

ШКОЛИН АЛЕКСЕЙ НИКОЛАЕВИЧ

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ПРОЦЕССОВ В ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМАХ ИМПУЛЬСНЫХ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ВНЕШНИХ ТЕПЛОВЫХ
И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ**

Специальность 05.13.18 – Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Брянск 2019

Работа выполнена на кафедре «Электронные, радиоэлектронные и электротехнические системы» ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет».

Научный руководитель **Потапов Леонид Алексеевич,**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты **Михальченко Сергей Геннадьевич,**
доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Промышленная
электроника» ФГБОУ ВО «Томский
университет систем управления и
радиоэлектроники»

Безик Дмитрий Александрович,
кандидат технических наук, доцент, доцент
кафедры электроэнергетики и автоматики
ФГБОУ ВО «Брянский государственный
аграрный университет»

Ведущая организация ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова
(Ленина)»

Защита диссертации состоится 04 февраля 2020 года в 14:00 на заседании диссертационного совета Д 212.021.03 при ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет» по адресу: 241035, г. Брянск, ул. Харьковская, д. 10-Б, ауд. Б101.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет» и на сайте университета: <https://www.tu-bryansk.ru/mainpage/dissertatsii/shkolin-aleksey-nikolaevich>

Отзывы на автореферат высылать по адресу: 241035, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, д.7, ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет».

Автореферат разослан «____» _____ 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент

М.Ю. Рытов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Современное развитие электронной отрасли неразрывно связано с повышением уровня ее информатизации. Математическое моделирование применяется на этапах проектирования как электронных устройств в виде систем, функциональных узлов, модулей, блоков, так и отдельных элементов компонентной базы (ЭКБ), ярким примером которых выступают интегральные микросхемы (ИМС) различной степени интеграции и сложности.

Совершенствованию ИМС импульсных преобразователей напряжения (ИПН) препятствует то, что они являются сложными техническими объектами, имеющими в своем составе нелинейные и импульсные компоненты. В этой связи требуется разработка новых математических методов моделирования, учитывающих влияние нелинейных явлений в ИМС. Математическое моделирование с использованием новых методов позволяет проанализировать процессы в ИМС ИПН при внешних тепловых и электрических воздействиях.

Моделированию нелинейных динамических систем и изучению явлений в импульсных преобразователях посвящены работы Баушева В.С., Белова Г.А., Жусубалиева Ж.Т., Кобзева А.В., Колоколова Ю.В., Михальченко Г.Я., Михальченко С.Г., Di Bernardo M., Tse C.K., William C.Y. и др. Вопросам структурно-параметрической идентификации моделей аналоговых ИМС и импульсных преобразователей на их основе уделялось внимание в работах Осипова Д.Л., Arnedo L., Guererro V.V., Middlebrook R.D., и др., в том числе вопросам получения параметров и структуры мультидисциплинарных моделей элементов электронной компонентной базы с учетом тепловых свойств посвящены работы ученых Васькова О.С., Нисса В.С., Сергеева В.А., Porre A., Székely V. и др.

Одним из широко распространённых видов динамических математических моделей ЭКБ являются поведенческие модели (ПМ). ПМ – это имитационная модель, воспроизводящая внешнее поведение объекта. Так как для ПМ описание внутренней структуры объекта моделирования является не обязательным, то, с одной стороны, ПМ с точки зрения минимальных требований к вычислительным ресурсам представляют интерес для инженеров-разработчиков электронных устройств, или конечных потребителей ИМС, а с другой стороны, вследствие необязательности воспроизведения внутренней структуры элемента ЭКБ позволяют производителям реализовать свои права на интеллектуальную собственность (например, топологию ИМС). Вследствие этого ПМ активно применяются в электронной сфере.

Сегодня существуют математические методы моделирования и реализованные на их основе программные инструменты для синтеза ПМ простейших элементов ЭКБ (диоды, стабилитроны, транзисторы), однако средства для синтеза моделей ИМС отсутствуют. При этом наибольшую сложность представляет собой синтез моделей аналоговых и гибридных (цифро-аналоговых, импульсных и т.п.) ИМС. Одним из ярких примеров такого класса ИМС являются микросхемы ИПН, процессы в которых носят нелинейный и импульсный характер, обусловленный дискретностью работы ключевых элементов в составе ИПН. Это в свою очередь и обуславливает актуальность исследований в области разработки методов математического моделирования процессов в ИМС ИПН, алгоритмов синтеза и проверки адекватности ПМ ИМС ИПН и в разработке программного комплекса, обладающего возможностью структурно-параметрической идентификации моделей ИМС ИПН и позволяющего инженерам-разработчикам электронной техники осуществлять автоматизированный синтез ПМ микросхем ИПН и их последующую верификацию.

Объектом исследования являются процессы в интегральных микросхемах импульсных преобразователей напряжения при воздействии внешних электрических и тепловых факторов.

Предметом исследования являются методы и алгоритмы математического моделирования процессов в интегральных микросхемах импульсных преобразователей напряжения с учетом воздействий внешних электрических и тепловых факторов, а также эффективные численные методы, позволяющие реализовать данные методы математического моделирования.

Цель диссертационной работы – совершенствование математических методов, алгоритмов и программ для моделирования процессов в интегральных микросхемах импульсных преобразователей напряжения с учетом внешних тепловых и электрических воздействий, развитие которых имеет существенное значение для практики модельно-ориентированного проектирования и испытаний импульсных электронных устройств.

Задачи исследования, поставленные в диссертационной работе, для достижения указанной цели:

1. Провести исследование и выполнить анализ известных математических методов моделирования интегральных микросхем импульсных преобразователей напряжения, позволяющих учитывать внешние электрические и тепловые факторы.
2. Разработать математический метод и алгоритм интерпретации экспериментальных данных, полученных на основе тестовых электрических и тепловых воздействий, подаваемых на исследуемые интегральные микросхемы импульсных преобразователей напряжения и формирующих динамический отклик.
3. Предложить численный метод получения аппроксимирующей зависимости переходной тепловой характеристики микросхем импульсных преобразователей напряжения на основе экспериментальных данных.
4. Разработать алгоритм проверки адекватности математических моделей интегральных микросхем импульсных преобразователей напряжения.
5. Разработать программный комплекс для выполнения вычислительного эксперимента на основе алгоритмов, реализующих новые методы математического моделирования поведения интегральных микросхем импульсных преобразователей напряжения при воздействии внешних тепловых и электрических факторов.

Научная новизна. В диссертационной работе получены следующие результаты, характеризующиеся научной новизной:

1. Новый математический метод и алгоритм интерпретации экспериментальных данных, полученных на основе тестовых воздействий на микросхему импульсного преобразователя напряжения и формирующих ее динамический отклик, базирующийся на новой динамической обобщенной математической модели микросхем импульсных преобразователей напряжения, отличающийся учетом внешних электрических и тепловых воздействий.
2. Модифицированный численный метод получения аппроксимирующей зависимости переходной тепловой характеристики микросхем импульсных преобразователей напряжения на основе экспериментальных данных, базирующийся на нелинейном методе наименьших квадратов и использовании алгоритма оптимизации Левенберга-Марквардта, отличающийся учетом спектральной плотности постоянных времени переходной тепловой характеристики для определения структуры и нахождения начального приближения при численном определении параметров искомой зависимости.

3. Новый алгоритм проверки адекватности математических моделей микросхем импульсных преобразователей напряжения в частотной области, базирующийся на численном решении системы нелинейных дифференциальных уравнений обобщенной модели методом Гира и получении решения во временной области, отличающийся от аналогов предложенной процедурой поиска стационарного режима на основе статистических методов.

4. Разработан комплекс проблемно-ориентированных программ для выполнения вычислительного эксперимента на основе разработанных методов математического моделирования поведения микросхем импульсных преобразователей напряжения при воздействии внешних тепловых и электрических факторов.

