

# Гибридное реле

А. А. Шаров<sup>1,2</sup>, И. М. Романов<sup>2</sup>, С. А. Наумов<sup>2</sup>, А. Э. Дегтерев<sup>1</sup>, И. А. Ламкин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

<sup>2</sup>АО НПК «Северная заря»  
sharov.2000@mail.ru

**Аннотация.** Разработана электрическая схема гибридного реле, которая продемонстрировала бездуговую коммутацию РЭС-90 с числом, превышающим в 3,1 раза максимально допустимое значение циклов работы.

**Ключевые слова:** электромагнитное реле; срок службы; электрическая дуга; гибридное реле; бездуговая коммутация; полупроводниковый ключ

## I. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

Электромагнитное реле (ЭМР) – это коммутатор (переключатель) электрического тока, который производится и улучшается по сей день. Электромагнитное реле известно своей надежностью и широким использованием в авиационной, космической и промышленной автоматике [1].

### A. Принцип действия простейшего электромагнитного реле

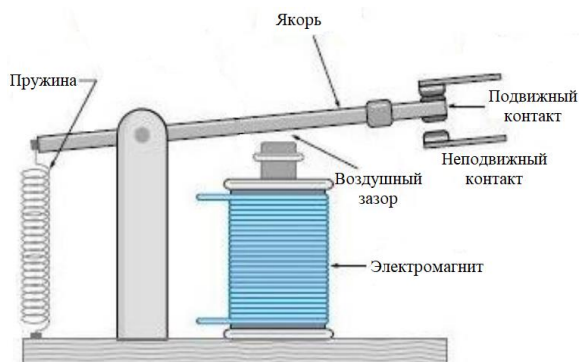


Рис. 1. Простейшая схема реле, описывающая принцип работы [3]

В простейшем случае ЭМР состоит из электромагнита, якоря, пружины, подвижного контакта и неподвижного контакта, рис. 1. При подключении питания через катушку электромагнита начинает протекать ток, который в свою очередь создает магнитное поле. Затем якорь за счет магнитного поля притягивается к катушке и приводит к соприкосновению подвижный контакт с неподвижным [2].

### B. Срок службы электромагнитных реле

Как говорилось ранее ЭМР используется в авиационной и космической автоматике, где к используемой электронной компонентной базе (ЭКБ) предъявляются крайне жесткие требования. И одним из

Исследование проводилось в рамках проекта № FSEE-2020-0008, который выполнялся в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 075-01438-22-00.

таких требований является длительный срок безотказной работы (срок службы). [4]

Срок службы ЭМР определяется механическим и электрическим ресурсом. Механический ресурс включает в себя количество циклов работы (замыканий/размыканий) без нагрузки, которые могут выдержать контакты реле, прежде чем потребуются их замена. А электрический ресурс выражается в количестве циклов работы под нагрузкой, когда через контакты протекает ток. [5]

Причем как показывает практика, механический ресурс циклов работы реле гораздо больше, по сравнению с электрическим. И в основном это связано с возникновением электрической дуги во время замыканий/размыканий механических контактов реле под нагрузкой. [5]

### C. Влияние электрической дуги на контакты электромагнитного реле

Электрическая дуга в электромагнитном реле – это пробой газа (воздушного зазора) между подвижным и неподвижным механическим контактом реле и как следствие протекание тока между ними. [6]

Минимальное напряжение для возникновения дуги между контактами реле зависит от материала самих контактов и лежит в пределах 6–12 (В) [7]. Процесс возникновения электрической дуги сопровождается переносом материала между контактами и приводит к плавлению материала, что увеличивает сопротивление контакта и уменьшает срок службы ЭМР. Также перенос материала способствует образованию жидкометаллического мостика между контактами, из-за чего контакты перестают должным образом замыкаться/размыкаться и такое реле попадает в брак. [8]

### D. Гибридное реле

Одним из способов предотвращения электрической дуги во время коммутации реле является использование параллельно подключенного к механическим контактам ЭМР полупроводникового (ПП) ключа. [9]

ПП-ключ позволяет снизить падение напряжения на контактах ЭМР в момент его замыкания/размыкания, за счет чего осуществляется бездуговая коммутация. В качестве полупроводникового ключа используют: MOSFET's, IGBT транзисторы и TRIAC симисторы. [10]

Последовательность работы такого гибридного реле состоит из нескольких этапов, представленных на рис. 2.

