

На правах рукописи



Подгузова Мария Андреевна

**ДРАЙВЕРЫ С ТРАНСФОРМАТОРНОЙ
ГАЛЬВАНИЧЕСКОЙ РАЗВЯЗКОЙ ДЛЯ
ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ СИЛОВЫХ
ТРАНЗИСТОРНЫХ КЛЮЧЕЙ**

Специальность 2.4.2 –
«Электротехнические комплексы и системы»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» на кафедре «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы».

- Научный руководитель:** **Ковалев Константин Львович**, доктор технических наук, с.н.с., заведующий кафедрой 310 ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».
- Официальные оппоненты:** **Лукин Анатолий Владимирович**, доктор технических наук, профессор, генеральный директор ООО «ММП-Ирбис».
Рощупкин Георгий Вячеславович, кандидат технических наук, руководитель направления ИБП ООО «Парус электро».
- Ведущая организация:** ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Защита состоится **«26» декабря 2024 г. в 14 часов 00 минут** на заседании диссертационного совета 24.2.327.11, созданного на базе ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д.4, корп. 57, ауд. 302.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4, и на сайте: https://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT_ID=182700.

Автореферат разослан «___» _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.327.11,

кандидат технических наук, доцент



Д.С. Дежин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. На современном этапе развития энергетической электроники силовые транзисторные ключи и управляющие ими драйверы являются неотъемлемой составной частью различных устройств преобразования, распределения и регулирования электроэнергии, обязательно входящих в состав любых электротехнических комплексов и систем. К таким устройствам относятся:

- источники вторичного электропитания;
- преобразователи постоянного напряжения в переменное (инверторы);
- зарядные устройства аккумуляторных батарей;
- преобразователи переменного напряжения в постоянное (конвертеры);
- источники бесперебойного питания;
- силовые активные фильтры;
- преобразователи частоты (циклоконвертеры);
- устройства и системы стабилизации выходного напряжения синхронных генераторов;
- устройства и системы стабилизации выходного напряжения генераторов постоянного тока;
- импульсные регуляторы коллекторных, бесколлекторных, асинхронных и шаговых электродвигателей;
- бесконтактная полупроводниковая аппаратура коммутации и защиты распределительных электросетей.

Алгоритм управления работой силового каскада преобразователя электроэнергии задаёт несиловое маломощное устройство управления. Для улучшения удельных массоэнергетических показателей устройств преобразования электроэнергии их регулирующие элементы должны работать в ключевом режиме на достаточно высокой частоте переключения с относительно малыми динамическими потерями. Для связи маломощного устройства управления с силовыми транзисторными ключами (СТК) преобразовательного каскада, предназначены специальные электронные устройства – драйверы.

Несмотря на то, что многие зарубежные фирмы и ряд отечественных предприятий серийно выпускают драйверы различных типов, разработка и исследование принципов построения драйверов различных типов в литературе рассмотрена недостаточно полно и является актуальной задачей. Это обусловлено следующими причинами. Разработчик и производители стараются защитить свои особенности реализации драйверов, поэтому не публикуются в

открытой печати. Кроме того, последние два десятилетия в мировой практике наблюдается явная тенденция даже не патентовать новые решения в силовой электронике, для сохранения секретов фирмы. В серийно выпускаемых изделиях эти секреты скрываются с помощью различных специальных технологий. Отечественные производители драйверов так же не раскрывают свои схемотехнические решения. Экспериментальные исследования отечественных драйверов показали, что они, к сожалению, не удовлетворяют предъявляемым к ним требованиям, и в ряде случаев не соответствуют параметрам, приводимым в технической документации. В связи с вышеизложенным разработка и исследования принципов построения различных драйверов с разными видами узла гальванической развязки, на отечественной элементной базе, является достаточно актуальной задачей.

Степень разработанности темы исследования. Отдельные вопросы проектирования и исследования драйверов с трансформаторной гальванической развязкой (ТГР) для высоковольтных силовых транзисторных ключей рассмотрены в работах Анучина А.С., Воронина П.А., Шевцова Д. А., Машукова Е. В., Сергеева Б.С, Волошина С.А. и других, а также зарубежных ученых Wolfgang Ewald, Diego Puyal, Carlos Bernal, Blumenfeld A, Cervera A, Philip Anthony, Neville McNeill, Derrick Holliday, Duncan Grant, George Hearn – и многих других

Объект исследования. Объектом исследования являются драйверы с различными способами передачи информационного сигнала через ТГР для высоковольтных силовых транзисторных ключей.

Предмет исследования. Предметом исследования являются топологии силовых каскадов драйверов с ТГР и их алгоритм управления, направленные на повышение эффективности работы и увеличение качества потребления электроэнергии.

Цели и задачи работы. Целью диссертационной работы является разработка принципов построения драйверов с ТГР для управления высоковольтными СТК на основе МДП и IGB-транзисторов.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- 1) анализ технических требований, предъявляемых к драйверам СТК;
- 2) поиск структурных и схемотехнических решений драйверов с ТГР, опубликованных в открытых изданиях;

- 3) исследования влияния паразитных параметров ТГР на процессы переключения различных типов силовых транзисторных ключей.
- 4) получение аналитических соотношений для количественной оценки неизбежных паразитных параметров ТГР;
- 5) разработка структурных и функциональных схем драйверов с различными способами передачи сигнала управления через ТГР;
- 6) разработка и исследование схемотехнических решений для подавления негативного влияния неизбежных паразитных параметров и эффекта du/dt на процессы переключения драйверов и силовых транзисторных ключей;
- 7) разработка принципиальных электрических схем драйверов и их компьютерных моделей в системе ORCAD PSPICE для проверки их работоспособности с помощью имитационно- компьютерного моделирования;
- 8) исследования с помощью имитационно-компьютерного моделирования работоспособности и эффективности предложенных технических решений;
- 9) разработка методики проектирования ТГР для драйверов с различным способом передачи сигнала управления;
- 10) разработка и исследования методов повышения эффективности драйверов с ТГР;
- 11) разработка и экспериментальные исследования макетных образцов драйверов с ТГР.

