

**ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
"ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА"**

**На правах рукописи
УДК 621.383.8**

Казимеж Бучек

**ЭЛЕКТРОННЫЕ ИМПУЛЬСНЫЕ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ И ИНТЕГРАЛЬНЫЕ
УСТРОЙСТВА ИХ УПРАВЛЕНИЯ**

Специальность:

**05.27.05 - "Интегральные радиоэлектронные
устройства"**

**05.09.12 - "Полупроводниковые преобразователи
электроэнергии"**

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук**

Львов - 1994

Работа выполнена на кафедре "Электронные устройства"
Жешувского политехнического института (Польша).

Научный консультант: проф.д.т.н. Калита В. (Польша)

Официальные оппоненты:

доктор технических наук,
профессор Стаднык Б.И.

доктор технических наук,
профессор Чабан В.И.

доктор технических наук,
профессор Фронцковяк Л. (Польша)

Ведущая организация: Львовский научно-исследовательский
радиотехнический институт

Защита диссертации состоится " 10 " 06 .1994г. в 14⁰⁰ час.
на заседании специализированного совета Д 068.36.06 при
Государственном университете "Львівська політехніка"
(290013, г.Львов, ул. Бандеры, 12). 6226 ауд. 2. к.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке
Государственного университета "Львівська політехніка",
(ул. Профессорская, 1)

Автореферат разослан " 29 " 04 .1994г.

Ученый секретарь
специализированного совета
д.ф.-м.н., профессор



Буджак Я.С

ЛНБ України ім.В.Стефаніка



00802241 (H)

ЛНБ ім. В. Стефаніка
АН України

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Электронные импульсные преобразователи (ЭИП) известны на протяжении нескольких десятков лет, с начала использования в половине шестидесятых годов кремниевых транзисторов. Развитие электронных преобразователей зависело от статических и динамических параметров полупроводниковых биполярных транзисторов (BJT), диодов, тиристоров (SCR) и позднее полевых МОП-транзисторов (MOSFET) и биполярных транзисторов с изолированным затвором IGBT, которые являются элементной базой для их построения. Иные полупроводниковые приборы со специфическими свойствами, как-то: выключающие тиристоры (GTO), электростатические тиристоры (SITH), триаки, фототиристоры и т.п., применяются в специальных схемах и не находят широкого применения [78, 79, 80, 81].

В настоящее время в ЭИП применяются полупроводниковые приборы с широкими диапазонами тока, напряжения, частоты, и других величин [80, 82, 83, 84]. Потому ЭИП работают в системах малой, средней и большой мощности, с большим к.п.д. ($>0,93$), частотой следования импульсов в диапазоне 50Гц...20кГц, напряжением питания от 5В до 220В и могут быть использованы при: изменениях температуры от 218К до 393К, влажности $<95\%$, с помехами мощностью до 700Вт - для преобразователей и до 20Вт - для устройств управления.

Полупроводниковые приборы стали удобными элементами для построения промышленных преобразователей, так как, благодаря своим хорошим параметрам, работают практически без запаздывания и с большим энергетическим к.п.д. [85, 86].

В общем работа электронных преобразователей возможна в двух режимах:

- непрерывном, предназначенном в основном для систем переменного тока (AC);
- импульсном для систем постоянного (DC) и переменного токов.

Непрерывная работа электронных преобразователей создает ряд проблем технического характера, как: искажение тока питания (высшие гармоники, отсутствие электромагнитной совместимости),

потребление дополнительной реактивной мощности (уменьшение к.п.д.). Импульсная работа электронных преобразователей состоит в циклическом повторении состояния включения (насыщения) и выключения (блокировки), благодаря чему потери мощности, связанные с преобразованием, уменьшаются, а электронная система имеет больший энергетический к.п.д.

В работах по электронным импульсным преобразователям и их устройствам управления, проведенных до сих пор не решен ряд проблем, важнейшими из которых являются:

- создание достаточно точной и единой математической модели для всех полупроводниковых приборов (диодов, транзисторов и тиристоров);
- разработка и внедрение универсального и комплексного метода расчета, проектирования и выполнения преобразователей для переменного и постоянного токов;
- создание скоростных переключающих элементов, создающих возможность увеличения рабочей частоты и ограничения переменных составляющих в цепях постоянного тока;
- применение математического моделирования процесса коммутации ключей переменного тока с целью ограничения перенапряжений и сверхтоков, возникающих во время переходных процессов;
- разработка математического моделирования для использования компьютерных, профессиональных программ проектирования интегральных устройств управления ЭИП;
- надежное управление ЭИП с помощью электронных устройств на основе микроэлектронной технологии.

Решение перечисленных выше вопросов стало возможным, благодаря применению новых методов анализа электронных систем при помощи простых моделей полупроводниковых приборов и профессиональных программ для ЭВМ (MATLAB, и др.), позволяющих методами математического моделирования решать проблемы уменьшения количества испытательных моделей для разработки практической системы, использование новых, быстродействующих транзисторов, управляемых напряжением (MOSFET, IGBT), применение толстопленочной технологии для создания управляющих интегральных электронных устройств.

С решением этих задач возможна разработка ЭИП для электронных систем с высоким к.п.д. для использования в системах радиоэлектроники и телекоммуникации, вычислительных машин, электротермии, автоматики приводов, электроэнергетике, и др.

Разработки ЭИП и их ИУУ были проведены в рамках научных программ: Польской академии наук (правительственные программы PR-04, PR-17), Института авиации в Варшаве (правительственная программа PR-3), Жешувской политехники (отраслевые программы U-3843/BW и U-3519/DS).

Цель и задачи работы. Разработка ЭИП, работающих в электронных системах требует решения следующих проблем:

- создание математических моделей полупроводниковых приборов (ПП), выбор их вида и типа для импульсных режимов электронных систем, определение их рабочих характеристик,
- разработка и внедрение новых электронных схем с использованием современных ПП в системах преобразования,
- разработка и внедрение новых электронных микросхем для управления ПП, включая использование толстопленочной технологии изготовления интегральных схем,
- разработка комплексного и универсального метода математического анализа ЭИП, работающих в системах переменного и постоянного токов,
- разработка и внедрение электронных схем, предназначенных для устранения или ограничения переходных процессов в электрических цепях переменного тока при включении в импульсном режиме,
- проведение экспериментальных исследований разработанных ЭИП в условиях эксплуатации и определение их практической пригодности, а также электромагнитной и электротермической совместимости,
- проведение анализа и внедрение разработок ЭИП и устройств их управления, а также внедрения их в радиоэлектронных системах, промышленной телекоммуникации, приводных системах, электротермии, электроэнергетике, а также в блоках питания электронных систем вычислительной техники и др. с учетом эксплуатационных условий

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Впервые определены зависимости g, c -параметров от характеристик статических и динамических параметров ПП. Разработана теория и новая методика численных расчетов ЭИП, базирующихся на их использовании.

2. Разработан и впервые применен новый метод моделирования ПП, состоящий в замене ПП приборов их динамическими g, c -параметрами, определенными на основании измерений напряжений и токов, с последующими вычислениями для статического (режимы пропускания и блокировки) и динамического (режимы включения и выключения) рабочих диапазонов.

3. Впервые разработан метод анализа электрических цепей с электронными схемами, работающими в импульсном режиме с использованием эквивалентных g, c -параметров ПП и описания электронных схем при помощи систем дифференциальных уравнений состояния, применением для решения уравнений состояния численного метода и профессиональных компьютерных программ.

4. Разработан перспективный метод определения очередности операций в процессе анализа, проектирования и внедрения электронных схем, позволяющий сократить цикл разработки и применения этих схем в системах электроники.

5. Разработан оригинальный метод рационального подбора ПП в преобразователях, состоящий в учете токовых нагрузок, напряжений и потерь мощности, определенных с помощью математического моделирования, направленный на обеспечение безотказной работы, высокого энергетического к.п.д., электромагнитной и электротермической совместимости систем электроники в преобразовании формы тока.

6. Разработана методика электронного контроля напряжения на ПП для практического определения момента включения ключей переменного тока.

7. Для управления электронными импульсными преобразователями, разработан ряд гибридных толстопленочных интегральных микросхем, обеспечивающих повышенную стойкость, надежность, уменьшение габаритов и массы систем преобразования.

8. Впервые применена методика проектирования на основе

профессиональной компьютерной программы PSPICE, для анализа микросхем, выполненных в толсто пленочной технологии интеграции.

Практическая ценность. Возможность практической и эффективной разработки ЭИП, работающих в промышленных системах преобразования была получена как результат:

- анализа электронных систем, содержащих новые методы с использованием компьютерных программ;
- анализа временных диаграмм высокого напряжения в электроэнергетической системе, содержащей электронные ключи, работающие в импульсном режиме;
- анализа положительного эффекта, полученного вследствие применения электронных схем в управлении процессом компенсации реактивной мощности в электрических сетях;
- разработки метода устранения временных состояний при включении электронных ключей в цепях переменного тока, использующего возможность контроля момента включения ключа;
- ограничения переменных составляющих в цепях потребителей постоянного тока, питаемых в импульсном режиме (приводы постоянного тока для станков) вследствие выбора частоты импульсов;
- применения в практических решениях импульсной регулировки и стабилизации температуры, бесконтактного включения электромагнитных клапанов, повышения эффективности процессов фильтрации выхлопов, а также приводных систем и систем питания;
- разработки схемы конвертора, ограничивающего высшие гармоники тока питания системы с ПП;
- применения электронных интегральных микросхем, особенно толсто пленочных интегральных микросхем в управлении полупроводниковыми приборами в ЭИП;
- разработки и промышленного внедрения ЭИП и их устройств управления:
 - инвертора для системы электронных регуляторов привода подачи электродов в электроустановках сверления [EDA-16, EDA-36],

- регуляторов скорости вращения в приводах с батарейным питанием [TPS-678],

- регулятора газового пламени в лакировочных сушилках [EUSP-1],

- системы регулирования пламени в газовых печах центрального отопления [RTGK-1],

- регулятора электрофильтров [EUSE-68/375],

- системы управления батареями статических конденсаторов в промышленной электросети [EUSBK-86],

- регуляторов температуры [ZG-SAT, ZG-AK, ZG-LAF, RP-700].

Разработаны и внедрены в производство 12 оригинальных систем электронных преобразователей и микроэлектронных устройств управления, которые защищены патентами и патентными заявками.

Эксплуатационные испытания подтвердили практическую электромагнитную и электротермическую совместимости внедренных электронных схем, работающих в импульсном режиме.

Разработанные методы и электронные схемы могут использоваться во многих других случаях применения ЭИП.

Положения, выносимые на защиту.

1. Простая и достаточно точная модель для импульсного режима работы ПП, заменяющая их динамическими r, c -параметрами, полученными на основании измерений тока и напряжения.

2. Математическое моделирование систем импульсного преобразования, использующих эквивалентные параметры ПП, описание электрических цепей с помощью системы дифференциальных уравнений состояния и численного метода решения этих уравнений состояния (метод Рунге-Кутты-Фельберга) с помощью пакета профессиональных программ для ЭВМ, позволяющих провести с высокой точностью и за короткое время подбор ПП в электронных схемах, работающих в импульсном режиме.

3. Метод устранения сверхтоков и перенапряжений импульсных преобразователей посредством учета моментов включения и использования гибридных интегральных схем для их управления, обеспечивающий устойчивость и надежность электронных схем при неограниченном числе соединений приборов.

4. Метод ограничения нежелательных переменных составляющих в цепях постоянного тока (пульсации тока нагрузки) в системах преобразования за счет введения полностью управляемых ПП (MOSFET, IGBT), способных работать с частотой переключения до 10-20 кГц при максимальной нагрузке.

5. Сокращенный цикл проектирования через однородный алгоритм решений отдельно для единичных вместе соединенных узлов в большой структуре электронных управляемых микросхем.

6. Метод математического моделирования для оптимального выбора моментов включения полупроводниковых ключей, за счет введения синхронного управления, обеспечивающих исключение возникновения сверхтоков переходных процессов после включения.

7. Новые ЭИП и устройства их управления, применяемые в системах регулирования тока, напряжения, мощности, температуры, скорости и др., обеспечивающие большой к.п.д. ($>0,93$), широкий диапазон частот следования импульсов (50Гц...20кГц) при изменении температуры работы от 218К до 393К, для влажности $>95\%$, с помехами мощности до 700Вт - для единичного ПП и до 20Вт - для устройства управления в номинальных условиях.

Апробация работ. Основные результаты работы докладывались на научных конференциях: "II Krajowa Konferencja Napędu Elektrycznego i Energoelektroniki Kraków-1977", "Vedecka Konference VST Kosice-1977", "III Sympozjum "Mikromaszyny i serwonapedy Warszawa-1982", "IV Krajowa Konferencja Energoelektroniki Napędu Elektrycznego i Trakcji Elektrycznej Warszawa-1984", "Krajowa Konferencja "Gospodarka moca bierna Kraków-1989", "Wissenschaftliche Konferenz-Rationalisierung im Maschinenbau durch Schliessentechnologien Zwickau-1989", "XII Sympozjum "Electromagnetic Phenomena in Nonlinear Circuits Poznan-1991", "Wissenschaftliche Kolloquium TH Zwickau-1991, 1992", "17th Conference and Exhibition of the ISHM, Solina-1993", "Konferenz: 3.Zwickauer Automatisierungsforums, Zwickau-1993", "Konferencja: Modern Control Methods for Power Electronic and Electric Drives Łódź-1993".

