

Научная статья  
УДК 343.81/83(470)  
doi: 10.24143/1812-9498-2021-2-71-77

## Оптимизация работы схемы электронного предохранителя с регулируемым током перегрузки

**Константин Александрович Климкин**✉

*Астраханский государственный технический университет,  
Астрахань, Россия, elmech@astu.org*✉

Рассматривается возможность применения быстродействующего электронного предохранителя с регулируемым током перегрузки в различных схемах промышленного и бытового электрооборудования. Отмечен недостаток в базовом варианте схемы. Предложен вариант схемы, с помощью которого удалось избавиться от недостатка в базовом варианте: если в защищаемой цепи (в цепи нагрузки) присутствует конденсатор относительно большой емкости ( $C \geq 100$  мкФ), схема может не выйти на рабочий режим, т. к. большой зарядный ток этого конденсатора в момент включения приводит к срабатыванию электронного предохранителя и нагрузка остается неподключенной. Только при условии резкого ограничения зарядного тока конденсатора можно исключить подобную ситуацию, для чего в схему был введен источник тока на полевом транзисторе VT3 и времязадающая цепь R10R11C1. По мере зарядки C1 через источник тока VT3 происходит плавное повышение напряжения смещения на эмиттерных переходах составного транзисторного ключа VT1VT2 при постепенном повышении его проводимости. В итоге пусковой ток через емкостную нагрузку в первый момент времени оказывается значительно меньше, и электронный предохранитель без проблем входит в рабочий режим. Найдены оптимальные соотношения между отдельными элементами схемы, их значения и режимы работы в зависимости от величины и характера нагрузки, при этом благодаря использованию отечественной элементной базы себестоимость устройства оказалась минимальной по сравнению с другими схемами подобного типа. Проведенные исследования могут быть использованы для практической реализации устройств аналогичного типа в бытовом и промышленном применении.

**Ключевые слова:** электронный предохранитель, ток срабатывания, емкость нагрузки, начальный ток стока, ток удержания, источник тока VT3

**Для цитирования:** Климкин К. А. Оптимизация работы схемы электронного предохранителя с регулируемым током перегрузки // Вестник Астраханского государственного технического университета. 2021. № 2 (72). С. 71–77. DOI: 10.24143/1812-9498-2021-2-71-77.

Original article

## Optimizing operation of electrical fuse circuit with controllable overload current

**Konstantin A. Klimkin**✉

*Astrakhan State Technical University,  
Astrakhan, Russia, elmech@astu.org*✉

**Abstract.** The article discusses the application of a rapid action electrical fuse with controllable overload current in the schemes of industrial and household electrical equipment. There has been found a deficiency in the basic version of the scheme. A variant of the circuit was proposed, which helps to get rid of the drawback in the basic version: if a condenser with relatively large capacity ( $C \geq 100$   $\mu$ F) is present in the protected circuit (in the load circuit), the circuit may not reach the operating mode, because, when the condenser is on, its large charging current triggers the electronic fuse and the load remains unconnected. This situation can be avoided only if the charging current of the condenser is greatly reduced, for which a current source on a field-effect transistor VT3 and a timing circuit R10R11C1 were introduced into the circuit. As C1 is being charged, through the

current source VT3 there is a smooth increase in the bias voltage at the emitter junctions of the composite transistor switch VT1VT2 with a gradual increase in its conductivity. As a result, the starting current through the capacitive load at the first moment of time turns out to be much less, and the electronic fuse enters the operating mode. The optimal relationships were found between individual elements of the circuit, their values and modes of operation, depending on the size and nature of the load, while, thanks to the use of the domestic element base, the cost of the device turned out to be minimal compared to other circuits of a similar type. The research data can be used for operation of the devices of a similar type in the household and for industrial applications.

**Keywords:** electrical fuse, operating current, load capacity, initial drain current, holding current, VT3 current source

**For citation:** Klimkin K. A. Optimizing operation of electrical fuse circuit with controllable overload current. *Vestnik of Astrakhan State Technical University*. 2021;2 (72):71-77. (In Russ.) DOI: 10.24143/1812-9498-2021-2-71-77.

