

УДК 621.396.66
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-6-52-59>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Защита аппаратуры с батарейным питанием от ошибочного подключения напряжения обратной полярности

В.П. Бабенко,
В.К. Битюков[®]

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

[®] Автор для переписки, e-mail: bitukov@mirea.ru

Резюме

Цели. В настоящее время широкое применение находит аппаратура с батарейным питанием (беспроводные датчики, кардиостимуляторы, «умные» браслеты, очки виртуальной реальности, беспилотные летающие аппараты, роботы, пирометры, автомобили, DC/DC преобразователи и др.). Для этих устройств принципиально важным вопросом является безопасное подключение первичных источников электропитания и наличие защиты от напряжения обратной полярности. Традиционное решение проблемы «переполюсовки» (подачи на прибор напряжения питания обратной полярности) с использованием диодов Шоттки при резервировании системы или увеличения мощности путем объединения источников питания по схеме ИЛИ вследствие большого падения напряжения приводит к значительным потерям мощности при больших токах, сложной проблеме теплоотвода и увеличению массогабаритных параметров. Это предопределило реализацию эффективных средств защиты аппаратуры с батарейным питанием от ошибочного подключения напряжения обратной полярности.

Методы. Задача решена с использованием схемотехнического моделирования в среде *Electronics Workbench*.

Результаты. Показано, что минимальный уровень потерь и малое падение напряжения при защите аппаратуры от обратной полярности питающего напряжения обеспечивают схемные решения «идеального диода» на дискретных компонентах и микросхемы типа «интегрального диода» с внешним и внутренним силовым транзистором MOSFET. Схемотехническое моделирование «идеальных диодов» на *p*- и *n*-канальных транзисторах, которые отличаются высокими техническими параметрами, позволило уточнить характеристики, потери напряжения и мощности в защищаемых цепях и показать простоту непосредственно самого технического решения. В статье обсуждены вопросы эффективности и современная элементная база устройств защиты.

Выводы. Приведены примеры элементной базы устройств защиты от «переполюсовки» источников питания, варианты защиты аппаратуры от воздействия напряжения обратной полярности, а также схемотехнические решения на дискретных и интегральных компонентах. Моделирование передаточных характеристик устройств защиты показало ограничение на минимальную величину входных напряжений около 4 В, обусловленную используемым MOSFET транзистором.

Ключевые слова: защита, батарейное электропитание, MOSFET, диод Шоттки, паразитный диод, «идеальный диод», подключение, напряжение, обратная полярность

• Поступила: 02.02.2022 • Доработана: 31.03.2022 • Принята к опубликованию: 05.09.2022

Для цитирования: Бабенко В.П., Битюков В.К. Защита аппаратуры с батарейным питанием от ошибочного подключения напряжения обратной полярности. *Russ. Technol. J.* 2022;10(6):52–59. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-6-52-59>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Protection of battery-powered devices against accidental swap of power supply connections

Valery P. Babenko,
Vladimir K. Bitukov @

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia
@ Corresponding author, e-mail: bitukov@mirea.ru

Abstract

Objectives. Battery-powered devices (e.g., wireless sensors, pacemakers, watches and other wrist-worn devices, virtual reality glasses, unmanned aerial vehicles, robots, pyrometers, cars, DC/DC converters, etc.) are widely used today. For such devices, it is highly important to ensure safe primary power supply connection, including protection against reverse polarity. The conventional solution to the reverse polarity problem, involving the use of Schottky diodes during system redundancy or increasing power by combining two or more power supplies in the OR-ing circuit due to a large voltage drop, results in significant power losses at high currents, heat dissipation problems, and an increase in the mass and size of the equipment. For this reason, it becomes necessary to develop efficient battery-powered equipment protection against incorrect reverse polarity connection.

Methods. The problem is solved using circuit simulation in the *Electronics Workbench* environment.

Results. When protecting equipment against reverse voltage polarity, it is shown that the minimum level of losses and low voltage drop are provided by “ideal diode” circuit solutions based on discrete components and microcircuits of the “integrated diode” type with external and internal power metal–oxide–semiconductor field-effect transistors (MOSFETs). The circuit simulation of ideal diodes based on *p*- and *n*-channel transistors with superior technical parameters allows the characteristics and voltage and power losses in the protected circuits to be specified along with a presentation of the proposed technical solution simplicity. The contemporary component base of protection devices is discussed in terms of efficiency.

Conclusions. Examples of equipment for protecting against reverse voltage polarity are given along with circuit solutions based on discrete and integrated components. The simulation of the transfer characteristics of protection devices shows the limit for the minimum input voltage value of around 4 V using a MOSFET transistor.