Публикации. Результаты проведенной научно-исследовательской работы опубликованы в 48 республиканских и зарубежных научных изданиях, патентах и патентных заявках, а также 30 отчетах о

научно-исследовательских и опытно-конструкторских работах, выполненных по бюджетной и хозяйственной тематике, принятых комиссиями заказчиков и 8 экспертизами.

Объем работы. Диссертация изложена на 295 страницах, включает 172 рисунков и 13 таблиц. Список литературы содержит 274 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

АНАЛИЗ РЕЖИМОВ РАБОТЫ И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ ДЛЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ. В настоящее время электронные импульсные преобразователи могут работать в широком диапазоне преобразуемой мощности от милливатт в цифровых вычислительных системах до мегаватт в больших промышленных системах.

В импульсных преобразователях используются в основном два режима работы полупроводниковых приборов, пропускание и блокирование, в которых потери мощности очень малы по отношению к преобразуемой мощности (небольшое падение напряжения при пропускании, очень малый ток в режиме блокировки). Проблемой во время работы этих преобразователей являются потери мощности, сверхнапряжения и сверхтоки возникающие в режимах переключения. Эти вопросы, среди других, являются предметом исследований в настоящей работе.

В литературе не приводятся точные указания относительно диапазонов мощности для электронных преобразователей. В дальнейшем принято:

- для малой мощности $P < 10$ Вт,
- для средней мощности $10 \text{ Вт} < P < 10 \text{ кВт}$,
- для большой мощности $P > 10 \text{ кВт}$,

где: P обозначает преобразуемую мощность.

Импульсные преобразователи применяются в цифровых микросистемах малой мощности и системах регулирования средней и большой мощности.

К современным полупроводниковым приборам, предназначенным для работы в импульсном режиме в системах преобразования формы тока относятся прежде всего: биполярные транзисторы ВТТ (в том числе биполярные транзисторы в схеме Дарлингтона), полевые МОП-

транзисторы (MOSFET), транзисторы с изолированным затвором IGBT, тиристоры SCR (а тоже выключающие тиристоры GTO).

Временные диаграммы коммутационных процессов в электрических цепях характеризуются скачкообразным изменением импеданса (активного сопротивления) цепи, в результате которого изменяются ток и напряжение. Бесконтактное соединение включается и выключается с помощью полупроводниковых приборов за счет изменения удельного сопротивления определенного фрагмента токоведущего узла, профиль которого не изменяется.

Характеристики соединения электрических цепей для биполярного транзистора при типичных нагрузках (R, RL, RC) изображены на рис.1, как типовой пример для остальных ПП.

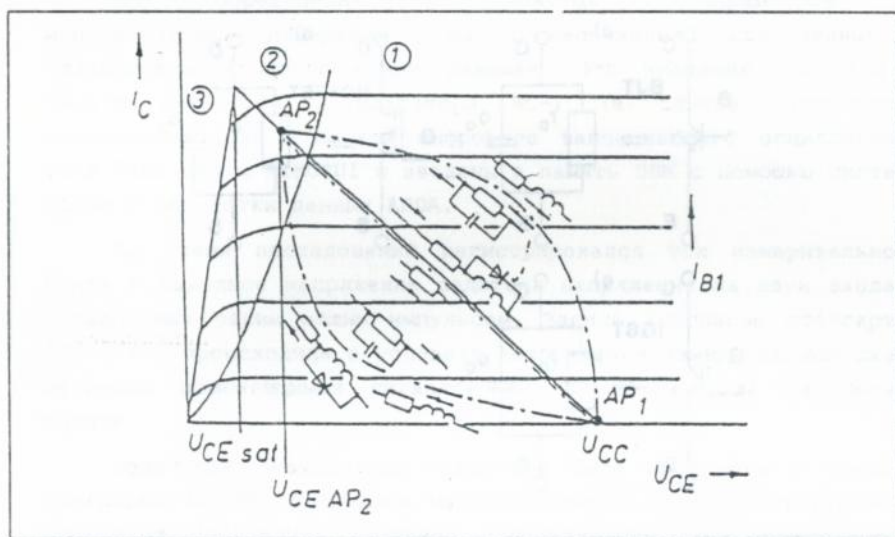


Рис.1. Характеристики включения и выключения электрических цепей с помощью полупроводниковых приборов; 1 - область переключения, 2 - область квазинасыщения, 3 - область устойчивого насыщения.

Двумя стабильными состояниями работы транзистора (или другого ПП) в качестве ключа в импульсном режиме являются AP_1 -блокировка и AP_2 -квазинасыщение.

Динамический режим работы полупроводниковых приборов характеризуют, в свою очередь, временные диаграммы основного тока и напряжения на приборе при включении и выключении.

Динамические режимы могут представляться динамическими сопротивлением и емкостью [7]. Обе эти величины зависят от времени и могут учитываться исключительно внутри интервалов наращивания и спада тока.

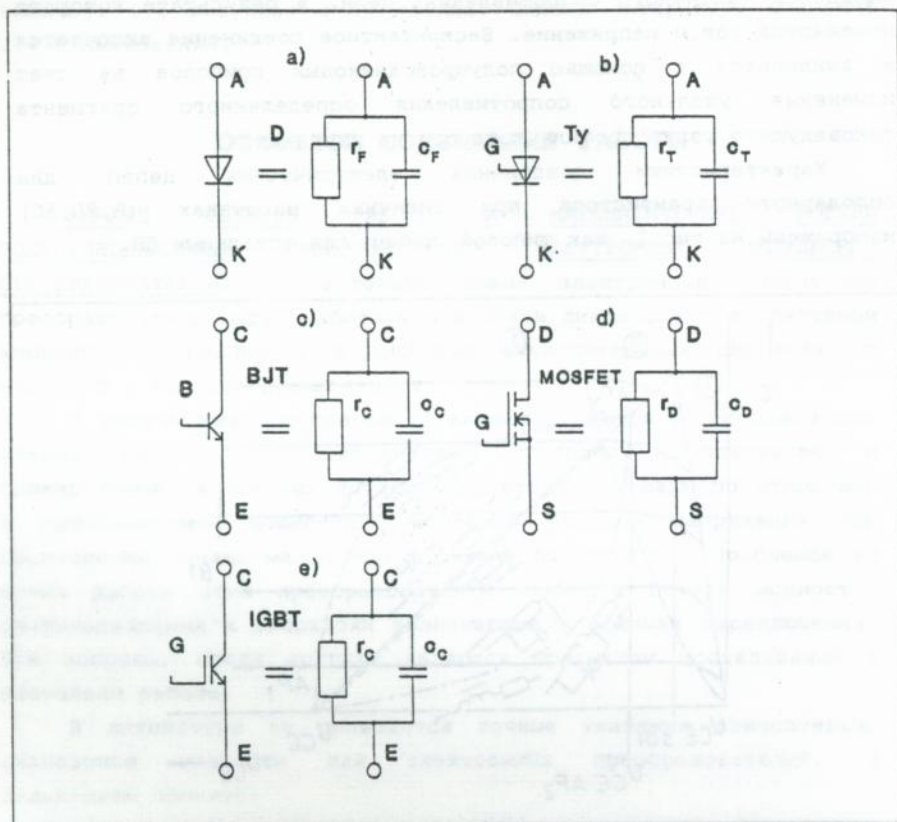


Рис.2. Эквивалентные схемы некоторых полупроводниковых приборов: диода (а), тиристора (б), биполярного транзистора (с), полевого МОП-транзистора (д), биполярного транзистора с изолированным затвором (е).

Предложенные модели, охватывающие режимы работы ПП, представлены на рис.2. На этом рисунке приняты следующие индексы динамической емкости и сопротивления для полупроводниковых приборов согласно международным стандартам IEC:

F - для силовых диодов,

T - для тиристорov,

C - для биполярных транзисторов и транзисторов IGBT,

D - для полевых МОП-транзисторов (MOSFET).

Для исследований с помощью моделей были выбраны полупроводниковые приборы, которые в дальнейшем использовались в практических решениях. Это изделия, изготовленные фирмой LAMINA: диоды D32-40-10, тиристоры T00-4-10, а также фирмой SEMIKRON: биполярные транзисторы (в схеме Дарлингтона) типа SK 50 DAL 100D, полевые МОП-транзисторы (MOSFET) типа SKM 151 и транзисторы IGBT типа SKM 50 GAL 100D.

Рассматриваемые полупроводниковые элементы причисляются к электронным приборам средней мощности.

Для определения эквивалентных гс-параметров ПП использовались измерения тока и напряжения, проведенные в статических и динамических режимах. Эти значения записаны в памяти цифрового регистратора RC-1 (в случае статических параметров) или в памяти цифрового запоминающего осциллографа типа 7101 фирмы KIKUSUI и введены в память ЭВМ с помощью системы сбора и обработки данных ADDA.

Во время исследований регистрировался ток измерительного шунта и выходное напряжение делителя напряжения на двух входах, управляемых одним общим импульсом. Запись (согласно стандартам IEC и PN) происходила в условиях возбуждения измерительной схемы медленно изменяющимся сигналом 50 Гц до момента заполнения памяти.

Обработка результатов измерений была проведена с помощью программы RC-SYM. Программа математического моделирования RC-SYM позволяет определить активное сопротивление r и емкость c в зависимости от значения тока (для статических режимов) и времени (для динамических режимов). В этой программе предположено, что:

- временные диаграммы основных величин (ток, напряжение) полупроводниковых приборов можно представить с помощью непрерывных функций,
- временной интервал измерения можно разделить на n конечных промежутков Δt_n ,
- длина промежутков Δt_n различна и зависит от скорости изменений тока и напряжения.

Использовались следующие математические зависимости, составляющие алгоритм вычислений согласно программе RC-SYM:

$$\Delta t_n = t_{n+1} - t_n,$$

$$\Delta u_n = u_{n+1} - u_n,$$

$$\Delta i_n = I_{n+1} - I_n,$$

$$i_n = \frac{I_{n+1} + I_n}{2},$$

$$u_n = \frac{U_{n+1} + U_n}{2},$$

$$\Delta q_n = i_n \Delta t_n = i_n (t_{n+1} - t_n),$$

$$r_n = \frac{\Delta u_n}{\Delta i_n},$$

$$c_n = \frac{\Delta q_n}{\Delta u_n},$$

$$p_n = \frac{P_{n+1} + P_n}{2},$$

$$W = \sum_n p_n \Delta t_n,$$

$$u_{Ln} = \frac{\Delta i_n}{\Delta t_n},$$

где i_n означает среднее значение тока на промежутке Δt_n , u_n - среднее значение напряжения на промежутке Δt_n , Δq_n - приращение электрического заряда в структуре ПП в промежутке Δt_n , r_n - динамическое значение активного сопротивления ПП в промежутке Δt_n , c_n - динамическое значение эквивалентной емкости ПП в промежутке Δt_n , p_n - среднее значение мощности потерь в ПП в промежутке Δt_n , W - энергия потерь в рассматриваемом интервале времени $t \in (t_p, t_k)$, t_p - начало интервала, t_k - конец интервала, U_L - напряжение (перенапряжение) на индуктивности рассеяния L соединений или других элементов электрической цепи преобразователя.

Длина итерационного промежутка Δt устанавливается в программе автоматически путем последовательного деления этого промежутка пополам. Перед окончательным установлением величины итерационного промежутка проверяется разница между средними значениями тока или напряжения (методом трапеций) для Δt из предыдущего промежутка и для промежутка в 2 раза короче. Процесс определения этого промежутка прекращается тогда, когда:

$$1) [i_n(\Delta t) - i_n(0,5\Delta t)] < 10^{-3} [i_n(\Delta t)] \text{ или}$$

$$2) [i_n(\Delta t) - i_n(0,5\Delta t)] < 1 \text{ мкА},$$

причем Δt принято в программе в пределах:

$$\Delta t_{\max} = (t_k - t_p) / 20,$$

$$\Delta t_{\min} = (t_k - t_p) / 20000,$$

где t_p - начало рассматриваемого временного интервала, t_k - конец этого интервала.

Для каждого шага вычислений в качестве начального значения принималось:

$$\Delta t_0 = (t_k - t_p) / 100.$$

Программа RC-SYM делает возможным прежде всего итеративное вычисление эквивалентных r, c -параметров полупроводниковых приборов, а также всех электрических величин, как на самих приборах, так и в электрических цепях преобразователей, в которых эти приборы работают. Для проведения вычислений дифференциальные уравнения записываются в виде алгебраических разностных уравнений. Основой алгоритма вычислений являются временные диаграммы тока и напряжения ПП, полученные методом "трапеций".

РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОННЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ. Идея разрабатываемого метода построения электронных импульсных преобразователей должна учитывать следующие этапы:

- определение целей использования систем электронных импульсных преобразователей;
- выбор типа полупроводниковых приборов;

- вычисление r, c -параметров модели, предназначенных для применения в ПП;
- анализ электрической цепи, в которой будет работать ПП;
- вычисление значения электрических параметров, влияющих на работу потребителя и на выбор ПП;
- анализ потерь мощности и к.п.д. системы;
- вычисление эксплуатационных характеристик системы преобразования электроэнергии с ПП;
- разработка микросхем, управляющих работой ПП;
- анализ электромагнитной и электротермической совместимости ЭИП и интегральных устройств управления.

