

**Исследование принципов работы изолированного драйвера****А. А. Тельнов**Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

antel45@yandex.ru

**Аннотация.** В рамках данной статьи исследовались принципы работы изолированных драйверов силовых транзисторов, а также выработаны рекомендации по построению систем защиты. Для реализации поставленной цели в среде схемотехнического моделирования LTspice были разработаны модели драйверов, различающихся способом реализации гальванической развязки: с применением трансформатора или оптрона. Во второй половине статьи рассмотрена работа системы защиты, направленной на ограничение предельных режимов работы кристаллов полупроводниковых ключей.

**Ключевые слова:** оптическая изоляция, трансформаторная развязка, драйвер транзистора, ограничение перенапряжений, методы защиты транзисторов

**Для цитирования:** Тельнов А. А. Исследование принципов работы изолированного драйвера // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2023. Т. 16, № 6. С. 96–102. doi: 10.32603/2071-8985-2023-16-6-96-102.

Original article

**Investigation of the Principles of Operation of an Isolated Driver****A. A. Telnov**

Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

antel45@yandex.ru

**Abstract.** This paper studies the operational principles of isolated drivers of power transistors with the purpose of developing recommendations for the construction of protection systems. To this end, driver models were developed in the LTspice circuit simulator software. The models were different in term of galvanic isolation implementation, i.e., using either a transformer or an optocoupler. In the second half of the article, the work of a protection system aimed at restricting the limiting modes of operation of semiconductor key crystals is considered.

**Keywords:** optical isolation, transformer isolation, transistor driver, overvoltage limitation, transistor protection methods

**For citation:** Telnov A. A. Investigation of the Principles of Operation of an Isolated Driver // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2023. Vol. 16, no. 6. P. 96–102. doi: 10.32603/2071-8985-2023-16-6-96-102.

Драйвер силового транзистора представляет собой устройство, предназначенное для усиления управляющих сигналов и обеспечения потенциальной развязки между силовой и управляющей частями преобразователя. Гальваническая развязка информационного сигнала может быть реали-

зована двумя путями: с применением трансформатора либо оптрона.

К основным достоинствам трансформаторов в качестве развязывающего устройства можно отнести: невозможность передачи постоянной составляющей управляющего сигнала, способность

регулировки уровня выходного напряжения (изменяя количество витков в обмотке) и наличие большого количества схемных решений, позволяющих реализовать отрицательное смещение на затворе ключевого транзистора. В качестве отличительной особенности использования импульсных трансформаторов можно выделить зависимость амплитуды управляющего сигнала от скважности  $D$  импульса, что будет рассмотрено на отдельном примере (рис. 1).

На схеме приняты следующие обозначения:  $V_{in}$  – импульсный источник напряжения, управляющий силовым транзистором;  $R_c$ ,  $R_g$  и  $R_1$  – токоограничивающие сопротивления;  $C_c$  – развязывающий конденсатор; индуктивности  $L_1$  и  $L_2$  образуют модель импульсного трансформатора;  $R_{gs}$  – нагрузочный резистор;  $M_1$  – силовой транзистор;  $D_1$  – диод, включенный параллельно цепи «коллектор–эмиттер» транзистора  $M_1$ ;  $V_1$  – источник постоянного напряжения;  $V_c$  – уровень отрицательного смещения сигнала.

Диаграммы, иллюстрирующие форму сигнала в точке  $b$  для двух значений скважности, представлены на рис. 2.

В работе схемы прослеживается определенная закономерность: при увеличении скважности выходного напряжения  $V_{in}$  происходит снижение амплитуды управляющего сигнала. Данное обстоятельство можно объяснить равенством площадей положительной и отрицательной частей импульсов управления в течение периода  $T$ . Так, увеличение  $D$  до 50 % приводит к снижению уровня напряжения в точке  $b$  до 9 В, что неприемлемо для управления силовыми ключами. Данный недостаток устраняется введением вспомогательных схемных элементов – диода  $D_2$ , транзистора  $M_2$  и токоограничивающего сопротивления  $R_2$ , как показано на рис. 3.