Теоретическая и практическая значимость работы. Проведенные в рамках диссертационной работы исследования и разработанные на их основе положения позволили:

1. Применить результаты исследования:

– для внедрения в АО «Группа Кремний ЭЛ», г. Брянск, при разработке и испытании опытных серий ряда микросхем ИМС ИПН (Акт внедрения № 32/205 от 18 октября 2019 г.);

– для внедрения в ООО «Фрекон», г. Томск, осуществляющее разработку и изготовление промышленных преобразователей электрической энергии (Акт внедрения от 12 ноября 2019 г.).

2. Использовать результаты исследования при выполнении НИР по заданию Министерства образования и науки № 8.1729.2017/ПЧ. «Разработка методов структурно-параметрической идентификации и автопостроения поведенческих и мультифизических моделей интегральных схем и разработка на их базе программно-аппаратного измерительного комплекса» 2017-2019 гг.

3. Применить разработанный программный комплекс и полученные с его помощью поведенческие модели в учебном процессе в БГТУ при обучении студентов по направлению подготовки 11.03.04 «Электроника и нанoeлектроника» (профиль – Промышленная электроника, профиль – Микроэлектроника и твердотельная электроника).

Методология и методы исследования. Принятая в работе методология основана на анализе логической структуры известных методов и построении теоретических положений настоящей работы, проверке предположений и полученных результатов. Полученные результаты, положения и сделанные выводы основаны на методах вычислительной математики, теории имитационного моделирования, теории дифференциальных уравнений, теории автоматического управления, теории идентификации систем, теории планирования эксперимента, теории математической статистики.

Соответствие паспорту специальности. Содержание диссертационной работы соответствует паспорту специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» по следующим пунктам: п. 3 «Разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий»; п. 4 «Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента»; п. 6 «Разработка новых математических методов и алгоритмов проверки адекватности математических моделей объектов на основе данных натурного эксперимента»; п. 7

«Разработка новых математических методов и алгоритмов интерпретации натурального эксперимента на основе его математической модели».

Положения, выносимые на защиту.

1. Новый математический метод и алгоритм интерпретации экспериментальных данных, полученных на основе тестовых воздействий на интегральную микросхему импульсного преобразователя напряжения (ИМС ИПН) и формирующих ее динамический отклик.

2. Модифицированный численный метод получения аппроксимирующей зависимости переходной тепловой характеристики ИМС ИПН на основе экспериментальных данных.

3. Алгоритм проверки адекватности математических моделей ИМС ИПН в частотной области.

4. Комплекс проблемно-ориентированных программ для выполнения вычислительного эксперимента на основе алгоритмов, реализующих разработанные математические методы моделирования поведения ИМС ИПН при воздействии внешних тепловых и электрических факторов.

Степень достоверности и апробация результатов. Степень достоверности выводов и положений диссертационной работы определяется:

- отсутствием противоречий с известными современными научными положениями;
- сопоставлением полученных результатов с результатами аналитических расчетов и результатами исследований, опубликованными в научной литературе.

Достоверность результатов, полученных в диссертации, обеспечивается использованием методов математического моделирования динамических процессов в созданном программном комплексе «SBM» (Synthesis of behavioral models) и сравнительном анализе (валидации) полученных результатов: с имитационными моделями в среде моделирования SystemVision Cloud компании Mentor Graphics, реализованными без применения предлагаемой методики автопостроения ПМ; с имитационными моделями, опубликованными фирмами изготовителями, в частности SPICE-моделями ИМС LM2596 компании Texas Instruments, ИМС LT1076, LT1372 компании Analog Devices и др.; с проведенными натурными экспериментами в программно-аппаратном измерительном комплексе АТоМ-9х, разработанном в НИЛ АТМ.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на международном московском IEEE-семинаре (2018 г., МИЭМ НИУ ВШЭ, г. Москва), международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления» (2017 г., 2018 г., ТУСУР, г. Томск), международной IEEE-Сибирской конференции по управлению и связи (2019 г., ТУСУР, г. Томск), международной научно-технической конференции «Пром-Инжиниринг» (2019 г., ЮУрГУ, г. Сочи), всероссийской научно-технической конференции «Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем» (2019 г., ЧГУ им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары), международной научно-практической конференции «САПР и моделирование в современной электронике» (2017 г., 2018 г., БГТУ г. Брянск).

Личный вклад автора. Развитие методов математического моделирования микросхем импульсных преобразователей, создание нового способа синтеза поведенческих моделей ИМС ИПН на базе разработанной обобщенной математической модели, создание программного комплекса для исследования и синтеза нелинейных поведенческих моделей ИМС ИПН выполнено лично автором.

Постановка задачи выполнена совместно с научным руководителем проф. Л.А. Потаповым. Верификация и валидация результатов вычислительного эксперимента проведена при участии к.т.н., с.н.с. НИЛ АТМ БГТУ А.Ю. Дракина и к.т.н., доц. кафедры «ПЭиЭ» В.Ф. Зотина.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 15 работ, в том числе четыре статьи в журналах, входящих в перечень ВАК РФ, 5 статей в изданиях, индексируемых Scopus и Web of science; получено четыре свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ и один патент на полезную модель.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 139 наименований, и 4 приложений. Работа содержит 187 страниц основного текста, включая 95 рисунков и 4 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель и задачи работы, представлены основные положения, выносимые на защиту.

В главе 1 представлена классификация моделей ЭКБ и принципов синтеза поведенческих моделей современных микросхем ИПН, рассмотрены методы математического моделирования микросхем ИПН, описаны главные факторы, влияющие на выбор поведенческих моделей (ПМ) как основного типа моделей, используемых в электронной промышленности.

Установлено что, подход к моделированию на основе совместного использования фундаментальных систем уравнений математической физики, геометрии объекта исследования, методов конечных элементов, реализованный в программных продуктах Comsol Multiphysics, ANSYS, TCAD и др., позволяет получить весьма адекватные мультифизические математические модели (ММ) отдельных компонентов. Однако при этом проблемой, с одной стороны, являются высокие требования к компетенции разработчика в методах математической физики, что не часто встречается в повседневной инженерной практике, а с другой – вычислительная сложность таких моделей.

ИМС ИПН является сложным электронным устройством и включает в себя значительное количество различных функциональных блоков. В частности, эти функциональные блоки выпускаются и в виде отдельных изделий (микросхемы операционных усилителей, микросхемы контроллеров для систем управления ИПН, силовые ключи, и др.). Таким образом, детализированная ММ ИМС ИПН, реализуемая для транзисторного уровня, зачастую требует значительных вычислительных ресурсов для ее расчета, который многократно проводится на этапах разработки электронных изделий и устройств. В микроэлектронной и других технических отраслях критически важным является время, затраченное на проектирование. Процессы проектирования, изготовления и испытания становятся все более сложными и дорогостоящими. Для снижения трудовых и временных затрат на разработку используются поведенческие модели ИМС. Такие модели описывают функционирование интегральной микросхемы в целом, задают соответствие входных и выходных сигналов системы, имитируя ее работу. ПМ воспроизводит требуемое поведение исходной анализируемой системы.

С появлением расширений высокоуровневых языков описания аппаратуры, таких как Verilog-AMS и VHDL-AMS, ПМ активно применяются для технической реализации ПМ непрерывных (аналоговых систем), в том числе так называемых мультидисциплинарных, примером которых являются электротепловые ПМ,

учитывающие взаимосвязь электрических и тепловых свойств полупроводниковых приборов.

В главе выполнен сравнительный анализ следующих видов существующих методов построения поведенческих моделей и способов определения их параметров: с использованием шаблонных структур, методы синтеза теплоэлектрических (мультидисциплинарных) моделей, непараметрические и параметрические методы синтеза, в том числе для случаев малого и большого сигнала и др. В процессе анализа также установлено, что для определения частотных характеристик ИПН существуют методы осреднения моделей относительно малых изменений переменных состояния, однако их применение для режима большого сигнала применительно к нелинейным системам, которыми являются ИПН, с общих позиций невозможно.

На основе анализа определен подход к синтезу ПМ ИМС ИПН как комбинации принципов непараметрических и параметрических методов, применительно к единой шаблонной структуре мультидисциплинарной обобщенной математической модели, позволяющей учесть нелинейный характер процессов, протекающих в ИМС ИПН. Это доказывает необходимость разработки математического метода и алгоритма интерпретации экспериментальных данных, полученных на основе тестовых воздействий на исследуемую ИМС ИПН и формирующих ее динамический отклик.