Keywords: protection, battery power, MOSFET, Schottky diode, parasitic diode, ideal diode, connection, voltage, reverse polarity

• Submitted: 02.02.2022 • Revised: 31.03.2022 • Accepted: 05.09.2022

For citation: Babenko V.P., Bitukov V.K. Protection of battery-powered devices against accidental swap of power supply connections. *Russ. Technol. J.* 2022;10(6):52–59. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-6-52-59>

Financial disclosure: The authors have no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Портативность, функциональность и удобство использования электронной аппаратуры (беспроводных датчиков, кардиостимуляторов, «умных» браслетов, очков виртуальной реальности, беспилотных летающих аппаратов, роботов, пирометров, автомобилей, DC/DC преобразователей и др.) требуют применения в них автономного питания [1–6].

Для аппаратуры с батарейным питанием существует возможность неправильного ее подключения к первичному источнику электропитания, поэтому целесообразно предусмотреть защиту от «переплюсовки», т.е. от подачи на аппаратуру напряжения питания обратной полярности. Обычно батарейный отсек и контакты аппаратуры с батарейным питанием конструктивно выполняют таким образом, чтобы исключить возможность размещения элемента электропитания неправильно. Однако сохраняется вероятность ошибочного подключения клемм аккумулятора в устройствах автомобильной электроники, мобильного электротранспорта, телекоммуникационных серверах, системах хранения данных, инфраструктурном оборудовании серверов, а также при использовании дисковых элементов питания. При «переплюсовке» аккумулятора или при переходных процессах во время коммутации индуктивной нагрузки на линиях электропитания могут возникать напряжения обратной полярности, способные приводить к серьезным сбоям и повреждениям электронных систем и блоков. Обратная полярность при неверном включении аккумулятора электротранспорта опасна тем, что в течение некоторого времени могут генерироваться значительные токи величиной десятки-сотни ампер.

В таких случаях для защиты от неверной полярности источника питания приходится использовать схемотехнические решения и дополнительные электронные компоненты, что и является предметом анализа данной работы.

Для лучшего понимания процессов и факторов, влияющих на характеристики устройств защиты от «переплюсовки», использовалось схемотехническое моделирование в среде *Electronics Workbench* (*EWB*), что обусловлено спецификой поставленной задачи [7]. Кроме традиционного SPICE-анализа¹ *EWB* позволяет пользователям подключать к исследуемой схеме виртуальные контрольно-измерительные приборы, приближенные к реальным аналогам. В *EWB* имеется встроенная обширная библиотека аналоговых и цифровых электронных компонентов, большой профессиональный набор методов анализа различных характеристик электронных схем. Накоплен значительный опыт и существует обширная литература

по использованию *EWB* в разных областях аналоговой и цифровой электроники [7, 8]. Имеется встроенная библиотека мощных *n*- и *p*-канальных MOSFET² производителей International Rectifier (США) и Zetex Semiconductors (Великобритания), мощных диодов с *p-n*-переходом и диодов Шоттки (Motorola, США). При работе в *EWB* удобно использовать два способа моделирования, поддерживаемые программой:

- имитация электронной лаборатории, когда в электронную схему устанавливаются виртуальные измерительные приборы, подобные реальным приборам, и моделирование запускается выключателем Activate Simulation на рабочей панели;
- квазипрофессиональное моделирование, когда вид анализа задается из меню Analysis, в окне которого устанавливается вид анализа и узлы схемы, для которых просматривается результат моделирования.

ДИОДНАЯ ЗАЩИТА ОТ ОБРАТНОГО НАПЯЖЕНИЯ ПИТАНИЯ

В самых простых способах защиты оборудования от обратного напряжения питания используется диод VD1 (рис. 1а), включенный последовательно с нагрузкой R1 [9].

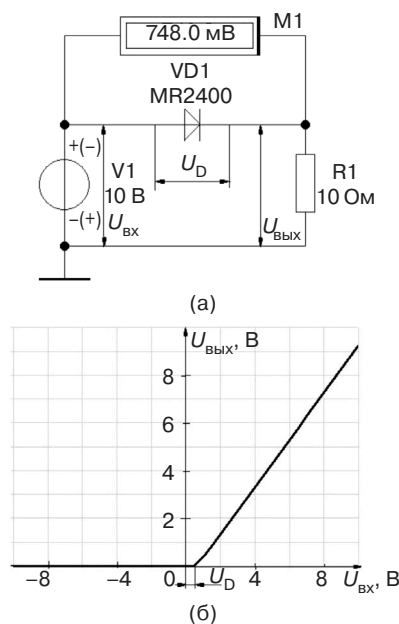


Рис. 1. Диодная защита от обратного напряжения питания: (а) схема, (б) передаточная характеристика. MR2400 – диод (производитель Infineon Technologies AG, Германия). Здесь и на следующих рисунках обозначения элементов схем соответствуют обозначениям, принятым в ГОСТ 2.710-81³

² MOSFET – metal–oxide–semiconductor field-effect transistor.

