

МИНОБРАЗОВАНИЯ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра радиотехники и электродинамики

Разработка прибора для измерения сопротивления канала мощных MOSFET-
транзисторов по параметрам переходного процесса
наименование темы курсовой работы полужирным шрифтом

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

студента (ки) 2 курса 2233 группы

направления 03.04.03 «Радиофизика» профиль «Радиоэлектроника»

код и наименование направления

институт физики

наименование факультета

Артамонов Ярослав Александрович

фамилия, имя, отчества

Научный руководитель

к. ф. - м. н., доцент

должность, ученая степень, уч. звание

подпись, дата

К.А.Гребенюк

Инициалы Фамилия

Заведующий кафедрой

д. ф. - м. н., профессор

должность, ученая степень, уч. звание

подпись, дата

О. Е. Глухова

Инициалы Фамилия

Саратов 2021 г.

Оглавление

Введение.....	3
Методы измерения сопротивления канала MOSFET-транзисторов.....	5
Требования, налагаемые при измерении сопротивления каналов.....	7
Измерение с помощью шунта.....	7
Погрешность метода измерения.....	9
Чувствительность метода.....	10
Заключение.....	12
Список используемой литературы.....	13

Введение

В настоящее время в современной электронике широко используется импульсные силовые устройства такие как высокочастотные импульсные источники питания, источники бесперебойного питания, в системах преобразователей и инверторов, ультразвуковые генераторы, модули защиты и контроллеры заряда-разряда для Li-ion аккумуляторов и устройства ТВЧ. Основным элементом перечисленных устройств являются электронных ключ. В выпускаемых промышленностью приборах в качестве электронных ключей используются MOSFET-транзисторы. Их применение характеризуется высоким быстродействием, которое обусловлено временем включения ($\tau_{on} \sim 50$ нс), временем отключения ($\tau_{off} \sim 60$ нс) и большой коммутирующей мощностью ($P \sim 5$ кВт).

Актуальность. С увеличением числа изготавливаемого оборудования растет количество выпускаемых деталей. В зависимости от фирмы – производителя, качество изготавливаемых ключей может сильно различаться. В связи с этим необходима предварительная проверка MOSFET - транзисторов перед их использованием в проектируемых или ремонтируемых устройствах.

Основным измеряемым параметром MOSFET-транзистора является сопротивление его канала R_{ds}^{on} в открытом состоянии. Поэтому для определения сопротивления канала можно использовать методы, применяемые при измерении активных сопротивлений. Величина сопротивления канала MOSFET-транзистора в открытом состоянии составляет порядка десятых и сотых долей Ома. Этот факт налагает ограничение на применяемые методы измерения.

Зная сопротивление канала MOSFET-транзистора в открытом состоянии, можно определить рассеиваемую на нем мощность. В случае исследования переходных процессов, протекающих при открытии и закрытии MOSFET-транзистора, можно также определить динамическую рассеиваемую мощность.

Для испытания MOSFET – транзистора в том режиме, в котором он будет использоваться, необходимо пропускать через его канал ток величиной порядка десятков ампер. За время работы устройства при измерении сопротивления канала будет происходить выделение тепла, сопровождающееся повышением температуры канала MOSFET- транзистора, в результате чего сопротивление канала будет увеличиваться, а измерения окажутся недостоверными.

В ходе проведения патентного обзора были найдены методы измерения сопротивления канала MOSFET-транзистора в открытом состоянии [7], [8], [9]. Указанные способы определения сопротивления канала MOSFET-транзисторов имеют сходства с рассматриваемыми в данной работе методами, однако, они имеют серьезный недостаток, который связан с отсутствием контроля мощности при измерении сопротивления канала в открытом состоянии (это приводит к нагреву MOSFET- транзистора и изменению его характеристик, в частности, выходу его из строя при измерении), а также применением отвода тепла, что обуславливает затрату времени на подготовку перед измерением. Это налагает ограничение на скорость измерения.

Испытание MOSFET-транзистора в импульсном режиме имеет преимущество, которое заключается в контроле мощности, рассеиваемой на канале транзистора. Таким образом, испытание MOSFET-транзистора производится без изменения температуры самого транзистора по причине рассеивания мощности на его канале. Это преимущество особенно актуально при измерении сопротивлений канала MOSFET-транзисторов, а также значений порога открывания MOSFET-транзистора, который зависит от температуры [18].

Цель работы. В связи с актуальностью проблемы измерения сопротивления канала MOSFET-транзисторов была поставлена цель, которая заключается в создании измерительного устройства, позволяющего испытать MOSFET-транзистор в требуемом режиме его работы.