В главе 2 проведен анализ основных существующих структур и функциональных возможностей ИМС ИПН. На основе этого анализа выделены основные типовые функциональные элементы и предложена структура поведенческой обобщенной математической модели (ОММ), которая включает указанные типовые элементы и возможные связи между ними. Приведено полное математическое описание компонентов, входящих в ее структуру (рис. 1).

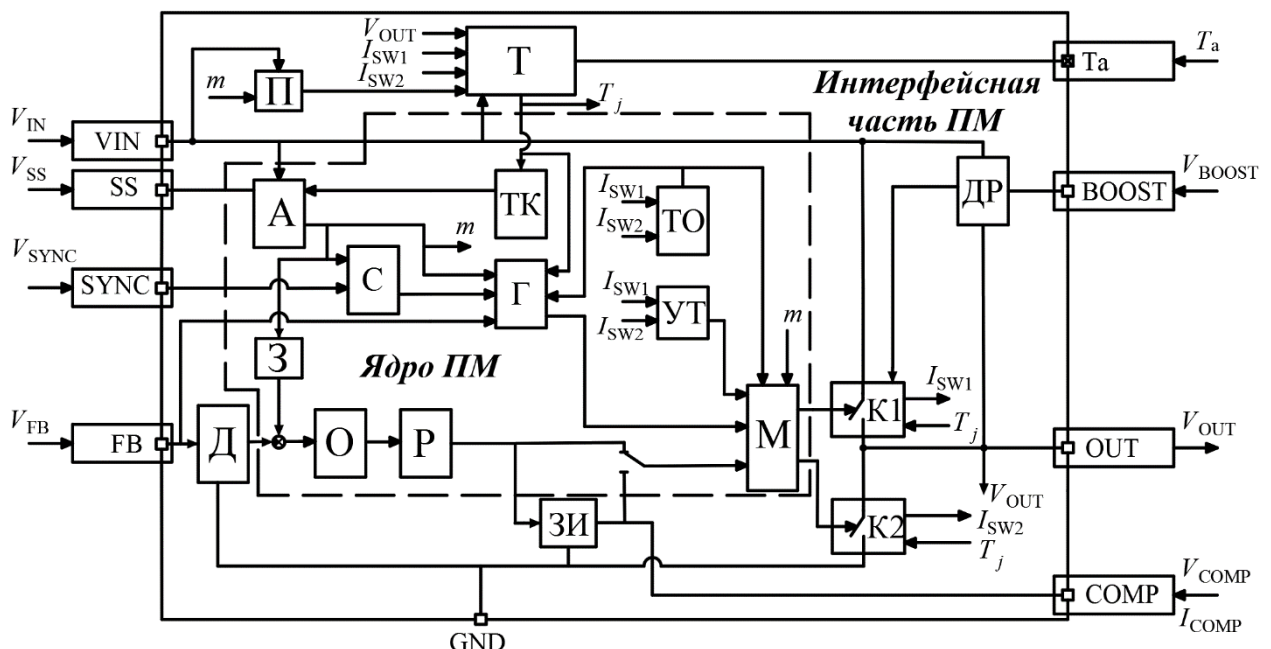


Рис. 1. Структура обобщенной модели ИМС ИПН

В состав ОММ ИМС ИПН входят блоки импульсного модулятора (М), делителя сигнала обратной связи (Д), регулятора (Р), ограничения уровня сигнала ошибки (О), независимого источника (ЗИ) контура обратной связи по напряжению, усилителя тока ключа (УТ), генератора развертывающего и тактового сигнала (Г), силовых ключей (K1, K2), драйвера силового ключа (ДР), активации рабочего режима (А), тока

потребления микросхемы (П), синхронизации (С), вычисления температуры кристалла (Т), защит по величине выходного тока (ТО) и температуре кристалла (ТК). В модели приняты следующие обозначения: V_{IN} , V_{SS} , V_{SYNC} , V_{FB} , V_{OUT} , V_{BOOST} , V_{COMP} – напряжения на соответствующих выводах микросхемы относительно потенциала на выводе GND; I_{COMP} – ток в выводе COMP; I_{SW1} , I_{SW2} – токи силовых ключей; m – сигнал активации рабочего режима; T_j – температура кристалла; физические терминалы VIN, SS, SYNC, FB, BOOST, OUT, COMP – соответствующие выводам ИМС ИПН, а также T_a – температура окружающей среды.

Созданная ОММ представляет собой совокупность систем нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих непрерывную часть модели, и систем логических уравнений, описывающих дискретную часть модели, которая в компактной форме выглядит как приведенная далее система уравнений, в которой каждое уравнение отражает зависимости для перечисленных ранее блоков модели

$$\left\{ \begin{array}{l} Ramp(t) = f_{\Gamma}(t, T_j, V_{FB}, T_p, T_{CL}), \text{ при } L_{\Gamma}(m, T_L), \\ S(t) = q_{\Gamma}(Ramp), \text{ при } L_{\Gamma}(m, T_L), \\ U_y(t) = f_P(U_{REF}, V_{FB}, V_{IN}, V_{COMP}, I_{COMP}), \text{ при } L_P(m, c_s), \\ I_A(t) = f_{YT}(I_{SW1}, I_{SW2}), \\ U_{REF}(t) = f_3(t), \text{ при } L_3(m, T_L), \\ T_p(t) = f_C(V_{SYNC}), \text{ при } L_C(m, T_L), \\ I_{SW1}(t) = f_{K1}(V_{IN}, V_{OUT}, T_j), \text{ при } L_{K1}(s_1, D_r), \\ I_{SW2}(t) = f_{K2}(V_{OUT}, T_j), \text{ при } L_{K2}(s_2), \\ s_1 = L_{M1}\left(m, C_L, S, q_M\left[f_M\left((U_y, I_A, Ramp)\right)\right]\right), \\ s_2 = L_{M2}(s_1), \\ D_r = L_D(m, q_D(f_D(V_{BOOST}))), \\ T_j(t) = f_T(T_a, P), \end{array} \right. \quad (1)$$

где t – время; S , $Ramp$ – тактовый и пилообразный сигнал на выходе блока Г; T_p – период тактового интервала на выходе блока С; T_{CL} – сигнал изменения периода тактового интервала по току на выходе блока ТО; T_L – сигнал ограничения по температуре на выходе блока ТК; m – сигнал активации рабочего режима на выходе блока А; c_s – сигнал, соответствующий наличию вывода COMP в ИМС ИПН; V_{IN} , V_{SS} , V_{SYNC} , V_{FB} , V_{OUT} , V_{BOOST} , V_{COMP} – напряжения на соответствующих выводах микросхемы относительно потенциала на выводе GND; I_{COMP} – ток в выводе COMP; I_{SW1} , I_{SW2} – соответственно токи ключей, определяющие ток в выводе OUT и с учетом тока потребления токи в выводах VIN и GND; U_y – сигнал управления регулятора выходного напряжения ИПН на выходе блока Р; $U_{REF}(t)$ – сигнал задания регулятора выходного напряжения ИПН на выходе блока З; I_A – сигнал на выходе блока УТ; C_L – сигнал наличия ограничения по току на выходе блока ТО; s_1 , s_2 – сигналы управления блоками K1 и K2 соответственно; D_r – сигнал на выходе блока ДР для активации блока K1; T_j – температура кристалла на выходе блока Т; P – тепловая мощность, выделяемая кристаллом ИМС ИПН, которая определяется напряжениями V_{IN} , V_{OUT} , а также токами I_{SW1} , I_{SW2} и током потребления ИМС ИПН;

T_a – температура окружающей среды; $L_\Gamma, L_P, L_3, L_C, L_{K1}, L_{K2}, L_{M1}, L_{M2}, L_{ДР}$ – логические функции в составе соответствующих блоков; $f_\Gamma, f_P, f_{УТ}, f_3, f_C, f_{K1}, f_{K2}, f_M, f_{ДР}, f_T$ – функции в составе соответствующих блоков; q_Γ, q_M, q_D – функции квантования по уровню в составе соответствующих блоков.