³ ГОСТ 2.710-81. Единая система конструкторской документации. Обозначения буквенно-цифровые в электрических схемах. М.: Издательство стандартов; 1985. [GOST 2.710-81. Unified system for design documentation. Alpha-numerical designations in electrical diagrams. Moscow: Izd. Standartov; 1985 (in Russ.).]

¹ SPICE – simulation program with integrated circuit emphasis.

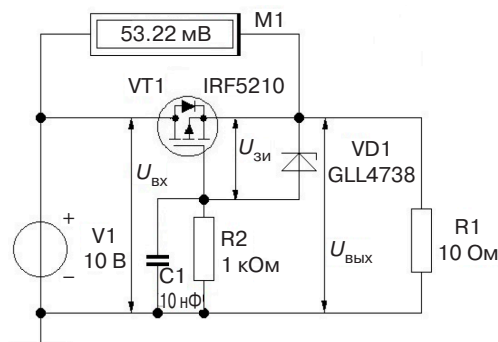
Передаточная характеристика (зависимость выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ на нагрузке R1 от входного напряжения $U_{\text{вх}}$) приведена на рис. 16. Для удобства оценки результатов при моделировании в режиме Analysis/DC Sweep напряжение источника V1, определяющего входное напряжение $U_{\text{вх}}$, изменялось в диапазоне от -10 В до $+10$ В. Вольтметр M1 показывал падение напряжения U_D на диоде VD1 в прямом направлении $U_D = 0.748$ В при прохождении через него тока нагрузки I_H около 1 А. При этом потери мощности в данной цепи на защитном диоде составили 0.748 Вт, что является крайне нежелательным для устройств с батарейным питанием. Диоды Шоттки с падением напряжения $U_D = 0.3 \dots 0.4$ В несколько улучшают характеристики диодной защиты. Но если речь идет о низких напряжениях питания порядка 3.3 В и ниже, характерных для питания современных интегральных схем (ИС) и микроконтроллеров, то даже такое незначительное падение напряжения может быть неприемлемым.

Иногда, когда нет возможности использовать специализированные ИС защиты от «переплюсовки», применяют схемы на дискретных компонентах с использованием дешевых, доступных и обладающих малым сопротивлением канала в открытом состоянии MOSFET. Подобные схемы за свои характеристики часто называют «идеальным диодом», а иногда «умным диодом»⁴.

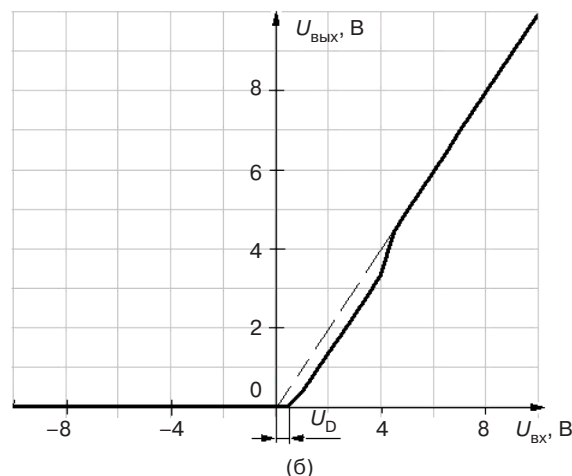
«ИДЕАЛЬНЫЙ ДИОД» НА p-MOSFET

Схема с использованием p-канального MOSFET, приведенная на рис. 2а, выполняет функцию защитного диода⁵.

В данной схеме на сток транзистора VT1 подано положительное напряжение источника входного напряжения V1. До подачи напряжения $U_{\text{вх}}$ канал транзистора заперт, т.к. затвор и исток имеют потенциал «земли» и напряжение $U_{\text{зи}}$ между затвором и истоком равно нулю. При подаче входного напряжения $U_{\text{вх}}$ положительной полярности ток протекает через прямосмещенный паразитный диод (Body Diode) в структуре MOSFET и нагрузку R1, создавая падение напряжения, близкое к $U_{\text{вх}}$. Паразитный диод открыт до тех пор, пока не откроется канал транзистора VT1 (это произойдет при напряжении $U_{\text{вх}}$ около 4.5 В). При этом открытый канал, благодаря своему низкому сопротивлению, шунтирует паразитный диод, обеспечивая на нем малое падение напряжения,



(а)



(б)