Задачи. Для достижения поставленной цели работы были решены следующие задачи:

1. Теоретический расчет погрешности метода измерителя
2. Разработка и настройка макета измерителя
3. Проведение серии измерений характеристик MOSFET-транзисторов
4. Исследование характеристик испытуемых MOSFET- транзисторов

Методы измерения сопротивления канала MOSFET-транзисторов.

Для параметра измерения определяемого существуют следующие методы:

- 1.Метод вольтметра – амперметра
- 2.Метод замещения
- 3.Мостовой метод
- 4.Метод переходных процессов
- 5.Метод АИП

Перечисленные методы обладают высокой точностью измерения сопротивления (табл. 1) однако, основным недостатком первых трех перечисленных методов является их длительность времени измерения. Для испытания MOSFET – транзистора в том режиме, в котором он будет использоваться, необходимо пропускать через его канал ток величиной порядка десятков ампер. За время работы устройства в таком режиме будет происходить выделения тепла, сопровождающееся повышением температуры канала MOSFET- транзистора, в результате чего сопротивление канала будет увеличиваться, а измерения окажутся недостоверными.

Таблица 1. Погрешности методов измерения.

Метод	Погрешность	Особенности измерения
V- А	$2 \div 5\%$	Простота исполнения
Замещения	5%	Простота исполнения
		Высокая точность измерения малых

Мостовой	$0,25 \div 1\%$	величин сопротивления
Метод переходных процессов	2%	Измерение с помощью RC-цепи
АИП	$0,01 \div 0,25 \%$	Высокая разрешающая способность измерения. Возможность одновременно независимого раздельного измерения сопротивления и емкостной составляющей измеряемой цепи

Метод переходных процессов [3] является простым в своем исполнении методом, однако, он требует использования эталонного конденсатора (в частности, электролитического конденсатора большой емкости), емкость которого не зависела бы от температуры окружающей среды и прикладываемого к конденсатору зарядного напряжения, что является существенным недостатком [18].

Последний метод из перечисленных примечателен высокой разрешающей способностью измерения параметров R_{ds} и C_{ds} , однако, он не способен создавать необходимого режима работы MOSFET- транзистора по току.

Требования, налагаемые при измерении сопротивления каналов MOSFET-транзисторов

Исходя из выше перечисленных требований, налагаемых на режим работы измерительного устройства можно сделать следующие выводы:

1. Испытание MOSFET – транзистора должно производиться в том режиме по току, в котором он будет использован или в режиме, указанном в паспорте на испытуемый транзистор.

2. Во избежание изменения температуры транзистора следует существенно ограничить временную длительность работы транзистора в открытом состоянии. Выбор времени работы транзистора в открытом состоянии обусловлен временем переходного процесса, происходящего при его открытии.

3. Управление током, пропускаемым через канал транзистора необходимо осуществить непосредственно самим транзистором, т.к. это наиболее легкий способ управления током, в связи с чем, необходимо учитывать длительность переходного процесса транзистора.

Измерение с помощью шунта

В рамках данной работы рассмотрен способ измерения сопротивления канала MOSFET-транзистора в открытом состоянии с помощью шунта.

Схема для измерения сопротивления канала полевого MOSFET-транзистора рис. 1 состоит из управляющего генератора импульсов прямоугольной формы с внутренним сопротивлением R_i , выход которого подключен к затвору полевого транзистора относительно истока. Резистор R_{sh} и сопротивление открытого канала полевого транзистора R_{ds}^{on} ($R_{sh} \geq R_{ds}^{on}$), а также конденсатор C_1 образуют RC – цепь. Источник питания E зарядный резистор R_{ch} образуют цепь заряда конденсатора C_1 .

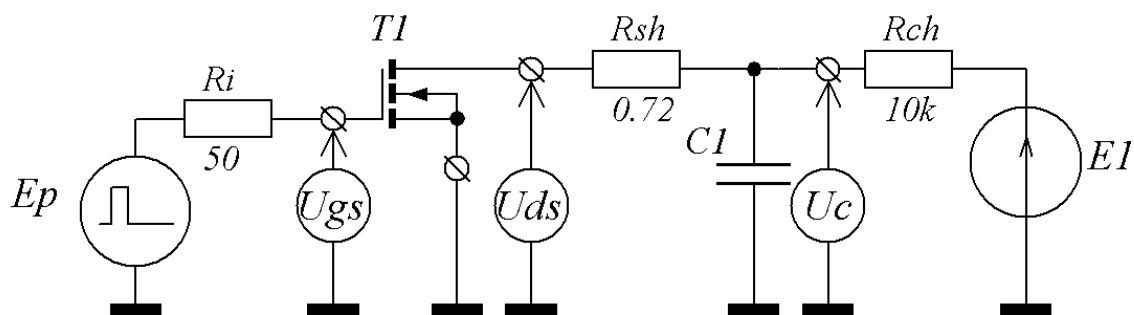


Рис. 1. Принципиальная схема стенда измерения сопротивления канала MOSFET-транзистора.