### Введение

Электронные предохранители (ЭП), применяемые в настоящее время в различных устройствах и системах промышленного и бытового электрооборудования, зарекомендовали себя как надежные, быстродействующие, бесконтактные защитные устройства выходных цепей вторичных источников электропитания. Основное назначение таких предохранителей – бесконтактное отключение цепей нагрузки в случае перегрузки по току либо короткого замыкания в ней. При этом подобные устройства, как правило, имеют возвратный режим установки схемы в первоначальное состояние, т. е. подключение нагрузки к источнику вторичного питания, что также происходит бесконтактным способом при том или ином внешнем воздействии со стороны оператора (пользователя). Плавкие предохранители не обладают той гибкостью и функциональностью, которые имеются у ЭП. Электронные предохранители могут работать не только при малых токах (до 100 мА), но и при низких напряжениях (исчисляемых единицами В), на этих уровнях тока и напряжения плавкие предохранители часто не срабатывают.

### Материалы исследования

Работа большинства схем ЭП основана на измерении падения напряжения на токочувствительном элементе, в качестве которого может быть применен низкоомный резистор, или шунт. Если падение напряжения превышает некоторый заданный порог, то проходной транзистор отключается и цепь нагрузки разрывается.

Электронный предохранитель включают между источником питания (ИП) и нагрузкой  $Z_n$ , содержащей емкость  $C_n$  (рис. 1).

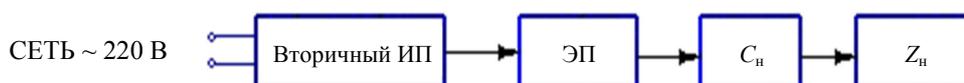


Рис. 1. Блок-схема включения ЭП в состав вторичного ИП

Fig. 1. Block diagram of including electronic fuse into the secondary power supply

Первоначально использовался вариант схемы из [1], основные характеристики следующие:

- пределы изменения входного напряжения  $\Delta U_{вх} = 3 \div 35$  В;
- максимальное падение напряжения на регулируемом транзисторе  $\Delta U_{VT2} = 1,9$  В;
- диапазон токов срабатывания  $I_{сраб} = 0,1 \div 1,5$  А;
- время срабатывания устройства  $t = 3 \div 5$  мкс.

Принцип работы схемы ЭП сводится к следующему: в рабочем режиме транзистор VS1 закрыт, а электронный ключ на транзисторах VT1, VT2 открыт за счет токов, протекающих через R1, который заменен на VT3 в новом варианте, в базу транзистора VT1. При этом ток нагрузки протекает через VT2, резисторы R3, переменный резистор R8 и кнопку SB1. При перегрузке падение напряжения на резисторах R3 и R8 достигает значения, достаточного для открывания транзистора VS1, который замыкает цепь базы транзистора VT1, что приводит к закрыванию элек-

тронного ключа. При этом ток в цепи нагрузки резко уменьшается, но остается незначительный остаточный ток, равный в общем случае:

$$I_{\text{ост}} = U_{\text{пит}} / R1.$$

Если напряжение вторичного ИП  $U_{\text{пит}} = 9 \text{ В}$ , то остаточный ток  $I_{\text{ост}} = 12 \text{ мА}$ , а при  $U_{\text{пит}} = 35 \text{ В}$ :  $I_{\text{ост}} = 47 \text{ мА}$ . Остаточный ток можно уменьшить до  $2\div 4 \text{ мА}$  при любом напряжении питания, применив для смещения транзистора VT1 источник тока на полевом транзисторе КП303А, КП303Б с начальным током стока меньше  $1,5 \text{ мА}$ . При этом резистор R1 исключается, затвор и исток полевого транзистора соединяются вместе и подключаются к базе транзистора VT1, а сток – к его коллектору. В этом случае устройство работоспособно в цепях с напряжением не более  $25 \text{ В}$ . Чтобы восстановить рабочий режим устройства после устранения причины перегрузки, необходимо нажать и отпустить кнопку SB1. Тринистор VS1 закроется, а транзисторы VT1 и VT2 вновь откроются.