Рис. 2. Защита от «переплюсовки» на основе p-MOSFET: (а) схема, (б) передаточная характеристика. GLL4738 – стабилитрон (производитель Vishay, США)

что видно на передаточной характеристике, приведенной на рис. 2б [10, 11]. Вольтметр M1 измеряет падение напряжения $U_{\text{си}} = 53.22$ мВ на открытом транзисторе. При токе нагрузки $I_H = 1$ А это соответствует сопротивлению канала открытого транзистора $r_{\text{си откр}}$, равному 0.053 Ом, что близко к данным для транзистора IRF5210 $r_{\text{DS ON}} = 0.06$ Ом. При изменении полярности входного напряжения $U_{\text{вх}}$, формируемого источником V1, транзистор VT1 запирается и блокирует ток нагрузки (второй квадрант характеристики, показанной на рис. 2б).

Стабилитрон VD1 защищает транзистор VT1 от превышения допустимого напряжения «затвор-исток». Величина напряжения стабилизации выбирается равной $U_{\text{ст}} = 9 \dots 10$ В, чтобы напряжение было достаточным для надежного открытия транзистора VT1. Конденсатор C1 сглаживает отрицательные выбросы напряжения на нагрузке, которые могут возникать при быстром изменении полярности входного напряжения.

Если входное напряжение $U_{\text{вх}}$ невысокое и не превышает допустимых напряжений MOSFET ключа (обычно около 20 В), то защита от превышения допустимого напряжения не требуется. Схему можно

⁴ Basics of Ideal Diodes. Application Note. Texas Instruments Incorporated. SLVAE57B – FEBRUARY 2021. 24 p. <https://www.ti.com/lit/an/slvae57b/slvae57b.pdf?ts=1639001451460>. Дата обращения 10.01.2022. / Accessed January 10, 2022.

⁵ <https://www.terraelectronica.ru/news/5444>. Дата обращения 10.01.2022. / Accessed January 10, 2022 (in Russ.).

упростить, исключив элементы VD1, C1 и R2, при этом затвор транзистора подключается к «земле».

Минимальное входное напряжение при нормальной работе, начиная с которого эта схема имеет минимальные потери и похожа на «идеальный диод», начинается с напряжения отпирания транзистора (около 4.5 В). При меньшем напряжении канал транзистора заперт, а открыт только паразитный диод и падение напряжения на коммутаторе составляет около $U_D = 0.7$ В (рис. 2б). Пример защиты электронной автомобильной аппаратуры от напряжения обратной полярности приведен в литературе⁶.

Схема «идеального диода» на p -MOSFET привлекает простотой, имеет малое падение напряжения на транзисторном ключе в нормальном режиме работы и блокирует ток в случае «переплюсовки». Но при прочих равных условиях p -канальный MOSFET уступает своим n -канальным собратьям по таким параметрам как сопротивление открытого канала, максимальный ток, входная емкость и стоимость.

«ИДЕАЛЬНЫЙ ДИОД» НА n -MOSFET

Аналогичную схему защиты от «переплюсовки» можно реализовать на n -MOSFET, если включить его в цепь отрицательного вывода источника напряжения V1, как показано на рис. 3а [12].

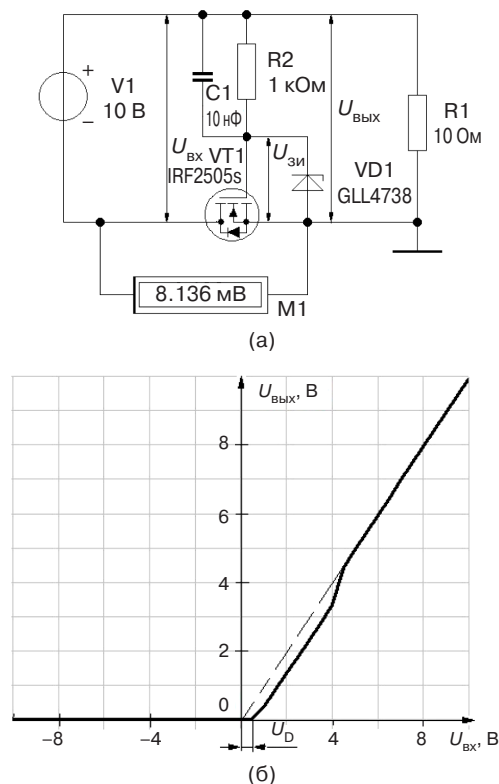


Рис. 3. Защита от переплюсовки на основе n -MOSFET: (а) схема, (б) передаточная характеристика

⁶ <https://www.terraelectronica.ru/news/5446>. Дата обращения 10.01.2022. / Accessed January 10, 2022 (in Russ.).