Необходимость зарядного резистора R_{ch} обусловлена большим значением тока при заряде конденсатора. Значение зарядного резистора выбирают исходя из значения напряжения и максимальной мощности источника питания. Выбор данной схемы обусловлен использованием конденсатора в качестве источника напряжения с большим значением выходного тока, что освобождает от использования мощного источника питания.

В исходном состоянии конденсатор C_1 заряжен от источника напряжения за время, равное $(3 \div 4) R_{ch} C_1$. При открывании ключа происходит переходный процесс, при котором конденсатор начинает разряжаться (кривая разряда начинает свое движение с момента подачи импульса на затвор пт). Сопротивление канала при переходном процессе будет стремиться к сопротивлению открытого канала пт. За время этого переходного процесса часть энергии израсходуется конденсатором. Напряжение на конденсаторе уменьшится. При полном открытии канала пт падение напряжения на нем составит величину R_{ds}^{on} , в то время как напряжение на конденсаторе U_C будет отлично от напряжения источника питания E_1 . Зная значения напряжений U_{ds} , U_C и сопротивления R_{sh} , можно найти сопротивление R_{ds}^{on} согласно выражению

$$R_{ds}^{on} = \frac{R_{sh}}{\frac{U_c}{U_{ds}} - 1} . \quad (1)$$

Погрешность метода измерения.

Погрешность метода измерения определяется выражением

$$d R_{ds} = \frac{\partial R_{ds}}{\partial R_{sh}} \Delta R_{sh} + \frac{\partial R_{ds}}{\partial U_c} \Delta U_c + \frac{\partial R_{ds}}{\partial U_{ds}} \Delta U_{ds} . \quad (2)$$

Согласно выражению (1) выражение погрешности метода (2) примет вид

$$d R_{ds} = \frac{1}{\frac{U_c}{U_{ds}} - 1} \Delta R_{sh} + \frac{-R_{sh}}{\left(\frac{U_c}{U_{ds}} - 1\right)^2} \frac{1}{U_{ds}} \Delta U_c + \frac{R_{sh} U_c}{\left(U_c - U_{ds}\right)^2} \Delta U_{ds} . \quad (3)$$

Погрешность метода будет определяться инструментальной погрешностью измерителя и погрешностью сопротивления шунта. Инструментальная погрешность измерителя определяется шагом квантования по уровню устройства АЦП. На рис. 2 представлен график погрешности метода в зависимости от напряжения U_c накопительного конденсатора. Значения элементов электрической цепи и инструментальные погрешности приведены в табл. 2.

Таблица 2. Значения и абсолютные погрешности элементов электрической цепи.

Параметры, используемые при измерении и определении погрешности метода	Значения и абсолютные погрешности
R_{ds} , Ом	0.1±0.01
R_{sh} , Ом	0.72±0.01
U_{c0} , В	20±0.004
ΔU_{ds} , В	±0.004

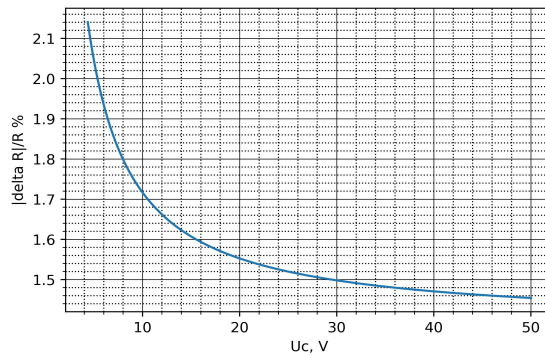


Рис. 2. Зависимость относительной погрешности метода от напряжения накопительного конденсатора.

С увеличением напряжения накопительного конденсатора погрешность метода асимптотически уменьшается.