Зависимость тока срабатывания ЭП от сопротивления резистора R8 приведена на рис. 2.

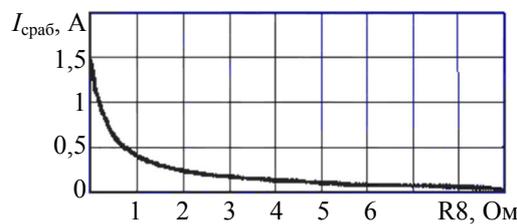


Рис. 2. Зависимость тока срабатывания устройства от суммарной величины сопротивлений R3, R8

Fig. 2. Dependence of a device operating current on the total value of resistances R3, R8

Вид характеристики сильно зависит от напряжения открывания ( $U_{\text{откр}}$ ) тринистора VS1, в данном случае  $U_{\text{откр}} = 0,53 \text{ В}$ , а  $R3 = 0,3 \text{ Ом}$ . Необходимо учитывать, что при значительных пульсациях напряжения питания от вторичного источника ЭП будет срабатывать на пиках напряжения, поэтому средний ток через нагрузку будет немного ниже, чем при использовании хорошо сглаженного напряжения.

При практической реализации данной схемы и работы устройства в цепях с резистивно-емкостной нагрузкой было выявлено следующее: если в защищаемой цепи присутствует конденсатор относительно большой емкости ( $C \geq 100 \text{ мкФ}$ ), ЭП не выходит на рабочий режим, т. к. большой зарядный ток этого конденсатора ( $C_{\text{н}}$  на рис. 1) в момент включения приводит к срабатыванию устройства и нагрузка остается неподключенной. Исключить подобную ситуацию можно при условии резкого ограничения зарядного тока конденсатора.

Доработанный вариант схемы ЭП изображен на рис. 3.

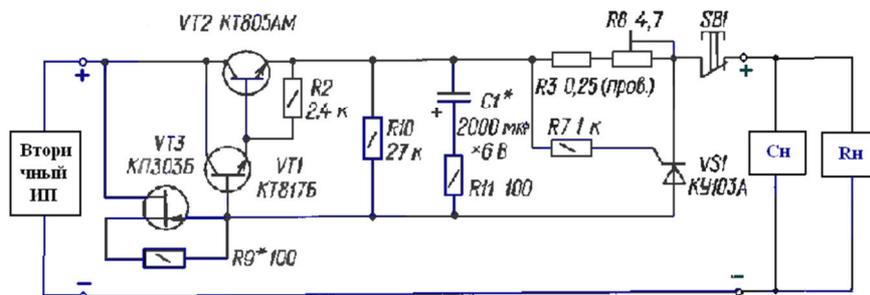


Рис. 3. Схема доработанного варианта ЭП

Fig. 3. Scheme of the modified version of an electronic fuse

Нумерация дополнительных элементов (R9, VT3, R10, R11, C1) продолжает начатую нумерацию в первоначальном варианте схемы. Вместо резистора R1 применен источник тока на полевом транзисторе VT3. Между базой транзистора VT1 и эмиттером VT2 введена времязада-

ющая цепь R10, R11, C1, обеспечивающая плавное открывание составного транзистора VT1, VT2. В момент включения нагрузки эти транзисторы закрыты, однако по мере зарядки конденсатора C1 через источник тока на полевом транзисторе VT3 и резисторе R11 напряжение смещения на эмиттерных переходах VT1 и VT2 постепенно повышается, обеспечивая плавное открывание составного транзисторного ключа. В итоге пусковой ток через емкостную нагрузку в первый момент времени оказывается значительно меньше и ЭП беспрепятственно выходит на рабочий режим.