Методы исследования. Для решения поставленных в работе задач использовались методы математического анализа, методы теории линейных и нелинейных электрических цепей, методы решения дифференциальных уравнений, методы имитационного компьютерного моделирования в средах Mathcad и Orcad 9.2, методы теории автоматического управления и регулирования, экспериментальные исследования физических моделей драйверов с ТГР.

Научная новизна. При решении задач, поставленных в диссертационной работе, были получены следующие новые научные результаты:

1. предложены принципы построения драйверов с ТГР с различными способами передачи сигнала управления.
2. исследовано влияние неизбежных паразитных параметров ТГР на процессы переключения драйверов и СТК;

3. получены аналитические соотношения для количественной оценки межобмоточной ёмкости и индуктивности рассеяния ТГР с тороидальным сердечником и однослойными обмотками;
4. предложены схемотехнические решения для подавления негативного влияния эффекта du/dt и паразитных параметров ТГР на работоспособность драйвера;
5. предложен алгоритм расчета и методика проектирования ТГР для драйверов с различными способами передачи сигнала управления;
6. разработаны схемотехнические решения, расширяющие функциональные возможности драйверов с ТГР.

Практическая значимость работы.

1. Предложена классификация драйверов с ТГР и различными способами передачи управления;
2. Предложены схемотехнические решения формирователей управляющих импульсов на первичной обмотке ТГР;
3. Предложено схемотехническое решение, исключающее несимметричный режим перемагничивания ТГР в двухтактном режиме работы.
4. Разработаны принципиальные электрические схемы драйверов с различными способами передачи сигнала управления.
5. Разработаны компьютерные модели драйверов с различными способами передачи сигнала управления в системе Orcad 9.2.
6. Разработаны макетные образцы драйверов с ТГР и экспериментально исследованы их параметры и характеристики.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

1. Принципы построения формирователей управляющих импульсов для драйверов с различными способами передачи сигнала управления через ТГР.
2. Структурные схемы драйверов с различными способами передачи сигнала управления через ТГР.
3. Способы подавления негативных параметров ТГР и эффекта du/dt на работоспособность драйвера.
4. Алгоритм расчета и методика проектирования ТГР для драйверов с различными способами передачи сигнала управления.
5. Способы защиты СТК от аварийного выхода в активный режим с помощью драйвера.

6. Способ обеспечения активного запираания силового транзисторного ключа.
7. Способ устранения несимметричной работы ТГР в двухтактном режиме.
8. Результаты экспериментальных исследований макетных образцов драйверов с различными способами передачи сигнала управления через ТГР.

Степень достоверности результатов. Основные положения и результаты диссертационной работы подтверждаются корректным использованием математического аппарата, а также сопоставлением результатов, полученных путем аналитических расчетов, математических и компьютерных моделей, а также экспериментальных исследований.

Апробация работы. Основные результаты докладывались и обсуждались на XXX Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, (МЭИ, г. Москва, 2024 г.), 20-ой международной студенческой конференции «Авиация и космонавтика» (г. Москва, РФ, 2024г.); международной научной конференции XLIX «Гагаринские чтения-2023» (г. Москва, РФ, 2023 г.).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 17 научных работ, включая 12 статей в журналах и изданиях, рекомендуемых ВАК РФ. И 2 статьи в изданиях, индексируемых международными базами Scopus и WoS. Получены в соавторстве 3 патента на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка использованных источников и 2-х приложений. Основная часть работы содержит 148 машинописных страниц, в том числе 94 рисунка и 2 таблицы. Список использованных источников включает 115 наименований. Общий объем работы - 160 страниц

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи диссертации, определена научная новизна и практическая значимость работы, сформулированы положения, выносимые на защиту, дана информация о структуре и объеме диссертации.

В первой главе сформулировано функциональное назначение драйверов и перечислены функции, выполняемые драйверами, а также области их применения. В результате анализа было установлено, что драйверы представляют собой устройства сопряжения между выходом маломощного устройства управления и входом СТК. От качества

работы драйвера во многом зависит работоспособность, надежность и эффективность всего преобразователя электроэнергии. Основными требованиями, предъявляемые к драйверам являются:

- высокое быстродействие (малые задержки на включение и выключения, малые фронты на включение и выключения).
- наличие гальванической развязки между входом и выходом (в подавляющем большинстве случаев).
- формирование относительно больших выходных импульсных токов для управления затворами СТК.
- малое выходное внутреннее сопротивление и высокое входное сопротивление.
- устойчивость к эффекту du/dt , особенно при повышенном напряжении питания и малых временах переключения.
- устойчивость к внешним и внутренним электромагнитным помехам.
- сохранение работоспособности при наличии неизбежных «паразитных» параметров.
- возможность работы при коэффициенте заполнения (Кз) от 0 до 1 включительно.
- низкое энергопотребление (энергетическая экономичность).
- способность управлять, как одиночным верхним и нижним ключом, так и ключами в составе мостовых и полумостовых схем.

Дополнительные требования к драйверу могут быть:

- возможность регулировки времени задержки на включение без задержки на отключение для предотвращения сквозных токов первого рода в мостовых и полумостовых схемах, поскольку сквозные токи приводят к существенному увеличению динамических потерь, к заметному повышению уровня электромагнитных помех, к значительному снижению надежности;
- защита от аварийного выхода СТК в активную область;
- передача гальванически развязанного сигнала от драйвера в устройство управления об аварийно отключенном состоянии СТК.
- возможность реализации двухполярного управления СТК для обеспечения его активного запириания.