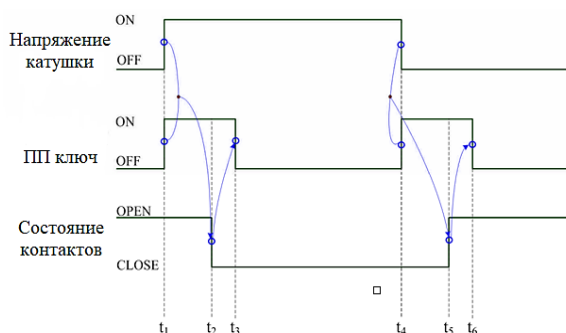


Рис. 2. Последовательность работы гибридного реле в течение полного цикла [9]

Интервал 1 ( $t_1 - t_2$ ): подаваемое напряжение должно прикладываться одновременно на катушку и ПП-ключ. Скорость замыкания ПП-ключа составляет от десятков до сотых наносекунд [11], что быстрее, чем у механической контактной системы (единицы – десятки миллисекунд [12]). Через ПП-ключ, ток потечет раньше и вследствие его низкого сопротивления, на нем упадет малое напряжение. Следовательно, при замыкании контактов реле, на контактной группе установится напряжение падения открытого перехода ПП-ключа. [9]

Интервал 2 ( $t_2 - t_3$ ): когда подвижный контакт реле впервые соприкасается с неподвижным контактом, неизбежным результатом является дребезг. Из-за того, что разница напряжений между подвижным и неподвижными контактами очень мала, условие возникновения дуги между этими двумя сталкивающимися механическими контактами является недостаточным. [9]

Интервал 3 ( $t_3 - t_4$ ): как только дребезг контактов прекратится, ПП-ключ следует отключить, чтобы весь протекающий ток проходил через механический контакт реле. [9]

Интервал 4 ( $t_4 - t_5$ ): в момент размыкания контактов следует обратно включить ПП-ключ, чтобы предотвратить возникновение высокотемпературной дуги при размыкании механических контактов реле. [9]

Интервал 5 ( $t_5 - t_6$ ): размыкание механических контактов реле в момент открытого ПП-ключа. [9]

## II. ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

### A. Моделирование электрической схемы гибридного реле

На рис. 3 изображена электрическая схема гибридного реле, где в качестве полупроводникового ключа используются два параллельно подключенных MOSFET транзистора. Дополнительно к выходу канала транзисторов (сток) последовательно подсоединен резистор 7 (Ом), с целью намеренно ухудшить сопротивление открытого канала ПП-ключа, чтобы основной ток проходил через контакты ЭМР.

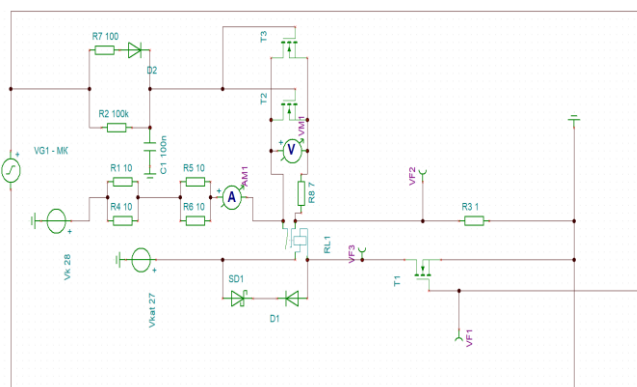


Рис. 3. Схема гибридного контактного реле с двумя, подключенными параллельно, MOSFET транзисторами в среде Tina-TI

Схема работает от трех источников напряжения: «VG1 – МК» равным 15 (В) – напряжение открытия транзисторов T1, T2, T3; «Vvk28» равным 28 (В) – напряжение на контактах гибридного реле; «Vkat27» равным 27 (В) – напряжение катушки ЭМР.

В качестве нагрузки используются две пары параллельно подключенных резисторов, которые в совокупности дают номинал 10 (Ом) и способны рассеивать мощность 200 (Вт).

Для обеспечения бездуговой коммутации механических контактов реле последовательно затворам транзисторов подключена замедляющая система, представляющая собой диод, с параллельно подключенным резистором большого номинала сопротивления 100 (кОм) и конденсатором 100 (нФ). Идея такой системы заключается в следующем: для открытия MOSFET транзисторов необходимо зарядить паразитную емкость затвор-исток и дополнительный конденсатор на 100 (нФ). Емкость затвор-исток при подаче импульса положительной полярности заряжается через цепь R7, D2, так как к диоду приложено прямое напряжение (то есть анод имеет положительный потенциал относительно катода). А чтобы держать транзисторы открытыми дольше, чем пройдет процесс полного механического замыкания или размыкания контактов, необходимо разрядить эти конденсаторы медленно. Процесс разряда конденсаторов будет происходить через резистор R2, так как при снятии управляющего напряжения VG1-МК, через диод D2 будет протекать только ток утечки. Таким образом, механические контакты реле смогут замкнуться раньше ПП-ключа, рис. 4.

На рис. 4 изображена осциллограмма работы гибридного реле, состоящая из трех сигналов: VF1 – осциллограмма управления катушки ЭМР и затворами MOSFET транзисторов; VF2 – осциллограмма контактов гибридного реле; VF3 – осциллограмма снятия управления с катушки ЭМР.

