

УДК 656.257

*Канд. техн. наук О.В. Нейчев,  
д-р техн. наук В.И. Мойсеенко*

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ РЕЛЕ КАК ИСТОЧНИК ПОМЕХ ДЛЯ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ

**Введение.** Современный этап развития транспортной системы Украины можно охарактеризовать как начало массового внедрения микропроцессорных (компьютерных) систем управления и контроля. Их низкая энергоемкость и малая энергия переключения элементов, с одной стороны, является положительным моментом, с другой – требует серьезного подхода к решению проблем электромагнитной совместимости. Наличие значительного количества электромагнитных реле в традиционных системах железнодорожной автоматики создает напряженную электромагнитную обстановку в местах компактного размещения релейной аппаратуры и повышает вероятность обратимых (а в ряде случаев и необратимых) отказов микроэлектронных устройств. Ситуация усложняется тем, что на данном этапе наиболее вероятным является одновременное использование релейно-контактной и микроэлектронной техники как в рамках одной системы, так и в рамках одного пространства (например, поста ЭЦ или релейного шкафа). Характерный пример – системы ЭЦ с микропроцессорным маршрутным набором.

В связи с этим понимание причин, механизма возникновения и характера помех, генерируемых типовой аппаратурой ЖАТ, представляет интерес для решения практических задач разработки и эксплуатации цифровых технических средств.

**Анализ исследований и публикаций.** Традиционно исследователи рассматривают реле, как источник электромагнитных помех в самом общем виде. Применительно к системам железнодорожной автоматики делается акцент на проблемах безопасного поведения технических средств в условиях воздействия помех. Так, в работах В.В. Сапожникова и В.Ф. Кустова [1-3] достаточно детально исследованы процессы влияния электромагнитных помех на безопасность функционирования микропроцессорных систем управления и контроля. Вместе с тем процессы возникновения электромагнитных помех при коммутации контактной группой реле первого класса цепи с реактивной нагрузкой исследованы пока недостаточно.

**Цель работы.** Исследование механизма возникновения электромагнитных помех при коммутации цепи питания реле железнодорожной автоматики контактной группой.

**Изложение основного материала.**

Каждая коммутация электрической цепи, в которую включено реле, вызывает возникновение электромагнитных помех. Их напряжение, форма импульсов, энергия зависят от ряда факторов: типа реле, индуктивности и сопротивления обмотки,

напряжения/тока питания. Схема замещения обмотки электромагнитного реле, как источника помех, представлена на рис. 1, где  $L_p$  – индуктивность,  $R_p$  – сопротивление,  $C_p$  – паразитная приведенная межвитковая и межслоевая емкость обмотки.

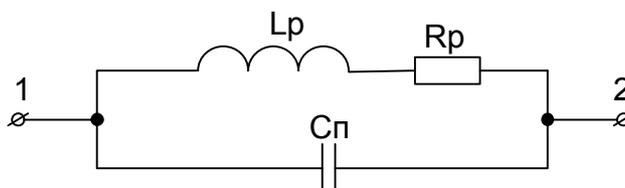


Рис. 1 Эквивалентная электрическая схема реле

Параметры  $R_p$  и  $C_p$  являются постоянными для определенного типа реле, а  $L_p$  зависит как от типа реле, так и от его состояния (при включенном реле индуктивность максимальна, при выключенном – минимальна).

В общем случае при размыкании электрической цепи, содержащей индуктивный элемент  $L$ , на выводах обмотки возникает ЭДС самоиндукции,  $V$ ,

$$e_i = -L \, di/dt. \quad (1)$$

Поскольку при коммутации цепи питания реле и индуктивность и ток являются функциями времени  $F_1(L(t))$  и  $F_2(i(t))$  соответственно, выражение (1) примет вид [4-6],  $V$ :

$$e_{op} = -F_1(L(t)) \, dF_2(i(t))/dt. \quad (2)$$

Указанная ЭДС является причиной возникновения нестационарных переходных процессов, сопровождающихся возникновением электрической дуги на размыкающих контактах, высвобождением энергии в виде тепла и электромагнитного излучения.

Рассмотрим механизм возникновения электромагнитных помех более детально на примере схемы, приведенной на рис. 2, а.