Как и в предыдущей схеме, до подачи входного напряжения $U_{вх}$ канал транзистора VT1 заперт, т.к. $U_{зи} = 0$. При подаче положительного входного напряжения $U_{вх}$ открывается паразитный диод транзистора VT1 и ток протекает через сопротивление нагрузки R1. Как видно из передаточной характеристики (рис. 3б), при напряжении $U_{вх}$ около +4.5 В канал транзистора VT1 становится проводящим. Падение напряжения на открытом канале транзистора становится минимальным и равным 8.136 мВ. При токе нагрузки около 1 А это соответствует сопротивлению открытого канала $r_{си\text{ откр}}$, равному 8.136 мОм, что близко к данным Datasheet⁷ для транзистора IRF2505S $r_{DS\text{ ON}} = 0.008$ Ом.

Рассеиваемая мощность на транзисторе VT1 незначительна и равна около 8 мВт.

При «переплюсовке» источника питания транзистор VT1 запирается и блокирует обратный ток (второй квадрант передаточной характеристики, показанной на рис. 3б). Стабилитрон VD1, как и в предыдущей схеме, защищает от превышения допустимого напряжения транзистора VT1. Конденсатор C1 ≈ 10 нФ необходим для сглаживания отрицательного выброса напряжения на выходе, который может возникнуть в момент переключения полярности входного напряжения и привести к повреждению используемых электронных компонентов. Увеличением емкости конденсатора C1 можно увеличить время нарастания напряжения на затворе, что позволяет реализовать функцию «плавного включения».

При входном напряжении $U_{вх}$, меньшем допустимых напряжений для транзистора, можно исключить схему защиты от превышения между затвором и истоком, исключив элементы VD1, C1 и R2. При этом затвор транзистора подключается к «плюсу» источника питания.

Схема на n -MOSFET обеспечивает наиболее эффективную защиту от «переплюсовки». Однако вследствие того, что защита включена в «земляную» шину, возможны неудобства при построении большой системы с «земляной» звездой.

«ИДЕАЛЬНЫЙ ДИОД» В ИНТЕГРАЛЬНОМ ИСПОЛНЕНИИ

Производители электронных компонентов предлагают достаточно широкий выбор высокоэффективных решений «идеальных диодов». Например, интегральный контроллер LM74610-Q1 (компания Texas Instruments, США)⁸, схема включения которого

⁷ Datasheet IRL2505S International Rectifier. <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/84685/IRF/IRL2505S.html>. Дата обращения 10.01.2022. / Accessed January 10, 2022.

⁸ Datasheet LM74610-Q1 Texas Instruments. <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/810348/TI1/LM74610-Q1.html>. Дата обращения 10.01.2022. / Accessed January 10, 2022.

показана на рис. 4, с внешним n -MOSFET VT1 выполняет функции «идеального диода». При правильной (положительной) полярности входного напряжения транзистор открывается и пропускает ток. Благодаря низкому сопротивлению открытого канала уровень рассеиваемой мощности оказывается минимальным. Если на вход схемы поступает напряжение обратной полярности, контроллер выключает транзистор менее чем за 8 мкс. Как и обычный диод, «идеальный диод» подключается к линии питания только с помощью выводов «Anode» и «Cathode». Контроллер не имеет связи с общим выводом, что обеспечивает нулевой ток собственного потребления. Для управления внешним силовым транзистором используется схема накачки заряда с внешним конденсатором V_{cap} .

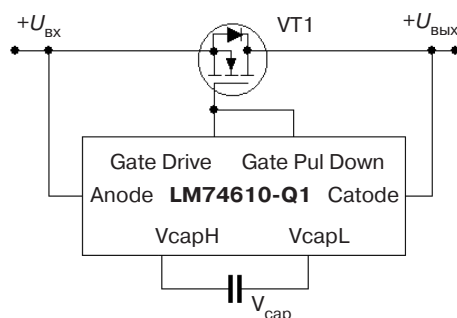


Рис. 4. Схема включения «идеального диода» LM74610-Q1

Контроллер предназначен для широкого спектра автомобильных приложений, способен выдерживать обратное напряжение до 45 В. Величина тока в цепи и рассеиваемой мощности определяется характеристиками внешнего транзистора.

Представленные на рис. 5 «идеальные диоды» LTC4411 и LTC4412 компании Linear Technology (США)^{9, 10}, ориентированы на использование p -канального MOSFET. При этом LTC4411 (рис. 5а) содержит встроенный транзистор с сопротивлением канала в открытом состоянии $r_{DS\ ON} = 0.14$ Ом, а LTC4412 – внешний транзистор, что расширяет диапазон контролируемых им токов.

