$  – ток первичной обмотки. Для резистивной нагрузки можно принять величину  $I_1 = I_n / K_{тр}$ .
5. Определяется максимальная величина сопротивления нагрузки ИЕП, приведенная к первичной обмотке трансформатора  $R_{1max} = R_{max} / K_{тр}^2$ .
6. Для конкретной схемы ИЕП находятся номиналы реактивных элементов, которые определяют величину тока короткого замыкания. Поскольку  $\omega L = 1/\omega C = U_1 / I_1 = 220 / I_1$ , то величины реактивных элементов могут быть определены по эмпирическим зависимостям:  $L = 0,7 / I_1$  Гн и  $C = 14,48 I_1$  мкФ .
7. Величина эквивалентного волнового сопротивления  $\rho = \sqrt{L/C} = 219,86 / I_1$ .
8. Для резистивной нагрузки  $U_2 = U_d$ , при заряде емкостного накопителя максимальная величина действующего значения  $U_{2max} = U_{Cmax} / \sqrt{2}$ , при заряде АКБ  $U_2 = 0,9 U_d = const$ .
9. При необходимости результаты расчета следует проверить с помощью программного средства MicroCap 9.0.

Расчет трехфазных ИЕП аналогичен расчету однофазных ИЕП (см. параграф 4.1), в виду того, что трехфазные ИЕП состояются из трех однофазных ИЕП. Отличие для трехфазных ИЕП заключается в следующем:

1. Согласованная нагрузка (после выпрямителя) в  $\sqrt{3}$  раз больше по сравнению с однофазными.
2. Ток нагрузки в  $\sqrt{1,5}$  раза больше тока обмоток трансформатора при  $k_{тр} = 1$ .
3. При  $R_n = \sqrt{3}\rho$  напряжение первичных обмоток трансформатора примерно равно 220В.

В результате экспериментальных исследований были получены зависимости выходного тока нагрузки от величины сопротивления нагрузки и формы входных токов при работе на активную нагрузку и заряд АКБ, которые потом были проверены в MicroCap 9.0.

Схема экспериментальной установки ТЕП представлена на рис. 17.

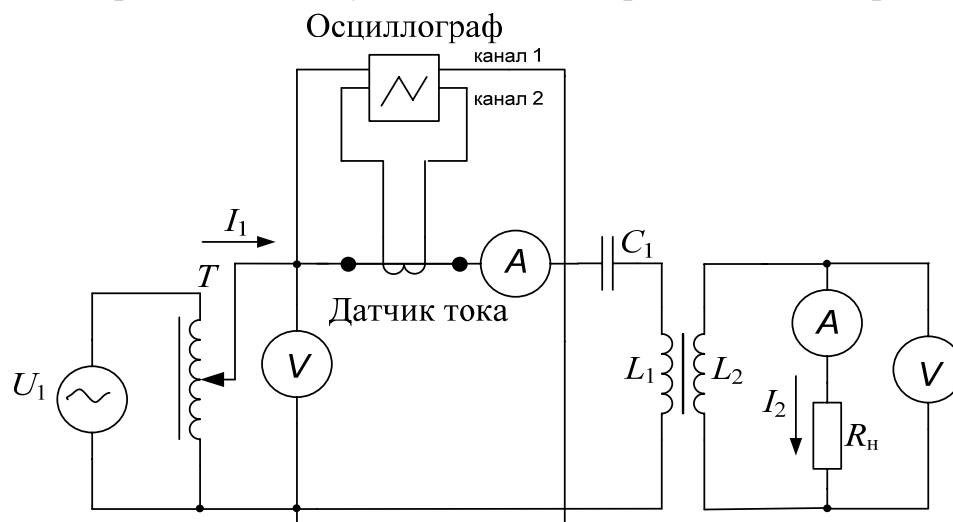


Рисунок 17 – Экспериментальная схема ТЕП



Результаты измерений, полученных экспериментальным путем и с применением численного моделирования, представлены в табл. 3

Таблица 3.

Зависимость выходного тока ТЕП от величины сопротивления нагрузки

$U$ , выход ЛАТРа	$C_1$ , мкФ	$R_{н}$ , Ом	$I_1$ , А Эксперимент	$I_1$ , А Micro- Cap9.0	$I_2$ , А Эксперимент	$I_2$ , А Micro- Cap9.0
40В	600	9	13,5	13,8	7	7,1
40В	600	4,7	9,5	9,9	7,15	7,4
40В	600	3	8,5	8,7	7,2	7,5
40В	600	0	7,5	7,2	7,4	7,6

Из табл.3 можно сделать вывод о том, что результаты, полученные экспериментальным путем и с помощью численного моделирования, мало отличаются друг от друга. Аналогичные зависимости были получены и для других исследуемых схем.