Предложенная в работе ОММ обладает отличительной особенностью, которая выражается в возможности описания нелинейных динамических электрических и тепловых процессов, являющихся характерными для наблюдаемого внешнего поведения интегральных микросхем импульсных преобразователей напряжения, и позволяет реализовать описание отдельного типа ИМС ИПН простой подстановкой коэффициентов конкретного варианта устройства в обобщенные выражения ОММ. Кроме того, в модели учтены особенности систем управления, присущих реальным типам ИМС ИПН. В частности модель включает описание системы управления ИМС ИПН, в которой присутствует нелинейная часть, реализующая ограничение сигнала ошибки регулятора, и линейная часть на базе инерционного звена 4-го порядка.

В процессе синтеза и проверки адекватности (валидации) целевых ПМ одним из наиболее затратных этапов с точки зрения вычислительных ресурсов является расчет переходных процессов при анализе режимов работы ИМС ИПН. Это осуществляется путем численного расчета и последующей математической обработки переходного процесса в ИМС ИПН. Для решения данной проблемы было предложено применить отдельную ММ системы для анализа параметров ПМ и расчета процессов в рабочем режиме ИМС ИПН с учетом схемы ее включения (рис. 2).

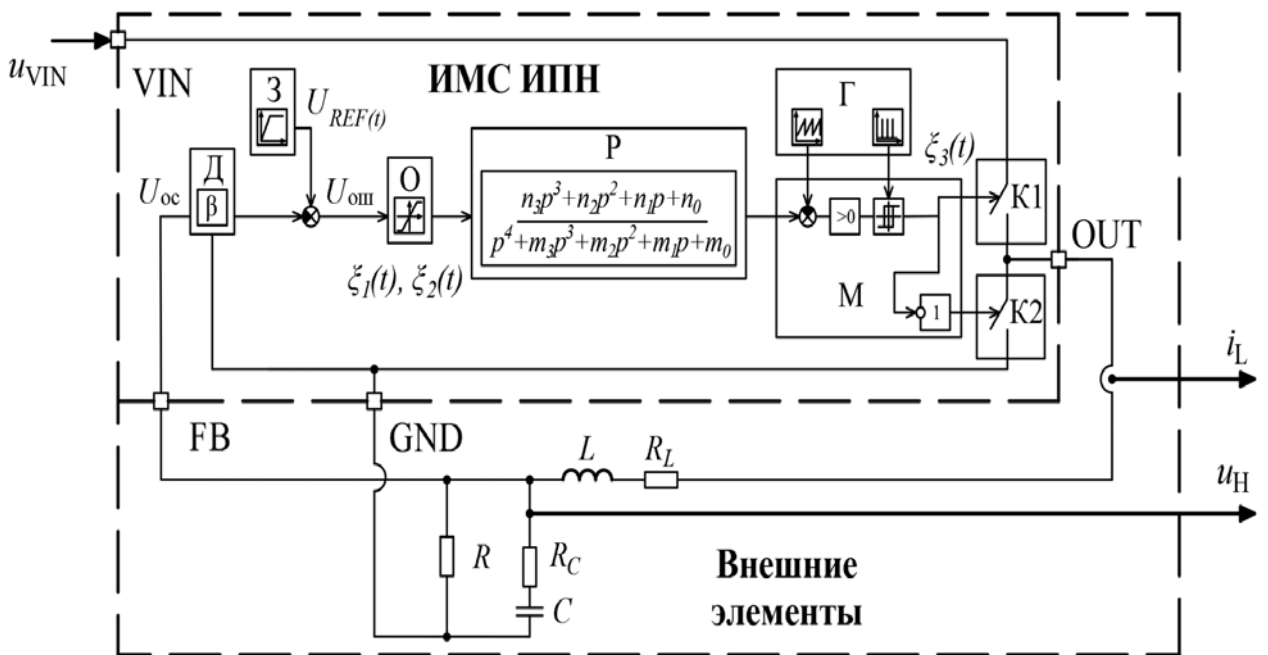


Рис. 2. Схема анализа параметров ПМ ИМС ИПН

Рассматриваемая модель включает в себя делитель напряжения (Д) с коэффициентом деления β сигнала обратной связи $U_{ос}$, блок задающего сигнала (3) с выходным сигналом $U_{REF}(t)$, регулятор (Р) обратной связи по напряжению четвертого порядка, ограничитель уровня сигнала (О) ошибки $U_{ош}$ на входе в регулятор, генератор пилообразного и тактового сигнала (Г), однополярный неинвертирующий модулятор (М) типа ШИМ-II, силовые ключи (K1) и (K2) сопротивление нагрузки R и силовой фильтр, в который входят: последовательное сопротивление R_L и индуктивность дросселя L , последовательное сопротивление R_C и емкость конденсатора C .

Эта модель представлена в виде системы нелинейных дифференциальных уравнений (СНДУ) с разрывной правой частью (3).

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_L}{dt} = -\frac{R_L}{L} - \frac{RR_C}{L(R+R_C)} \cdot i_L - \frac{R}{L(R+R_C)} \cdot u_C + \frac{u_{VIN} \cdot K_{F3}(\xi_3(t))}{L}; \\ \frac{du_C}{dt} = \frac{R}{C(R+R_C)} \cdot i_L - \frac{1}{C(R+R_C)} \cdot u_C; \\ \frac{dx_1}{dt} = x_2; \\ \frac{dx_2}{dt} = x_3; \\ \frac{dx_3}{dt} = x_4; \\ \frac{dx_4}{dt} = -\frac{\beta RR_C \cdot i_L \cdot K_{F1}(\xi_1(t), \xi_2(t))}{(R+R_C)} - \frac{\beta R \cdot u_C \cdot K_{F1}(\xi_1(t), \xi_2(t))}{(R+R_C)} - \\ - m_0 \cdot x_1 - m_1 \cdot x_2 - m_2 \cdot x_3 - m_3 \cdot x_4 + s \cdot K_{F2}(\xi_1(t), \xi_2(t)) + K_{F1}(\xi_1(t), \xi_2(t)) \cdot U_{REF}(t), \end{array} \right. \quad (3)$$

где t – время; i_L – ток в дросселе; u_C – напряжение на конденсаторе; u_{VIN} – постоянное напряжение источника питания; x_1, x_2, x_3, x_4 – переменные состояния регулятора; m_0, m_1, m_2, m_3 – коэффициенты полинома знаменателя передаточной функции регулятора; s – уровень срабатывания ограничения сигнала ошибки $U_{ош}$; $K_{F1}=1 - |K_{F2}|$ – коммутационная функция, принимающая значения 1 или 0, в зависимости от наличия ограничения сигнала ошибки регулятора; K_{F2} – коммутационная функция, принимающая 1, 0 и -1, в соответствии с состоянием выхода ограничительного элемента регулятора; K_{F3} – коммутационная функция, принимающая значения 1 или 0, в соответствии с состоянием силового ключа; $\xi_1(t), \xi_2(t), \xi_3(t)$ – разностные функции, определяющие во времени моменты коммутации ключа и ограничения сигнала ошибки $U_{ош}$ по верхнему и нижнему порогу соответственно; $U_{REF}(t)$ – сигнал задания.

Разрывная правая часть в СНДУ (3) имеет шесть отдельных участков непрерывности, что объясняется для одного интервала коммутации наличием трех возможных состояний нелинейного элемента на входе регулятора на каждом из двух возможных состояний силового полупроводникового ключа.