Проведен сравнительный анализ достоинств и недостатков различных видов УГР. Предложена классификация драйверов с различными способами сигнала управления через ТГР, показанная на рисунке 1.

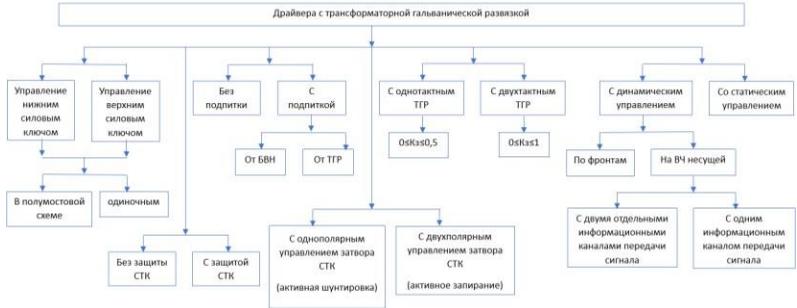


Рисунок 1 – Классификация драйверов с трансформаторной гальванической развязкой силовых транзисторных ключей

Рассмотрены различные варианты подключения первичной стороны драйвера к силовому каскаду.

Предложена обобщенная структурная схема драйвера с ТГР, показанная на рисунке 2.

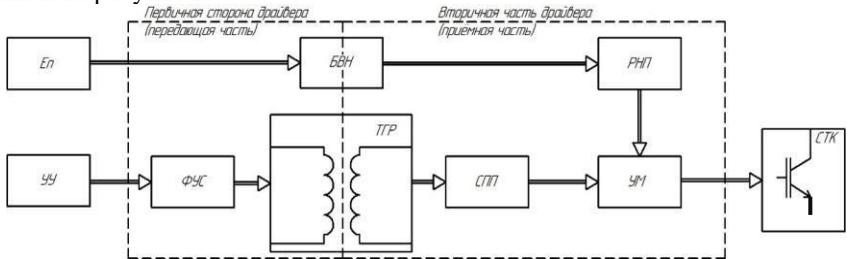


Рисунок 2 – Обобщенная функциональная схема драйвера с трансформаторной гальванической развязкой

Данная схема содержит следующие функциональные узлы:

Ep – напряжение питания первичной (передающей) стороны драйвера;
УУ – устройство управления драйвером (формирует сигналы управления СТК);

ФУИ – формирователь управляющих импульсов, передаваемых с первичной на вторичную (принимающую) сторону драйвера;

ТГР – трансформатор гальванической развязки;

СПП – схема подавления помех, обусловленных вредным влиянием du/dt и наличием паразитных параметров ТГР;

УМ – усилитель мощности обеспечивает необходимый уровень выходных импульсных токов драйвера для быстрого переключения СТК;

БВН – блок вспомогательного напряжения, предназначен для питания функциональных узлов вторичной стороны драйвера и обеспечения

гальванической развязки по энергетическому каналу между передающей и принимающей сторонами драйвера;
 РНП – реле напряжения питания, разрешает включение СТК по сигналам управления, только при условии, что выходное напряжение БВН находится в допустимых пределах;
 СТК – силовой транзисторный ключ, управляемый драйвером.

Перечислены основные проблемы проектирования драйверов с ТГР такие как предотвращение негативного влияния неизбежных паразитных параметров ТГР, и эффекта du/dt на процессы переключения самого драйвера и СТК. Под эффектом du/dt понимается резкое изменение напряжение на силовых электродах СТК, приводящее к протеканию относительно больших импульсных токов через паразитные межобмоточные ТГР и межэлектродные емкости СТК.

На рисунке 3 изображена схема идеального трансформатора и схема замещения реального трансформатора с учетом его паразитных параметров:

- индуктивности рассеяния обмоток;
- межобмоточные ёмкости;
- активное сопротивление обмоток.

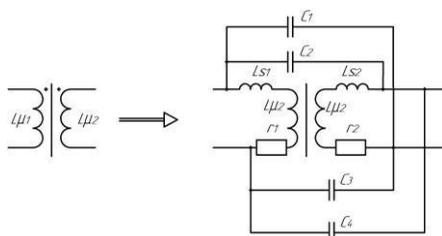


Рисунок 3 – Схемы идеального и реального трансформатора

На рисунке 4 показана осциллограмма процессов переключения высоковольтного СТК верхнего уровня на МДП-транзисторе, управляемого драйвером, спроектированным без учета негативного влияния на процессы переключения паразитных параметров ТГР и эффекта du/dt .

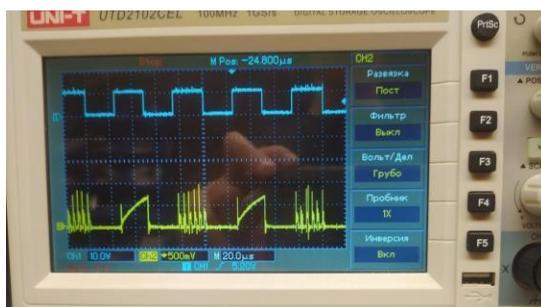


Рисунок 4 – Результаты экспериментального исследования влияния паразитных параметров ТГР

Во второй главе проведенные исследования показали, что применения одноконтных ФУИ нецелесообразно в драйверах с ТГР для управления высоковольтными СТК (как для одиночных, так и в составе полумостовой схемы). Это связано с тем, что во время паузы первичная обмотка ТГР не закорачивается, и на ней возникают паразитные высокочастотные колебания, которые трансформируются во вторичную обмотку ТГР и вызывают ложные переключения СТК. Кроме того, одноконтные ФУИ не обеспечивают исключения негативного влияния эффекта du/dt на процессы переключения.

