

ОТЗЫВ

официального оппонента Михальченко Сергея Геннадьевича на диссертацию Школина Алексея Николаевича на тему «Математическое моделирование процессов в интегральных микросхемах импульсных преобразователей напряжения при внешних тепловых и электрических воздействиях», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

1. Актуальность избранной темы

Диссертационная работа посвящена исследованию процессов, протекающих в интегральных микросхемах импульсных преобразователей напряжения при воздействии внешних электрических и тепловых факторов.

Автором разрабатываются методы и алгоритмы математического моделирования процессов в интегральных микросхемах импульсно-модуляционных стабилизаторов напряжения с учетом воздействий внешних электрических и тепловых факторов, а также численные методы, реализующие созданные модели.

Проблемная ситуация заключается в том, что у современных методов разработки преобразовательной техники основой является процесс *имитационного моделирования устройства в современных САПР* различного вида, однако не все электронные компоненты имеют имитационные модели достаточного качества и в требуемом САПР формате. Особенно плачевна ситуация с имитационными моделями отечественной ЭКБ.

Разработчикам электронной аппаратуры остро необходимы модели импульсно-модуляционных компонентов достаточной степени проработки, учитывающие:

- нелинейные процессы, протекающие в микросхемах,
- внешние воздействия электромагнитных и радиационных факторов,
- характеристики среды использования и режимов эксплуатации.

Микросхемы импульсных преобразователей напряжения содержат логические цифровые и аналоговые узлы, коммутационные полупроводниковые приборы и большое число реактивных элементов, призванных работать на частотах от сотен килогерц до сотен мегагерц. С точки зрения моделирования они являются сугубо нелинейными объектами (содержащими практически все виды нелинейностей) и имеют тенденцию к появлению недетерминированных

хаотических явлений. Развитие методов их моделирования представляет собой значительный научный и практический интерес.

2. Структура и краткая характеристика работы

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы из 139 наименований, 4 приложений. Объем диссертации составляет 187 страниц, в том числе 95 рисунков и 4 таблицы.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, определены цель и задачи, научная новизна и практическая значимость результатов, приведены выносимые на защиту положения, отмечен личный вклад автора.

Первая глава диссертации посвящена анализу существующих моделей электронных изделий в целом и микросхем импульсных преобразователей в частности, а также анализу методов и подходов к их синтезу. В главе автор приводит тенденции развития и основные факторы, определившие достаточно широкую область применения поведенческих моделей электронных компонентов и устройств. Также сравниваются существующие подходы и методы построения поведенческих моделей и способов определения их параметров: непараметрические и параметрические методы синтеза, способы формирования теплоэлектрических (мультидисциплинарных) моделей, способов определения параметров: с использованием шаблонных структур. В результате чего формулируется цель разработки математического метода и алгоритма интерпретации экспериментальных данных, полученных на основе тестовых воздействий на исследуемую микросхему импульсного преобразователя напряжения и формирующих ее динамический отклик.

Во второй главе автор, базируясь на предложенной классификации различных типов микросхем импульсных преобразователей напряжения, описывает разработку динамической обобщенной математической модели, учитывающей взаимодействие электрических и тепловых внешних факторов и позволяющей описать обширный класс микросхем импульсных преобразователей напряжения, приводится описание всех элементов этой модели. для анализа параметров поведенческой модели и расчета процессов в рабочем режиме микросхем с учетом схемы включения; рассматривает модель, позволяющую сократить затраты машинного время на итерационный процесс синтеза поведенческих моделей. Дополнительно приведен предлагаемый автором модифицированный численный метод получения аппроксимирующей зависимости переходной тепловой характеристики, позволяющий определить структуру и параметры

аппроксимирующей зависимости. На базе этого рассматривается предлагаемый автором оригинальный метод и алгоритм интерпретации экспериментальных данных, полученных на основе тестовых воздействий на исследуемую микросхему импульсных преобразователей напряжения и формирующих ее динамический отклик.

Третья глава посвящена разработке программного комплекса, объединяющего в себе представленные математические модели и метод, описанию его структуры и алгоритмов его функционирования.

В четвертой главе приведены результаты моделирования и экспериментальные данные, на основе которых проведена проверка адекватности полученных поведенческих моделей для микросхем импульсных преобразователей напряжения конкретных типов и марок. Приведены результаты проверки работоспособности синтезированных поведенческих моделей различных микросхем с учетом их программной реализации в среде моделирования SystemVision Cloud.