Такой алгоритм построения ЭИП обеспечивает правильность выбора схемы соединений, достоверность получения требуемых эксплуатационных параметров и, что особенно важно с точки зрения окончательных результатов, уменьшение количества пробных моделей и связанных с этим вычислений. Предлагаемый метод разработки подтверждают многолетние исследования разработанных автором систем, а также практический опыт их эксплуатации [1...10, 13...24, 26...32, 34, 36, 38, 39, 41...44].

Принципы создания математических моделей ЭИП. Импульсный режим работы ПП заключается в поочередном включении и выключении в определенных ветвях электрической цепи. Такой режим вызывает переходные процессы и может переходить в квазистационарный, если он периодически повторяется. Нелинейный характер ПП отражается на виде математической модели явлений, происходящих в электрических цепях.

Математические модели ЭИП постоянного и переменного токов имеют общие черты, несмотря на различия технического характера. Место ЭИП среди систем преобразования показано на рис.3.

В работе рассматривались случаи питания систем импульсного преобразования постоянного тока с помощью батарей аккумуляторов, выпрямителей с выходным фильтром очень большой емкости, генераторов постоянного тока.

Питание систем переменного тока - это обычно сложные сети низкого напряжения, компенсированные относительно реактивной мощности батареями конденсаторов и синхронных компенсаторов.

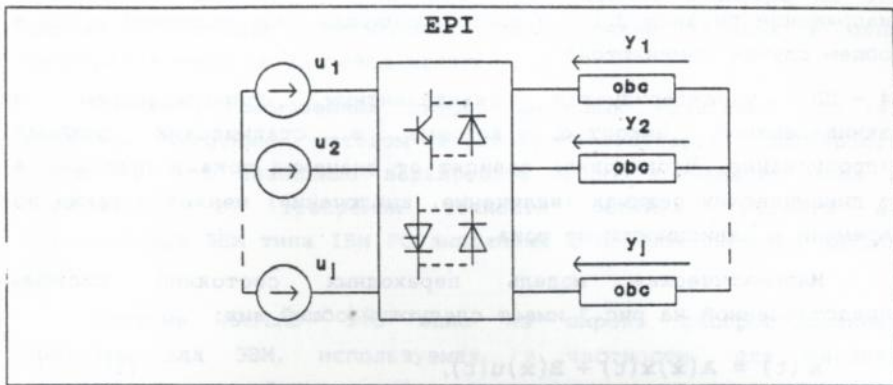


Рис.3. Принципиальная схема электронного преобразователя в электрических системах: где u_1, u_2, \dots, u_n означают мгновенные значения напряжений питания, EPI - электронный импульсный преобразователь (ЭИП), y_1, y_2, \dots, y_n - мгновенные значения выходных величин (напряжение, ток), *обс* - нагрузка.

Перечисленные выше системы питания характеризуются очень большой мощностью короткого замыкания, т.е. небольшим внутренним импедансом (типа RL).

Несмотря на то, что активное сопротивление и индуктивность этих систем весьма малы, их следует учитывать при моделировании электронных импульсных преобразователей. Индуктивность источника питания оказывает существенное влияние на скорость переключения полупроводниковых приборов и является причиной перенапряжений в ЭИП.

Для построения математической модели системы импульсного преобразования (СИП) с помощью ЭИП были приняты следующие предположения:

1 - сеть питания СИП рассматривается как источник напряжения U_s (постоянного или переменного), активное сопротивление R_s и индуктивность L_s , соединенные последовательно;

2 - нагрузка СИП может быть типа: сопротивление R или сопротивление-индуктивность RL или сопротивление-емкость RC или сопротивление-индуктивность с электродвижущей силой вращения RLE в электромашинных системах;

3 - параметры RLC сети и нагрузка независимы от времени; напряжение питания $u_s(t)$ и электродвижущая сила вращения $e_o(t)$ в общем случае изменяются;

4 - ПП характеризуется эквивалентным сопротивлением и эквивалентной емкостью, которые в статических режимах (пропускание, блокировка) зависят от значения тока в приборе, а в динамических режимах (включение, выключение) меняются также во времени в зависимости от тока.

Математическая модель переходных состояний системы представленной на рис.3 имеет следующий общий вид:

$$\dot{\mathbf{x}}'(t) = \mathbf{A}(\mathbf{x})\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}(\mathbf{x})\mathbf{u}(t), \quad (1)$$

где: $\mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}^0$,

$\mathbf{A}(\mathbf{x})$ -матрица состояний (или $\mathbf{A}(\mathbf{u}, \mathbf{x})$), $\mathbf{B}(\mathbf{x})$ -матрица входов, $\mathbf{x}(t)$ -вектор состояний, $\mathbf{u}(t)$ -вектор входных сигналов питания.

Нелинейность системы учитывается элементами матрицы состояний $\mathbf{A}(\mathbf{x})$ и матрицы входа $\mathbf{B}(\mathbf{x})$.

Выходные сигналы системы определяются уравнением выхода:

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}(\mathbf{x})\mathbf{x}(t), \quad (2)$$

где: $\mathbf{C}(\mathbf{x})$ -матрица выходов, $\mathbf{y}(t)$ -вектор выходных сигналов.

Уравнения (1), (2) решались разностным методом с линеаризацией на протяжении очередных временных шагов

$t \in (t_n, t_n + \Delta t_n)$. Временные шаги выбирались таким образом, чтобы импульсы управления всегда начинались с нового временного шага. Значение управления на данном временном шаге не изменялось. Таким образом для n-того временного шага решалась следующая система уравнений:

$$\dot{\mathbf{x}}^{(n)}(t) = \mathbf{A}(\mathbf{x}^{(n)})\mathbf{x}^{(n)}(t) + \mathbf{B}(\mathbf{x}^{(n)})\mathbf{u}^{(n)}, \quad (3)$$

$$\mathbf{y}^{(n)}(t) = \mathbf{C}(\mathbf{x}^{(n)})\mathbf{x}^{(n)}(t), \quad t \in (t_n, t_n + \Delta t_n), \quad (4)$$

для начальных условий: $\mathbf{x}(t_n) = \mathbf{x}_n$,

где: \mathbf{x}_n - конечное значение \mathbf{x} (n-1)-того временного шага.

В импульсном режиме работы электронных преобразователей наблюдаются значительные различия постоянных времени. Большие значения этих постоянных относятся к нагрузке (RL, RC), а

значительно меньше к процессам переключения. Несмотря на это система уравнений, описывающих электрические явления в цепи преобразователя не является жесткой.

Система обыкновенных дифференциальных уравнений (3), (4) решалась численным методом Рунге-Кутты-Фельберга (четвертого порядка), что позволило варьировать длину временного шага в зависимости от требуемой точности решения. Расчеты на персональной ЭВМ типа IBM PC выполнены с помощью пакетов MATLAB [87].

Система MATLAB - это одна из широко распространенных программ для ЭВМ, используемая, в частности, для анализа линейных и нелинейных систем, для которых может быть построена математическая модель, описывающая явления с помощью уравнений состояния, типа $x' = f(x, t)$ [88].

Для принятых ограничений итерационный метод Рунге-Кутты-Фельберга обеспечивает в программе MATLAB точность вычислений с погрешностью меньше чем 0,1% и сходимость при анализе линейных систем.

В проведенных анализах систем с циклически повторяющимся процессом решалась система уравнений состояния (3), (4) методом Рунге-Кутты-Фельберга с автоматическим подбором шага вычислений при нулевых начальных условиях. Эти анализы позволили наблюдать переходный процесс преобразователя и вычислить параметры в установившемся режиме. Для установившегося режима процесс вычислений прекращался, если разница повторяемости вычислений была меньше 0,1% от основного значения (тока или напряжения) или меньше чем 1мкА для тока приемника (или 1мкВ).

Новые, более совершенные версии программы MATLAB, обеспечивают статистический анализ результатов вычислений для принятых допустимых отклонений параметров.

Пример использования математических моделей ЭИП иллюстрирует принцип решения однонаправленного регулятора постоянного тока (рис. 4)

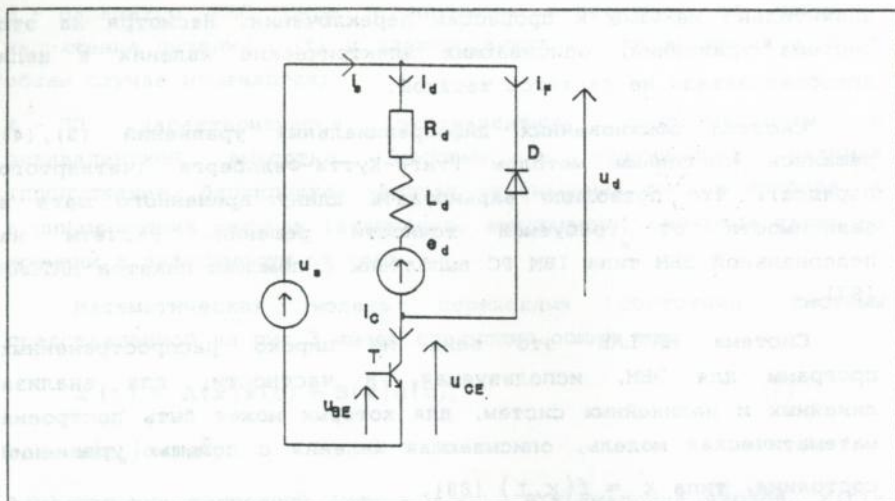


Рис. 4. Структурная схема однонаправленного транзисторного регулятора постоянного тока, работающего в импульсном режиме.

Учитывая принципы моделирования ПП, представленные на рис.5, приведена схема замещения однонаправленного транзисторного регулятора постоянного тока, работающего в импульсном режиме.

Систему, представленную на рис.5, с учетом I-го и II-го законов Кирхгофа можно описать как:

$$u_s - R_s i_s - L_s \dot{i}_s - u_d - L_c \dot{i}'_c - u_{CE} = 0, \quad (5)$$

$$R_d i_d - L_d \dot{i}'_d - e_d - u_d = 0, \quad (6)$$

$$i_{cF} = C_F \dot{u}'_d, \quad (7)$$

$$i_{cC} = C_C \dot{u}'_{CE}, \quad (8)$$

$$u_d = r_F i_{rF}, \quad (9)$$

$$u_{CE} = r_C i_{rC}, \quad (10)$$

$$i_{cC} + i_{rF} = i_d + i_{rF} + i_{cF} = i_c, \quad (11)$$

$$i_c = i_s, \quad (12)$$

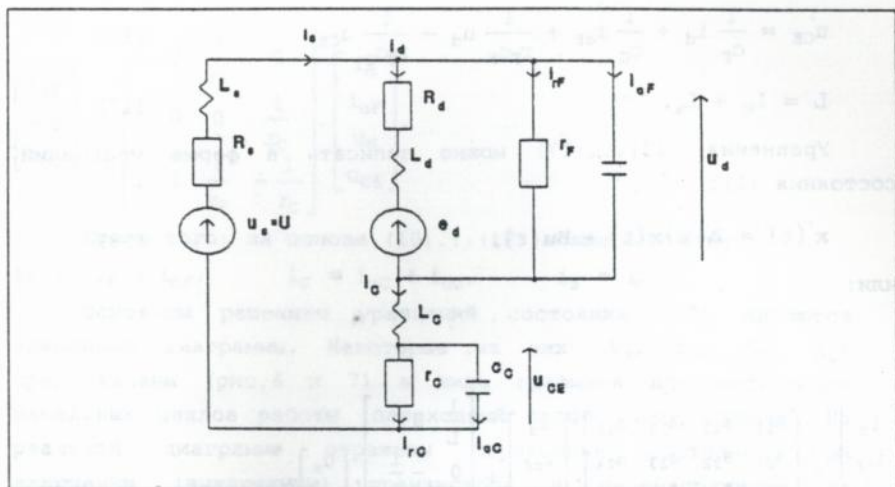


Рис. 5. Схема замещения однонаправленного транзисторного регулятора постоянного тока.

где: u, i - мгновенные значения напряжений и токов, $r_c = r_c(i_c)$ - эквивалентное сопротивление транзистора, $r_F = r_F(i_F)$ - эквивалентное сопротивление диода, L_c - паразитная индуктивность внешних соединений транзистора, L_s - активное сопротивление сети питания постоянного тока, L_s - индуктивность рассеивания сети питания постоянного тока.