Для заряда АКБ была собрана схема (рис. 18) и были получены осциллограммы входного тока (рис. 19), которые были перепроверены в MicroCap 9.0 (рис. 20).

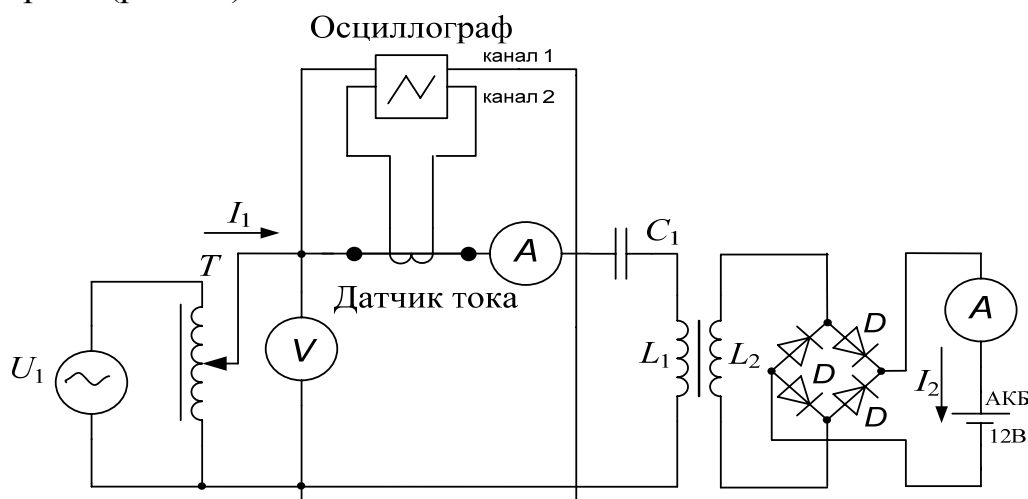


Рисунок 18. – Схема ТЕП для заряда стартерной АКБ

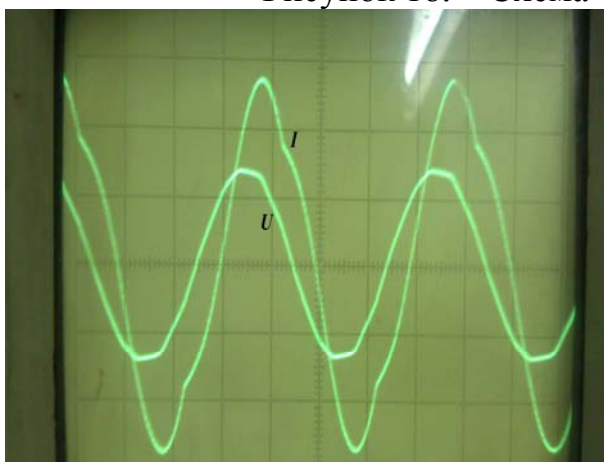


Рисунок 19 – Осциллограмма входного тока и напряжения ТЕП при заряде стартерной АКБ

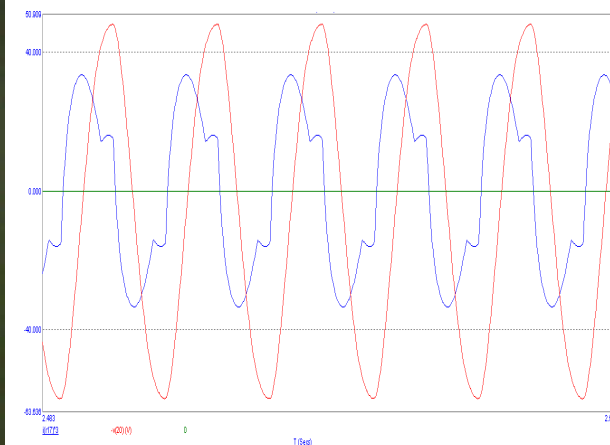


Рисунок 20 – Форма входного тока и напряжения ТЕП при заряде АКБ, полученные с помощью MicroCap 9.0.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основным научным результатом диссертации является разработка источников неизменного тока на базе ТЕР, обеспечивающих заданную точность стабилизации выходного тока нагрузки для заданного изменения сопротивления нагрузки и создание методики расчета и проектирования ИЕР, разработка способов регулирования выходного тока нагрузки ИЕР и ТЕР.

В соответствии с целью и задачами диссертации получены следующие основные результаты:

1. Проведены исследования входных и выходных характеристик преобразователей. Предложены оптимальные схемы источников неизменного тока при работе на разные виды нагрузок с учетом оптимальных массогабаритных показателей.

2. Исследованы и проанализированы входные и выходные характеристики источника неизменного тока, выполненного на базе ТЕР.