В заключении представлены основные результаты диссертационного исследования.

В приложениях рассмотрены документы об апробации и внедрении результатов исследования, приведен программный код синтезированных поведенческих моделей микросхем, представлены дополнительные материалы с результатами моделирования.

3. Основные научные и практические результаты и их новизна

Сущность предлагаемого автором решения актуальной научной задачи разработки математических методов, алгоритмов и программ для моделирования процессов в интегральных микросхемах импульсных преобразователей напряжения с учетом внешних тепловых и электрических воздействий объединяет в себе сферы моделирования силовой электроники как динамических нелинейных объектов, теории оптимизации и теории математической статистики.

Наиболее важными результатами диссертационной работы, обладающими научной новизной, являются следующие:

- 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;

- 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;

- 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.

Наиболее важным эксплуатационно-практическим результатом работы, обладающим кроме того научной новизной, является 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.

Результаты, полученные автором в ходе диссертационного исследования, могут быть рекомендованы к применению также для микросхем других типов импульсных преобразователей, в частности корректоров коэффициента мощности.

4. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

В работе приведены результаты оценки адекватности синтезированных поведенческих моделей на основе сравнительного анализа результатов моделирования с экспериментальными данными.

Результаты оценки эффективности разработанного программного комплекса позволяют его применять в реальных условиях работы инженера-проектировщика импульсных преобразователей и других устройств силовой преобразовательной техники, включающих в свой состав исследуемые микросхемы.

Кроме этого, разработанные автором методы, модели и алгоритмы уже нашли применение в рабочем процессе ряда предприятий, а именно при разработке и испытании опытных серий ряда микросхем импульсных преобразователей

напряжения в АО «Группа Кремний ЭЛ», г. Брянск, и при разработке и изготовлении промышленных преобразователей электрической энергии в ООО «Фрекон», г. Томск. Это позволяет говорить о практической значимости диссертационной работы.

Результаты исследования электромагнитных процессов, протекающих в интегральных микросхемах импульсных преобразователей напряжения, подтверждаются результатами экспериментов, проведенных на имитационных моделях и реальных прототипах устройств. Обоснованность научных положений диссертации подтверждена экспериментальными результатами.

Степень обоснованности сформулированных научных положений, выводов и рекомендаций находится на уровне требований достаточном для кандидатской диссертации.

5. Соответствие содержания автореферата основным положениям диссертации

Диссертация и автореферат написаны технически и литературно грамотным понятным языком. Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации и соответствует ее структуре.

6. Соответствие содержания диссертации паспорту специальности 05.13.18

Все научные результаты соответствуют пунктам областей исследований, определенным паспортом специальности 05.13.18 Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, в частности:

- присутствует разработка новых математических методов моделирования технических и естественнонаучных объектов и явлений - интегральной микросхемы импульсного преобразователя напряжения и ее динамики;
- разработаны качественные и приближенные аналитические методы исследования математических моделей для использования на предварительном этапе математического моделирования;
- проработано и применено обоснование и тестирование эффективных численных методов с применением современных компьютерных технологий;
- реализованы эффективные численные методы и алгоритмы в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента;
- проведено комплексное исследование научных и технических, фундаментальных и прикладных проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента;

- разработан новый математический метод и набор алгоритмов проверки адекватности математических моделей объектов на основе данных натурального эксперимента;
- предложен новый математический метод и алгоритмы интерпретации натурального эксперимента на основе его математической модели;
- разработана система имитационного моделирования.

7. Подтверждение опубликования результатов исследования

По материалам диссертации опубликовано 15 печатных работ, среди которых 4 статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ, и 5 статей в изданиях, индексируемых Scopus и Web of science. Также в рамках диссертационного исследования автором было получено 4 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ и один патент на полезную модель. Работы автора, опубликованные в открытых научных изданиях, в достаточной степени отражают содержание диссертации. Все полученные автором результаты, обладающие признаками научной новизны, отражены в статьях, опубликованных в журналах из перечня ВАК РФ.

8. Замечания официального оппонента по диссертационной работе

Диссертация Школина А.Н. представляет собой законченную, самостоятельно выполненную оригинальную научно-исследовательскую работу, посвященную решению актуальной научной задачи. Диссертация содержит значимые теоретические и практические результаты.