Чувствительность метода

Определим, как изменяется искомое значение R_{ds}^{on} от изменения U_{ds} , найдя разрешающую способность метода. Выражение разрешающей способности метода имеет вид

$$S = \frac{dR_{ds}^{on}}{dU_{ds}}. \quad (4)$$

В этом выражении U_{ds} является зависимой величиной от сопротивления R_{ds}^{on} . Выражая зависимость $U_{ds} = f(R_{ds})$ из уравнения (1), и найдя чувствительность метода (4) относительно (1), получим соответствующие выражения

$$U_{ds} = U_c \frac{R_{ds}}{R_{ds} - R_{sh}}, \quad (5)$$

$$S = \frac{R_{sh} U_c}{(U_c - U_{ds})^2}. \quad (6)$$

Используя полученные выражения и значения табл. 1, построим семейство характеристик чувствительностей от измеряемого сопротивления R_{ds} при фиксированных значениях напряжения U_c рис. 3.

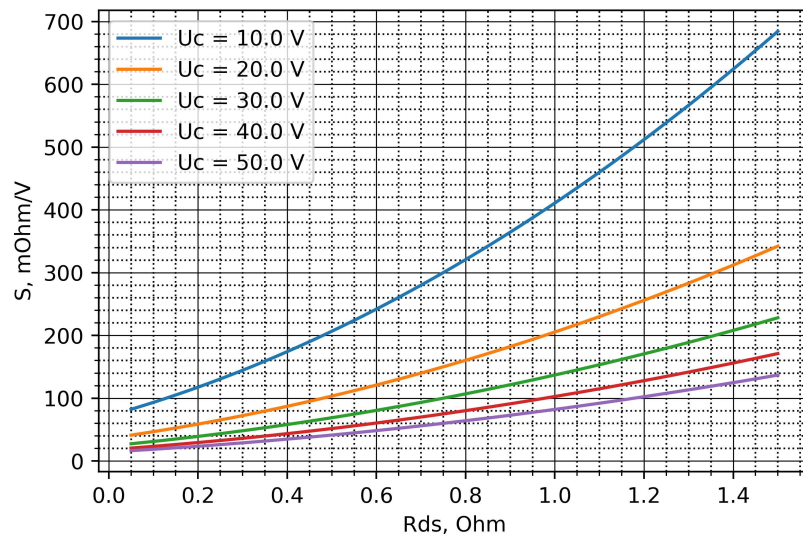


Рис. 3. Зависимость чувствительности метода от измеряемого сопротивления при фиксированных значениях напряжения накопительного конденсатора.

Согласно полученным результатам моделирования с увеличением измеряемого сопротивления канала увеличивается разрешающая способность, а с уменьшением погрешности измерения метода уменьшается и его чувствительность.

Заключение

В ходе данной работы был проведен литературный обзор методов измерения малых сопротивлений, в результате которого выяснилось, что рассмотренные способы измерения не удовлетворяют условиям ограничения мощности, контроля температуры, а также контроля тока при измерении сопротивления открытого канала MOSFET-транзистора.

Были рассмотрены динамические методы измерения сопротивления канала MOSFET-транзистора в открытом состоянии: метод измерения с помощью шунта в импульсном режиме, а также метод измерения по разряду RC цепи. Получены аналитические выражения выше названных методов, относительно которых по входным параметрам цепей измерения были косвенно определены значения сопротивлений открытого канала MOSFET-транзистора. Также относительно представленных аналитических выражений были определены погрешности и чувствительности методов. Погрешность измерения с помощью шунта зависит от напряжения на накопительном конденсаторе. При напряжении накопителя 10В погрешность метода не превышает 1.7%. Однако чувствительность метода уменьшается с увеличением напряжения на накопительном конденсаторе.

Перспективы дальнейших исследований в данной области посвящены разработке устройства для измерения динамических характеристик MOSFET-транзистора, таких как статическая и динамическая рассеиваемая мощность на канале MOSFET-транзистора, заряд затвора, относительно которого можно вычислить рабочий выходной ток управления драйвером в зависимости от требуемой скорости включения MOSFET-транзистора, а также динамические потери при заряде затвора MOSFET-транзистора.

По результатам проведенных экспериментов было обнаружено падение напряжения на накопительном конденсаторе вследствие наличия паразитного сопротивления. Используя быстродействующий MOSFET-транзистор, можно осуществить измерение паразитного сопротивления конденсатора в импульсном режиме при больших значениях тока разряда.