Синтезированы принципиальные электрические схемы формирователей управляющих импульсов (ФУИ) первичной стороны драйвера для передачи информационного сигнала через ТГР с закорачиванием его первичной обмотки во время паузы:

- на частоте сигнала управления;
- по фронтам;
- на высокой несущей частоте.

Возможный вариант двухтактного ФУИ для передачи информации через ТГР на частоте сигнала управления представлен на рисунке 5.

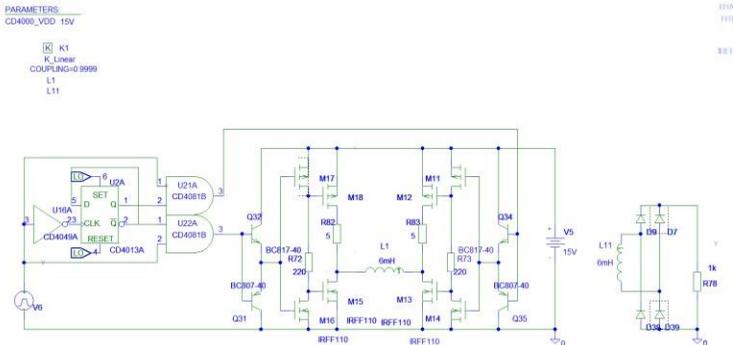


Рисунок 5 – модель схемы двухтактного ФУИ для передачи информации через ТГР на частоте сигнала управления

С помощью имитационного компьютерного моделирования (ИКМ) в системе OrCAD Pspice исследована и подтверждена работоспособность предложенных схемотехнических решений. Временные диаграммы процессов, подтверждающие работоспособность и эффективность такого ФУИ показаны на рисунке 6.

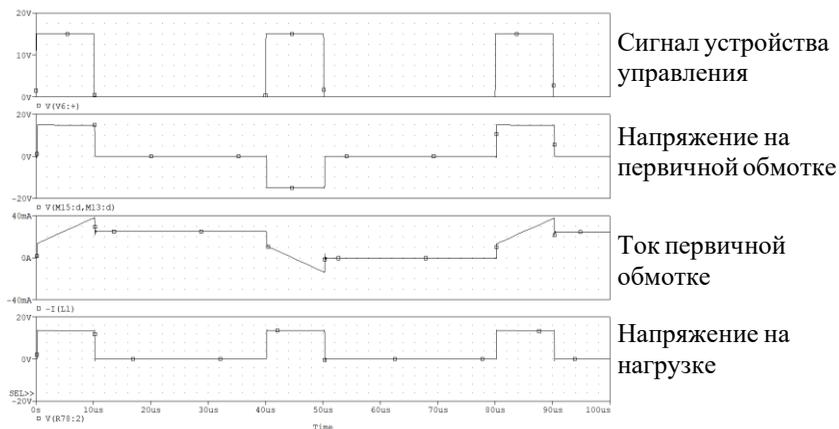


Рисунок 6 – Временные диаграммы процессов в двухтактном ФУИ

Предложена методика проектирования ТГР для драйверов с различными способами передачи сигнала управления. Отличительной особенностью этой методики является возможность проектирования



Рисунок 7 – Фотография трансформаторов, используемых в качестве ТГР для драйверов

импульсных ТГР для драйверов с различным способом сигнала управления. В соответствии с

разработанной методикой были спроектированы и изготовлены ТГР с тороидальным сердечником для драйверов с различными способами передачи сигнала управления. Фотографии спроектированных ТГР представлена на рисунке 7.

Отмечено, что перспективным направлением развития драйверов с ТГР является применение интегральных трансформаторов, показанных на рисунке 8.

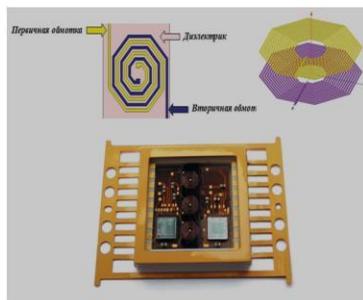
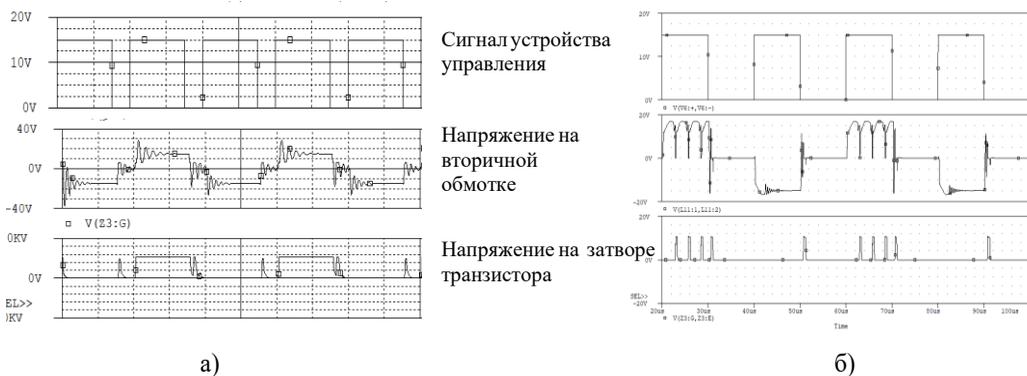


Рисунок 8 – перспективные интегральные ТГР для драйверов

В третьей главе установлено, что наличие паразитных параметров ТГР может

приводить к ложным переключениям СТК как при его отпирании, так и при его запирации, как видно из осциллограмм, приведенных на рисунке 4.

Исследованы процессы переключения драйвера для различных типов СТК с разными способами подключения первичной стороны драйвера при работе СТК как на резистивную нагрузку, так и на активно-индуктивную с блокирующим диодом. С помощью ИКМ выявлено, что негативное влияние на процессы переключения драйвера и СТК оказывают и индуктивности рассеивания обмоток ТГР и межобмоточная емкость, как видно из результатов ИКМ, представленных на рисунках 10а, 10б.