Положительно оценивая работу в целом, отмечаю несколько замечаний:

1. Выводы по первой главе работы (п.1.4, стр.46) указывают необходимость получения исходных данных для построения адекватной имитационной модели интегральной микросхемы импульсного преобразователя напряжения, однако перечень этих первичных данных не приводится и методика их получения не проработана, в то время как от полноты полученных данных напрямую будет зависеть качество построенных математических моделей.

2. В работе не приведено математического доказательства того факта (в принципе, очевидного, но формально не доказанного), что предложенная обобщенная модель описывает *все* перечисленные на рисунках 2.1 - 2.7 типовые структуры топологии управляющих контроллеров. И все ли возможные топологии микросхем указанного функционала присутствуют на этих рисунках?

3. Не в достаточной степени алгоритмизирован процесс перехода от обобщенной математической модели ИМС ИПН, которая рассмотрена в разделе 2.3,

к модели, позволяющей анализировать параметры ПМ с учетом схемы включения микросхем, которая приведена на странице 77, формула (2.57).

4. В качестве способа формирования последовательности импульсов, управляющих коммутационными элементами модели, выбрана широтно-импульсная модуляция, в то время как в управляющих микросхемах (например, производства Vicor corp.) используется частотно-импульсная, а возможны и другие виды модуляции. В работе не рассматривается способ перехода к математическому описанию других видов модуляции, что, несомненно, сужает область применения программного продукта и сделанных в диссертации выводов.

5. Неочевиден выбор вида регулятора в составе обобщенной математической модели ИМС ИПН, в частности – порядка инерционного звена линейной части регулятора, описание которой рассмотрено в разделе 2.3.

6. В большом количестве работ приводятся данные о хаотических и катастрофических явлениях в динамике полупроводниковых преобразователей напряжения с импульсно-модуляционными способами управления. Мне не известны преобразователи, в которых бы подобные явления не наблюдались. В работе не рассматривается вопрос адекватности отображения созданной моделью аномальных режимов работы преобразователя.

7. Поскольку предложенная обобщенная модель интегральной микросхемы импульсного преобразователя напряжения все же не охватывает все виды контроллеров такого рода, напрашивается алгоритм, анализирующий саму возможность построения адекватной имитационной модели микросхемы по результатам алгоритма валидации и верификации ПМ с учетом выбранной структуры, вида модуляции, параметров и т.д.

8. В четвертой главе при анализе результатов моделирования и оценке адекватности синтезированных ПМ для лучшего понимания достигаемого эффекта желательно было привести более широкий спектр статистических оценок, отражающих совпадение результатов моделирования с экспериментальными данными. Так же желательно провести серию экспериментов, позволяющих сравнить результаты работы модели и физического макета для большего числа управляющих микросхем, имеющих различные структуры.

Указанные замечания не снижают высокого уровня оценки проделанной работы и не влияют на положительное мнение официального оппонента о ней в целом, а направлены на возможности дальнейшего развития тематики исследования.

Заключение

Диссертационная работа Школина Алексея Николаевича соответствует специальности 05.13.18 (пп. 1-8 паспорта специальности) и представляет собой законченную научно-квалификационную работу, результатом которой является решение важной задачи актуального направления в моделировании преобразовательной электронной техники. Работа обладает научной новизной и практической значимостью, в достаточной степени освещена в печати. Разработанное программное обеспечение прошло государственную регистрацию. Результаты работы нашли применение в учебном процессе Брянского государственного технического университета и на специализированных предприятиях АО «Группа Кремний ЭЛ», г. Брянск, и ООО «Фрекон», г. Томск. Автореферат в достаточной степени отражает основные положения и выводы диссертации и соответствует ее структуре.

В целом представленная диссертация соответствует, предъявляемым к кандидатским диссертациям, требованиям, установленным в «Положении о порядке присуждения ученых степеней», утвержденным постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 №842 (ред. от 30.07.2014) в части раздела II пункта 9, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, Школин Алексей Николаевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Официальный оппонент
заведующий кафедрой «Промышленная электроника»
ФГБОУ ВО «Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники»
доктор технических наук, доцент

С.Г. Михальченко

«14» марта 2020г.

Контактные данные:
тел. +7-9138260907
e-mail msg@ie.tusur.ru
Адрес: 634050, Россия, г.
Томск, пр. Ленина, д. 40,

Подпись Михальченко *Сергей Геннадьевича* заверяю:

Подпись
УДОСТОВЕРЯЮ
Ученый секретарь
Е.В. П...