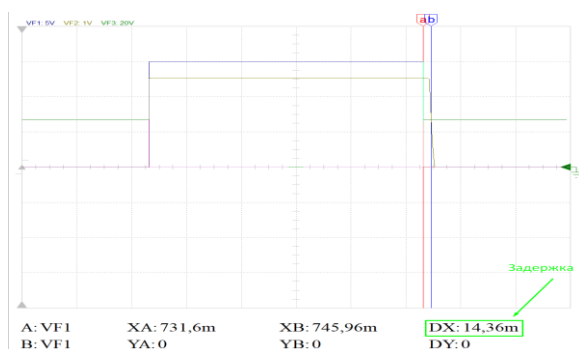


Рис. 4. Осциллограмма работы гибридного реле, демонстрирующая задержку закрытия транзисторов, в среде TINA-TI

### В. Сборка моделируемой электрической схемы гибридного реле



Рис. 5. Собранная моделируемая электрическая схема гибридного реле

Схема на рис. 5 была собрана с электромагнитным реле РЭС-90, которое имеет время срабатывания не более 10 (мс), а время возврата (отпускания) не более 5 (мс) с максимальным числом коммутационных циклов равным  $2,5 \cdot 10^5$  [12].

Номиналы компонентов системы задержки подобраны таким образом, чтобы время отпускания ПП-ключа было не меньше 5 (мс), рис. 4.

Для открытия и закрытия ПП-ключа использовался микроконтроллер (МК) STM32F746ZG с драйвером TC4427. МК запрограммирован выдавать прямоугольный импульс частотой 5 (Гц) на драйвер.

Драйвер обеспечивает большой ток для быстрой зарядки затвора транзистора для его открытия. А также быстро разряжает затвор, когда транзистор нужно закрыть.

Собранная моделируемая схема на рис. 5 тестировалась в течение рабочей недели – 42,75 часа.

Суммарное число коммутаций гибридного реле при токе нагрузки 3 (А) и частоте коммутации 5 (Гц) составило – 769 500 раз.

Перед тестированием гибридной схемы сопротивление контактов РЭС-90 составляло 0,4 (Ом).

После тестирования сопротивление увеличилось до 0,56 (Ом), что допустимо для дальнейшего использования.

### III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Срок службы ЭМР определяется его электрическим ресурсом, который гораздо меньше механического, из-за

возникновения электрической дуги между механическими контактами реле.

Для осуществления бездуговой коммутации была предложена электрическая схема гибридного реле, которая включает в себя ЭМР и параллельно подключенный ПП-ключ в виде двух параллельно подключенных MOSFET транзисторов, рис. 3.

Чтобы осуществить идею включения ПП-ключа раньше ЭМР, а выключение позже, была смоделирована замедляющая система, которая задерживает выключение ПП-ключа на 14,36 (мс), рис. 4, что больше времени возврата реле РЭС-90.

По итогу работы была собрана моделируемая электрическая схема гибридного реле, рис. 5, которая тестировалась 42,75 часа и продемонстрировала 769 500 полных циклов работы бездуговой коммутации, что примерно в 3,1 раза больше максимально допустимого значения циклов, заявленных разработчиками АО НПК «Северная Заря».

При этом сопротивление контактной цепи осталось в пределах допустимого <1(Ом) [12] для дальнейшей коммутации тока нагрузки, что является положительным результатом работы моделируемой схемы на рис. 5.

### БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают благодарность директору предприятия АО НПК «Северная Заря» Лаврову Валерию Александровичу за оказанное содействие при проведении научных исследований.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Рудык А.Р., Любинский Д.Л. Технология миниатюрных реле. Л: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1982. 264 с.
- [2] Eniliev R.R. Principle of operation and application area of electromagentic relay, 2019.
- [3] M.J. Mbulwe, U.C. Ogbuefi, B.O. Anyaka. Protection of a Disturbed Electric Network using Solid State Protection Device. Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2018
- [4] Белоус А.И., Солодуха В.А. Микроэлектронная элементная база космических аппаратов: состояние, проблемы и тенденция развития. 2018г. УДК 621.3.049.77:629.78(045)
- [5] Никитин А.Б., Ковкин А.Н., Манаков А.Д. Использование малогабаритных силовых реле в безопасных устройствах сопряжения компьютерных систем железнодорожной автоматики. 2018г. УДК 681.518.5:004.052.32
- [6] Бобин А.А., Ефимов И. П., Кузнецов А.С. Методы определения электрической дуги 2021г. УДК 53.083.92
- [7] Розанов Ю.К., Акимов Е.Г., Пручкин А.Н., Рябов М.Ю. Эрозия контактов в условиях гибридной коммутации. «Электротехника» 1998 г.
- [8] Zhuan-Ke Chen and Koichiro Sawa. Effect of Arc Behavior on Material Transfer: A Review. Department of Electrical Engineering, Keio University, Yokohama, Japan.1996
- [9] Chieh-Tsung Chi. To Develop a New Arcless and Power-Saving Power Relay with Hybrid Contacts. Department of Electrical Engineering 2016.
- [10] Manuel Fernández, Xavier Perpiñà, José Rebollo, Miquel Vellvehi, David Sánchez, Tomás Cabeza, Sergio Llorente, and Xavier Jordà. Solid State Relay Solutions for Induction Cooking Applications based on Advanced Power Semiconductor Devices. IEEE transactions on industrial electronics 2018.
- [11] Бабенко В.П., Битюков В.К. Особенности моделирование MOSFET ключей в electronics workbench. 2017 УДК 621.372.632
- [12] Северная заря, каталог предприятия. Реле РЭС-90. <https://relays.ru/product.html>. Дата обращения 14.02.2023