

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ НА IGBT ТРАНЗИСТОРАХ ПРИ РАБОТЕ СИЛОВЫХ КАСКАДОВ НА ИНДУКЦИОННУЮ НАГРУЗКУ

Н.Н. ЧЕРНЫШОВ, В.М. ПИСАРЕНКО, К.Т. УМЯРОВ, ХАНСАА А. ГАЗИ

Научная статья посвящена анализу динамических потерь в импульсных преобразователях на IGBT транзисторах и исследованию влияния режимов работы резонансных преобразователей электрической энергии, расходуемой на потери. В ней учитывается возможность снижения динамических потерь на транзисторах и возможность использования устройства для восстановления гармонических сигналов посредством широтно-импульсной модуляции. Целью данной работы является развитие общей теории IGBT и MOSFET транзисторов в направлении физики процессов, происходящих в полупроводниковых приборах, и теоретическое исследование различных вариантов электронных схем.

Ключевые слова: динамические потери, инверсные диоды, частотная коммутация, силовой каскад, транзистор.

ВВЕДЕНИЕ

Наиболее перспективным направлением современной электроники являются интеллектуальные силовые компоненты: интегрированные силовые микросхемы, ключи и модули. Это направление стремительно развивается благодаря совершенствованию технологии изготовления и значительному улучшению параметров мощных полевых транзисторов (MOSFET), биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT), силовых драйверов более высокой степени интеграции.

Интеграция схем управления (драйверов, контроллеров) в силовые ключи и затем в исполнительные устройства стала необходимым шагом. Силовая электроника (Power Electronics) базируется на ключевых режимах преобразования энергии и связана с современными методами анализа и синтеза электронных цепей, которые обеспечивают эффективные преобразование, управление и регулирование электрической энергии с помощью силовых полупроводниковых приборов [1]. Основными приборами силовой электроники в области коммутируемых токов до 50 А являются: диоды (Diodes); тиристоры (Thyristors, SCR); биполярные транзисторы (BPT); биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT); полевые транзисторы с изолированным затвором (MOSFET); силовые интегральные схемы (Power IC); интеллектуальные силовые интегральные схемы (Smart Power IC).

Основные приборы силовой электроники в области коммутируемых токов более 50 А:

- силовые модули на базе биполярных транзисторов;
- силовые модули на базе IGBT;
- тиристоры;
- запираемые тиристоры (GTO, IGCT);
- диоды.

В основу создания высокочастотных IGBT транзисторов, способных коммутировать токи четвертого порядка на частотах до нескольких сотен кГц легли следующие факторы:

— применение ультрасовременных технологий для обеспечения прецизионной точности формирования полупроводниковых структур с точностью до нескольких десятков нм;

— поиск различных композиций полупроводниковых материалов с высокой подвижностью носителей заряда, позволивший снизить паразитные параметры приборов и решать, таким образом, проблемы быстродействия, а так же создать новые поколения транзисторов с высокими динамическими характеристиками;

— разработка MOSFET транзисторов, на основе которых были созданы IGBT транзисторы.

В импульсных преобразователях на IGBT транзисторах актуальной задачей является анализ динамических потерь и их влияния на режимы работы. Целью работы являются исследование возможности применения нестандартного подхода к реализации устройств для восстановления гармонических сигналов посредством широтно-импульсной модуляции и влияния длительности фронтов импульсов переключения IGBT и MOSFET на эффект спонтанной задержки переключения.

1. IGBT ТРАНЗИСТОРЫ

При создании первых прототипов IGBT транзисторов (первая половина 80-х годов прошлого века), силовые полупроводниковые коммутирующие приборы были представлены биполярными транзисторами, тиристорами и диодами. Общими их недостатками являлось токовое управление и сравнительно низкие частоты переключения, а также сложность в управлении. Полевые транзисторы, лишённые этих недостатков, в то время применялись в основном

в информационных технологиях и не были пригодны для работы с высокими напряжениями и токами. Создание IGBT транзисторов явилось попыткой объединить тело биполярного транзистора с системой управления полевым транзистором, что в итоге дало весьма качественные результаты. Самыми распространенными приборами в диапазоне до 50 А являются полевые транзисторы с изолированным затвором – MOSFET. Эти приборы обладают малыми статическими и динамическими потерями, незначительными затратами на управление, крайне небольшими временами переключения и работают на частотах до 1 МГц. Это позволило практически полностью вытеснить из низковольтных преобразовательных устройств (< 200 В) все остальные типы силовых полупроводниковых приборов [2].