Путем несложных преобразований системы уравнений (5)-(12) получим:

$$i'_{cF} = \left(\frac{R_d}{L_d} - \frac{R_s}{L} \right) i_d + \left(\frac{1}{r_F C_F} - \frac{R_s}{L} \right) i_{cF} + \left(\frac{1}{L_d} - \frac{R_d}{L r_F} - \frac{1}{L} \right) u_d +$$

$$- \frac{1}{L} u_{cF} + \frac{1}{L} u_s, \quad (13)$$

$$i'_d = \frac{1}{L_d} [-R_d + u_d - e_d], \quad (14)$$

$$u'_d = \frac{1}{C_F} i_{cF}, \quad (15)$$

$$u_{CE}' = \frac{1}{C_F} i_d + \frac{1}{C_C} i_{CF} + \frac{1}{r_F C_F} u_d - \frac{1}{r_C C_C} u_{CE}, \quad (16)$$

$$L = L_C + L_S. \quad (17)$$

Уравнения (13)...(17) можно записать в форме уравнений состояния (1):

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}(\mathbf{x})\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}u(t), \quad (18)$$

или:

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_d \\ \dot{i}_{CF} \\ \dot{u}_d \\ \dot{u}_{CE} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_{CF} \\ u_d \\ u_{CE} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{L_d} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_s \\ e_d \end{bmatrix},$$

где:

$$a_{11} = -\frac{R_d}{L_d}, a_{12} = 0, a_{13} = \frac{1}{L_d}, a_{14} = 0,$$

$$a_{21} = \frac{R_d}{L_d} - \frac{R_s}{L}, a_{22} = \frac{1}{r_F C_F} - \frac{R_s}{L}, a_{23} = \frac{1}{L_d} - \frac{R_s}{L r_F} - \frac{1}{L}, a_{24} = -\frac{1}{L},$$

$$a_{31} = 0, a_{32} = \frac{1}{C_F} 0, a_{33} = 0, a_{34} = 0,$$

$$a_{41} = \frac{1}{C_F}, a_{42} = \frac{1}{C_C}, a_{43} = \frac{1}{r_F C_F}, a_{44} = \frac{1}{r_C C_C}, \quad \text{где:}$$

$$a_{m,n} = f(i_d, i_{CF}, u_d, u_{CE}); \quad m, n=1, 2, 3, 4,$$

со следующими начальными условиями: $i_s(0^+) = 0, i_d(0^+) = 0, u_d(0^+) = 0, u_{CE}(0^+) = 0,$

Для вычисления выходных значений (i_{rF}, i_{rC}, i_{CC}) , использовано (2) в форме:

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}(\mathbf{x})\mathbf{x}(t), \quad (19),$$

или:

$$\begin{bmatrix} i_{rF} \\ i_{rC} \\ i_{cC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{r_F} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{r_C} \\ 1 & 1 & \frac{1}{r_F} & -\frac{1}{r_C} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_{cF} \\ u_d \\ U_{CE} \end{bmatrix}.$$

Кроме того, на основе (10)...(12) можно описать:

$$i_F = i_{rF} + i_{cF}, \quad i_C = i_{rC} + i_{cC}, \quad i_s = i_C,$$

Основным решением уравнений состояния (18) являются временные диаграммы. Некоторые из них (U_d , i_d , U_{CE} , i_C) представлены (рис. 6 и 7) в виде графиков для нескольких начальных циклов работы (переходный процесс регулятора). На реальной диаграмме отражены переходные состояния при включении (выключении) транзистора и перенапряжения на транзисторе.

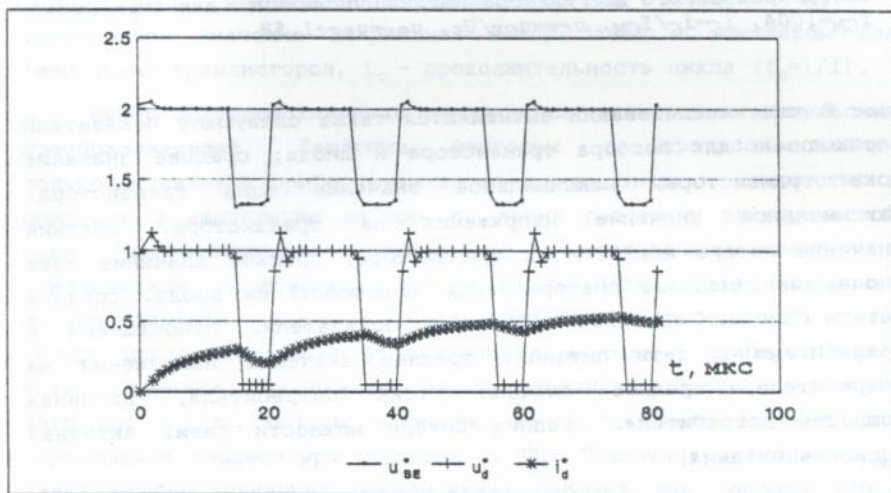


Рис. 6. Временные диаграммы управляющего сигнала (u_{BE}), напряжения на приемнике (u_d) и тока нагрузки (i_d) в схеме однонаправленного регулятора DC, вычисленные для параметров: $U_S=220V$, $I_{CM}=100A$; $i_d=i_d/I_{CM}$, $u_d=u_d/U_S$, $u_{BE}=u_{BE}+1,5B$.

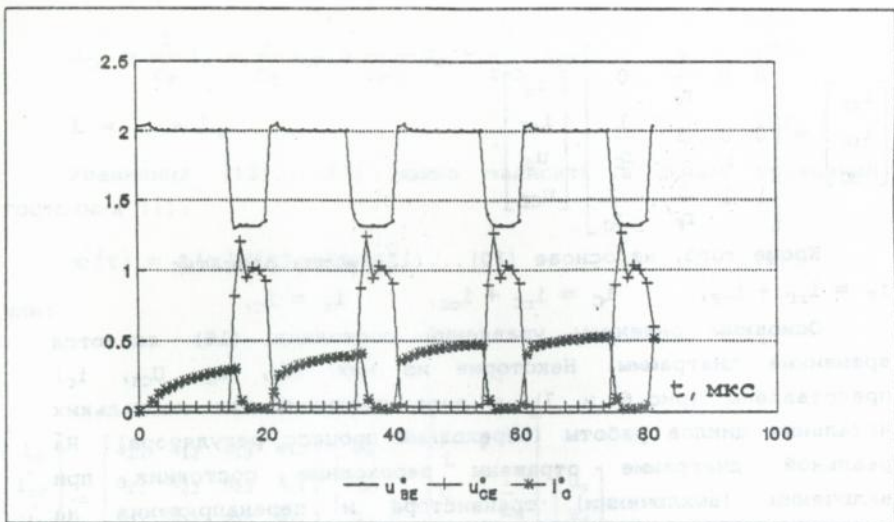


Рис. 7. Временные диаграммы сигнала (u_{BE}), напряжения на транзисторе (u_{CE}) и тока транзистора (i_C) в схеме однонаправленного регулятора DC, вычисленные для $U_S=220V$, $I_{CM}=100A$, $i_C=i_C/I_{CM}$, $u_{CE}=u_{CE}/U_S$, $u_{BE}=u_{BE}+1,5V$.

В ходе исследований вычисляются также следующие показатели необходимые для подбора транзистора и диода: среднее значение тока транзистора, максимальное значение тока транзистора, максимальное значение напряжения на транзисторе, средние значение потерь мощности на транзисторе, среднее значение тока диода, максимальное повторяющееся напряжение на диоде, средние потери диода, а также некоторые показатели, относящиеся к потребителю и сети питания: среднее значение напряжения на потребителе, среднее значение тока потребителя, активная мощность потребителя, средние потери мощности сети, активная мощность питания,

Для системы также вычисляются: значения пульсации тока потребителя ΔI_{dmax} , перенапряжения на транзисторе в зависимости от L_c , общий к.п.д. системы.

При помощи этого анализа разработаны модели других систем постоянного и переменного токов, а именно: реверсивного импульсного регулятора DC (мостовая схема), импульсные однофазовые ключи AC с нагрузками R, RL, RC, импульсные трехфазные ключи AC с нагрузками R, RC, конвертор AC/DC.

Определение потерь мощности в полупроводниковых приборах, работающих в импульсном режиме. Потери мощности, возникающие в полупроводниковых приборах, оказывают существенное влияние на к.п.д. электронных схем, работающих в импульсном режиме в системах преобразования электрической энергии.

Общий вид энергетических потерь в полупроводниковых приборах, работающих в импульсном режиме, представляется следующей зависимостью:

$$W_p = \int_0^{t_c} [u(t)i(t) + u_G(t)i_G(t) + u_{BE}(t)i_B(t)] dt,$$

где: $u(t)$ - мгновенное значение напряжения на полупроводниковом приборе, $i(t)$ - мгновенное значение тока, протекающего через прибор, $u_G(t)$ - мгновенное значение напряжения между затвором и катодом для тиристора, затвором и истоком для полевого МОП-транзистора (MOSFET), или затвором и эмиттером для транзистора IGBT, $i_G(t)$ - мгновенное значение тока на затворе, $u_{BE}(t)$ - мгновенное значение напряжения между базой и эмиттером для биполярных транзисторов, t_c - продолжительность цикла ($t_c = 1/f$).

Выбор полупроводниковых приборов для электронных импульсных преобразователей. Решающим фактором в процессе выбора полупроводниковых приборов являются потери энергии (мощности) в приборах и напряжение на них во время работы в электрической цепи. Вышесказанное относится как к статическим, так и к динамическим состояниям, при которых наблюдаются временные потери мощности и временные перенапряжения на приборах. Значение потерь мощности зависит от значения силы тока в приборе, формы тока, времени протекания (коммутационных) процессов, вида нагрузки и тп. Потери мощности имеют основное влияние для определения температуры контакта T_j ПП. Граничное значение T_{jmax} (каталоговое значение) ограничивает рабочий ток прибора (20). Для импульсного режима работы токовая нагрузочная способность ПП зависит от частоты включений и выключений, увеличивающей общие потери.

$$P_{TOT} = \frac{T_{jmax} - T_a}{R_{th\Gamma}}, \quad (20)$$

где: P_{TOT} - среднее значение потерь мощности, T_{Jmax} - граничное значение температуры контакта, T_a - температура охлаждающего агента, $R_{\text{th}\Sigma}$ - суммарное сопротивление тепловода.

Зависимость токовой нагрузки для исследованных в работе приборов от рабочей частоты показана на рис.8. Этот факт необходимо учитывать при подборе ПП.

Источником перенапряжений в электрических цепях являются пассивные индукционные элементы, особенно индуктивности рассеяния, а также скорости изменений электрических параметров в цепи, особенно крутизна затухания тока. Значение вычисленных коммутационных перенапряжений используется для определения класса напряжения ПП. Этот класс определяется для: транзисторов BJT и IGBT; максимальное напряжение коллектор-эмиттер, транзисторов MOSFET; максимальное напряжение сток-исток, диодов; максимальное повторяющееся обратное напряжение.

Пример полученных результатов на основе математического моделирования представлен на графике рис.9.

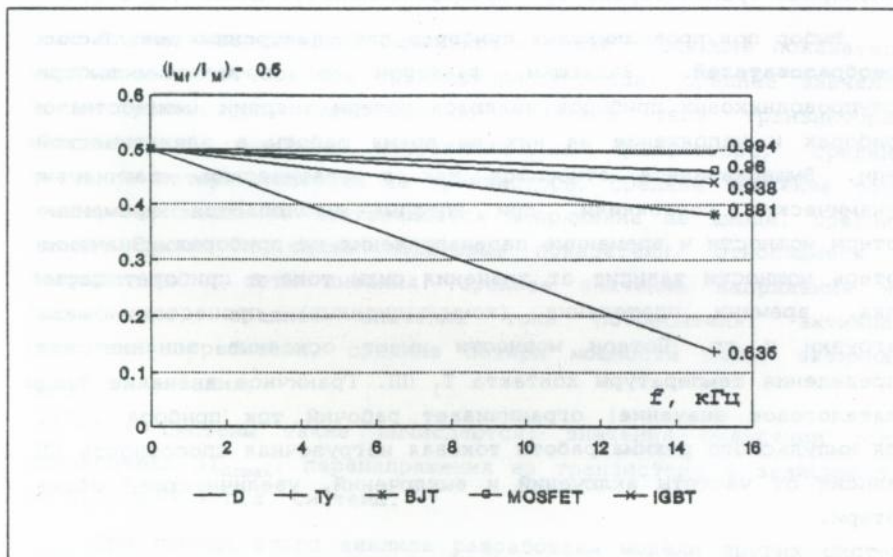


Рис.8. Зависимость токовой нагрузочной способности ПП от рабочей частоты; I_M -номинальный ток, I_{Mf} -ток, зависящий от частоты.

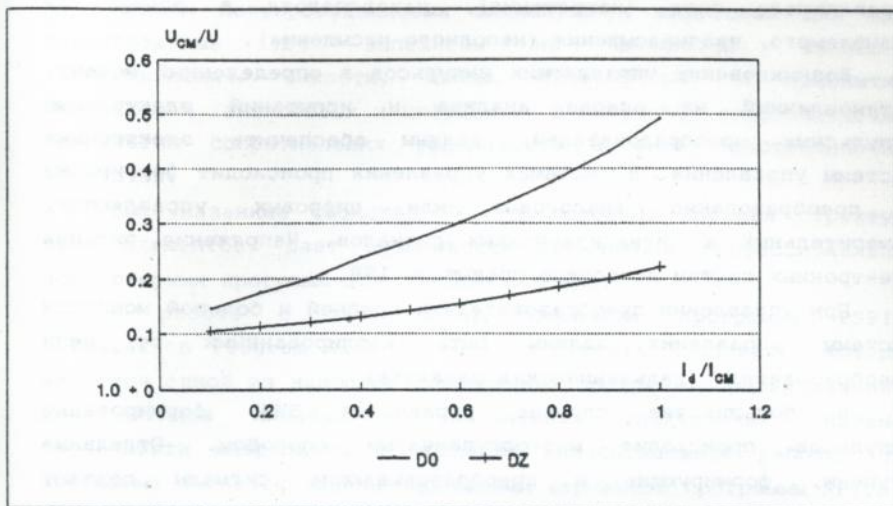


Рис. 9. Зависимость напряжения коллектор-эмиттер транзистора от тока нагрузки однонаправленного транзисторного регулятора постоянного тока, работающего в импульсном режиме $U=220В, I_c=50А$.