Представив уравнения СНДУ в матричной форме (4), было выполнено решение задачи Коши для каждого участка приближенным способом в аналитическом виде по методу Коши-Пикара (5)

$$\frac{d\mathbf{X}(t)}{dt} = \mathbf{A}_i \cdot \mathbf{X}(t) + \mathbf{B} \cdot \mathbf{u}_i(t), \quad (4)$$

где i – номер участка постоянства структуры СНДУ, а $\mathbf{X}(t) = [i_L, u_C, x_1, x_2, x_3, x_4]^T$ – вектор переменных состояния; $\mathbf{A}_i, \mathbf{B}$ – матрицы постоянных коэффициентов; $\mathbf{u}_i(t)$ – вектор вынуждающих воздействий;

$$\mathbf{X}(t) = e^{\mathbf{A}_i(t-t_0)} \mathbf{X}_{0i} + e^{\mathbf{A}_i(t-t_0)} \int_{t_0}^t e^{-\mathbf{A}_i(\tau-t_0)} \mathbf{B}(\mathbf{u}_{1i}(\tau) + \mathbf{u}_{2i}) d\tau, \quad (5)$$

где $\mathbf{u}_{1i}, \mathbf{u}_{2i}$ – зависимая и независимая от времени составляющие вектора возмущающих воздействий; $t_0, \mathbf{X}_{0i}$ – начальное время и начальные условия.

Решение (5) для участков гладкости СНДУ получено в общем виде:

$$\mathbf{X}(t) = e^{\mathbf{A}_i(t-t_0)} \left[\mathbf{X}_{0i} + (\mathbf{A}_i^{-2} + \mathbf{A}_i^{-1}t) \cdot \mathbf{B} \cdot \mathbf{u}_{2i} \right] - e^{-\mathbf{A}_i(t-t_0)} \cdot (\mathbf{A}_i^{-2} + \mathbf{A}_i^{-1}t) \cdot \mathbf{B} \cdot \mathbf{u}_{1i} + \\ + \mathbf{A}_i^{-1} \cdot \mathbf{B} \cdot \mathbf{u}_{1i}t_0 + \mathbf{A}_i^{-2} \cdot \mathbf{B} \cdot \mathbf{u}_{1i} \quad (6)$$

Значения элементов матриц, входящих в это решение, выводятся отдельно и зависят от текущей топологии на участках постоянства структуры.

В работе рассмотрен алгоритм поиска моментов переключения постоянства структуры, который реализован с применением численных методов для решения трансцендентных уравнений на основе разностных функций. В частности, при численном решении этой задачи был использован метод Ньютона, обладающий высокой сходимостью и эффективностью.

Также для синтеза ММ блока тепловых процессов предложен модифицированный численный метод получения аппроксимирующей зависимости переходной тепловой характеристики (ПТХ) ИМС ИПН, которая используется в приближенном методе анализа тепловых процессов в ИМС. В соответствии с ним используется метод электротепловой аналогии, который базируется на представлении многослойной конструкции ИМС в виде электрической цепи, собранной либо по схеме Фостера, либо по схеме Кауэра. Для реализации в ММ была выбрана схема Фостера, так как ее полное сопротивление, отражающее кривую тепловой реакции на единичный импульс тепловой мощности, описывается суммой экспонент. При этом коэффициенты для этой зависимости вычисляются по экспериментальному временному отклику термочувствительного параметра микросхемы при подаче импульса фиксированной тепловой мощности, или графику ПТХ. При формировании электротепловой модели по ПТХ наиболее важным является выбор структуры электротепловой модели, что в рассматриваемой задаче соответствует определению количества экспонент. При этом из-за наличия шума в экспериментальных данных зачастую представляет определенные трудности получение аппроксимирующей зависимости хорошо совпадающей с начальным участком ПТХ. Для снижения влияния указанных факторов при получении аппроксимирующей зависимости предлагается метод аппроксимации, состоящий из двух основных этапов. На первом этапе применен предложенный V. Székely метод структурных функций, в соответствии с которым с помощью теоремы обратной свертки графика первой производной ПТХ в логарифмическом масштабе времени $z = \ln(t)$ и весовой функции $w_z = \exp(z - \exp(z))$ строится зависимость спектральной плотности постоянных времени (СППВ). На втором этапе определялись точки максимумов z_i полученного графика СППВ:

$$z_i = \arg \max_z \left(\left[\frac{dZ_{th}(z)}{dz} \right] \otimes^{-1} w_z(z) \right), \quad (7)$$

где $Z_{th}(z)$ – экспериментальная ПТХ в логарифмическом масштабе времени; $\otimes^{-1}$ – операция деконволюции (обратной свертки), $i = 1, 2, 3 \dots$ – номер локального максимума.

Положение найденных максимумов СППВ использовалось в качестве составления начального приближения вектора искомых параметров $\mathbf{c}^{(0)} = [\mathbf{p}, \mathbf{R}]^T$ при поиске аппроксимирующей зависимости ПТХ. Вектор начального приближения постоянных времени $\mathbf{p}$ определяется найденными максимумами $z_i = \ln(\tau_i)$ как $\mathbf{p} = [\exp(z_1), \exp(z_2), \dots]^T$. Элементы вектора начального приближения постоянных коэффициентов $\mathbf{R} = [R_1, R_2, \dots]^T$ находятся

$$R_i = \left[Z_{ih}(\tau_i) - \sum_{l=1}^i R_l \left(1 - \exp\left(\frac{-\tau_l}{\tau_{l-1}}\right) \right) \right] (1 - \exp(-1))^{-1}. \quad (8)$$

В качестве численного метода для нахождения аппроксимирующей зависимости ПТХ применялся нелинейный метод наименьших квадратов (МНК) с использованием алгоритма оптимизации Левенберга-Марквардта, при этом для задания границ диапазонов поиска при вычислении коэффициентов аппроксимирующей зависимости также применялись найденные максимумы графика СППВ:

$$\begin{cases} \mathbf{c}^{(k+1)} = [\mathbf{p} \ \mathbf{R}]^T - (\mathbf{A}^{(0)} + \lambda^{(0)} \mathbf{D})^{-1} \mathbf{v}^{(0)}, & \text{если } k = 0, \\ \mathbf{c}^{(k+1)} = \mathbf{c}^{(k)} - (\mathbf{A}^{(k)} + \lambda^{(k)} \mathbf{D})^{-1} \mathbf{v}^{(k)}, & \text{если } k > 0. \end{cases} \quad (9)$$

где k – номер итерации; $\mathbf{D} = \text{diag}(\mathbf{A})$ – диагональная матрица весов; $\mathbf{A} = \mathbf{J}^T \mathbf{J}$; $\mathbf{J}$ – матрица Якоби; λ – параметр регуляризации; $\mathbf{v} = \mathbf{J}^T \mathbf{r}$; $\mathbf{r}$ – вектор невязки, входящий в состав минимизируемой функции, которая формируется согласно МНК как сумма квадратов элементов вектора невязки.

Для формирования ПМ конкретного типа ИМС ИПН в ОММ необходимо определить ряд ее параметров и зависимостей на основе имеющихся исходных данных: параметров, известных по справочному описанию, и экспериментальных данных, полученных на основе тестовых воздействий на ИМС ИПН. Для этого разработаны математический метод и алгоритм интерпретации экспериментальных данных, формирующих динамический отклик ИМС ИПН. В начале производится расчет аппроксимирующей зависимости ПТХ, на основе которой вычисляется температура кристалла. Далее, используя экспериментальные частотные характеристики и параметры силового фильтра схемы включения ИМС ИПН, выполняется расчет значений, входящих в описание цепей линейной части регулятора обратной связи в ОММ. После чего решается оптимизационная задача получения параметров нелинейной части регулятора обратной связи в ОММ, которая основана на получении решения ММ (3).

Таким образом, разработан математический метод и алгоритм интерпретации экспериментальных данных, полученных на основе тестовых воздействий на интегральную микросхему импульсного преобразователя напряжения (ИМС ИПН) и формирующих ее динамический отклик, а также создан модифицированный численный метод получения аппроксимирующей зависимости переходной тепловой характеристики ИМС ИПН на основе экспериментальных данных.

В главе 3 поставлена и решена задача разработки комплекса проблемно-ориентированных программ для выполнения вычислительного эксперимента, а также осуществления анализа, синтеза и валидации ПМ ИМС ИПН. В главе представлены алгоритмы и способы построения ПМ, рассмотрен алгоритм проверки адекватности ПМ, полученных в результате выполнения процедур синтеза.