Список используемой литературы

- 1.Бабенко В. П. Моделирование статических и динамических потерь в MOSFET-ключаях. / Бабенко В.П., Битюков В.К., Кузнецов В.В., Симачков Д.С.. // Российский технологический журнал 2018 Том 6 № 1
- 2.Вернези М. А. Методика расчета цепи управления MOSFET посредством микропроцессорной техники / Вернези М.А., Горянина К.И. // Международный студенческий научный вестник № 3, 2018.
- 3.Воротников, И. Н. Способы измерения электрической емкости по параметрам переходного процесса / И. Н. Воротников, М. А. Мастепаненко // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2013. - № 10. – С. 60 – 65.
- 4.Мэк Р. Импульсные источники питания. Теоретические основы проектирования и руководство по практическому применению / Пер. с - М.: Издательский дом «Додэка», 2008. - 272 с.: ил. (Серия «Силовая электроника»).
- 5.Ицхоки Я. С., Овчинников Н. И.. Импульсные и цифровые устройства. // Под ред. проф. Я. С. Ицхоки. - Москва : Сов. радио, 1972.
- 6.Grant, Duncan Andrew. Power MOSFETS: theory and applications / Grant Duncan Andrew, John Govar ISBN 0-471-82867-X 1989 (page 79, 91, 105, 117, 164, 165, **195**, 377).
- 7.<https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=KR4248770&tab=NATIONALBIBLIO>
- 8.<https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=JP268336864>
(Nonprovisional patent application Ser. No. 15/395,907, filed Dec. 30, 2016)
- 9.https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=US235907280&tab=PCTDESCRIPTION&_cid=P11-KANQWL-94308-2
10. А. И. Колпаков В лабиринте силовой электроники (Сборник статей) — СПб: «Издательство Буковского», 2000. — 96 с.: ил.
11. Измерение характеристик МОП-транзистора. International Rectifier. AN-975B.

12.Калинушкин, Д. О. Модель измерения заряда переключения МОП-транзистора / Д. О. Калинушкин // Молодой ученый. – 2019. – № 20(258). – С. 104-107.

13.Laszlo Balogh. Design And Application Guide For High Speed MOSFET Gate Drive Circuits

14.Схемы управления затворами силовых транзисторов / А. М. Бобрешов, А. В. Дыбой, С. Ватхик, М. С. Куролап // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Физика. Математика. – 2010. – № 2. – С. 189-197.

15.Бабенко, В. П. Схемотехника формирователей паузы задержки dead time в силовых ключах / В. П. Бабенко, В. К. Битюков // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. – 2018. – Т. 18. – № 3. – С. 615-620.

16.Колпаков, А. Характеристики и особенности применения драйверов MOSFET и IGBT / А. Колпаков // Компоненты и технологии. – 2003. – № 3(29). – С. 22-30

17. Бабенко, В. П. Особенности моделирование MOSFET ключей в electronics Workbench / В. П. Бабенко, В. К. Битюков // Учебный эксперимент в образовании. – 2017. – № 3(83). – С. 76-88.

18.Моделирование статических и динамических потерь в MOSFET-ключах / В. П. Бабенко, В. К. Битюков, В. В. Кузнецов, Д. С. Симачков // Российский технологический журнал. – 2018. – Т. 6. – № 1(21). – С. 20-39.

19.Конюшенко, И. Основы устройства и применения силовых МОП-транзисторов (MOSFET) / И. Конюшенко // Силовая электроника. – 2011. – Т. 2. – № 30. – С. 10-14.

20.Бабенко, В. П. Эффект Миллера и динамические параметры MOSFET ключей / В. П. Бабенко, В. К. Битюков, Е. Г. Кузеленкова // Инновационные, информационные и коммуникационные технологии. – 2017. – № 1. – С. 343-348.

21.Вернези, М. А. Методика расчета цепи управления MOSFET посредством микропроцессорной техники / М. А. Вернези, К. И. Горянина // Международный студенческий научный вестник. – 2018. – № 3-3. – С. 454-457.

22.Лачин, В. И. Влияние тока абсорбции на процесс измерения сопротивления изоляции / В. И. Лачин, К. Ю. Соломенцев, К. У. Нгуен //

Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2013. – № 6(175). – С. 32-35.

23. Методы и устройства измерения сопротивления изоляции электроэнергетических объектов и их классификация / В. И. Лачин, К. У. Нгуен, К. Ю. Соломенцев, И. Г. Балабан // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2015. – № 1(182). – С. 84-89. – DOI 10.17213/0321-2653-2015-1-84-89.

24. ГОСТ 28885-90. Конденсаторы. Методы измерений и испытаний. - URL: <http://gostrf.com/normadata/1/4294825/4294825836.pdf> (07.10.2019).