РАЗРАБОТКА ИНТЕГРАЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ УПРАВЛЕНИЯ.

Способ включения полупроводниковых приборов в электронных преобразователях зависит от принципа работы этого прибора. Тиристоры включаются при помощи кратковременного импульса с длительностью до 300..500мкс, а время открытого состояния зависит от свойств электрической цепи. Тиристор выключается уменьшением тока ниже значения тока поддержки.

Время открытого состояния тиристора практически не зависит от параметров (амплитуда, длительность) управляющего импульса.

Биполярные плоскостные транзисторы (BJT) управляются током базы, а униполярные транзисторы и биполярные транзисторы с изолированным затвором управляются напряжением затвора. Время открытого состояния транзисторов приблизительно равно длительности управляющего импульса.

Параметры управляющего импульса (амплитуда, скорость нарастания и др.) влияют на основные параметры импульсной работы ПП: время включения, время выключения, потери мощности во время включения и выключения, а также потери мощности во время работы транзисторов. Для уменьшения потерь мощности и времени включения транзисторов процесс выключения должен начинаться от значения

управляющего тока (напряжения), находящегося в зоне, так называемого, квазинасыщения (неполного насыщения).

Возникновение управляющих импульсов в определенный момент, установленный на основе анализа и испытаний электронных импульсных преобразователей, должны обеспечить электронные системы управления. В системах управления происходит формировка и преобразование аналоговых или цифровых управляющих, измерительных и сигнализационных сигналов. Напряжение питания электронных систем не должно превышать 18В.

При управлении преобразователями средней и большой мощности системы управления должны быть изолированными от цепи преобразователя (гальваническая развязка).

В большинстве случаев управления ЭИП, формирование импульсов происходит многоступенчатым способом. Отдельные ступени, формирующие и преобразовывающие сигналы создают электронные сборочные узлы, которые совместно создают блочную структуру. Блочная структура и отдельные функции электронных сборочных узлов дают возможность осуществить независимый анализ этих узлов. При этом анализ можно провести значительно быстрее (меньшее количество элементов) и с учетом влияния большего числа параметров, а также с учетом больших изменений этих параметров. Результаты этого анализа являются очень полезными при проектировании и исследовании окончательного варианта системы управления.

Блочная структура облегчает построение систем управления в интегральной технологии, особенно - в толстопленочной. Каждый электронный сборочный узел можно после анализа разработать и изготовить на одной унифицированной подложке. Это является большим облегчением при проектировании систем управления. Системы управления ЭИП данного типа, например DC или AC имеют аналогичные структуры, то есть они состоят из одинаковых или похожих сборочных узлов.

К наиболее часто встречаемым электронным сборочным узлом в ИУУ можно причислить: генератор линейного пилообразного напряжения, компараторы напряжения, усилители электронных сигналов, транзисторные ключи, синхронизаторы переменного напряжения, мультивибраторы, счетчики импульсов, цифровые дешифраторы, логические элементы OR, (NOR), а также AND (NAND) итд.

Модели полупроводниковых элементов и микросхем для ИУУ. Разработанные ИУУ выполнены на дискретных элементах (сопротивления, емкости, диоды, транзисторы) и монолитных микросхемах (аналоговых и цифровых). В гибридной толстопленочной технологии сопротивления выполняются в виде толстопленочных элементов.

Вышеуказанные свойства ИУУ, а особенно блочная структура этих элементов, дает возможность применения профессиональных компьютерных программ для анализа системы.

В работе с этой целью применена программа PSPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis), которая является одной из наиболее современных программ, предназначенных для анализа линейных и нелинейных электронных систем, в особенности микросхемы в условиях малосигнальной работы. Эта программа является модернизированным вариантом программы SPICE и SPICE 2 [89].

Программа PSPICE выбрана из-за возможности выполнения нелинейного анализа методом постоянного тока, анализа нелинейных переходных процессов и линейного анализа методом переменного тока. Системы, изучаемые при помощи программы PSPICE, могут содержать сопротивления, емкости, индуктивности, взаимные индуктивности, независимые источники тока и напряжения, управляемые источники (линейные и нелинейные), полупроводниковые элементы: диоды, биполярные транзисторы BJT, униполярные МОП-транзисторы, полевые транзисторы, а также ключи, управляемые током или напряжением, транзисторные инверторы, операционные усилители и т.д.

Модели полупроводниковых элементов встроены в программу, что облегчает пользование этой программой. Учитывая то, что модель диода универсальна ее можно применить для плоскостного диода, диода с барьером Шоттки, а также для стабилитронов (зенеровский диод). Модель биполярного транзистора является модифицированным вариантом модели Гуммеля-Пуна, а униполярный транзистор представлен при помощи модели Схихмана-Ходгеса (полевой транзистор JFET) или модели Фромана-Гровега (полевой транзистор MOSFET).

В результате анализа переходных процессов в системе (директива .TRAN) получаем временные характеристики токов и напряжений в принятом диапазоне времени (на основе начальных или конечных условий, определенных во время постоянноточкового

анализа). Во время этого анализа можно также определить коэффициенты Фурье (директива .FOUR) произвольной физической величины (напряжение, ток).

Программа PSPICE принимает все параметры для номинальной температуры 300K. Используя директиву .TEMP, можно вести вычисления для других значений температуры.

Расчеты в программе PSPICE выполняются итерационным методом. Итерационный алгоритм практически безотказный и гарантирует точность результатов. Процесс итерации прекращается в следующих случаях:

1) после достижения при определении токов в нелинейных цепях точности 0,1% или 1nA (1.0E-12A);

2) после достижения при определении узловых потенциалов точности 0,1% или 1мкВ (1.0E-6В).

В обоих случаях в виде ограничения выбираются большее из них.

Значения выше указанных критериев можно изменить при помощи директивы .OPTIONS. Применяемые в программе методы анализа (метод продолжения-sours-stepping method, модифицированный метод узловых потенциалов) подробнее описаны в работе [89].

Последняя версия программы PSPICE обеспечивает возможность анализа допусков методом Монте-Карло, при котором происходит многократное моделирование всей системы при повторяющейся каждый раз случайной модификации избранных параметров ее элементов в пределах допусков. При этом модифицировать все параметры, получая статистический анализ вычисляемых величин [89].

Программа PSPICE основана на индивидуальных моделях элементов. Особенно существенными являются здесь полупроводниковые элементы. Эти модели учитывают практически все параметры, касающиеся данного элемента, причем выступающие в них коэффициенты находятся в библиотеке программы. Можно также определить их на основе литературы или путем лабораторных измерений.

Методы проектирования интегральных устройств управления.
При разработке интегральных устройств управления, предназначенных для работы с электронными импульсными преобразователями, принят следующий порядок:

- 1) определение входных и выходных параметров ИУУ,
- 2) разработка блок-схемы ИУУ,
- 3) разработка электронных функциональных блоков ИУУ,

4) математический анализ отдельных блоков для номинальной температуры 300К,

Номинальная температура, принятая для вычислений вытекает из специфики примененной программы PSPICE, в которой основные значения параметров относятся к температуре 300К

5) предварительная проверка подбора элементов и микросхем в сборочных единицах,

6) анализ влияния температуры на выходные параметры сборочных единиц и всей системы ИУУ,

7) анализ допусков ИУУ, учитывающий влияние разброса параметров элементов на точность величин выходных элементов и всей системы ИУУ,

8) анализ электромагнитной и электротермической совместимости ИУУ,

9) конечный подбор микросхем и дискретных элементов,

10) выбор технологии выполнения ИУУ.

Особенно пригодной является индивидуальная разработка отдельных сборочных единиц перед объединением в одну систему управления. Малое количество элементов в сборочных единицах, по сравнению со всей системой позволяет сократить время испытаний и анализа на всех этапах разработки.

Использование профессиональной компьютерной программы PSPICE дало возможность проведения математического анализа сборочных единиц и всей системы ИУУ. Эта программа очень полезна при анализе допусков проектированных элементов методом Монте-Карло. Следует подчеркнуть факт внедрения впервые в таком масштабе программы PSPICE для разработки электронных систем, выполняемых в толстопленочной гибридной технологии.

Разработка ИУУ при использовании компьютерного анализа.

На этапе разработки ИУУ для ЭИП рассмотрен и проанализован ряд электронных схем. Проведены исследования ряда моделей радиоэлектронных ИУУ: стабилизаторов напряжения (тока), электронных стабилизаторов температуры с питанием, электронных стабилизаторов скорости вращения в системах постоянного тока, электронных ключей переменного тока и др.

Исследованные устройства управления имели блочную структуру. Она позволила провести отдельный анализ электронных узлов, что обеспечило возможность оперативного определения влияния параметров дискретных элементов и микросхем на основные величины для управления ПП в системах ЭИП.

Исследования проведены при многих важных испытаниях, в том числе для анализа: влияния окружающей температуры, допуска параметров элементов и микросхем, выбора типов элементов и др. на прогрессность стабилизации температуры, стабилизации напряжения (или тока), частоты подачи управляемых импульсов в системах преобразования DC, точности выбора моментов включения полупроводниковых ключей, особенно в системах AC и т.п.

Определение влияния допуска на точность параметров основных управляющих величин осуществлялось методом Монте-Карло, при котором можно многократно моделировать все электронные устройства при повторяющейся каждый раз случайной модификации избранных параметров в диапазонах допусков.

Разработанная методика при использовании компьютерной программы PSPICE для проектирования ИУУ, выполненных в толстопленочной технологии, позволяет определить входные и выходные параметры с высокой точностью (<10%), в широком диапазоне температур (218K...393K), а также производить рациональный подбор дискретных элементов и интегральных микросхем.

Все устройства управления имеют единую основную блок-схему, в которой прежде всего применяются: преобразователи выходных величин (напряжения, тока, температуры и т.п.), генератор линейного пилообразного напряжения, компаратор напряжения и усилитель мощности. В этих устройствах изменяются только преобразователи выходных величин в зависимости от предназначения ЗИП.

Типичным принципом решений ИУУ является устройство для импульсного стабилизатора температуры в авиационных контейнерах - ZG-SAT.

Концепция интегральных устройств управления стабилизатором температуры ZG-SAT в виде блок-схемы представлено на рис.10.

В соответствии с концепцией разработки ИУУ система собрана из сборочных единиц с определенными функциями. Принцип работы системы представляют теоретически прогнозируемые временные характеристики (Рис.11). Они вытекают из гарантирования нормальной работы системы импульсного регулятора постоянного тока (Рис.4). Это касается выходных сигналов отдельных блоков ИУУ: PTN-U1 (рис.12a) и GNP-U2 (рис.12b). Температура T1 и T2 подобрана из диапазона температур, стабилизированных в контейнере.

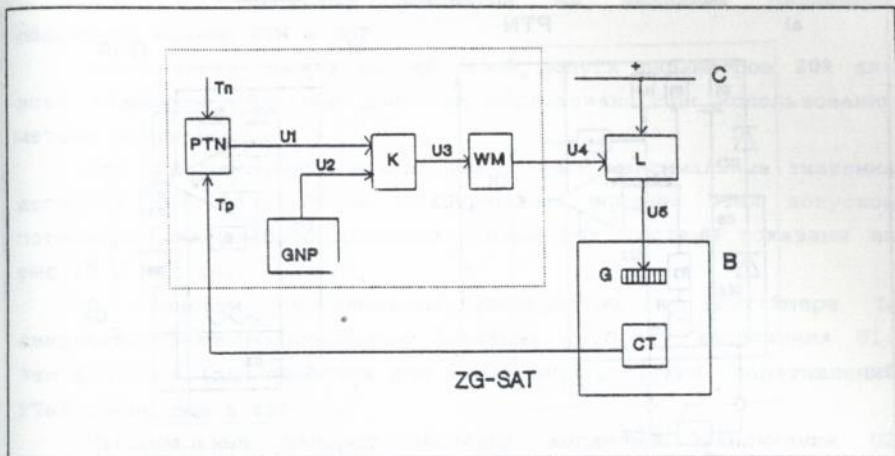


Рис.10. Блок-схема системы стабилизации температуры в авиационных контейнерах ZG-SAT. (Штриховой линией обозначено ИУУ): PTN-преобразователь температуры, GNP-генератор линейного пилообразного напряжения, K-компаратор напряжения, WM-усилитель мощности, CT-датчик температуры, L-ключ импульсного регулятора DC, G-нагреватель, B-контейнер (камера нагревателя), C-питание.

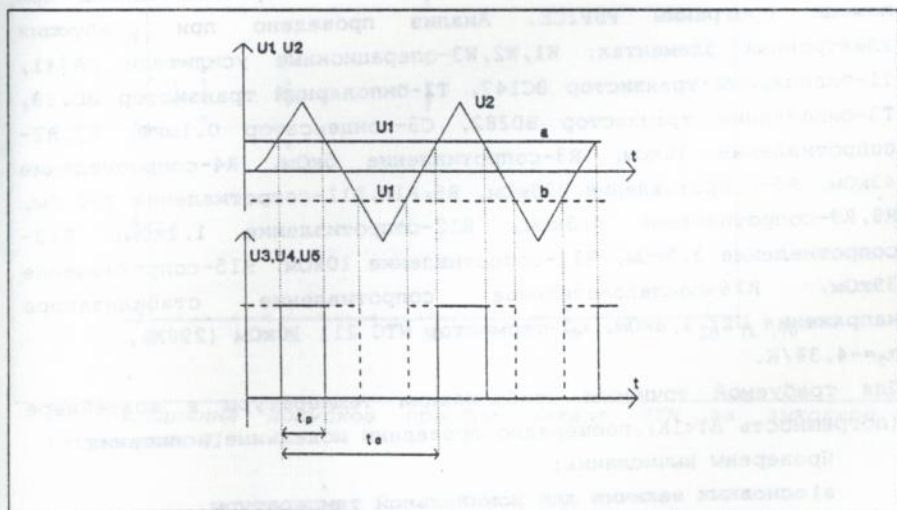


Рис.11. Типичные временные диаграммы для системы, представленной на рис.10; а) напряжение U_1 соответствующие температуре T_1 , б) напряжение U_2 соответствующие температуре T_2 .