Следует иметь в виду, что чем больше емкость нагрузки  $C_n$ , тем больше должна быть емкость конденсатора C1 для более плавного открывания составного транзистора VT1, VT2 и, соответственно, чем меньше ток срабатывания ЭП, установленный с помощью R8, тем меньше должна быть емкость нагрузки. Опытным путем было выявлено, что для исключения ложных срабатываний устройства из-за влияния зарядного тока емкостной нагрузки емкость конденсатора C1 должна подбираться в пределах от 1 000 до 3 000 мкФ. Также надежная работа схемы ЭП возможна только при выполнении условия

$$I_{c.n} < I_{уд},$$

где  $I_{c.n}$  – начальный ток стока транзистора VT3;  $I_{уд}$  – ток удержания тиристора VS1.

Согласно [2] для тиристора КУ103А ток удержания, т. е. минимальный основной ток, который необходим для поддержания тиристора в открытом состоянии,  $I_{уд} = 1,2 \div 2,5$  мА, а начальный ток стока для полевых транзисторов типа КП303А и КП303Б  $I_{c.n} = 0,5 \div 2,5$  мА [3]. При нарушении этого условия ЭП переходит в режим релаксационных колебаний, что может привести к перегреву транзистора VT2 и выходу его из строя. Подбор полевого транзистора по начальному току стока  $I_{c.n} < 1,5$  мА позволяет исключить режим релаксационных колебаний, приводящий к перегреву VT2 и повысить надежность работы ЭП в целом. Повторное включение схемы с доработанным вариантом ЭП возможно через 5÷8 с, т. е. после частичной разрядки конденсатора C1.

Указанный в работе [1] ток срабатывания ЭП, в зависимости от величины резистора R8 в зоне максимальных значений, представляет собой довольно грубую зависимость (см. рис. 2), поэтому максимальное значение тока срабатывания ( $I_{ср.аб}$ ) было установлено равным 1 А, что примерно соответствует величине  $R3 = 0,25$  Ом; при этом величина переменного резистора  $R8 = 0$ . Исходя из максимального тока нагрузки, близкого к 1 А, при котором будет работать ЭП без захода в режим срабатывания, мощность рассеивания на коллекторном переходе VT2:

$$P_{VT2} = \Delta U_{VT2} I_n,$$

где  $\Delta U_{VT2}$  – максимальное падение напряжения на транзисторе VT2, равное 2 В;  $I_n$  – максимальное значение постоянного тока в нагрузке, принятое равным 0,9 А.

Соответственно,  $P_{VT2} = 2 \text{ В} \cdot 0,9 \text{ А} = 1,8 \text{ Вт}$ .

Для рассеивания данной мощности транзистор VT2 был установлен на небольшой теплоотвод с рекомендованной в [3] площадью поверхности (около 50 см<sup>2</sup>) при допустимой температуре перегрева  $\Delta T = 40$  °С.

Рабочий вариант ЭП представлен на рис. 4.

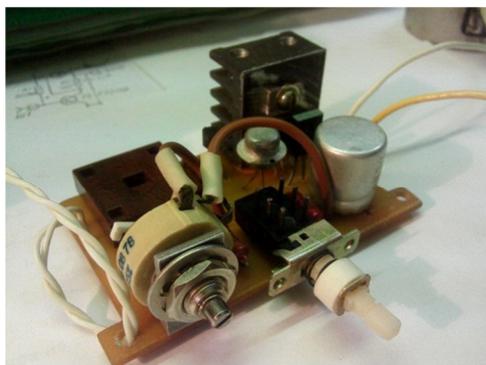


Рис. 4. Конструктивное исполнение ЭП

Fig. 4. Design of an electronic fuse

Электронный предохранитель был смонтирован на печатной плате из фольгированного стеклотекстолита 80×45 мм, толщиной 1,5 мм. В качестве мощного управляющего транзистора VT2, входящего в состав транзисторного ключа, был применен КТ819А, имеющий большее максимальное значение тока коллектора ( $I_k = 10$  А), допустимую мощность рассеивания  $P_{к.рас} = 1,5$  Вт без радиатора и меньшее значение максимально допустимого напряжения насыщения коллектор-эмиттер ( $U_{к-эм.нас} = 2$  В) [4], по сравнению с базовым вариантом (КТ805АМ).