Во время нормальной работы «идеальных диодов» падение напряжения на транзисторе может составлять до 28 мВ при токе не больше 2.6 А и входном напряжении от +2.6 В до +5.5 В. На кристалле интегральной схемы имеется устройство тепловой защиты, блокирующее ток при превышении допустимой температуры. Транзистор также отключается, если выходное напряжение превышает входное, при этом

обратный ток не превышает 1 мкА. Вывод CTL позволяет управлять включением/выключением с помощью внешних команд. Статусный вывод STAT индицирует состояние, когда при резервировании питание подается от альтернативного источника, напряжение на нагрузке имеется, а ток от основного источника питания через «идеальный диод» не протекает.

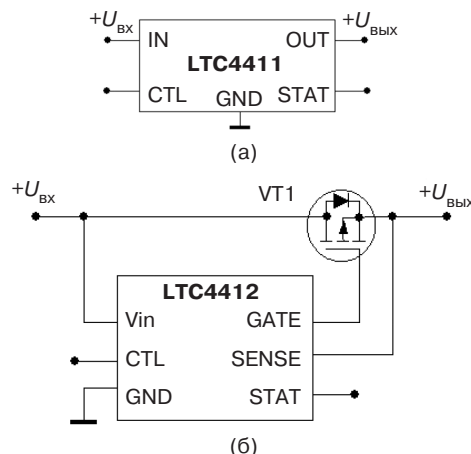


Рис. 5. Схема включения «идеального диода»: (а) LTC4411, (б) LTC4412

Контроллер LTC4412 (рис. 5б) управляет внешним p -MOSFET (в соответствии с устоявшимися правилами, если транзистор внешний, то управляющая схема называется контроллером). Допустимое входное напряжение – до 40 В, коммутируемый ток целиком определяется характеристиками внешнего транзистора. Выводы SENSE и STAT используются для переключения или распределения тока нагрузки при работе от нескольких источников питания. Драйвер затвора содержит внутренний ограничитель напряжения для защиты затвора транзистора.

На базе LTC4412 компания Linear Technology выпустила микросхему управления электропитанием LTC4412ES¹¹, представляющую собой «идеальный диод» с внешним p -канальным MOSFET и встроенным диодом Шоттки, что позволяет обеспечить эффективную работу по технологии «монтажное ИЛИ» нескольких источников питания на общую нагрузку (рис. 6).

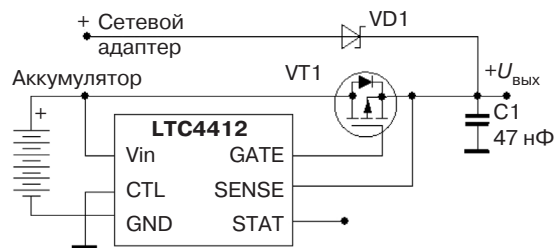


Рис. 6. Схема управления резервным питанием

⁹ Datasheet LTC4411 Linear Technology. <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/94411/LINER/LTC4411.html>. Дата обращения 10.01.2022. / Accessed January 10, 2022.

¹⁰ Datasheet LTC4412 Linear Technology. <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/82845/LINER/LTC4412.html>. Дата обращения 10.01.2022. / Accessed January 10, 2022.

¹¹ Datasheet LTC4412ES6 Linear Technology. <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/82846/LINER/LTC4412ES6.html>. Дата обращения 10.01.2022. / Accessed January 10, 2022.

При нормальной работе ток в нагрузку поступает от сетевого адаптера через диод Шоттки VD1. При отключении внешнего питания ток в нагрузку поступает от резервного аккумулятора. Падение напряжения на внешнем p -канальном MOSFET составляет менее 20 мВ.

ИС предназначена для использования в сотовых телефонах, ноутбуках, цифровых видеокамерах, бесперебойных источниках питания, мощных USB-периферийных устройствах, устройствах альтернативной энергетики.

На рис. 7 приведена схема защиты от напряжений при обратной полярности аккумулятора на базе специализированного контроллера LTC4359 (Linear Technology) с внешним n -MOSFET¹².

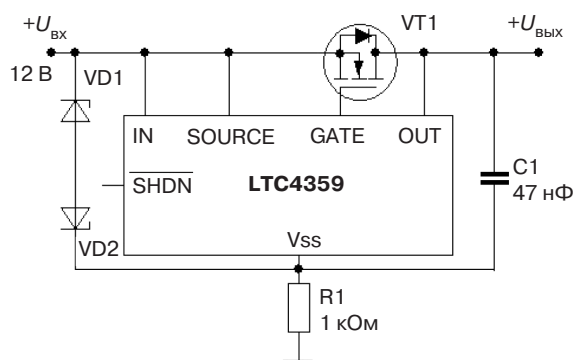


Рис. 7. Схема защиты аппаратуры автомобиля от обратной полярности аккумулятора

Стабилитроны VD1, VD2 и резистор R1 расширяют диапазон возможных входных напряжений.