Работа схемы может быть описана следующим образом: при поступлении на вход импульсного трансформатора сигнала положительной полярности по цепи  $D_2$ – $R_g$ – $M_1$ – $L_2$  происходит заряд входной емкости транзистора  $M_1$  – транзистор откры-

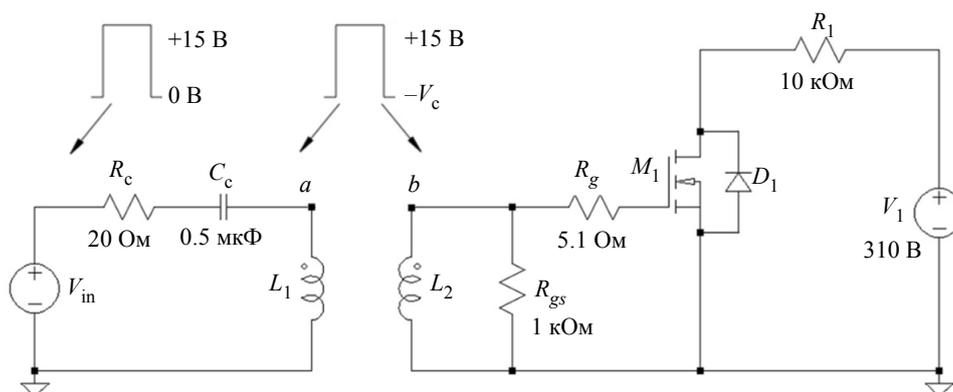


Рис. 1. Трансформаторная развязка импульсов управления в однотактной схеме

Fig. 1. Transformer isolation of control impulses

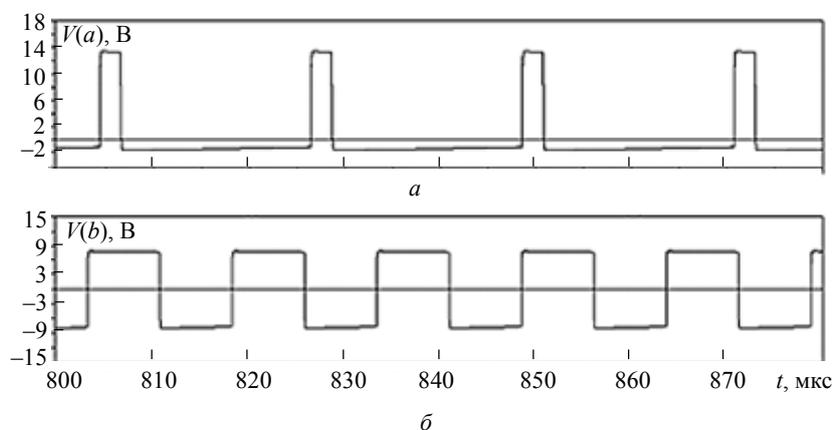


Рис. 2. Влияние скважности импульсов на форму управляющего напряжения:  $a - D = 10\%$ ,  $b - D = 50\%$   
Fig. 2. Influence of the duty cycle of the pulses on the shape of the control voltage:  $a - D = 10\%$ ,  $b - D = 50\%$