Создан алгоритм проверки адекватности ММ микросхем ИПН в частотной области, который позволяет сократить объем вычислений при выполнении расчёта частотных характеристик ММ нелинейных динамических импульсных систем в области их устойчивости на основе расчета во временной области. Это позволяет учитывать существенные особенности исследуемых нелинейных объектов, в отличие от линеаризованных (осреднённых) ММ, применимых только к режиму малого сигнала. При натурных испытаниях не представляет сложности получить временные

зависимости для интервалов времени значительно превышающих тактовый интервал ИМС ИПН. При расчете модели на ЭВМ ситуация осложнена тем, что расчет таких интервалов невозможно выполнить при большом шаге интегрирования численного метода, относительно величины тактового интервала (например, в области низких частот). Дополнительно ситуация усугубляется накоплением ошибок округления и применяемого численного метода. Последовательность основных действий предложенного алгоритма иллюстрирует рис. 3. Критерием завершения расчета принимается появление установившегося (стационарного) режима на интервале времени, соответствующем периоду гармонического сигнала. Установившийся режим определяется путем расчета статистических показателей стационарности режима для интервалов выделенных динамических «окон» (сфазированных внутри разных периодов гармонического сигнала, инжектируемого в контур обратной связи) дискретизированного по тактовой частоте рассчитанного ряда данных, для которых выполняется тест проверки на нулевую гипотезу и вычисляется коэффициент корреляции Пирсона.

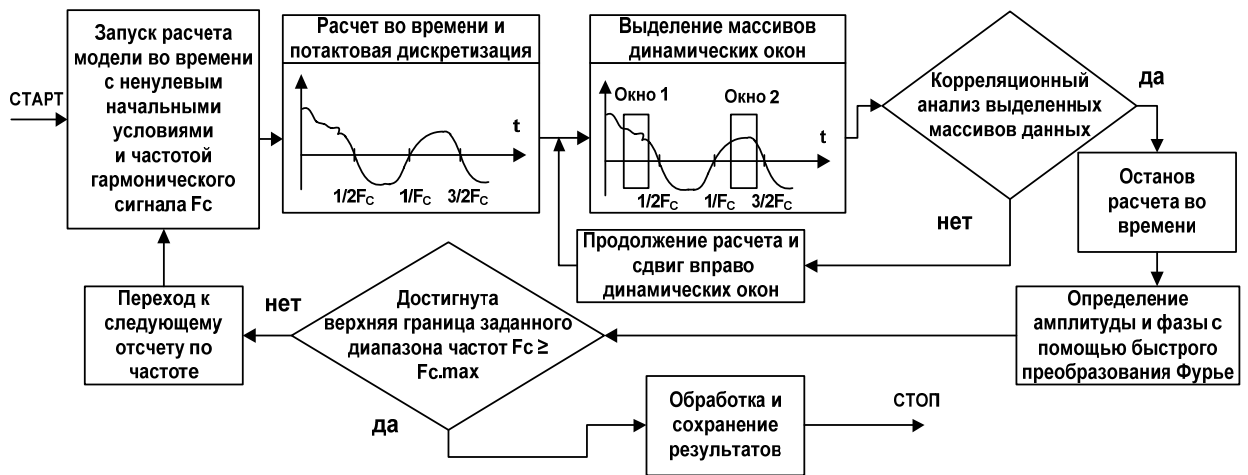


Рис. 3. Схема анализа частотных свойств ПМ ИМС ИПН

Применяемые сегодня в электронной области программные комплексы, с одной стороны, по таким показателям, как скорость расчета, точность и сходимость численного метода, малоэффективны для анализа импульсных силовых преобразователей (OrCAD, Multisim и т.д.), а с другой стороны, не имеют возможностей синтеза ПМ ИМС ИПН (IC-CAP, Orcad/ModelEditor). Это и определило необходимость разработки программного комплекса, лишенного указанных недостатков.

Разработанный программный комплекс «SBM» предназначен для моделирования динамических процессов в ИМС ИПН и синтеза ПМ ИМС. Комплекс разработан в платформе Matlab с использованием ее встроенных математических функций. Архитектура программного комплекса представлена на рис. 4.

Программный комплекс «SBM» обладает возможностью расчета процессов в ИМС ИПН на основе предложенных в диссертационной работе методов и алгоритмов, модульной архитектурой, интуитивно-понятным интерфейсом пользователя с большими возможностями по работе с данными, их визуализацией и экспортом/импортом данных в стандартные форматы. Также имеется возможность оперативного обмена экспериментальными данными, получаемых с помощью программно-аппаратного измерительного комплекса АТоМ-9х, разработанного в НИЛ АТМ БГТУ. Пользователь может выбрать для настройки любой из блоков схемы, изображенной на рис. 1, осуществляя коррекцию частоты коммутации и других параметров, активацию/деактивацию необходимого набора блоков в случае наличия в ИМС

ИПН выводов COMP, SYNC, BOOST, или изменения вида и состава силовых ключей внутри микросхемы. Для программной реализации целевых поведенческих моделей был выбран высокоуровневый язык описания аппаратуры VHDL (Very-High-Speed Hardware Description Language) и его расширение VHDL-AMS, описанное стандартом IEEE 1076.1. Этот язык разработан для описания поведенческих моделей с сигналами смешанного типа, что в полной мере позволяет реализовать мультидисциплинарные электротепловые ПМ. В главе рассмотрена реализация программного кода для отдельных блоков схемы, изображенной на рис. 1, на языке VHDL-AMS, что в результате позволяет синтезировать код поведенческих моделей для различных типов ИМС ИПН.

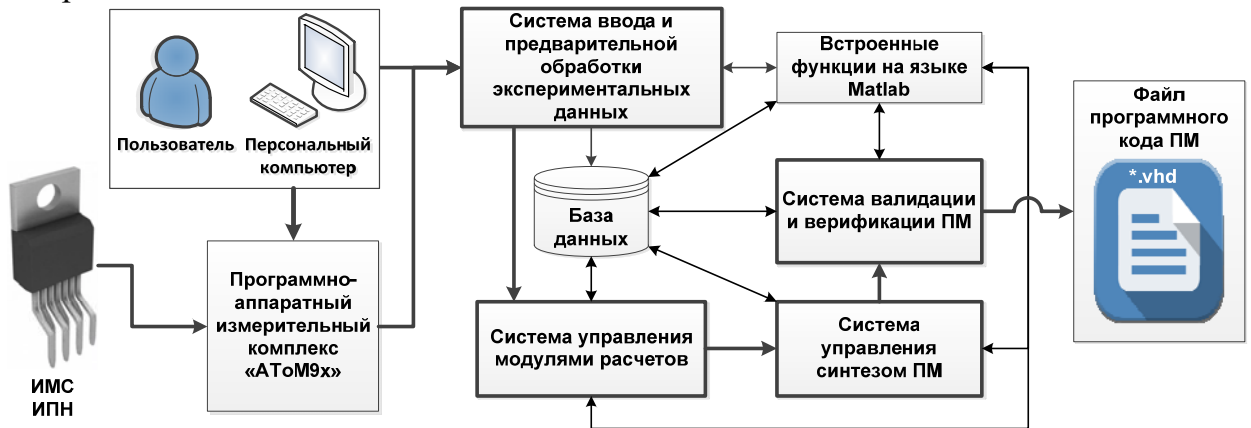


Рис. 4. Архитектура разработанного программного комплекса «SBM»

В главе 4 приведены результаты моделирования с целью проверки адекватности полученных ПМ для ИМС ИПН конкретных типов и марок.

Рассматривается тестовая задача формирования ПМ ИМС ИПН LM2596 компании Texas Instruments. Данная микросхема широко применяется при построении схем импульсных DC-DC преобразователей понижающего типа. Приводятся результаты верификации полученной ПМ для данной микросхемы. Различие результатов моделирования стартовых диаграмм синтезированной ПМ и SPICE-модели, приведенной производителем, не превышает 2,5% (рис. 5). Также для синтезированной разработанным программным комплексом ПМ данной ИМС ИПН приведены графики частотных характеристик, полученных с применением алгоритма, рассмотренного в главе 3, который позволил сократить время выполнения моделирования более чем в 3 раза по сравнению с известным подходом, в котором используется расчет временных интервалов увеличенной продолжительности. Приводятся результаты проверки адекватности синтезированной ПМ путем ее симуляции в среде моделирования SystemVision Cloud фирмы Mentor Graphics.