- а) результаты моделирования драйвера с учетом паразитной индуктивности рассеяния обмоток ТГР
 б) результаты моделирования драйвера с учётом паразитных межобмоточных ёмкостей ТГР

Рисунок 10 – Результаты моделирования драйвера управляющего одиночным нижним силовым транзисторным ключом, работающим на активную нагрузку с учётом паразитных параметров

Установлено, что при управлении различными видами СТК паразитные параметры ТГР оказывают различное влияние на процессы переключения при прочих равных условиях. Установлено и показано, что паразитные параметры ТГР оказывают негативное влияние как при переключении самого СТК, так и при переключении смежного с ним в составе полумостовой схемы. Выявлено, что наименьшее негативное влияние паразитные параметры ТГР оказывают при управлении одиночным нижним СТК, а наибольшее – при управлении верхним СТК в составе стойки. Установлено, что драйвер способный управлять верхним СТК в стойке также может управлять и другими типами СТК, и в этом смысле является наиболее универсальным.

Получены аналитические соотношения для оценки паразитных параметров ТГР с тороидальным сердечником и однослойными бифилярными обмотками.

$$C = \frac{\pi \varepsilon_0 l_0 W}{\ln \left(1 + \frac{D}{d_{\text{пров}}}\right)} \cdot \frac{d}{D} \cdot 2, \text{ где}$$

C – паразитная межобмоточная ёмкость;

$W_1 = W_2 = W$ – количество витков обмоток трансформатора;

ε_0 – диэлектрическая постоянная вакуума;

$l_0 = \left(\frac{D-d}{2} + h\right) \cdot 2$ – длина одного витка обмотки;

D – внешний диаметр сердечника;

d – внутренний диаметр сердечника;

h – высота сердечника; $d_{\text{пров}}$ – диаметр провода.

Верификация данной формулы была проверена с помощью измерительного прибора GW instek LCR-7816, измеренные значения отличались от расчетных не более 10%.

Индуктивность рассеяния обмоток трансформатора может быть оценена по формуле:

$$L_S = L \frac{d_{\text{пров}} \left(h + \frac{D-d}{2}\right) \cdot 2}{D-d} \cdot \frac{d}{D} \cdot 2, \text{ где}$$

L_S – индуктивность рассеяния;

$L = \mu_0 \mu W^2 \frac{S_{\text{ст}}}{l}$ – индуктивность намагничивания;

μ – относительная магнитная проницаемость материала

сердечника; μ_0 – магнитная постоянная вакуума;

$W_1 = W_2 = W$ – количество витков обмоток трансформатора

Получены аналитические соотношения для выбора величины сопротивления демпфирующего резистора, исключая паразитные колебания напряжения на затворе СТК. По результатам проведенных исследований сделан вывод о принципиальной необходимости учета неизбежных паразитных параметров ТГР для проектирования драйверов, способных управлять различными типами СТК. Установлено, что паразитные параметры ТГР из-за эффекта du/dt могут приводить к возникновению сквозных токов второго рода в мостовых и полумостовых схемах и, как следствие, к выходу СТК из строя. Предложены схемотехнические решения функциональных

узлов СПП исключают негативное влияние паразитных параметров ТГР эффекта du/dt . С помощью ИКМ подтверждено работоспособность предложенных схемотехнических решений узлов СПП, возможный вариант представлен на рисунке 11.

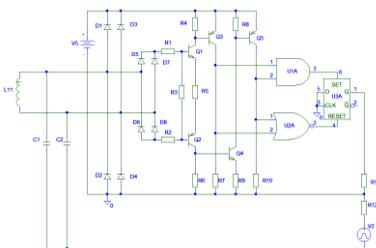


Рисунок 11 – модель принципиального электрического узла СПП вторичной стороны драйвера

В четвертой главе предложены принципы построения четырех разновидностей драйверов с ТГР:

- с общим энергетическим и информационным каналом связи между передающей и приемной сторонами на частоте сигнала управления;
- с отдельными энергетическим и информационным каналами и динамическим управлением по фронтам;
- с отдельными энергетическим и информационным каналами связи и передачей управляющего сигнала на высокой несущей частоте;
- с двумя отдельными высокочастотными информационными каналами связи на включение и выключение СТК, одновременно выполняющими функцию энергетического канала.

Дано описание предложенных функциональных схем драйверов с ТГР и представлены временные диаграммы процессов, поясняющие их работу. Перечислены достоинства и недостатки драйверов с ТГР с разным типом передачи сигнала управления, а также целесообразные области их применения. На основании предложенных функциональных схем синтезированы принципиальные электрические схемы драйверов с различными способами передачи сигнала управления через ТГР. Разработаны компьютерные модели принципиальных электрических схем драйверов с ТГР в системе Orcad Pspice.

На рисунке 12 представлена модель принципиальной электрической схемы драйвера с общим энергетическим и информационным каналом связи между передающей и приемной сторонами на частоте сигнала управления.

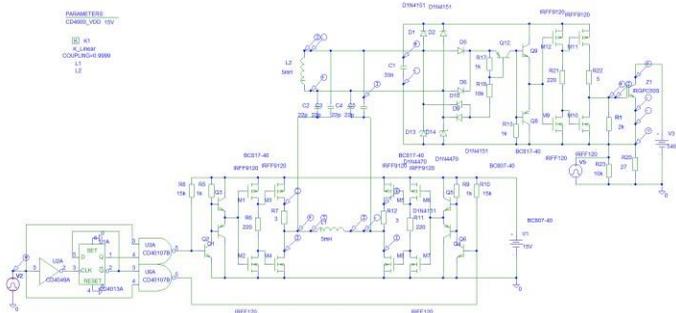
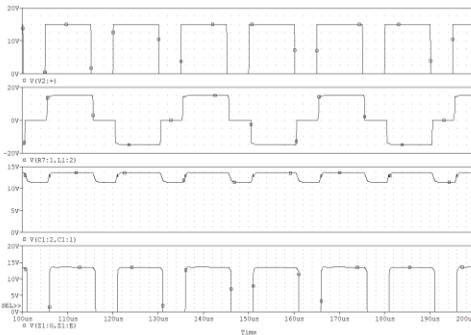


Рисунок12 – Модель принципиальной электрической схемы драйвера с общим информационным и энергетическим каналом

С помощью ИКМ проведено исследование процессов переключения драйверов для одиночных СТК верхнего и нижнего уровня, а также СТК в составе полумостовых схем. Временные диаграммы процессов, поясняющие работу драйвера представлены на рисунке 13.