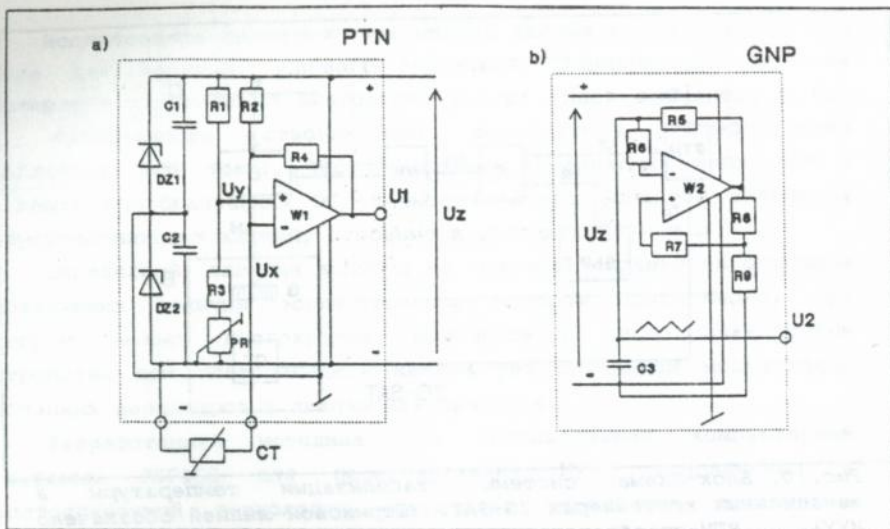


Рис.12. Структурные схемы: а) преобразователя температуры PTN, б) генератора линейного напряжения пилообразного GNP.

Отдельные сборочные единицы ИУУ подлежали моделированному анализу, основанному на схемах замещения сборочных единиц при помощи программы PSPICE. Анализ проведено при следующих электронных элементах: W1, W2, W3-операционные усилители $\mu A741$, T1-биполярный транзистор BC147, T2-биполярный транзистор BD139, T3-биполярный транзистор BD282, C3-конденсатор 0.1мкФ, R1, R2-сопротивление 10кОм, R3-сопротивление 5кОм, R4-сопротивление 43кОм, R5-сопротивление 200кОм, R6, R10, R11-сопротивление 200 Ом, R8, R9-сопротивление 4,3кОм, R12-сопротивление 1,2кОм, R13-сопротивление 3,9кОм, R14-сопротивление 10кОм, R15-сопротивление 39кОм, R16-последовательное сопротивление стабилизатора напряжения U_z ; 1,8кОм, CT-термистор NTC 211 10кОм (298K), $\alpha_T = -4,3\%/K$.

Для требуемой точности стабилизации температуры в контейнере (погрешность $\Delta T < 1K$), поочередно проведены модельные испытания.

Проверены вычисления:

- а) основных величин для номинальной температуры,
- б) влияния температуры датчика CT на коэффициент заполнения импульса,
- в) влияния разности окружающей температуры контейнера T_o и стабилизированной температуры T_s на коэффициент заполнения импульса D в случае температуры внутри контейнера $T_w = T_s$,

d) влияния допусков элементов на выходные параметры сборочных единиц PTN и GNP.

При анализе принят максимальный допуск параметров 20% для всех элементов. Влияние допусков исследовано при использовании метода Монте-Карло.

Для моделированных вычислений приняты максимальные значения допусков 20%, 10%, 5%, 2% и 1%. Принципы влияния этих допусков параметров на разброс основных параметров системы показаны на рис.13 и рис.14.

О точности стабилизации температуры в контейнере T_w свидетельствуют максимальные значения разброса напряжения U_1 . Эти значения (для принятых при вычислении допусков сопротивлений PTN) приведены в табл.1.

Максимальный разброс значений амплитуды напряжения U_2 преобразователя GNP представлен в табл.2.

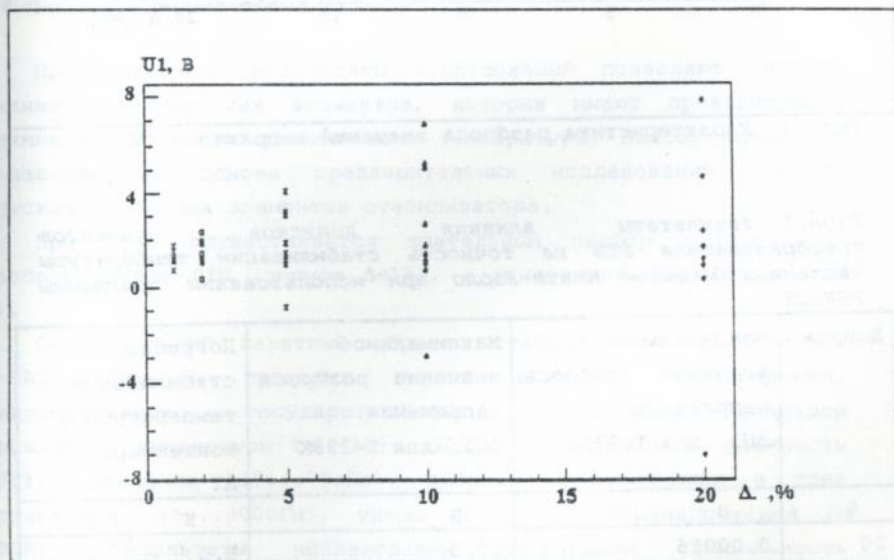


Рис.13. Влияние допусков преобразователя PTN на выходное напряжение U_1 .

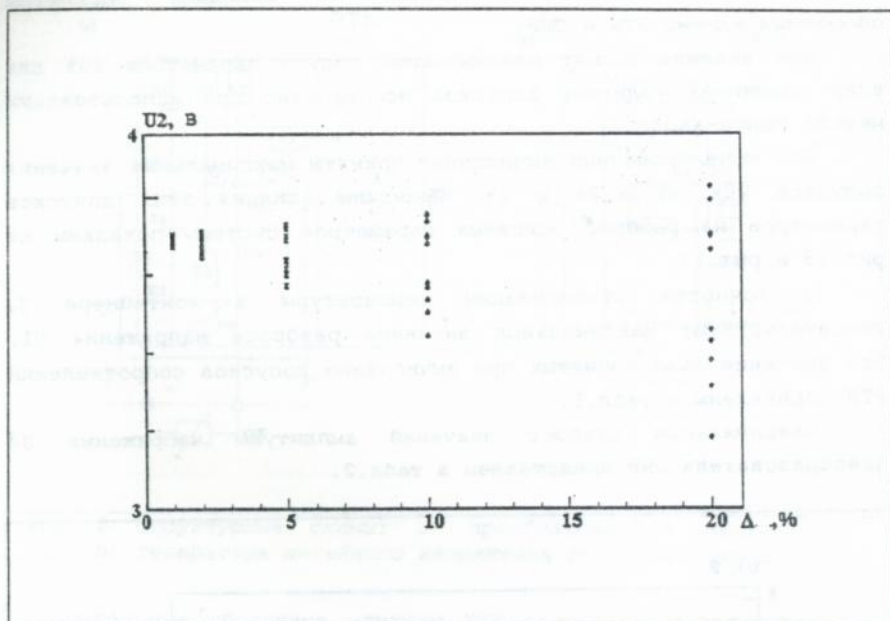


Рис.14. Характеристика разброса значений напряжения U_2

Табл.1. Результаты влияния допусков элементов преобразователя PTN на точность стабилизации температуры численным методом Монте-Карло при использовании программы PSPICE.

Допуск	Максимальное значение разброса напряжения ΔU_1 , для T=273K	Максимальное значение разброса напряжения ΔU_1 , для T=298K	Погрешность стабилизации температуры в контейнере ΔT
%	В	В	К
20	0,00016	10,5	6,3
10	0,0001	10,0	6,0
5	0,00007	4,9	3,7
2	0,00004	2,0	1,5
1	0,000008	1,0	0,75

Номинальное значение пилообразного напряжения: $\pm 4В$,

Установленная температура: 298К.

Табл. 2. Результаты анализа влияния допусков элементов GNP на точность стабилизации температуры контейнера.

Допуск Δ	Максимальное значение разброса напряжения ΔU_2 273K	Максимальное значение разброса напряжения ΔU_2 298K	Погрешность стабилизации температуры в контейнере ΔT 273K	Погрешность стабилизации температуры в контейнере ΔT 298K
%	В	В	К	К
20	0,7	1,1 *	0,49	0,82
10	0,6	1,0	0,45	0,75
5	0,2	0,6	0,15	0,45
2	0,2	0,5	0,15	0,37
1	0,2	0,5	0,15	0,37

Номинальное значение амплитуды напряжения U_2 : 4В,
Температура стабилизации 298К.

Представленные результаты исследований позволяют оценить влияние допусков тех элементов, которые имеют превалярующее влияние на точность стабилизации температуры. Подбор элементов произведен на основе предварительных исследований влияния допусков отдельных элементов стабилизатора.

При этом осуществляется тщательный подбор допусков: в преобразователе PTN (допуск $\Delta < 1\%$), в генераторе GNP (допуск $\Delta < 2\%$).

Окончательный пакетный образец стабилизатора температуры ZG-SAT (Рис.15) проходил полный комплекс исследований, предусмотренных государственными стандартами, - диапазон окружающей температуры T_0 (218...303К), относительная влажность ($> 95\%$), давление (19...70кПа), вибрация механическая в трех направлениях (5...3000Гц), удары (6...15g), перенапряжения ($< 1000В$). Результаты исследования подтвердили правильность разработанной методики расчета.

Проведены исследования разработанных и внедренных систем управления импульсных преобразователей, а именно: электронных регуляторов и стабилизаторов температуры ZG-AK и ZG-LAF, электронной системы синхронного включения ключей переменного тока UW, электронного командоконтроллера RTGK-1, электронного импульсного регулятора скорости TPS-675, электронного импульсного источника DC RI-5, электронного стабилизатора температуры RP-700, электронного регулятора температуры EUSP-1,

электронной системы управления батареями конденсаторов EUSBK-86, электронного командоконтроллера EUSE-86/375, электронной системы защиты 3-фазных потребителей АС от неполнофазной работы HR-050.

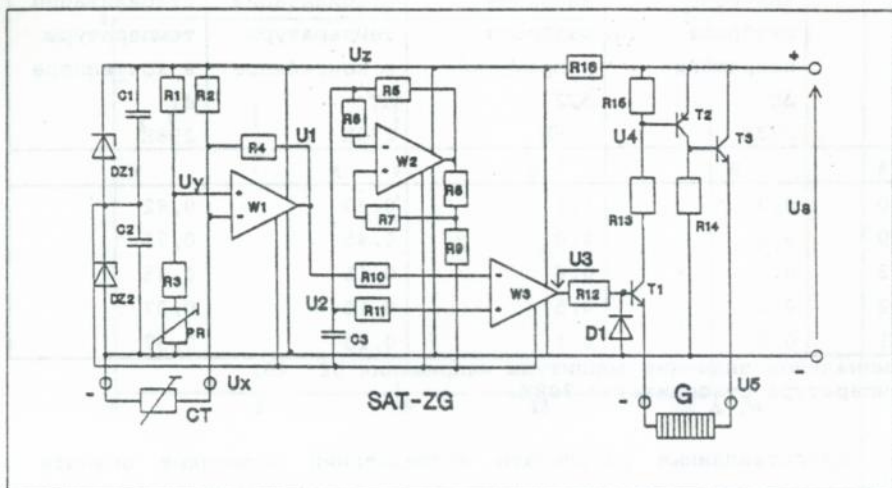


Рис.15. Окончательный вариант стабилизатора температуры SAT

ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАЗРАБОТАННЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ И ИНТЕГРАЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ ИХ УПРАВЛЕНИЯ.

Подтверждение внедрений в промышленности представлено в приложении к настоящей диссертации.

Внедрение результатов исследований электронных импульсных преобразователей и управляющих микросхем в системах электроники позволило построить различные спецсистемы.

В табл.3 приведена информация о внедренных ЭИП и их ИУУ.

Каждый отдельный случай применения электронных систем требовал их разработки с точки зрения обеспечения энергетического к.п.д, прочности, надежности, уменьшения размеров и массы, электромагнитной и электротермической совместимости, а многих также с точки зрения автоматической регулировки, стабилизации и интеграции методом толсто пленочной гибридной технологии. Это показано на примерах (табл.3) разработанных микросхем управления для электронных импульсных систем.

Табл. 3. Перечень основных разработанных ЭИП и их ИУУ.