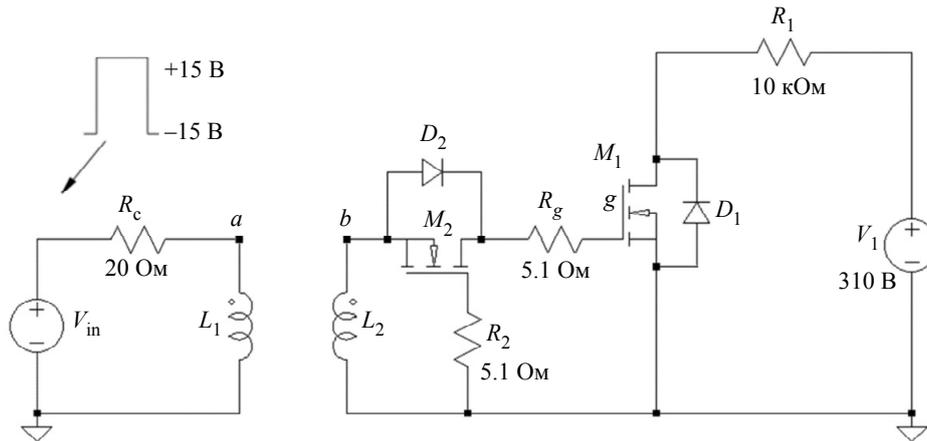


Рис. 3. Трансформаторная развязка импульсов управления в двухтактной схеме  
Fig. 3. Transformer isolation of control impulses

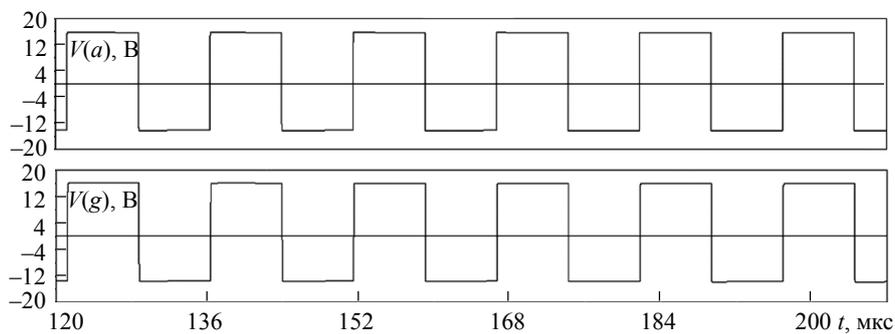


Рис. 4. Диаграммы входного и управляющего сигналов  
Fig. 4. Diagrams of input and control signals

вается. При подаче импульса отрицательной полярности открывается транзистор  $M_2$ , что влечет за собой перезаряд входной емкости транзистора  $M_1$  по цепи  $R_g-M_2-L_2-R_g$  до отрицательного напряжения – транзистор  $M_1$  запирается.

Диаграммы, иллюстрирующие форму входного и управляющего сигналов, представлены на рис. 4.

Несмотря на все достоинства трансформаторной развязки информационного сигнала, разработчики силовой аппаратуры чаще предпочитают работать с оптически изолированными драйверами промышленного производства, где основным элементом служит оптрон – оптоэлектронный прибор, конструкция которого содержит источник и приемник светового излучения. В качестве источника света чаще всего выступает инфракрасный светодиод, а роль светочувствительного элемента выполняет фототранзистор [1].

Основное преимущество оптронов перед схемами развязки на основе импульсных трансформаторов состоит в невосприимчивости оптических каналов связи к воздействию электромагнитных полей и возможности передачи постоянной составляющей информационного сигнала [2].

Структурная схема оптически изолированного драйвера затвора силовыми транзисторами представлена на рис. 5.

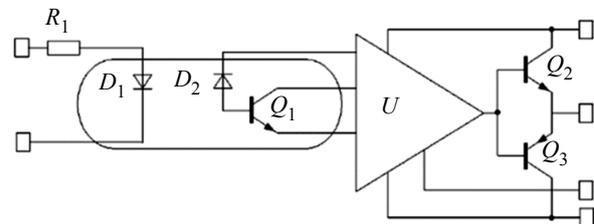


Рис. 5. Структурная схема оптически изолированного драйвера  
Fig. 5. Optical isolated driver circuit

Работу данной схемы можно описать следующим образом: в момент прохождения тока по цепи  $R_1-D_1$  фотодиод  $D_2$  фиксирует наличие сигнала на излучателе и преобразует световой поток в сигнал управления (фототок) транзистором  $Q_1$ . Открываясь, транзистор  $Q_1$  обеспечивает прохождение информационного сигнала через блок согласования ( $U$ ) на усилительный каскад ( $Q_2$  и  $Q_3$ ), где осуществляется формирование импульса управления необходимой амплитуды. Рассмотрим несколько примеров практической реализации оптически изолированных драйверов силовых транзисторов.