Совершенствование технологии MOSFET расширило область применения приборов этого класса в диапазоне коммутируемых напряжений 600...1000 В и при мощностях до 10 кВт MOSFET заменили силовые биполярные транзисторы. В области средних напряжений (500...600 В и выше) предпочтительны биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT – Insulated Gate Bipolar Transistors). В настоящее время IGBT обеспечивают коммутацию токов до 3600 А и напряжений до 6,5 кВ. При этом времена переключения биполярных транзисторов с изолированным затвором лежат в диапазоне 200...400 нс. МОП – управляемые приборы стимулировали развитие силовых модулей, в которых ключевые, а в некоторых случаях и информационные элементы, соединяются методами пленочной технологии на общей теплопроводящей изолирующей подложке, образуя всю или часть силовой схемы преобразовательного устройства. Силовые модули разделяются на обычные (стандартные) IGBT-модули и интеллектуальные. Стандартные модули выпускаются в одно-, двух-, четырех- и шестиключевом исполнении с обратными быстровосстанавливающимися диодами (FRD – Fast Recovery Diodes) или без них. Интеллектуальные силовые модули (IPM – Intelligent Power Modules) кроме силовой части схемы преобразователя (мостового одно- или трехфазного выпрямителя, мостового инвертора) содержат в едином корпусе также датчики, схемы драйверов, защиты, диагностики и источников питания [2].

Стандартные IGBT-модули можно условно разбить на два типа: паяной конструкции с изолированным основанием и прижимной (Press-Pack). Постоянные улучшения свойств силовых кристаллов, поиск новых решений и совершенствование существующих технологических процессов приводят к изменениям характеристик силовых ключей. Инновации связаны с внедрением новых широкозонных материалов, применение которых позволяет повысить экономическую эффективность производственных процессов.

2. ОПТИМИЗАЦИЯ РЕШЕНИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ТРАЕКТОРИИ РАБОЧЕЙ ТОЧКИ

Наиболее оптимальным решением задачи формирования траектории перемещения рабочей точки транзистора при коммутационных процессах является введение в схему силового каскада дополнительных схмотехнических элементов, обеспечивающих состояния dI/dt при включении и выключении dV/dt (рис. 1). Форма генераций переходных процессов могут быть различными, и поэтому при расчете коммутационных потерь могут возникнуть сложности. В большинстве случаев генерация может быть описана как переходный процесс при коммутации LC-цепей с аналогичными параметрами и свойствами.

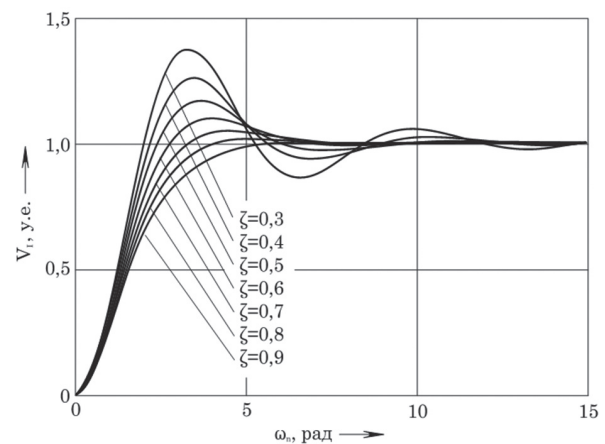


Рис. 1. Мгновенные значения тока и напряжения на транзисторе

3. ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ НА IGBT ТРАНЗИСТОРАХ ПРИ РАБОТЕ СИЛОВЫХ КАСКАДОВ

В этом разделе расчеты приведены для условий работы IGBT при жесткой коммутации и постоянной величины напряжении питания. Потери мощности складываются из частных составляющих (рис. 2.)