Название внедренной схемы (устройства)	Тип [заводской код]	Предприятие внедрения *)	N патента РП или патентной заявки. [N в списке литературы]
Электронный импульсный регулятор	TPS-675	Авиазавод WSK, г.Мелец	[15, 23, 217]
Электронный реверсивный импульсный регулятор расположения электродов искровой обработки.	EDA-16 EDA-36	Металлургический завод LFS, г. Ланьцут	Pat. 136607 Pat. 139517 [35, 37, 49, 60]
Электронный стабилизатор температуры	ZG-SAT ZG-AK ZG-LAF	WSK, г.Мелец IL, г.Варшава WAT, г.Варшава	Pat. 158404, P-278214 [14, 21, 41, 44, 63, 65, 67]
Электронный стабилизатор постоянного напряжения	RI-5	P.Rz. г.Жешув	[27]
Электронный стабилизатор температуры	RP-700	ZLW "Polam", г.Жешув	[6, 50, 55]
Электронный контроллер электрофильтров	EUSE-68/ 375	KiZPS "Siarkopol" г.Тарнобжег	Pat.130739 [5, 7, 33, 34, 48]
Электронный стабилизатор температуры	EUSP-1	SFA "Autosan" г.Санок	Pat.147189 [4, 38, 56, 61]
Электронная система управления батареями конденсаторов	EUSBK-86	KiZPS "Siarkopol" г.Тарнобжег	Pat.151486 [13, 19, 20, 39, 54, 57, 58, 66]
Электронная система защиты трехфазных приемников от неполнофазной работы	HR-050	HYBRES г.Жешув	P.283553 [26, 43]
Электронный контроллер АС	RTGK-1 [HR045]	HYBRES г.Жешув	P-279160 [42]

*) Полные названия предприятий указанных в табл.3:

WAT (Военная техническая академия), WSK (Завод транспортного оборудования), LFS (Металлургический завод), IL (Институт авиации), P.Rz. (Жешувский политехнический институт), ZLW (Завод газоразрядных ламп), KiZPS (Серный комбинат), SFA (Автобусный завод), HYBRES (Предприятие по внедрениям новой электронной техники).

Представленные методы анализа электрических систем позволили разработать ряд ЭИП с их ИУУ. Эти системы характеризуются высоким энергетическим к.п.д., высокой надежностью, прочностью, электромагнитной и электротермической совместимостью, а также, во многих случаях, уменьшенными размерами. Они полностью приспособлены к применению в системах автоматического регулирования. Для получения вышеупомянутых свойств электронные силовые системы должны:

- импульсно управляться с определенной частотой, обеспечивая синхронную работу в системах переменного тока,
- обладать такими запасами значений эксплуатационных параметров (напряжение, ток, мощность), чтобы не вышли из строя во время эксплуатации.

Испытания подтвердили высокую эффективность примененных методов проектирования, хорошие свойства и эксплуатационные параметры, о чем свидетельствуют акты внедрений и полученные патенты [15, 34, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 46, 50, 55, 60].

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. На базе многочисленных экспериментов разработана теория и новая универсальная методика численных расчетов электронных импульсных преобразователей, базирующихся на использовании динамических r, c - параметров эквивалентных схем полупроводниковых приборов (диодов, биполярных и униполярных транзисторов, тиристоров).
2. Созданы новые модели и разработаны методы расчета электронных преобразователей в системах: малой, средней и большой мощности нагрузки с большим к.п.д. $>0,93$; частотой следования импульсов в диапазоне $50\text{Гц} \dots 20\text{кГц}$; напряжения питания $5\text{В} \dots 220\text{В}$, безотказностью $\lambda=1.0\text{E}-6\text{с}$ могут быть использованы при: изменениях температуры от 218К до 393К ; влажности $<95\%$; давления в пределах $19 \dots 70\text{кПа}$; механических воздействиях (при произвольном напряжении) с частотой $5 \dots 3000\text{Гц}$, давлении силой $60 \dots 150\text{мН}$ при синусоидальной форме волны, и электрических воздействиях перегрузок до 1000В с помехами

мощностью до 700Вт - для ПП и до 20Вт - для систем управления.

3. Для сокращения цикла разработки и внедрения электронных импульсных преобразователей и микроэлектронных устройств управления предложены новые модели, обеспечивающие возможность компьютерного расчета основных параметров: тока, напряжения, нагрузочной мощности, потерь и др. (к примеру время разработки преобразователя DC/DC составляет 0,5 часа с момента введения параметров в компьютер).
4. Для обеспечения эффективности импульсных электронных преобразователей с к.п.д., большим чем 0.93 и сверхмощными токами нагрузки, достигающими 1,2 значения амплитуды номинального тока предложены модели и методы расчета их параметров (частоты и скважности следования импульсов, синхронизации и т.п.).
5. Установлено, что применение современных управляемых полупроводниковых приборов (MOSFET, IGBT), которые выполнены в виде изолированных блоков многоэлементных интегральных схем понижает паразитные индуктивности соединений в схемах ($L < 1 \text{ мкГн}$), что, в свою очередь, сводит к минимуму значение скачка напряжения в цепях при выключении приборов. Показано, что применение блоков MOSFET и IGBT уменьшает перенапряжение с $1,9U_{\text{мн}}$ до $1,25U_{\text{мн}}$, где $U_{\text{мн}}$ - амплитуда номинального напряжения питания.
6. Проведенные исследования микроэлектронных схем управления на основе тостопленочной технологии показывают, что ограничение числа переменных в системах постоянного тока ($< 0,05I_N$), ограничения градиента тока при выключении питания ($di/dt < 10 \text{ А / мкс}$) и сверхтоков при включении питания схем RC ($< 1,2I_N$ при соответствующей синхронизации), а также синусоидальная форма тока в схемах переменного напряжения, обеспечивают минимальные паразитные связи между импульсным электронным преобразователем и его управляющим устройством - (I_N - номинальное значение тока нагрузки).
7. Разработанная методика расчета электронных импульсных преобразователей и их управляющих устройств обеспечивает высокую корреляцию между расчетными и экспериментальными

параметрами приборов, что подтверждает ее высокую точность. Прогрешность расчетов основных величин, таких как значение силы тока, напряжения, потери мощности, к.п.д., скважность, не превышает 10% номинального значения.

8. Блочная структура электронных управляемых систем, которая составляет систему соответствующим образом подобранных и соединенных между собой электронных узлов, таких как генераторы, компараторы, усилители и т.п., позволила разработать однородный алгоритм решений, для каждого единичного узла. При малом числе элементов (до 20 штук) в узлах алгоритм является простым и дает возможность быстрого определения влияния модификации схемы (время решений компьютера РС 386 DX - <5мин.) а также учитывается влияние большого числа параметров.
9. Для проектирования электронных устройств управления, выполненных с помощью толстопленочной гибридной технологии, используются разработанные методики однородных элементных моделей, предусмотренных в профессиональной компьютерной программе PSPICE, которая обеспечивает возможность определения с большой точностью ($\pm 10\%$) входных и выходных параметров (амплитуда управляющего сигнала, длительность и градиент сигнала, и т.п.), при этом учитывается влияние теплообмена в диапазоне 218К...393К и уменьшение потерь в электронном устройстве управления.
10. Внедрение результатов исследований электронных импульсных преобразователей и управляющих микросхем в системах электроники позволило построить различные спецсистемы, защищенные патентами, предназначенные для работы в: управлении пламенем газовых печей центрального отопления (RTGK-1), батарейных системах приводов постоянного тока (TPS-675), системах электроискровой обработки (EDA-16, EDA-36), регуляции и стабилизации температуры в авиационных контейнерах (ZG-SAT, ZG-AK, ZG-LAF), питании больших электронных систем (RI-5), регулировки и стабилизации температуры в промышленных печах сопротивления (RP-700), управлении электрофильтров (EUSE-68/375), управлении газовыми горелками в сушильных камерах (EUSP-1), системе компенсации реактивной энергии электрической сети (EUSBK-86), защите трехфазных нагрузок перед неполнофазной работой (HR-050).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В
СЛЕДУЮЩИХ СТАТЬЯХ, ПАТЕНТАХ, ОТЧЕТАХ НАУЧНО-
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ И ОПЫТНО-КОНСТРУКТОРСКИХ РАБОТ:

1. Buczek K.: Mechanizm przewodzenia tyrystorowych, trójfazowych sterowników prądu przemiennego. Przegląd Elektrotechniczny, nr 5, 1975, s.206-210
2. Buczek K.: Układ sterowania falowników tyrystorowych niezależnych sterowanych sekwencyjnie. Przegląd Elektrotechniczny, 12 1980, s.522-524
3. Buczek K.: Metoda analizy układów tyrystorowych wysokiej częstotliwości na przykładzie falownika wielotaktowego. Rozprawy Elektrotechniczne, z.I/II, 1983, s.185-200
4. Buczek K.: Elektroniczny przekaznik opóźniający. Wiadomości Elektrotechniczne, 17-18, 1983, s.480-481
5. Buczek K., Knott M., Kowal-Gąska E.: Tyrystorowy układ sterowania elektrofiltrów. Przegląd Elektrotechniczny, 2, 1983, s.69-70
6. Buczek K., Knott M., Rząsa J.:Regulacja temperatury za pomocą łączników tyrystorowych w piecach firmy Tungfram do wytwarzania świetlówek. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, Zesz.2, 1984, s.77-81
7. Buczek K., Knott M., Kowal-Gąska E.:Charakterystyki sterowania elektrofiltrów zasilanych z tyrystorowych przekształtników prądu przemiennego. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, nr 1, 1985, s.13-22
8. Buczek K.: Układ zasilania zabezpieczeń zwarciovych w sieci prądu stałego stacji elektroenergetycznych. Wiadomości Elektrotechniczne, 13-14, 1985, s.320-321
9. Buczek K., Kostka J.: Elektroniczny układ sterowania płomieniem w suszarkach gazowych. Pomiary Automatyka Kontrola, 4, 1986, s.87-88
10. Buczek K.: Energoelektroniczny układ przełączniaka gwiazda-trójkąt do silnika indukcyjnego, pracującego przy zmiennym obciążeniu. Elektronizacja, 1, 1986, s. 6-8
11. Buczek K., Ziemiański W.: Graficzna metoda oceny zawartości wyższych harmoniczných prądu fázowego, trójfazowego sterownika mocy. Wyd.Ucz. Politechniki Rzeszowskiej, Rozprawy 4, 1986, s.47-56
12. Buczek K., Ziemiański W.: Regulacja prędkości silnika asynchronicznego pierścieniowego sterownikiem tyrystorowo-diodowym w obwodzie wirnika. Wyd. Politechniki Rzeszowskiej, Rozprawy 4, 1986, s.16-21
13. Buczek K.: Układ sterowania łącznikami energoelektronicznymi łączącymi baterie kondensatorów statycznych do kompensacji mocy biernej. Przegląd Elektrotechniczny, 11, 1988, s.337-338

14. Buczek K., Kalita W, Zajac K. i inni.: Impulsowa stabilizacja temperatury w zasobnikach osprzętu lotniczego. (artykuł oddany do druku w Zeszytach Naukowych Politechniki Rzeszowskiej 1992), 12s
15. Buczek K., Schulze M.: Zastosowanie regulatora impulsowego typu TPS-687 do napędów z zasilaniem bateryjnym. Wiadomości Elektrotechniczne, 8, 1992, s.307-308
16. Buczek K., Lewicki J.: Niektóre problemy pracy tyrystorowego wielotaktowego falownika wysokiej częstotliwości, współpracującego z odbiornikiem RL. II Krajowa Konferencja Napędu Elektrycznego i Energoelektroniki, Kraków, 1977, s.1-11.
17. Buczek K., Lewicki J.: Inwertor tyrystorowy wielotaktowy przy pracy w wysokich częstotliwościach. Vedecka Konference VST Kosice, 1977, s.40-47
18. Buczek K., Załucki W.: Zastosowanie do napędu odkurzacza silnika indukcyjnego zasilanego z przekształtnika tyrystorowego. III Sympozjum: Mikromaszyny i serwonapedy, Biuletyn Instytutu MERA - PIAP 5-6/94-95, 1982, s.105-113
19. Buczek K., Ziemiański W.: Kompensacja mocy biernej w sieciach niskiego napięcia za pomocą baterii kondensatorów sterowanych łącznikami tyrystorowymi. III Krajowa Konferencja Energoelektroniki Napędu Elektrycznego i Trakcji Elektrycznej, Warszawa 8-11.04.1984, s.229-232
20. Buczek K., Wilk K.: Mikroprocesorowy układ energoelektroniczny do kompensacji mocy biernej w sieciach przemysłowych. konferencja: Gospodarka mocą bierną. Budowa i eksploatacja kondensatorów energetycznych i energoelektronicznych. Kraków 24-25.11. 1989, s.195-199
21. Buczek K., Kalita W.: Temperaturimpulsregler im Behaltern von Verkehrsfahrzeugen. Wissenschaftliche Konferenz- Rationalisierung im Maschinenbau durch Schlusstechnologien, Zwickau, November, 1989, s.211-215
22. Buczek K.: Small power PWM-inverters supply system analysis. XII Sympozjum "Electromagnetic Phenomena in Nonlinear Circuits" Poznań, 16-18 October 1991, s.120-125
23. Buczek K.: Regulator impulsowy prądu stałego do napędów bateryjnych z wykorzystaniem tranzystorów mocy MOSFET. Wiss. Kolloquium TH Zwickau, Januar, 1991, s.14-19
24. Buczek K.: Kompensation hoeherer Harmonischer im Netz. Wiss.Kolloquium TH Zwickau, November, 1991, s.76-84
25. Buczek K.: Transistorumrichter zur Formierung sinusfoermiger Netzstroeme. Wiss. Kolloquium Hochschule fuer Technik und Wirtschaft, Zwickau, November, 1992, s.45-56
26. Buczek K., Kalita W., Zajac K.: Electronic thick-film system for protection of electric equipment against asymetrical supply. 17th Conference and Exhibition of the ISHM, Solina, 15-18 september 1993, s.48-56
27. Buczek K., Schulze M.: Der Einsatz der Pulssteller zur Steuerung von Gleichstrom-Antrieben. Konferencja "3. Zwickauer Automatisierungsforums", Zwickau, 12. October 1993, s.15-18
28. Buczek K.: Tranzistornyj konvertor s sinusoidalnym vhodnym tokom. Lvov, 1993, 16s