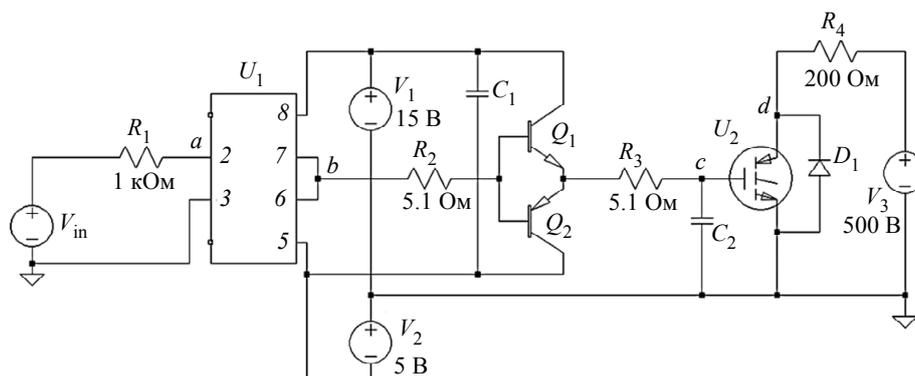


Рис. 6. Схема двухтактного биполярного драйвера  
 Fig. 6. Driver circuit with an amplifying stage

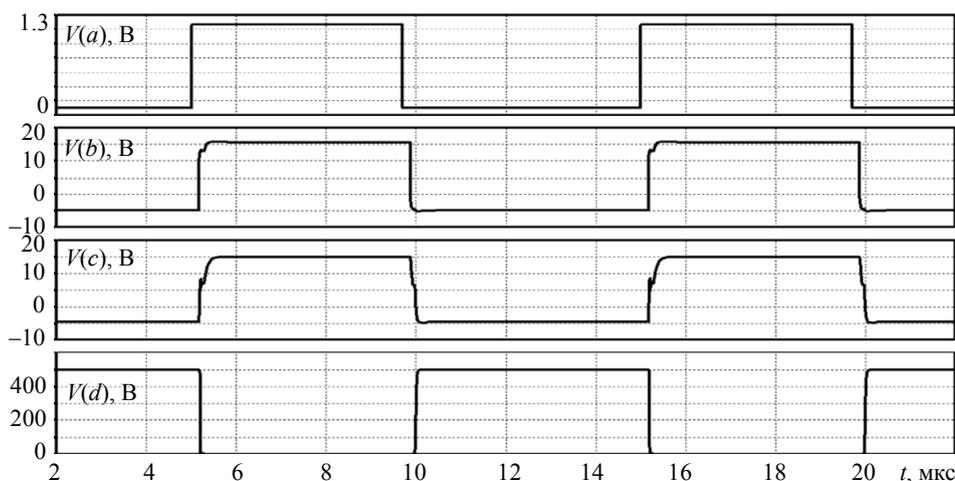


Рис. 7. Процесс коммутации силового транзистора  
 Fig. 7. Power transistor switching process

На рис. 6 представлена схема двухтактного биполярного драйвера, выполненного на основе быстродействующего оптодрайвера HSPL3180.

На схеме приняты следующие обозначения:  $V_{in}$  – импульсный источник напряжения, управляющий силовым транзистором;  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  и  $R_4$  – токоограничивающие сопротивления;  $U_1$  – оптически изолированный драйвер HSPL3180;  $U_2$  – модель силового транзистора;  $D_1$  – диод, включенный параллельно цепи «коллектор–эмиттер» транзистора  $U_2$ ;  $V_1$ ,  $V_2$  и  $V_3$  – источники постоянного напряжения;  $C_1$  – конденсатор параллельный цепи питания драйвера;  $Q_1$  и  $Q_2$  – усилительный каскад, выполненный на биполярных транзисторах NPN- и PNP-структур;  $C_2$  – входная паразитная емкость транзистора; выводы для подключения микросхемы HSPL3180 обозначены цифрами 2, 3, 5, 6, 7 и 8. Рассмотрим рис. 7, на котором показан расчетный процесс коммутации силового транзистора  $U_2$ , где сигнал  $V(a)$  информирует о моменте возникновения управляющих