Сигнал устройства управления

Напряжение на первичной обмотке

Напряжение на выходе сглаживающего фильтра

Напряжение на затворе транзистора

Рисунок 13 – Временные диаграммы работы схемы драйвера с общим информационным и энергетическим каналом на частоте сигнала управления

С помощью ИКМ проверена и подтверждена работоспособность и эффективность узлов подавления негативного влияния паразитных параметров ТГР и эффекта du/dt в составе драйвера. Приведены результаты моделирования, подтверждающие работоспособность предложенных схемотехнических решений драйверов во всех допустимых режимах, и их устойчивость к воздействию du/dt .

В пятой главе предложены схемотехнические решения, расширяющие функциональные возможности драйверов с ТГР. Синтезирована схема для формирования регулируемой задержки на включение СТК без задержки на его выключение для предотвращения сквозных токов первого рода в мостовых и полумостовых схемах.

Предложены схемотехнические решения усилителя мощности драйвера с двухполярным управлением СТК для обеспечения его активного запираания с целью устранения негативного влияния индуктивности подводящих проводов от драйвера к СТК и емкости Миллера СТК. Предложен способ построение РНП и его аппаратурная реализация. Предложена схема защиты СТК от аварийного выхода в активную область по уровню остаточного напряжению на включенном СТК, модель которой показанная на рисунке 14.

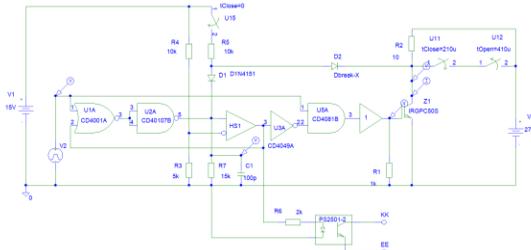
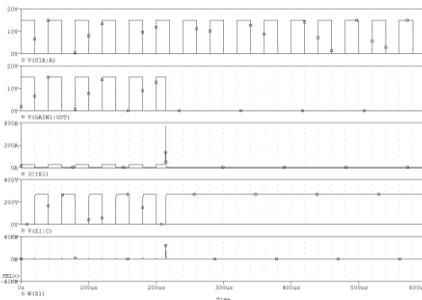


Рисунок 14 – Модель схемы драйверной защиты СТК от перегрузки

С помощью ИКМ в системе Orcad Pspice проверена работоспособность эффективность предложенных схемотехнических решений и приведены временные диаграммы процессов, подтверждающие их работоспособность.

Временные диаграммы, показывающие работоспособность схемы защиты СТК от аварийного выхода в активную область приведены на рисунке 15.



Сигнал устройства управления

Напряжение на затворе СТК

Ток через СТК

Напряжение на силовых электродах СТК

Мгновенная мощность СТК

Рисунок 15 – Временные диаграммы работы схемы драйверной защиты

В шестой главе разработаны экспериментальные макетные образцы драйверов с ТГР с различными способами передачи сигнала управления. Разработана программа экспериментальных исследований макетных образцов драйверов с ТГР.

Измерение статических параметров:

- измерение тока потребления по цепи питания в отключенном состоянии;
- измерение тока потребления по цепи питания во включенном состоянии;
- измерение тока потребления в аварийно отключенном состоянии;
- измерение тока потребления цепи управления в отключенном состоянии;
- измерение тока потребления цепи управления во включенном состоянии;
- измерение тока потребления цепи управления в аварийно отключенном состоянии;
- измерение уровня срабатывания реле напряжения питания;
- измерение уровня отпускания реле напряжения питания;
- измерение выходного напряжения драйвера в отключенном состоянии;
- измерение выходного напряжения драйвера во включенном состоянии;
- измерение управляющего напряжения включения драйвера;
- измерение управляющего напряжения выключения драйвера.

Измерение(Исследования) динамических параметров драйвера:

- измерения времени задержки включения драйвера по сигналу управления;
- измерения времени задержки на выключения драйвера по цепи управления;
- измерения времени нарастания выходного напряжения;
- измерения времени спада выходного напряжения;
- измерения времени срабатывания защиты при аварийном отключении.

Проверка устойчивости драйвера к воздействию du/dt :

- проверка работоспособности драйвера при управлении одиночным СТК нижнего уровня;
- проверка работоспособности драйвера при управлении одиночным СТК верхнего уровня;
- проверка работоспособности драйвера при управлении нижнем СТК в составе полумостовой схемы;

- проверка работоспособности драйвера при управлении верхним СТК в составе полумостовой схемы;
- проверка работоспособности драйвера при управлении нижнем СТК в составе полумостовой схемы.

На рисунке 16 показана фотография испытательного стенда для экспериментального исследования параметров и характеристик макетных образцов драйверов, который включает в себя следующее оборудование:

- универсальный двухканальный генератор сигналов специальной формы Актаком AWG-4164 (1);
- двухканальный источник питания Актаком APS-2236, 0...30В, 0...5А, 300Вт для организации питания макетов драйверов (2);
- программируемый источник постоянного напряжения EA-PSI 9360-80 3U, 0...360В, 0...80А, 10 кВт (3);
- цифровой осциллограф UNI-T UTD2102CEL (4);
- реостаты РПШ-2 с максимальным сопротивлением 100Ом (5);
- блок вспомогательного напряжения (6);
- радиатор (7);
- макетный образец драйвера (8).