¹² Datasheet LTC4359 Linear Technology. <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/1039943/LINER/LTC4359.html>. Дата обращения 10.01.2022. / Accessed January 10, 2022.

При использовании рекомендуемого в качестве внешнего VT1 транзистора n -канального MOSFET BSC028N06NS (компания Infineon Technologies AG, Германия)¹³ с сопротивлением канала $r_{DS\ ON} = 2.8$ мОм и током до 132 А достигается небольшое тепловыделение, малые потери напряжения и малые габаритные размеры. Контроллер позволяет управлять питанием при резервировании (вывод SHDN), а также удовлетворяет строгим требованиям, предъявляемым к автомобильному и телекоммуникационному оборудованию.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрена элементная база устройств защиты от ошибочного подключения напряжения обратной полярности источников питания, варианты защиты аппаратуры от воздействия напряжения обратной полярности, а также схемотехнические решения на дискретных и интегральных компонентах. Схемотехническое моделирование «идеальных диодов» на p - и n -канальных транзисторах, которые отличаются высокими техническими параметрами, позволило уточнить характеристики, потери напряжения/мощности в защищаемых цепях и показать простоту непосредственно самого технического решения.

Вклад авторов

Все авторы в равной степени внесли свой вклад в исследовательскую работу.

Authors' contribution

All authors equally contributed to the research work.

¹³ Datasheet BSC028N06NS Infineon Technologies. <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/470560/INFINEON/BSC028N06NS.html>. Дата обращения 10.01.2022. / Accessed January 10, 2022.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Guy J. Схема защиты от переплюсовки с автоматическим исправлением полярности. *РадиоЛоцман*. 2021;(7–8):120–121. URL: <https://www.rlocman.ru/shem/schematics.html?di=643745>
2. Чоудхари В. Решения устойчивого к переходным процессам первичного DC/DC-преобразователя системы питания автомобильной электроники. *Силовая электроника*. 2017;3(66):30–34. URL: <https://power-e.ru/wp-content/uploads/6630.pdf>
3. Казанцев Д.П., Щербак В.Ф., Закамалдин Д.А., Казанцев Ю.Е., Пронин А.В., Молодых С.В. *Электрокардиостимулятор*: пат. 2531695 РФ. Заявка № 2012156979/14; заявл. 24.12.2012, опубл. 27.10.2014. Бюл. № 30.
4. Гарелина С.А., Латышенко К.П., Фрунзе А.В., Горбунов Р.А. Практическая реализация пирометров для измерения температуры пламени и объектов сквозь пламя. *Научные и образовательные проблемы гражданской защиты*. 2020;2(45):110–115.

REFERENCES

1. Guy J. Automatic polarity correction circuit for reverse polarity protection. *RadioLotsman = RadioLocman*. 2021;(7–8):120–121 (in Russ.). Available from URL: <https://www.rlocman.ru/shem/schematics.html?di=643745>
2. Choudhary V. Transient resistant primary DC/DC converter solutions for automotive power systems. *Silovaya elektronika = Power Electronics*. 2017;3(66):30–34 (in Russ.). Available from URL: <https://power-e.ru/wp-content/uploads/6630.pdf>
3. Kazantsev D.P., Shcherbak V.F., Zakamaldin D.A., Kazantsev Yu.E., Pronin A.V., Molodykh S.V. *Electric cardiac pacemaker*: RF Pat. 2531695. Publ. 27.10.2014 (in Russ.).
4. Garelina S.A., Latyshenko K.P., Frunze A.V., Gorbunov R.A. Practical implementation of pyrometers for measuring flame temperature and objects through a flame. *Nauchnye i obrazovatel'nye problemy grazhdanskoi zashchity = Scientific and Educational Tasks of Civil Defence*. 2020;2(45):110–115 (in Russ.).