Благодаря применению в составном транзисторном ключе в качестве VT2 более мощного транзистора типа КТ819А, а также прецизионного резистора R3 = 0,12 Ом, 0,5 % типа С2-10-2, стало возможным увеличить максимальный ток срабатывания ЭП, доведя его до 2 А. Рабочий пример эксперимента представлен на рис. 5, где в качестве вторичного ИП приведен понижающий трансформатор типа ТН (слева) и диодный мост КЦ405, установленный на плате ЭП. В качестве эквивалента нагрузки был применен проволочный переменный резистор (в центре сверху), позволяющий плавно менять ток, значение которого контролировалось цифровым мультиметром типа VC9805А.



Рис. 5. Пример определения максимального тока срабатывания ЭП

Fig. 5. Example of determining the maximum operating current of an electronic fuse

Представленный ЭП не имеет функции самовосстановления, в отличие от других подобных устройств [5], и после срабатывания должен приводиться в исходное состояние кратковременным нажатием кнопки SB1. Однако этот факт не относится к недостатку данной схемы, т. к. существует некоторое время, в течение которого можно найти неисправность в том или ином узле. В случае же с самовосстанавливающимися ЭП схема будет каждый раз срабатывать после включения, пока причина перегрузки не будет устранена, что может привести к непредсказуемым последствиям для нагрузки ИП, тем более если нагрузка будет иметь емкостный характер.

Необходимо также отметить экономический фактор применения предложенного варианта ЭП. В таблице приведены усредненные значения стоимости различных видов ЭП Fuse зарубежного производства [5], поставляемых со складов в Москве.

Усредненная стоимость различных видов ЭП  
Average cost of types of electronic fuses

Производитель	Наименование ЭП	Информация	Цены
Opto 22	FUSE05B	16-channel I/O Module Rack В упаковке: 1 Минимальный заказ: 1	1 + 98.13 \$ 5 + 87.622 \$
Opto 22	FUSEG4B	Fuse 4A В упаковке: 1 Минимальный заказ: 1	1 + 107.944 \$ 5 + 96.385 \$
Cooper Bussmann	FUSE-ACC-KIT	Fuse accessory kit В упаковке: 1 Минимальный заказ: 1	1 + 328.342 \$
Cooper Bussmann	FUSEPULLER	В упаковке: 1 Минимальный заказ: 11	11 + 7.539 \$ 25 + 6.245 \$

Указанный в таблице диапазон цен составляет 98,1÷328,3 долл. для разных производителей, наименований и функциональности ЭП.

Стоимость электронных компонентов предложенного варианта ЭП с учетом цен магазина «Элеком» в мае 2021 г.:

- транзистор КТ819А – 56 руб.;
- транзистор КТ817Б – 28 руб.;
- транзистор КП303Б – 20 руб.;
- тиристор КУ103А – 15 руб.;
- диодный мост КЦ405Б – 6 руб.;
- переменный резистор ППБ-1А – 20 руб.;
- конденсатор К50-35 – 5 руб.;
- постоянные резисторы МЛТ-0,25 (5 шт.) – 5 руб.;
- прецизионный резистор С2-10-2 – 70 руб.;
- фольгированный стеклотекстолит (50×100 мм) – 25 руб.;
- кнопка П2К – 10 руб.;
- итого: 260 руб.

Стоимость затраченной электроэнергии не учитывалась, т. к. схема ЭП была спаяна за 1,5 ч паяльником мощностью 40 Вт.