Основная доля потерь на транзисторах приходится на статические потери в открытом состоянии ключа и динамические потери. Потери на транзисторе в открытом состоянии ($P_{FW/T}$) определяются:

- величиной коммутируемого тока;
- коэффициентом заполнения импульса;
- температурой кристалла.

Динамические потери на транзисторе ($P_{ON/T}$, $P_{OFF/T}$) определяются следующими факторами:

- величиной коммутируемого тока;
- величиной удерживаемого напряжения;
- температурой кристалла;
- частотой коммутации.

Помимо потерь на силовых ключах, следует уделить внимание инверсным диодам, которые, являясь составной частью силового ключа, изменяют статическое и динамическое состояние.

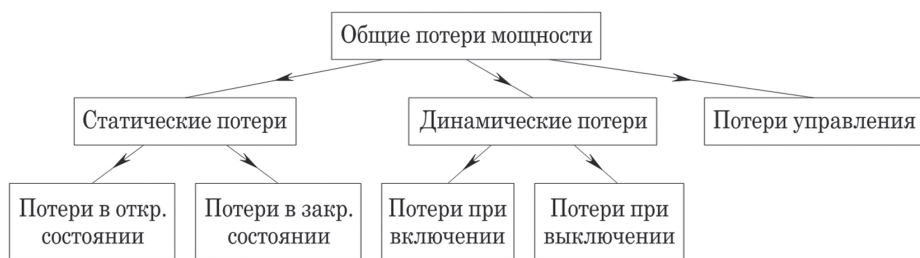


Рис. 2. Составные части потерь на IGBT

Это приводит к дополнительным потерям энергии, дополнительному тепловыделению, которое влияет на особенности кристалла транзистора и является составной частью общих потерь мощности. Таким образом, при учете потерь мощности следует учесть, что максимальная температура перехода не должна превышать значение (150°C для модульного исполнения, либо 125°C для дискретного элемента) при всех возможных режимах работы преобразователя электрической энергии [3].

Потерями мощности на инверсных диодах в закрытом состоянии можно пренебречь, т. к. их величина составляет единицы мВт. Потери мощности при выключении напрямую связаны с процессом прямого восстановления. Поэтому при применении быстрых и ультрабыстрых диодов решающим фактором должен быть показатель времени обратного восстановления диода (τ_{RR} — для большинства ультрабыстрых диодов составляет несколько десятков нс). Потери на диоде ($P_{FW/D}$) в открытом состоянии определяются:

- величиной тока нагрузки ($V_F = f(I_F)$);
- коэффициентом заполнения импульса;
- температурой перехода.

Динамические потери на диоде ($P_{F/D}$) определяются следующими факторами:

- величиной тока нагрузки;
- величиной удерживаемого напряжения;
- температурой кристалла;
- частотой коммутации.

Потери на IGBT и инверсных диодах в общем случае можно описать на примере двухтактной мостовой схемы силового каскада для преобразователя высокой мощности. На рис. 3. показан силовой каскад, выполненный по мостовой схеме с наличием инверсных диодов, работающий на индуктивно-реактивную нагрузку.

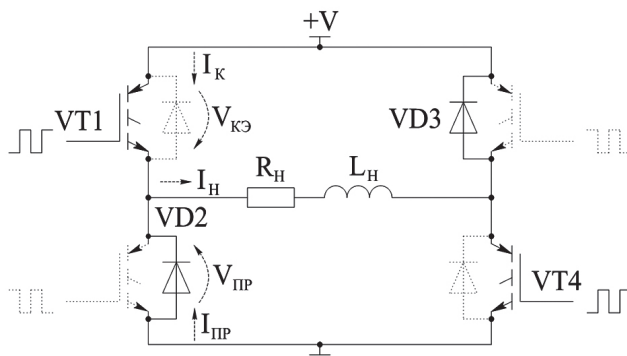


Рис. 3. Силовой каскад с инверсными диодами

Таким образом, для каждой конкретной рабочей точки в установившемся режиме работы силового каскада можно рассчитать потери на транзисторах [3].