импульсов на входе драйвера HSPL3180; кривая  $V(b)$  соответствует оптически изолированным импульсам управления; на графике  $V(c)$  изображена форма управляющего сигнала; кривая  $V(d)$  иллюстрирует форму сигнала напряжения «коллектор–эмиттер» транзистора  $U_2$ .

В момент прихода импульса управления на вход драйвера HSPL3180 (сигнал  $V(a)$ ), на его выходе (сигнал  $V(b)$ ) формируется оптически изолированный сигнал с амплитудой +15 В. Данный сигнал открывает полупроводниковую структуру верхнего NPN-транзистора, образуя путь для протекания электрического тока:  $V_1-Q_1-R_3-C_2-V_1$ . После завершения заряда входной емкости напряжение на затворе  $U_2$  достигает порогового уровня и транзистор начинает проводить ток (сигнал  $V(d)$ ).

В то время, когда входное напряжение оптодрайвера спадает до нуля (сигнал  $V(a)$ ), нижний PNP-транзистор открывается, что влечет за собой формирование отрицательного смещения –5 В, направленного на разряд внутренней емкости

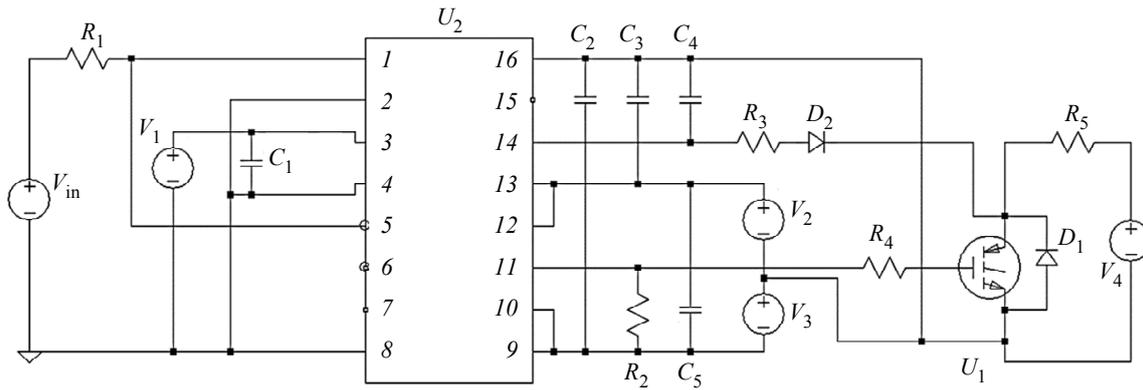


Рис. 8. Схема драйвера, выполненная на HCPL316J  
Fig. 8. Driver circuit made on HCPL316J

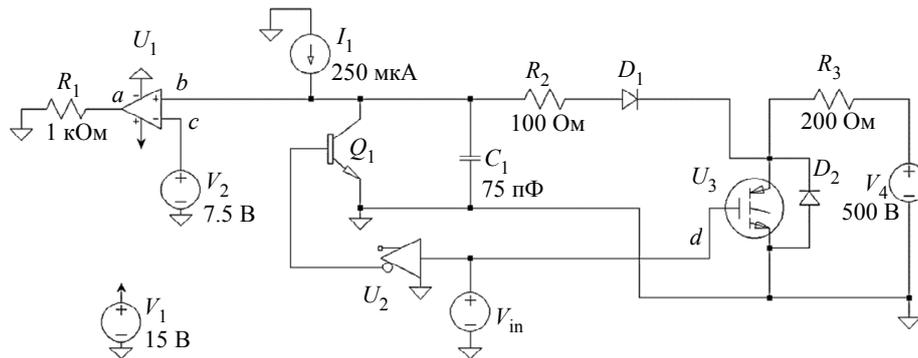


Рис. 9. Упрощенная схема блока DESAT  
Fig. 9. Simplified DESAT block circuit

транзистора  $U_2$  (путь протекания тока:  $C_2-R_3-Q_2-V_2-C_2$ ). После завершения разряда входной емкости транзистор  $U_2$  закрывается (сигнал  $V(d)$ ).