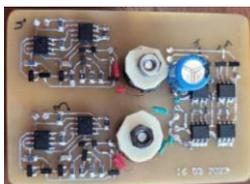


Рисунок 16 – Фотография испытательного стенда

На рисунке 17 представлены фотографии макетных образцов драйверов



а)



б)



в)

Рисунок 17 – Фотография экспериментального образца драйвера с ТТР: а) для управления одиночным (верхним/нижним) СТК на высокой несущей частоте; б) для управления двумя ключами в

полумостовой схеме по фронтам сигнала управления в) для управления двумя ключами в полумостовой схеме по фронтам сигнала управления

В качестве СТК использовались высоковольтные IGBT транзисторы с п-каналом (IR GNI140U06 в качестве одиночного СТК и IR GA125TS120U в качестве стойки) и высоковольтные MOSFET с п-каналом IXFN150N65X2, IXFK80N60P3, VSGT180DA120U. На рисунке 18 представлена фотография



Рисунок 18 – Высоковольтные IGBT транзисторы и MOSFET

силовых транзисторов, использованных в качестве СТК, управляемых драйвером с ТТР.

Проведено экспериментальное исследование работоспособности драйверов нижних и верхних СТК, как одиночных, так и в составе полумостовой схемы, при управлении силовыми высоковольтными МДП и IGBT транзисторами.

На рисунках 19, 20 представлены осциллограммы процессов переключения драйверов с передачей сигнала управления на основной частоте (рисунок 19), с передачей сигнала управления по фронтам (рисунок 20)

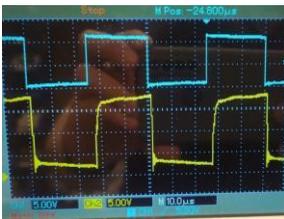


Рисунок 19 – Осциллограммы экспериментальных исследований: синий – входной сигнал управления драйвера; желтый – напряжение на затворе СТК.



Рисунок 20 – Осциллограмма экспериментальных исследований Желтый – входной сигнал управления драйвера;

Зеленый – напряжение питания первичной стороны драйвера;
Фиолетовый – напряжение на затворе СТК верхнего уровня;
Оранжевый – напряжение на затворе СТК нижнего уровня.

Проведенные экспериментальные исследования подтвердили работоспособность предложенных технических решений и совпали с результатами ИКМ.

По результатам проведенных экспериментальных исследований составлена таблица основных технических параметров макетных образцов драйверов с ТГР.

Таблица 1.1 – Основные технические характеристики драйвера при температуре окружающей среды +25°C

Основные технические характеристики	С передачей сигнала на высокой несущей частоте	С передачей сигнала управления по фронтам	С передачей сигнала управления на частоте сигнала управления
Номинальное напряжение питания драйвера, В	15 ± 10%	+15 ± 10%	+15 ± 10%
Напряжение срабатывания РНП, В	13,5/11,5	13,5/11,5	13,5/11,5
Ток потребления драйвера в состоянии ON/ OFF, мА	65/60	55/50	65/60
Выходной импульсный ток драйвера ON/ OFF, А	3/5	3/5	3/5
Несущая частота передаваемого сигнала, кГц	500	-	-
Частотный диапазон работы, кГц	25	25	25
Коэффициент заполнения	0-1	0-1	0-1
Время задержки на включение/ выключение, мкс	2/1,5	2,5 /1,5	2,5 /1,5
Время нарастания/спада, нс	100/100	100/100	100/100
Сохранение работоспособности при dU/dt, кВ/мкс	50	50	50
Выходное сопротивление драйвера в состоянии ON/ OFF, МОм	100/50	100/50	100/50

Заключение

1. Обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи научных исследований.
2. Проведен анализ технических требований, предъявляемых к драйверам.
3. Проведен поиск возможных структурных и схмотехнических решений драйверов с ТГР, опубликованных в открытой печати
4. С помощью ИКМ в системе Orcad Pspice исследовано влияние паразитных параметров ТГР на процессы переключения различных типов СТК.
5. Получены аналитические соотношения для количественной оценки неизбежных паразитных параметров ТГР.
6. Предложены структурные и функциональные схемы драйверов с ТГР с различными видами передачи сигнала управления.
7. Разработаны схмотехнические решения узлов подавления негативного влияния неизбежных паразитных параметров ТГР и эффекта du/dt на процессы переключения драйверов и СТК.
8. Разработаны принципиальные электрические схемы драйверов и их компьютерные модели в системе Orcad Pspice для проверки их работоспособности с помощью ИКМ.
9. Приведено описание работы принципиальных электрических схем драйверов.
10. Предложены методы повышения эффективности драйверов с ТГР и варианты их схмотехнической реализации.
11. С помощью ИКМ исследованы работоспособность и эффективность предложенных технических решений.
12. Разработана методика проектирования ТГР для драйверов с различным способом передачи сигнала управления.
13. Проведенные экспериментальные исследования подтвердили работоспособность предложенных технических решений и совпали с результатами ИКМ.
14. По результатам проведенных экспериментальных исследований составлена таблица основных технических параметров макетных образцов драйверов с ТГР.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых научных журналах, входящих в перечень рекомендуемых изданий ВАК:

1. *Лукошин И.В., Подгузова М.А., Шевцов Д.А.* // Методы обеспечения безопасной работы высоковольтных силовых каскадов преобразователей постоянного напряжения в аварийных и переходных режимах *Практическая силовая электроника*. 2024. № 1 (93). С. 26-31.