Потери на IGBT:

Рассеиваемая мощность при включении

$$P_{ON/T} = f_S \cdot E_{ON/T}(V, I_{H\min}, T_{j/T}). \quad (1)$$

Рассеиваемая мощность при выключении

$$P_{OFF/T} = f_S \cdot E_{OFF/T}(V, I_{H\max}, T_{j/T}). \quad (2)$$

Рассеиваемая мощность, выделяемая на канале транзистора

$$P_{FW/T} = \frac{1}{T} \int_0^{\tau} I_K(t) \cdot V_{КЭ}(t) dt. \quad (3)$$

При условии введения в схему силового каскада это уравнение имеет вид

$$P_{FW/T} = I_{H\text{ср}} \cdot V_{КЭ\text{нас}}(I_{H\text{ср}}, T_{j/T})^{\tau}. \quad (4)$$

Потери на диодах:

Рассеиваемая мощность при выключении (рис. 4)

$$P_{OFF/D} = f_S \cdot E_{OFF/D}(V, I_{H\max}, T_{j/T}). \quad (5)$$

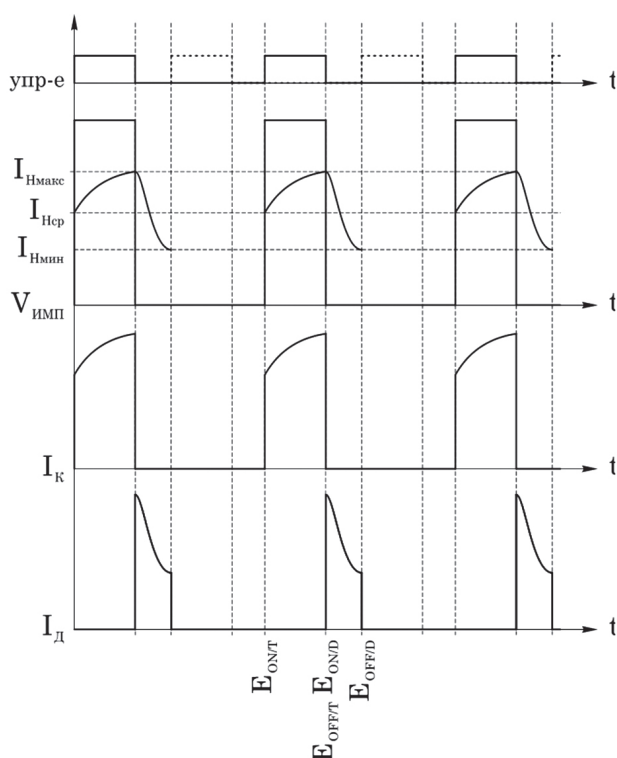


Рис. 4. Диаграммы токов на элементах мостовой схемы

Рассеиваемая мощность, выделяемая на переходе

$$P_{FW/D} = \frac{1}{T} \int_0^{\tau} I_{\text{ПР}}(t) \cdot V_{\text{ПР}}(t) dt. \quad (6)$$

После введения в схему силового каскада снабберов можно пренебречь токовыми всплесками, следовательно, это выражение может быть приведено к следующему виду

$$P_{FW/D} = I_{\text{Нср}} \cdot V_{\text{ПР}} \left(I_{\text{Нср}}, T_{j/T} \right) \frac{\tau_{DT}}{T}, \quad (7)$$

где τ_{DT} – “мертвое” время, в течение которого происходит перенос тока через инверсный диод.

ВЫВОД

В основу создания высокочастотных IGBT транзисторов, способных коммутировать токи четвертого порядка на частотах до нескольких сотен кГц легли следующие факторы: применение ультрасовременных технологий для обеспечения прецизионной точности формирования полупроводниковых структур с точностью до нескольких десятков нм и поиск различных композиций полупроводниковых материалов с высокой подвижностью носителей заряда. При создании IGBT транзисторов силовые полупроводниковые коммутирующие приборы были представлены биполярными транзисторами.