Для проверки предлагаемого численного метода получения аппроксимирующей зависимости ПТХ проведен натурный эксперимент, в ходе которого была выполнена аппроксимация экспериментально полученной ПТХ ИМС ИПН LM2676. В соответствии с рассчитанным графиком СППВ при аппроксимации использовалась аппроксимирующая зависимость на основе суммы четырех экспонент. Полученное в результате аппроксимации выражение, отражающее взаимосвязь во времени t температуры перегрева кристалла T_j ИМС ИПН в пересчете на 1Вт греющей мощности, позволяет приближенно описать кривую ПТХ с погрешностью не более 0,5% для всего интервала времени наблюдаемого переходного процесса установления температуры. Результаты аппроксимации приведены на рис. 6.

В главе приводятся результаты получения ПМ ИМС ИПН для ряда отличающихся друг от друга существенным образом типов ИМС ИПН, в качестве которых были выбраны следующие микросхемы LM2676, LT1076, LT1372, MP2012.

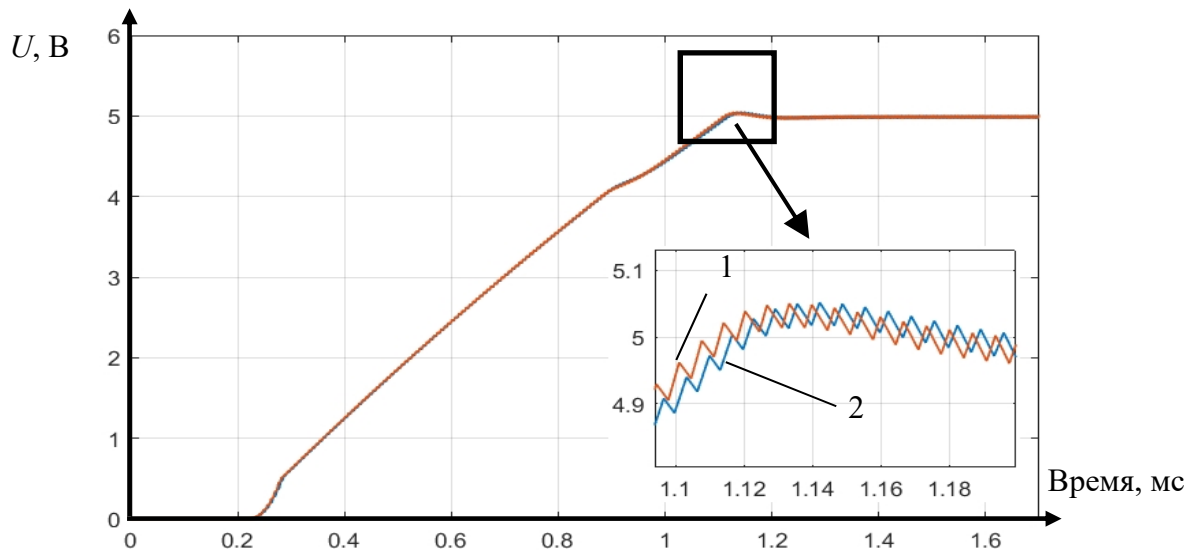


Рис.5. Стартовая диаграмма выходного напряжения ИПН на базе ИМС LM2596: 1 – синтезированная ПМ, 2 – Spice-модель

Также в четвертой главе приведены результаты проверки работоспособности синтезированных ПМ различных ИМС ИПН с учетом их программной реализации.

Проведено сравнение скорости и точности моделирования синтезированных поведенческих моделей с моделями транзисторного уровня для ИМС серий 5320ЕА, 5320ЕВ. Использование предложенных методов снижает затраты машинного времени по сравнению с существующими методами моделирования ИМС для транзисторного уровня более чем в 10 раз при аналогичных параметрах точности расчета.

Представленные исследования и алгоритмы используются при разработке и производстве радиационно-стойких ИМС ИПН на предприятии АО «ГРУППА КРЕМНИЙ ЭЛ», г. Брянск, а также при разработке и производстве промышленных преобразователей на основе ИМС ИПН в ООО «Фрекон», г. Томск.

Результаты исследования использованы при выполнении НИР по заданию Министерства образования и науки № 8.1729.2017/ПЧ «Разработка методов структурно-параметрической идентификации и автопостроения поведенческих и мультифизических моделей интегральных схем и разработка на их базе программно-аппаратного измерительного комплекса».

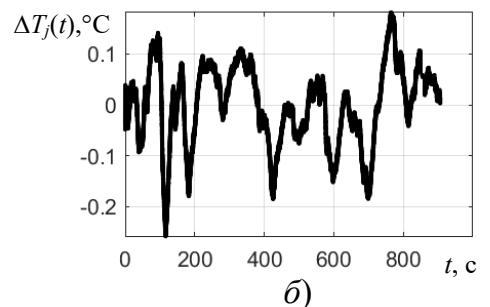
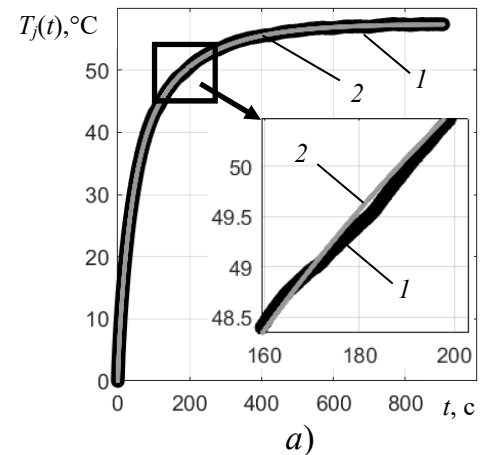


Рис.6. Результаты аппроксимации переходной тепловой характеристики (ПТХ)
а) – экспериментальная ПТХ (1) и результат аппроксимации (2);
б) – абсолютная ошибка

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Решена актуальная научно-техническая задача математического моделирования динамических процессов, характеризующих поведение интегральных микросхем импульсных преобразователей напряжения (ИМС ИПН), с использованием нового математического метода моделирования, имеющая существенное значение для практики разработки и испытаний ИМС ИПН, а также для развития методов модельно-ориентированного проектирования импульсных преобразователей напряжения, использующих в своем составе микросхемы данного класса.

В процессе исследований получены следующие новые научные результаты:

1. Разработанный математический метод и алгоритм интерпретации экспериментальных данных, полученных на основе тестовых воздействий на ИМС ИПН и формирующих ее динамический отклик, позволяют синтезировать мультидисциплинарные ПМ микросхем конкретного типа путем подстановки в выражения обобщенной математической модели ИМС ИПН значений параметров и зависимостей, найденных в результате исполнения данного алгоритма, реализующего предложенный метод.

2. Предложенный численный метод получения аппроксимирующей зависимости переходной тепловой характеристики (ПТХ) ИМС ИПН на основе экспериментальных данных позволяет определить структуру и величины параметров искомой зависимости, которая обеспечивает определение температуры кристалла при моделировании мультидисциплинарных электротепловых ПМ микросхем. Проведен натурный эксперимент, в ходе которого была получена аппроксимирующая зависимость ПТХ микросхемы LM2676 с погрешностью не более 0,5%.

3. Реализованный новый алгоритм проверки адекватности математических моделей ИМС ИПН в частотной области позволяет сократить время расчета частотных характеристик в области низких частот более чем в 3 раза по сравнению с известным подходом, в котором используется расчет временных интервалов увеличенной продолжительности.

4. Проведено сопоставление скорости и точности моделирования синтезированных поведенческих моделей ИМС ИПН с моделями транзисторного уровня. Использование предложенных методов снижает затраты машинного времени по сравнению с существующими методами моделирования ИМС для транзисторного уровня более чем в 10 раз при аналогичных параметрах точности расчета.