Кроме того, на драйвер могут быть возложены функции защиты, например защита от выхода транзистора из насыщения [3].

На рис. 8 представлена схема, выполненная на оптодрайвере HCPL316J, имеющая функцию «плавного» выключения в случае нарастания аварийного тока.

Здесь к рассмотренной ранее схеме добавлены следующие элементы:  $R_1, R_3, R_4, R_5$  – токоограничивающие сопротивления;  $R_2$  – сопротивление, установленное согласно технической документации;  $U_2$  – оптически изолированный драйвер HCPL316J;  $V_1, V_2, V_3$  и  $V_4$  – источники постоянного напряжения;  $C_1, C_2, C_3$  и  $C_5$  – конденсаторы, обеспечивающие фильтрацию помех,  $C_4$  – конденсатор, устанавливающий время срабатывания защиты;  $D_2$  – высоковольтный диод.

Отличительной особенностью микросхемы служит наличие оптической развязки управля-

ющих каналов (выводы 1, 2 и 8) и сигнала неисправности (вывод 6). Кроме того, в микросхеме предусмотрена защита от нехватки напряжения питания и блок контроля напряжения «коллектор–эмиттер» силового транзистора (вывод 14). Выходной каскад данной микросхемы (вывод 11) способен вырабатывать двухполярный выходной сигнал с пиковым значением выходного тока до 3 А, благодаря чему драйвер способен осуществлять управление мощными IGBT-транзисторами без подключения дополнительного усилительного каскада [4].

Выводы 3, 4, 9, 10, 12, 13 и 16 относятся к цепям питания драйвера, контакты 7 и 15 служат для проверки работоспособности интегральной схемы и в процессе эксплуатации не используются. С помощью выводного контакта 5 реализуется логический сброс аварийного состояния микросхемы.

Рассмотрим рис. 9, на котором представлено внутреннее устройство блока DESAT микросхемы HCPL316J.

Основные элементы схемы:  $R_1, R_2$  и  $R_3$  – токоограничивающие сопротивления;  $U_1$  – сравнивающее устройство;  $V_2$  – источник опорного напряжения;  $I_1$  – источник тока 250 мкА;  $Q_1$  –

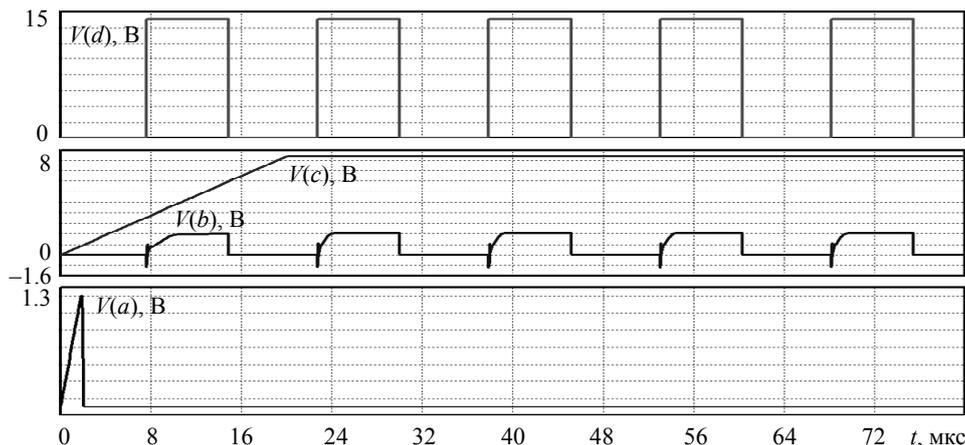


Рис. 10. Диаграммы работы блока DESAT (рис. 9)