Литература

- [1] А.К. Бельков. Новые биполярные и полевые транзисторы : справочник // под ред. Б. Л. Перельмана. – М.: МП «Символ-Р» / Журнал «Радио». Вып. 8, 1993. – 96 с.
- [2] C.G. Fonstad. Microelectronic Devices and Circuits. – New York : McGraw-Hill, Inc. – 1994. – 686 p.
- [3] N.N. Chernyshov, N.I. Slipchenko, A.M. Tsybal, K.T. Umyarov, V.L. Lukianenko. The photogalvanic effect within spin resonance in quantizing magnetic field // Фізична інженерія поверхні. – Т. 11, № 4, НФТЦ, Харків, 2013. – С. 427–430.

Поступила в редколлегию 2.12.2014

Чернышов Николай Николаевич, канд. техн. наук, старший научный сотрудник; старший научный сотрудник кафедры микроэлектроники, электронных приборов и устройств ХНУРЭ. Научные интересы: математическая физика, методы математического анализа, задачи теории поля, солнечной и ядерной энергетики.



Писаренко Василий Михайлович, канд. техн. наук, доцент; доцент кафедры микроэлектроники, электронных приборов и устройств ХНУРЭ. Научные интересы: схемотехника, математическая физика, методы математического анализа, численное и компьютерное моделирование.



Умяров Камиль Тагирович, доцент кафедры иностранных языков ХНУРЭ. Научные интересы: схемотехника, методы математического анализа, солнечная энергетика, терминоведение, теория термина, лингвистика, лексикография.



Хансаа А. Гази, асп. кафедры микроэлектроники, электронных приборов и устройств ХНУРЭ. Научные интересы: схемотехника, математическая физика, методы математического анализа, численное и компьютерное моделирование.

УДК 621.382.3

Дослідження динамічних втрат на IGBT транзисторах під час роботи силових каскадів на індукційне навантаження / М.М. Чернышов, В.М. Писаренко, К.Т. Умяров, Хансаа А. Гази // Прикладна радіоелектроніка: наук.-техн. журнал. – 2014. – Том 13. – № 4. – С. 440–443.

Наукова стаття присвячена аналізу динамічних втрат в імпульсних перетворювачах на IGBT транзисторах та дослідженню впливу режимів роботи резонансних перетворювачів електричної енергії, що витрачається на втрати. У ній враховується можливість зниження динамічних втрат на транзисторах і можливість використання пристрою для відновлення гармонійних сигналів за допомогою широтно-імпульсної модуляції. Метою даної роботи є розвиток загальної теорії IGBT та MOSFET транзисторів у напрямку фізичних процесів, що відбуваються в напівпровідникових приладах, і теоретичне дослідження різних варіантів електронних схем.

Ключові слова: динамічні втрати, інверсні діоди, частотна комутація, силовий каскад, транзистор.

Лл.: 4. Бібліогр.: 3 найм.

UDC 621.382.3

Studying dynamic losses in IGBT transistors at the operation of power stages on induction load / N.N. Chernyshov, V.M. Pisarenko, K.T. Umyarov, Hansaa A. Ghazi // Applied Radio Electronics: Sci. Journ. – 2014. – Vol. 13. – № 4. – P. 440–443.

The paper is devoted to analyzing dynamic losses in pulse transducers based on IGBT transistors and studying the influence of operation regimes of resonance converters of electric energy spent on the losses. The paper takes into account a possibility of reducing the transistor dynamic losses and that of using a unit for restoring harmonic signals due to pulse-width modulation. The aim of the paper is to develop the general theory of IGBT and MOSFET transistors in the direction of physics of processes occurring in semiconductor devices, and theoretical research of a variety of electronic circuits.

Keywords: dynamic losses, inverse diodes, frequency commutation, power stage, transistor.

Fig.: 4. Ref.: 3 items.