29. Buczek K.: O primenienii poluprovodnikovyh priborov silovoj elektroniki v sistemah preobrazovania elektroenergii. Lvov, 1993, 22s

30 Buczek K.: Wpływ diod zintegrowanych na przepięcia w tranzystorowych układach mocy. Konferencja: "Modern Control Methods for Power Electronic and Electric Drives", Łódź-Dobieszkowo, r 1993, s.340-347

31 Buczek K.: Simulation models circuits with power transistors of pulse operation type. XIII Sympozjum: "Zjawiska Elektromagnetyczne w Obwodach Nieliniowych, 25-28 maja 1994, Poznań, s.211-220

32 Buczek K., i inni: Elektroniczne układy impulsowe w systemach przetwarzania energii elektrycznej.(praca monograficzna -zgłoszona do druku w Wydawnictwie Politechniki Rzeszowskiej, wrzesień 1994, 120s

33. Stabilizator układu wyzwalania bramkowego. Pat. nr 133839, UP RP, 1986 (K. Buczek, B. Misiewicz)

34. Elektroniczny układ sterowania elektrofiltrów. Pat. nr 130799, UP RP, 1986 (K. Buczek, M. Knott)

35. Układ elektronicznego przekaźnika czasowego. Pat. nr 136607, UP RP, 1987 (K. Buczek, M. Knott)

36. Układ sygnalizacji zadziałania zabezpieczeń w sieci prądu stałego stacji elektroenergetycznych., Pat. nr 137853, UP RP, 1987, (K. Buczek)

37. Przełącznik czasowy. Pat. nr 139517, UP RP, 1988 (K. Buczek, W. Ziemiański)

38. Elektroniczny układ sterowania płomieniem palników gazowych, stosowanych zwłaszcza w suszarniach lakierniczych., Pat. nr 147187, UP RP, 1989 (K. Buczek, J. Kostka)

39. Sposób i układ regulacji mocy biernej. Pat. nr 151485, UP RP, 1991 (K. Buczek)

40. Urządzenie do suszenia, lutowania i wygrzewania lub spiekania w cyklu ciągłym. Pat. nr 153278, UP RP, 1992 (K. Buczek, W. Kalita, M. Gotfryd, K. Zając)

41. Impulsowy regulator temperatury. Pat. nr 158404, UP RP, 1992 (K. Buczek, W. Kalita, M. Gotfryd, K. Zając)

42. Elektroniczny układ sterowania pracą kotła gazowego. Zgłoszenie patentowe P-279160, UP RP, 1990 (K. Buczek, W. Kalita, M. Gotfryd, K. Zając)

43. Układ zabezpieczenia silników trójfazowych przed skutkami pracy niepełnofazowej. Zgłoszenie patentowe P-283553, UP RP, 1990 (K. Buczek, W. Kalita, K. Zając)

44. Układ regulatora temperatury grzejników elektrycznych. Zgłoszenie patentowe P-278214, UP RP, 1989 (K. Buczek, W. Kalita, M. Gotfryd, K. Zając)

45. Energoelektronika - laboratorium. Skrypt Politechniki Rzeszowskiej, 1987 (K. Buczek, J. Rząsa, M. Knott), 86s

46. Zastosowanie do napędu zmechanizowanego sprzętu gospodarstwa domowego nowych układów energoelektronicznych (praca zespołowa ,współautor), spr. U-519/80, 311s

47. Analiza doboru urządzeń i zabezpieczeń elektroenergetycznych w sieci rozdzielczej KiZPS "Siarkopol" w Tarnobrzegu. (praca zesp.: współautor) spr. U-540/80, 350s

48. Badania możliwości zastosowania układów półprzewodnikowych do sterowania elektrofiltrów w -Machów. Zlec. KiZPS "Siarkopol" w Tarnobrzegu. (praca zesp.: współautor), spr. U-739/81, 156s.

49. Badania możliwości zastosowania elektronicznego przekaznika czasowego. Zleniodawca: Łańcucka Fabryka Śrub. (praca zesp.: współautor, koordynator), spr. U-958/83, 54s.

50. Analiza możliwości zastosowania układów półprzewodnikowych do regulacji temperatury w piecach 300kW. Zlec. Rzeszowskie Zakłady Lamp Wyładowczych "Polam" Pogwizdowie Nowym. (praca zespołowa. U-1001/83, wdrożenie: U-1052/84, 55s.

51. Badania możliwości i wykonanie podzespołów elektronicznych wchodzących w skład układów regulacyjnych przetwornic typu AZ-30R i PSCz-15. Zlec. WZU-3 w Żurawicy. (praca zesp.: współautor, koordynator), spr. U-903/82, 86s.

52. Opracowanie koreferatu do ekspertyzy Nr194/22/82/G1. Zlec. BOBRME Komel" w Katowicach. (prac zesp.: współautor), spr. U-1004/83, 46s.

53. Analiza możliwości zastosowania półprzewodnikowego układu sterowania silnikiem frezarki Mf2/7 na bazie elementów dostępnych w kraju. Zlec. SFA "Autosan".(praca zesp.: współautor, koordynator), spr. U-1012/83, 67s.

54. Analiza możliwości zastosowania układów półprzewodnikowych do sterowania bateriami kondensatorów w sieci elektroenergetycznej KiZPS "Siarkopol" w Tarnobrzegu. (praca zesp.: współautor, koordynator), spr. U-738/81, 230s.

55. Zastosowanie układów półprzewodnikowych do regulacji temperatury w piecach oporowych 300kW "Polam-Rzeszów". (praca zesp.: współautor, koordynator), spr. U-1052/84, 55s.

56. Badania możliwości zastosowania układów półprzewodnikowych do sterowania palnikami gazowymi w suszarkach. Sanocka Fabryka Autobusów "Autosan". (praca zesp. współautor, koordynator), spr. U-1130/84, 97s.

57. Analiza możliwości regulacji współczynnika mocy w sieci elektroenergetycznej. Rzeszowskich Zakładów Naprawy Samochodów. (praca zesp.: współautor, koordynator, spr. U-1383/85, 36s

58. Badania możliwości zastosowania elektronicznych regulatorów mocy biernej w Łańcuckiej Fabryce Śrub. (praca zesp.: współautor, koordynator), spr. U-1397/86, 102s

59. Badania nad usprawnianiem zapalania i zabezpieczenia przed wybuchem w suszarkach typu ZSPZ-8. (praca zesp.: współautor, koordynator), spr. U-1594/86, 32s

60. Opracowanie i badania elektronicznych regulatorów napędu posuwu drążarek typu EDA-16 i EDA-36 w Łańcuckiej Fabryce Śrub. (praca zesp.: współautor, koordynator), spr. U-1763/87, 56s

61. Opracowanie i wykonanie układów sterowania pracą palników gazowych w suszarkach SFA. (praca zesp.: współautor, koordynator), spr. U-1776/88, 78s.

62. Zastosowanie sterowników tyrystorowych do napędu suwnic w PPP "Prefabet-Kolbuszowa". (praca zesp.: współautor, koordynator), spr. U-1728/87, 34s

63. Opracowanie wersji hybrydowej oraz wykonanie zespołów grzejnych SAT-ZG. (praca zesp.: współautor) spr. U-1912/88/89/90, 108s
64. Opracowanie sprzężarki lotniczego silnika turbinowego. (praca zesp.: współautor), spr. U-1355/88/89, 238s.
65. Opracowanie i wykonanie partii próbnej zespołu grzejnego luku akumulatorowego oraz przeprowadzenie badań laboratoryjnych i funkcjonalnych. (praca zesp.: współautor), spr. U-2041/89/90, 108s.
66. Analiza obciążalności mocą bierną i czynną Zakładów Naprawy Samochodów w Brzesku. (praca zesp.: współautor, koordynator), spr. U-2350/90, 44s.
67. Adaptacja zespołu grzejnego typu SAT-ZG do komory typu LAF PA-1. (praca zesp.: współautor), spr. U-2223/90, 108s.
68. Technologia kryształów ferroelektrycznych na bazie glicyn i amonów dla detektorów promieniowania podczerwonego. (praca zesp.: współautor), spr. U-1655/90, 55s.
69. Stanowisko do demonstracji na wykładach z fizyki. (praca zesp.: współautor), spr. U-1709/1990, 66s.
70. Analiza strat energii w sieci elektroenergetycznej Sanockiej Fabryki Autobusów w Sanoku. (praca zesp.: współautor, koordynator), Etap I i II, spr. nr 5/15/85 Rz SEP, 213s.
71. Opracowanie instrukcji eksploatacyjno-ruchowych rozdzielni głównej i stacji wydziałowych w SFA w Sanoku etap I i II. (praca zesp.: współautor, koordynator), spr. nr 2/15/86 Rz SEP, 12s
72. Opracowanie instrukcji eksploatacyjno-ruchowych w rozdzielniach i stacjach wysokiego napięcia Krośnieńskich Hut Szkła. (praca zesp.: współautor, koordynator), Etap I i II, spr. nr 21/15/89 Rz SEP, 154s.
73. Analiza strat energii w sieci elektroenergetycznej Zakładu Budowy Przyczep w Załużu. (praca zesp.: współautor, koordynator) Etap I i II, spr. nr 21/15/85 Rz SEP, 104s
74. Ocena prawidłowości pracy cieplarki (inkubatora) typu IK-13/A nr fabr.47423 produkcji firmy MEDICOR w Szpitalu Wojewódzkim w Rzeszowie. (Autor), 1989, Rz SEP, 8s.
75. Ocena modernizacji układu sterowania wycinarki mostowej typu 6005 w Zakładach "Respan" w Rzeszowie. (praca zesp.: współautor, koordynator), spr. nr 35/21/88 Rz SEP, 12s.
76. Opracowanie instrukcji eksploatacyjno-ruchowych w rozdzielniach i stacjach wysokiego napięcia Krośnieńskich Hut Szkła. (praca zesp.: współautor, koordynator), Etap I i II, spr. nr 21/15/89, Rz SEP, 1989, 123s.
77. Ocena poprawności oraz przydatności układu automatycznego załączania wyłączników zwarciovych APU po zaniku napięcia. RZPS "Respan" w Rzeszowie. (Autor) - ekspertyza Rz SEP, 1986, 7s.

СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

78. Gawecka H., Hartman M.: Półprzewodnikowe przyrządy mocy - stan obecny i tendencje rozwojowe, IV Krajowa Konferencja Energoelektroniki, Warszawa, 1990, s.106-120
79. Gawecka H.: Przyszłość przyrządów półprzewodnikowych mocy. Wiadomości Elektrotechniczne, 1991 R.59, nr 8, s.283-284
80. Bakowski M.: Przyrządy półprzewodnikowe dużej mocy. Elektronika 1992, R.33, nr 1-2, s.16-19
81. Xu C.: Netzwerkmodelle von Leistungshalbleiter-Bauelementen (Diode, BJT and MOSFET), Dissertation Thesis, 1990, TU Munchen, 120s.
82. Power Semiconductors '93/94, Short form Catalog, Semikron, 540s.
83. Świątek H.: Urządzenie pomiarowe półprzewodnikowych przyrządów mocy. Wiadomości Elektrotechniczne, 1991, R.59, nr 9, s.332-337
84. Heil M.A.: Power transistors. Rev. Telegr. Electron., 1991, no. 921, s.689-694
85. Laska B.: Untersuchung der Schalteigenschaften von Leistungshalbleiterbau-elementen mit Methoden der Bauelementsimulation und der Messtechnik. Dissertation Thesis, 1990, TH Darmstadt, 96s
86. J. Luciński: Układy z tyrystorami dwukierunkowymi. Warszawa, 1982, 275s
87. Instrukcja obsługi programu MATLAB. Podstawowe operacje, przygotowanie danych
88. Lauritzen P.O., Shi F.: Computer Simulation of power MOSFETs at high switching frequencies. Proc. Power Conversion International, October 1985, s.322-330.
89. PSPICE by MicroSim Corporation 23175 La Cadena Drive, Laguna Hills, CA92653, May 1986 (instrukcja do programu PSPICE), 34s.

R. Bimel

Подписано к печ. 22.04.1994. Формат 60x64x16. Уч. - издл. 1.0 Тираж 100 экз.

Типография Жешувского политехнического института, 35-959, Жешув,
ул. В. Поля, 2.

=====
Podpisano z datą 22.04.1994. Format 60x64x16. Wydawnictwo uczelniane.
Powielenie 1.0. Nakład 100 egz.

Poligrafia Politechniki Rzeszowskiej, 35-959, Rzeszów, ul. W.Pola, 2.

462422

Ав 29.751

Ав 29.751

Бесплатно.