Fig. 10. DESAT block operation diagrams (fig. 9)

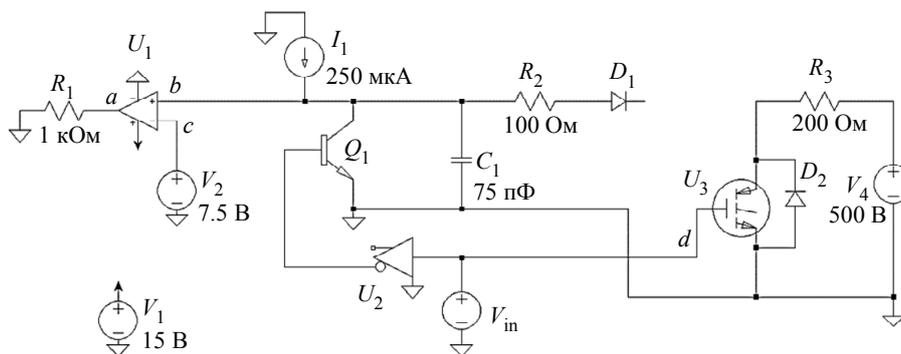


Рис. 11. Моделирование аварийной ситуации

Fig. 11. Emergency simulation

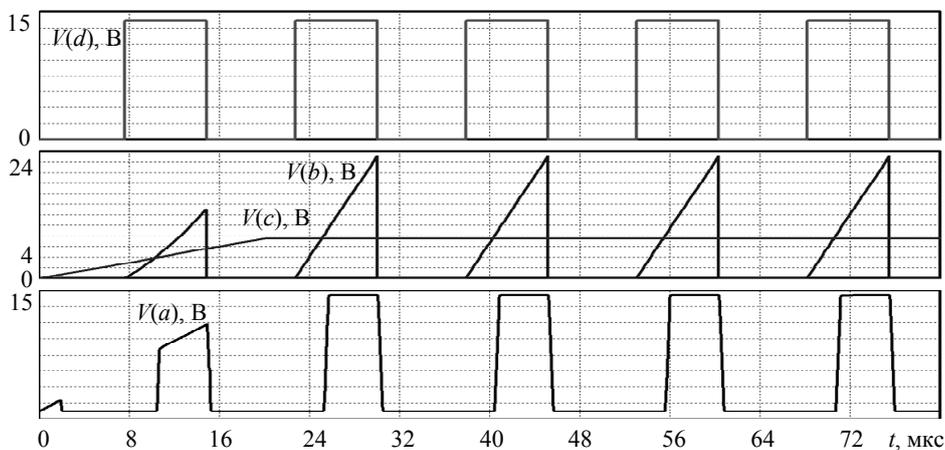


Рис. 12. Диаграммы работы блока DESAT (рис. 11)

Fig. 12. DESAT block operation diagrams (fig. 11)

транзистор, шунтирующий конденсатор  $C_1$ ;  $U_2$  – логический элемент «НЕ»;  $V_{in}$  – импульсный источник напряжения, управляющий силовым транзистором  $U_3$ . В поле атрибутов источника  $V_{in}$  установлены следующие параметры:  $f$  – частота следования импульсов (66 кГц);  $td$  – пауза 300 нс.

Работа данной модели основана на постоянном сравнении уровней напряжения на инверсном (сигнал  $c$ ) и не инверсном (сигнал  $b$ ) выводах

компаратора  $U_1$ . В случае штатной работы, когда напряжение «коллектор–эмиттер» на открытом транзисторе  $U_3$  мало, образуется цепь для протекания электрического тока  $I_1-R_2-D_1-U_3$ . Данный ток создает некоторое падение напряжения (менее 7.5 В) на вышеуказанных элементах, которое прикладывается к выводу «+» элемента  $U_1$ . В ходе сравнения сигналов  $a$  и  $b$  компаратор  $U_1$  информирует о нормальной работе транзисторно-

го ключа  $U_3$  переводом сигнала на выводе  $a$  в низкое состояние (рис. 10).