3. Разработана методика расчета и проектирования однофазных и трехфазных ИЕР, позволяющая быстро и качественно произвести расчет преобразователя.

4. Разработана методика расчета и оптимизации конструкции трансформатора с наперед заданным значением индуктивности намагничивания и рассеяния трансформатора для ТЕР.

5. Разработаны схемные решения и способ управления выходным неизменном током нагрузки ИЕР и ТЕР, позволяющий плавно регулировать выходной ток.

6. Разработаны две схемы управляемого заряда больших емкостных накопителей.

7. Проведен ряд экспериментов, доказывающих работоспособность ТЕР на практике. Полученные результаты физического эксперимента проверены с помощью программы схемотехнического моделирования MicroCap 9.0.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Публикации в ведущих изданиях, рекомендованных ВАК:*

1. Трансформаторно-емкостный стабилизатор тока / С.А. Дозоров, П.А. Кошелев, В.М. Опре и др. // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2012. - №2 (66) – С. 59-65.

*Патенты:*

2. Патент - 77517 РФ, МПК Н02М 5/06. Индуктивно-емкостный преобразователь. / С.А. Дозоров, В.М. Опре, И.В. Саенко, А.А. Новик, П.А. Кошелев, С.В. Парамонов; СПбГЭТУ «ЛЭТИ» - №2008118172/22; Заяв. 06.05.2008; Опубл. 20.10.2008., Бюл. № 29.

3. Патент - 90625 РФ, МПК H02M 3/24. Устройство защиты высокочастотных преобразователей / С.А. Дозоров, В.М. Опре, П.А. Кошелев, А.И. Сомов; ООО «Газпром трансгаз Санкт-Петербург» - №2009121046/22; Заяв. 02.06.2009; Опубл. 10.01.2010, Бюл. № 1.

4. Патент - 100687 РФ, МПК H02M 3/155. Источник неизменного тока / С.А. Дозоров, В.М. Опре, П.А. Кошелев, С.В. Парамонов, В.Н. Терещенко; СПбГЭТУ «ЛЭТИ» - №2010126898/07; Заяв. 30.06.2010; Опубл. 20.12.2010, Бюл. № 35.

5. Патент - 114567 РФ, МПК H02M 5/06. Высоковольтный источник неизменного тока / С.А. Дозоров, В.М. Опре, П.А. Кошелев, А.И. Сомов, В.Н. Терещенко; ООО «Газпром трансгаз Санкт-Петербург» - №2011113770/07; Заяв. 08.04.2011; Опубл. 27.03.2012, Бюл. №9.

6. Патент – 123266 РФ, МПК H02M 3/155. Зарядное устройство / С.А. Дозоров, В.М. Опре, П.А. Кошелев, С.В. Парамонов, А.А. Тимахович; СПбГЭТУ «ЛЭТИ» - №2012128058/07; Заяв. 03.07.2012; Опубл. 20.12.2012, Бюл. №35

*Учебные пособия:*

7. Силовая импульсная техника: метод. указания к лабораторным работам/ Дозоров С.А., Опре В.М. – СПб: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2010. 32 с.

*Публикации в других изданиях:*

8. Источники тока на основе резонансной трансформаторно-конденсаторной электрической цепи /С.А. Дозоров, П.А. Кошелев, В.М. Опре и др. // Проблемы электроэнергетики. Сборник научных трудов Саратовского государственного технического университета. - Саратов, 2009. - С. 25-31.

9. Проектирование генераторов мощных импульсов тока с применением символьных и матричных вычислений/ С.А. Дозоров, П.А. Кошелев, В.М. Опре и др. // Проблемы электроэнергетики. Сборник научных трудов Саратовского государственного технического университета. - Саратов, 2009. - С. 38-45.

10. Источник тока на основе индуктивно-емкостного резонансного преобразователя / С.А. Дозоров, В.С. Богачев, С.В. Парамонов // Электротехника, электромеханика и электротехнологии ЭЭЭ-2009. Материалы четвертой научно-технической конференции с международным участием. - Новосибирск, 2009. - С. 135-138.

11. Дозоров С.А. Параметрические источники тока в системе заряда аккумуляторных батарей./С.А. Дозоров // Материалы открытого научно-практического семинара молодых работников ООО «Газпром трансгаз Санкт-Петербург». - Санкт-Петербург, 2010. – С.204-208.

12. Дозоров С.А. Параметрические источники неизменного тока /С.А. Дозоров// Материали за 7-а международна научна практична конференция найновите постижения на европейската наука. - Болгария, София, 2011. С. 50-55.

13. Дозоров С.А. Сравнительный анализ электромагнитных процессов в однофазных индуктивно-емкостных преобразователях/ С.А. Дозоров, В.М. Опре // Силовая электроника. – 2013. - №3. – С. 59-62.