5. Бабенко В.П., Битюков В.К., Симачков Д.С. Понижающе-повышающий DC/DC преобразователь с единственной индуктивностью. *Микроэлектроника*. 2022;51(1): 60–70. <https://doi.org/10.31857/S0544126921060041>
6. Oleynik V. Схема коррекции полярности защищает устройства с батарейным питанием. *РадиоЛоцман*. 2021;(7–8):122–124. URL: <https://www.rlocman.ru/shem/schematics.html?di=643793>
7. Бабенко В.П., Битюков В.К. Имитационное моделирование процессов переключения силовых полевых транзисторов в программе Electronics Workbench. *Радиотехника и электроника*. 2019;64(2):199–205. <https://doi.org/10.1134/S0033849419020025>
8. Бабенко В.П., Битюков В.К., Кузнецов В.В., Симачков Д.С. Моделирование статических и динамических потерь в MOSFET-ключках. *Российский технологический журнал*. 2018;6(1):20–39. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2018-6-1-20-39>
9. Бабенко В.П., Битюков В.К., Симачков Д.С. Силовой MOSFET-ключ переменного тока. В сб.: *Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем* «Радиоинфоком-2021»: Сборник научных статей V Международной научно-практической конференции. М.: РТУ МИРЭА; 2021. С. 305–308.
10. Битюков В.К., Симачков Д.С., Бабенко В.П. *Источники вторичного электропитания*. М.: Инфра-Инженерия; 2020. 376 с.
11. Бабенко В.П., Битюков В.К. Нитрид-галлиевые транзисторы в силовых цепях постоянного и переменного тока. В сб.: *Перспективные технологии в средствах передачи информации ПТСПИ – 2021: Материалы XIV Международной научно-технической конференции*. Владимир: ВлГУ; 2021. С. 54–59.
12. Walker J. MOSFET в низковольтных схемах защиты от обратного напряжения. *РадиоЛоцман*. 2019;2: 58–59. URL: <https://www.rlocman.ru/shem/schematics.html?di=588375>
5. Babenko V.P., Bityukov V.K., Simachkov D.S. DC/DC buck-boost converter with single inductance. *Mikroelektronika = Russian Microelectronics*. 2022;51(1):60–70 (in Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0544126921060041>
6. Oleynik V. Polarity correcting circuit protects battery-powered device. *RadioLotsman = RadioLocman*. 2021; (7–8):122–124 (in Russ.). Available from URL: <https://www.rlocman.ru/shem/schematics.html?di=643793>
7. Babenko V.P., Bityukov V.K. Simulation of switching of high-power FETS using the Electronics Workbench software. *J. Commun. Technol. Electron.* 2019;64(2): 176–181. <https://doi.org/10.1134/S1064226919020025> [Original Russian Text: Babenko V.P., Bityukov V.K. Simulation of switching of high-power FETS using the Electronics Workbench software. *Radiotekhnika i elektronika*. 2019;64(2):199–205 (in Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0033849419020025>]
8. Babenko V.P., Bityukov V.K., Kuznetsov V.V., Simachkov D.S. Simulation of static and dynamic losses in MOSFET keys. *Russ. Technol. J.* 2018;6(1):20–39 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2018-6-1-20-39>
9. Babenko V.P., Bityukov V.K., Simachkov D.S. AC power MOSFET switch. In: *Actual Problems and Perspectives for the Development of Radio Engineering and Infocommunication (Radioinfocom 2021): Proceedings of the 5th International Scientific and Practical Conference*. Moscow: RTU MIREA; 2021. P. 305–308 (in Russ.).
10. Bityukov V.K., Simachkov D.S., Babenko V.P. *Secondary power sources*. Moscow: Infra-Inzheneriya; 2020. 376 p. (in Russ.).
11. Babenko V.P., Bityukov V.K. Gallium nitride transistors in DC and AC power circuits. In: *Perspective Technology in Means of Information Transfer – PTMIT-2021: Proceedings of the 14th International Scientific and Practical Conference*. Vladimir: VIGU; 2021. P. 54–59 (in Russ.).
12. Walker J. FET supplies low-voltage reverse-polarity protection. *RadioLotsman = RadioLocman*. 2019;2:58–59 (in Russ.). Available from URL: <https://www.rlocman.ru/shem/schematics.html?di=588375>

Об авторах

Бабенко Валерий Павлович, к.т.н., доцент, доцент кафедры радиоволновых процессов и технологий Института радиоэлектроники и информатики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: vbabenko16091940@gmail.com. Scopus Author ID 57220534735, SPIN-код РИНЦ 2815-3866

Битюков Владимир Ксенофонтович, д.т.н., профессор, профессор кафедры радиоволновых процессов и технологий Института радиоэлектроники и информатики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: bitukov@mirea.ru. ResearcherID Y-8325-2018, Scopus Author ID 6603797260, SPIN-код РИНЦ 3834-5360, <https://orcid.org/0000-0001-6448-8509>

About the authors

Valery P. Babenko, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Radio Wave Processes and Technology, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: vbabenko16091940@gmail.com. Scopus Author ID 57220534735, RSCI SPIN-code 2815-3866

Vladimir K. Bityukov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Radio Wave Processes and Technology, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: bitukov@mirea.ru. ResearcherID Y-8325-2018, Scopus Author ID 6603797260, RSCI SPIN-code 3834-5360, <https://orcid.org/0000-0001-6448-8509>