5. Предложена архитектура программного обеспечения, в соответствии с которой разработан комплекс проблемно-ориентированных программ для выполнения вычислительного эксперимента на основе алгоритмов, реализующих разработанные математические методы моделирования поведения ИМС ИПН при воздействии внешних тепловых и электрических факторов.

6. Разработанный программный комплекс «SBM», использован при изготовлении опытных серий радиационно-стойких микросхем ИПН на предприятии АО «ГРУППА КРЕМНИЙ ЭЛ», г. Брянск, а также при разработке и производстве промышленных преобразователей электрической энергии на основе ИМС ИПН в ООО «Фрекон», г. Томск.

7. В результате проведенных исследований с использованием разработанного программного комплекса синтезировано более 200 поведенческих моделей ИМС для АО «ГРУППА КРЕМНИЙ ЭЛ», г. Брянск.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Школин, А.Н. Измерение тепловых и электрических параметров микросхем импульсных преобразователей напряжения / А.Н. Школин, А.Ю. Дракин, Л.А. Потапов, В.Ф. Зотин // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия «Естественные и технические науки». – 2019. – №7. – С. 146-153.

2. Школин, А.Н. Использование имитационных моделей при контроле параметров интегральных микросхем [Электронный ресурс]// А.Ю. Дракин, А.Н. Школин, А.А. Пугачев // Инженерный вестник Дона. – 2019. – № 4. – Режим доступа: www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/N3y2019/5849.

3. Школин, А.Н. Автоматизированное измерение динамических параметров полупроводниковых модулей БТИЗ и БВД / А.Ю. Дракин, В.Ф. Зотин, А.Н. Школин // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия «Естественные и технические науки». – 2019. – №6/2. – С. 61-68.

4. Школин, А.Н. Аппроксимация передаточной характеристики чувствительного элемента термоанемометрического датчика расхода жидкости / В.И. Громов, П.В. Ястребов, К.Л. Афанасьев, В.В. Фесов, А.А. Малаханов, А.Н. Школин // Вестник БГТУ. – 2017. – № 3. – С. 80-87.

Статьи в изданиях, индексируемых Scopus и Web of science

5. Shkolin, A.N. Automation of capacitance measurements for power semiconductor modules / A.J. Drakin, V.F. Zotin, A.N. Shkolin // Journal of Fundamental and Applied Sciences. – 2017. – Vol. 9. – № 7S. – P. 962-981.

6. Shkolin, A.N. Automated Control of the Resistance of Schottky SiC Diodes to Return Voltage Speed Rate/ A.Yu. Drakin, A.N. Shkolin, V.F. Zotin // Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems. – 2018. – Vol. 10, 10-Special Issue. – P. 1939-1946.

6. Shkolin, A.N. Development of automated measurement systems for testing integrated circuits of switching converters / A.N. Shkolin, A.Y. Drakin, V.F. Zotin // 2018 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT). – IEEE, 2018. – P. 1-4.

8. Shkolin, A.N. Modeling and control of thermal processes in semiconductor devices / L.A. Potapov, A.N. Shkolin, A.Y. Drakin // ICIE-2019. – IEEE, 2019. – P. 1-6.

9. Shkolin, A.N. IC testing of high-frequency switching DC-DC converter using models of thermal processes / L.A. Potapov, A.N. Shkolin, A.Y. Drakin // SIBCON-2019. – IEEE, 2019. – P. 1-6.

Документы на объекты интеллектуальной собственности

10. Патент на полезную модель RU185532. Тестер микросхем высокочастотных импульсных преобразователей напряжения / А.Ю. Дракин, В.Ф. Зотин, Л.А. Потапов, А.Н. Школин, И.Ю. Бутарев; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО БГТУ (RU). - 185532U1; заявл. 12.02.2018; опубл. 07.12.2018 бюл. № 34. – 5 с.

11. Свидетельство 2018662665, Российская Федерация. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. Поведенческая модель интегральной микросхемы импульсного преобразователя напряжения LM2676 / А.Ю. Дракин, А.Н. Школин; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО БГТУ (RU). – 2018662665; заявл. 26.07.2018; опубл. 12.10.2018, Реестр программ для ЭВМ. – 1 с.

12. Свидетельство 2018662300, Российская Федерация. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. Поведенческая модель интегральной микросхемы импульсного преобразователя напряжения LM2596 / А.Ю. Дракин, А.Н. Школин; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО БГТУ (RU). – 2018662300; заявл. 26.07.2018; опубл. 04.10.2018, Реестр программ для ЭВМ. – 1 с.

13. Свидетельство 2018662664, Российская Федерация. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. Поведенческая модель интегральной микросхемы импульсного преобразователя напряжения LT1076 / А.Ю. Дракин, А.Н. Школин; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО БГТУ (RU). – 2018662664; заявл. 2018617901 26.07.2018; опубл. 12.10.2018, Реестр программ для ЭВМ. – 1 с.

14. Свидетельство 2018662299, Российская Федерация. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. Поведенческая модель интегральной микросхемы импульсного преобразователя напряжения LT1372 / А.Ю. Дракин, А.Н. Школин; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО БГТУ (RU). – 2018662300; заявл. 26.07.2018; опубл. 04.10.2018, Реестр программ для ЭВМ. – 1 с.

Статьи в сборниках научных трудов, тезисы докладов конференций

15. Школин, А.Н. Разработка поведенческих моделей интегральных микросхем ШИМ-контроллеров высокочастотных импульсных источников питания / А.Н. Школин, С.В. Михеев // САПР и моделирование в современной электронике: сб науч. тр. I Междунар. науч.-практ. конф. / под ред. Л.А. Потапова, А.Ю. Дракина. – Брянск: БГТУ, 2017. – С. 146-152.

16. Школин, А.Н. Разработка автоматизированных измерительных комплексов для испытаний микросхем высокочастотных импульсных преобразователей напряжения / А.Ю. Дракин, А.Н. Школин // Электронные средства и системы управления: материалы докладов XIII Междунар. науч.-практ. конф. (29 ноября – 1 декабря 2017 г.): в 2 ч. – Ч. 1. – Томск: В-Спектр, 2017. – С. 168-172.

17. Школин, А.Н. Разработка подходов к автопостроению поведенческих моделей интегральных микросхем регуляторов напряжения / А.Н. Школин, А.Ю. Дракин // САПР и моделирование в современной электронике: сб. науч. тр. II Междунар. науч.-практ. конф. / под ред. Л.А. Потапова, А.Ю. Дракина. – Брянск: БГТУ, 2018. – Ч.1 – С. 104-108.

18. Школин, А.Н. Применение тестового оборудования для автопостроения поведенческих моделей интегральных микросхем регуляторов напряжения / А.Ю. Дракин, А.Н. Школин // Электронные средства и системы управления: материалы докладов XIV Междунар. науч.-практ. конф. (28–30 ноября 2018 г.): в 2 ч. – Ч. 1. – Томск: В-Спектр, 2018. – С. 122-125.

19. Школин, А.Н. Теплоэлектрическое моделирование высокочастотных импульсных преобразователей напряжения / Л.А. Потапов, А.Н. Школин, Д.Г. Гадашев // САПР и моделирование в современной электронике: сб. науч. тр. II Междунар. науч.-практ. конф. / под ред. Л.А. Потапова, А.Ю. Дракина. – Брянск: БГТУ, 2018. – Ч.2 – С. 75-82.

20. Школин, А.Н. Сравнительный анализ режимов работы поведенческой модели понижающего ШИМ-контроллера в Matlab/Simulink / И.Ю. Бутарев, А.Н. Школин // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: материалы 13-й Всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары, Изд-во Чуваш. ун-та – 2019. – С. 209-213.

Подписано в печать 03.12.2019 Формат 60×84 1/16
Бумага офсетная. Офсетная печать. Печ. л. 1 Т. 100 экз. Заказ № _____. Бесплатно.

Брянский государственный технический университет
241035, Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7,
Лаборатория оперативной печати БГТУ, ул. Институтская, 16