Рассмотрим случай аварийной ситуации, когда транзистор  $U_3$  по какой-либо причине не открылся. Для этого разорвем цепь между диодом  $D_1$  и транзистором  $U_3$ , как показано на рис. 11.

В этом случае весь ток источника  $I_1$  пойдет на заряд конденсатора  $C_1$ , тем самым повышая уровень напряжения на прямом входе компаратора  $U_1$ . Как только уровень напряжения на узле  $a$  превысит значение опорного напряжения 7.5 В, сравнивающее устройство оповестит о возникновении нештатной ситуации – на графике рис. 12 данному случаю соответствует переход сигнала  $a$  в высокое состояние. В дальнейшем данная инфор-

мация должна быть обработана системой управления, где будет решаться вопрос о снятии импульсов управления с транзисторного ключа  $U_3$ .

В заключение можно сказать, что в случае возникновения аварийной ситуации одна из главных задач системы управления состоит в безопасном и быстром отключении силовых транзисторов. При этом постоянный контроль падения напряжения «коллектор–эмиттер» на открытом транзисторе – это самый надежный способ выявления ситуации, связанной с выходом транзистора из насыщения.

Материалы, используемые в статье, доступны для скачивания по ссылке [5].

#### Список литературы

1. Электротехнологические промышленные установки: учебник для вузов / И. П. Евтюкова, Л. С. Кацевич, Н. М. Некрасова, А. Д. Свенчанский / под ред. А. Д. Свенчанского. М.: Энергоиздат, 1982. 400 с.  
2. Ruedi H., Kohli P. «Scale» driver for high voltage IGBTs // Proc. of the Power conversion conf. (PCIM'99). Nurnberg, Germany, 1999. P. 357–364.

3. Барутсков И. Б., Цыганков Е. В. Преобразователи частоты: защита от короткого замыкания в нагрузке // ИСУП. 2016. № 3(63). С. 63–68.  
4. Колпаков А. И. Защитные функции драйверов SEMIKRON // Компоненты и технологии. 2003. № 5. С. 50–55.  
5. ЯндексДиск. URL: <https://disk.yandex.ru/d/6bcDBBwNqGGKeA> (дата обращения 17.02.2023).

---

#### Информация об авторе

**Тельнов Андрей Александрович** – студент гр. 0931 СПбГЭТУ «ЛЭТИ».  
E-mail: antel45@yandex.ru

#### References

1. Jelektrotehnologicheskie promyshlennye ustanovki: uchebnik dlja vuzov / I. P. Evtjukova, L. S. Kacevich, N. M. Nekrasova, A. D. Svenchanskij / pod red. A. D. Svenchanskogo. M.: Jenergoizdat, 1982. 400 s. (In Russ.).  
2. Ruedi H., Kohli P. «Scale» driver for high voltage IGBTs // Proc. of the Power conversion conf. (PCIM'99). Nurnberg, Germany, 1999. P. 357–364.

3. Barutskov I. B., Cygankov E. V. Preobrazovateli chastoty: zashhita ot korotkogo zamykanija v nagruzke // ISUP. 2016. № 3(63). S. 63–68. (In Russ.).  
4. Kolpakov A. I. Zashhitnye funkicii drajverov SEMIKRON // Komponenty i tehnologii. 2003. № 5. S. 50–55. (In Russ.).  
5. JandeksDisk. URL: <https://disk.yandex.ru/d/6bcDBBwNqGGKeA> (data obrashhenija 17.02.2023).

---

#### Information about the author

**Andrey A. Telnov** – student gr. 0931 of Saint Petersburg Electrotechnical University.  
E-mail: antel45@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 21.03.2023; принята к публикации после рецензирования 12.05.2023; опубликована онлайн 23.06.2023.

Submitted 21.03.2023; accepted 12.05.2023; published online 23.06.2023.

---