Учитывая курс доллара на июнь 2021 г. (72,8 руб.), стоимость компонентов модернизированного варианта ЭП составит  $260 / 72,8 = 3,57$  в долларовом эквиваленте, т. е. с учетом даже минимальной стоимости вышеупомянутых ЭП Fuse (98,1 долл.) предложенный вариант ЭП дешевле в 27,4 раз ( $98,1 / 3,57$ ). Получаемый в первом приближении экономический эффект может служить основанием для широкого применения предложенного варианта ЭП в различных устройствах автоматического контроля тока нагрузки бытового и промышленного применения.

### Заключение

В настоящее время применение ЭП является актуальным в соответствующих цепях автоматики, промышленного и бытового оборудования. Использование дополнительных элементов в схеме позволило расширить диапазон уставок тока и гибкость применения данного устройства. Сравнения с аналогичными устройствами (табл.) свидетельствует об экономической целесообразности применения предложенного варианта ЭП.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Эсаулов Н. Регулируемый электронный предохранитель // Радио. 1988. № 5. С. 31. URL: <http://archive.radio.ru/web/1988/05/034/> (дата обращения: 01.06.2021).
2. Гитцевич А. Б., Зайцев А. А., Мокряков В. В. и др. Полупроводниковые приборы. Диоды выпрямительные, стабилитроны, тиристоры: справ. / под ред. А. В. Голомедова. М.: Радио и связь, 1988. 528 с.
3. Справочник радиолюбителя-конструктора. М.: Радио и связь, 1983. 560 с.
4. Зайцев А. А., Миркин А. И., Мокряков В. В. и др. Полупроводниковые приборы. Транзисторы средней и большой мощности: справ. / под ред. Б. Л. Перельмана. М.: Радио и связь, 1989. 640 с.
5. Bourns. SinglFuse SMD Fuses. URL: [www.bourns.com/products/circuit-protection/singlfuse-smd-fuses](http://www.bourns.com/products/circuit-protection/singlfuse-smd-fuses) (дата обращения: 01.06.2021).

### REFERENCES

1. Esaulov N. Reguliruemiyi elektronnyi predokhranitel' [Adjustable electronic fuse]. *Radio*, 1988, no. 5, p. 31. Available at: <http://archive.radio.ru/web/1988/05/034/> (accessed: 01.06.2021).
2. Gittsevich A. B., Zaitsev A. A., Mokriakov V. V. i dr. *Poluprovodnikovye pribory. Diody vypryamitel'nye, stabilitrony, tiristory: spravochnik* [Semiconductor devices. Rectifier diodes, zener diodes, thyristors: reference book]. Pod redaktsiei A. V. Golomedova. Moscow, Radio i sviaz' Publ., 1988. 528 p.
3. *Spravochnik radioliubitelia-konstruktora* [Handbook of radio amateur designer]. Moscow, Radio i sviaz' Publ., 1983. 560 p.
4. Zaitsev A. A., Mirkin A. I., Mokriakov V. V. i dr. *Poluprovodnikovye pribory. Tranzistory srednei i bol'shoi moshchnosti: spravochnik* [Semiconductor devices. Medium and high power transistors: reference]. Pod redaktsiei B. L. Perel'mana. Moscow, Radio i sviaz' Publ., 1989. 640 p.
5. Bourns. *SinglFuse SMD Fuses*. Available at: [www.bourns.com/products/circuit-protection/singlfuse-smd-fuses](http://www.bourns.com/products/circuit-protection/singlfuse-smd-fuses) (accessed: 01.06.2021).

Статья поступила в редакцию 23.06.2021; одобрена после рецензирования 27.09.2021; принята к публикации 29.09.2021.  
The article was submitted 23.06.2021; approved after reviewing 27.09.2021; accepted for publication 29.09.2021.

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ**

**Константин Александрович Климкин** – старший преподаватель кафедры электрооборудования и автоматике судов; Астраханский государственный технический университет; 414056, Астрахань, ул. Татищева, 16; elmech@astu.org

**INFORMATION ABOUT THE AUTHOR**

**Konstantin A. Klimkin** – Senior Lecturer of the Department of Electric Equipment and Ship Automation; Astrakhan State Technical University; 414056, Astrakhan, Tatishcheva St., 16; elmech@astu.org