2. *Шевцов Д.А., Подгузова М.А., Лукошин И.В.* // Методы исключения негативного влияния du/dt на процессы переключения драйверов с трансформаторной гальванической развязкой. Практическая силовая электроника. 2024. № 1 (93). С. 36-39.
3. *Лукошин И.В., Подгузова М.А., Шевцов Д.А.* Устройство управления полумостовым четырехключевым преобразователем электроэнергии в режиме фазовой ШИМ. Практическая силовая электроника. 2024. № 2 (94). С. 38-42.
4. *Подгузова М.А., Мананникова Н.Г., Лукошин И.В., Пенкин В.Т., Шевцов Д.А., Шишов И.М.* // Классификация и проблемы проектирования драйверов силовых транзисторных ключей. Практическая силовая электроника. 2023. № 1 (89). С. 21-25.
5. *Подгузова М.А., Шевцов Д.А., Шишов И.М., Подгузов В.А., Мащуков Е.В.* // Влияние паразитных параметров трансформатора гальванической развязки на процессы переключения драйверов силовых транзисторных ключей. Практическая силовая электроника. 2023. № 2 (90). С. 41-45.
6. *Бирюкова Е.А., Подгузова М.А., Шевцов Д.А., Кован Ю.И.* // Безынерционные датчики амплитуды трехфазного напряжения. Практическая силовая электроника. 2023. № 2 (90). С. 49-53.
7. *Лукошин И.В., Подгузова М.А., Шевцов Д.А.* // Драйверы с трансформаторной гальванической развязкой для высоковольтных силовых транзисторных ключей с фазовой ШИМ. Практическая силовая электроника. 2023. № 4 (92). С. 37-43.
8. *Шевцов Д.А., Шишов Д.М., Мананникова Н.Г., Подгузова М.А.* // Стабилизированный источник вторичного электропитания с прямо-обратноходовым однотранзисторным силовым преобразовательным каскадом. Практическая силовая электроника. 2022. № 1 (85). С. 30-34.
9. *Бирюкова Е.А., Подгузова М.А., Шевцов Д.А., Шишов Д.М., Ильясов Р.И.* Системы стабилизации выходного напряжения синхронных генераторов. Практическая силовая электроника. 2022. № 2 (86). С. 26-31.
10. *Мананникова Н.Г., Подгузова М.А., Шевцов Д.А., Шишов Д.М.* // Новая структура силового каскада двухтактного двухтранзисторного прямо-обратноходового преобразователя напряжения при низком входном напряжении. Практическая силовая электроника. 2022. № 3 (87). С. 15- 21.
11. *Шевцов Д.А., Шишов Д.М., Мананникова Н.Г., Подгузова М.А.* // Стабилизированный источник вторичного электропитания с прямо-обратноходовым однотранзисторным силовым преобразовательным каскадом. Практическая силовая электроника. 2021. № 1 (85). С. 30.
12. *Подгузова Мария Андреевна* // Алгоритм проектирования и методика расчета трансформатора гальванической развязки для драйверов с различными способами передачи сигнала управления // Практическая силовая электроника 2023. №(91)

Научные статьи в журналах, входящих в международные системы цитирования Scopus и WoS:

1. Shevtsov, D.A., Shishov, I.M., Lukoshin, I.V., Podguzova, M.A., Kovan, Y.I.// Development of a New Gate Driver with Capacitive Isolation// International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM, 2024, страницы 1240–1243.
2. Shevtsov, D.A., Shishov, I.M., Lukoshin, I.V., Alekseev, A.O., Podguzova, M.A.// Eliminating the Negative Impact of the dU/dt Effect on Switching Processes in Drivers with Capacitive Galvanic Isolation.// International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM, 2024, страницы 1240–1243.

Доклады и материалы конференций

1. Подгузова М.А., Подгузов В.А. [Кинетический накопитель энергии](#) // В книге: XLVII Гагаринские чтения 2021. Сборник тезисов работ XLVII Международной молодёжной научной конференции. Москва, 2021. С. 505-506.
2. Подгузова М.А. // В книге: Гагаринские чтения - 2023. Сборник тезисов докладов XLIX Международной молодежной научной конференции. Москва, 2023. С. 352-353.
3. Лукошин И.В., Подгузова М.А. Драйвер с трансформаторной гальванической развязкой для работы с фазовой шим //В книге: Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. Тезисы докладов Тридцатой международной научно-технической конференции студентов и аспирантов. Москва, 2024. С. 1147.
4. Подгузова М.А., Лукошин И.В. Способы подавления влияния паразитных параметров трансформатора гальванической развязки на процессы переключения драйверов для управления высоковольтными силовыми транзисторными ключами //В книге: Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. Тезисы докладов Тридцатой международной научно-технической конференции студентов и аспирантов. Москва, 2024. С. 1148.

Патенты:

1. Схема управления силовым ключом на основе БТИЗ или МДП-транзисторов. *Шевцов Д.А., Шишов Д.М., Лукошин И.В., Кован Ю.И., Егошкина Л.А., Подгузова М.А.* Патент на изобретение RU 2806902 С1, 08.11.2023. Заявка от 24.05.2023.
2. Схема управления силовым ключом на основе БТИЗ или МДП-транзисторов. *Шевцов Д.А., Машуков Е.В., Шишов Д.М., Егошкина Л.А., Подгузова М.А., Кован Ю.И.* Патент на изобретение RU 2785321 С1, 06.12.2022. Заявка № 2022120203 от 22.07.2022.
3. Схема управления силовым ключом на основе БТИЗ или МДП-транзисторов.// *Шевцов Д.А., Шишов Д.М., Лукошин И.В., Кован Ю.И., Егошкина Л.А., Подгузова М.А., Алексеев А.О.* RU 2 825 437 С1, 26.08.2024. Заявка № 2024107031 от 18.03.2024