Пусть реле потребляет электроэнергию от источника  $E_1$  с напряжением  $U$ . Внутреннее сопротивление источника  $R_{вн} \ll R_p$ ,  $C_m$  – емкость монтажа. Ток в цепи  $I = U/(R_p + R_{вн})$ . При размыкании контактной группы  $K$  в результате разрыва цепи и возникновения воздушного промежутка  $\Delta_1$  (рис. 2, б) возрастает сопротивление в цепи питания реле и ток в обмотке начинает снижаться. Согласно выражению (2) на клеммах 1 и 2 реле возникает ЭДС самоиндукции  $e_{op}$ . На момент размыкания контактов паразитная емкость обмотки и емкость монтажа заряжены до напряжения источника питания (за вычетом падения напряжения на сопротивлении  $R_{вн}$ ). При появлении зазора между контактами ЭДС самоиндукции и напряжение заряда конденсаторов, образованных этими емкостями, поддерживают ток через обмотку реле, практически, на уровне рабочего тока. Однако цепь тока замыкается теперь не через источник питания и контактную группу, а через емкости  $C_p$  и  $C_m$  (рис. 3). С течением времени суммарная паразитная емкость сначала разряжается, а затем начинает заряжаться, но уже напряжением противоположной полярности. Источником

тока заряда является ЭДС самоиндукции.  
Постоянная цепи заряда, с,

$$\tau_{сз} = (Cп + Cм) R_p, \quad (3)$$

где  $R_p$  – сопротивление обмотки реле;  
 $Cп, Cм$  – паразитные емкости обмотки  
реле и монтажных проводов.

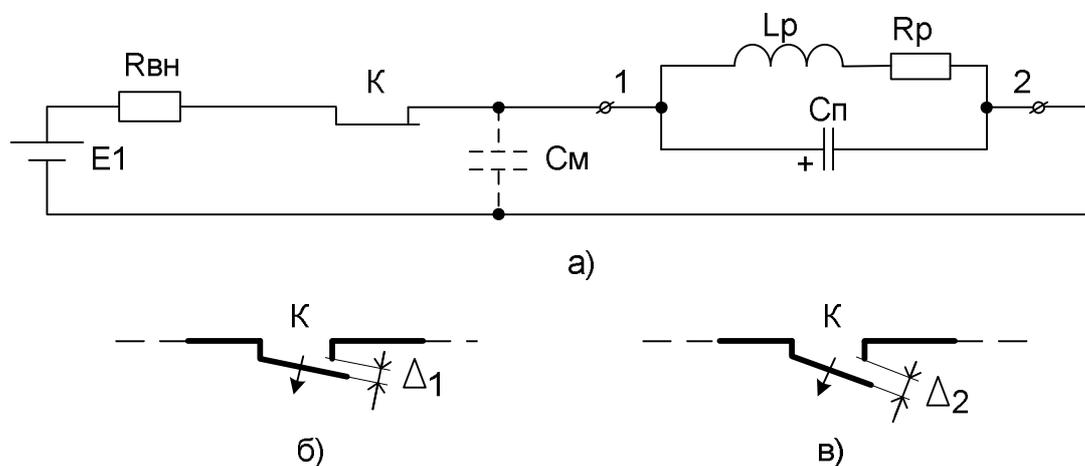


Рис. 2 Состояние схемы управления реле в процессе коммутации

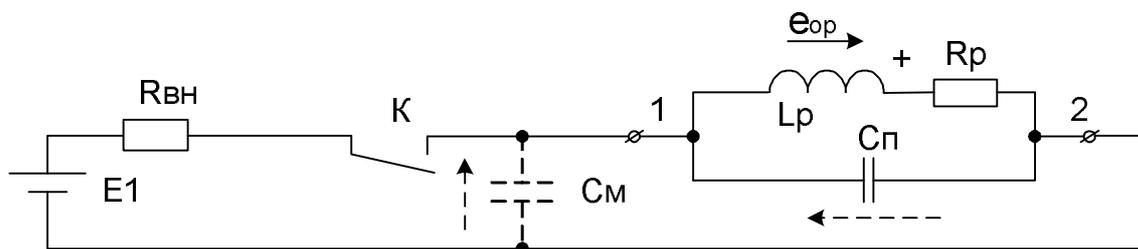


Рис. 3 Направление протекания токов самоиндукции

По мере заряда  $Cп$  и  $Cм$  ток через обмотку реле убывает, что способствует дальнейшему возрастанию ЭДС самоиндукции. Напряжение на выводах обмотки,  $U$ , изменяется по закону:

$$u = e_{оп} (1 - e^{-t/\tau_{сз}}). \quad (4)$$

Это напряжение плюс напряжение источника питания оказывается приложенным к контактам  $K$ . На начальной стадии процесса размыкания воздушный зазор  $\Delta_1$  мал и при возрастании

напряжения  $u$  в какой-то момент «пробивается» – возникает электрическая дуга, ионизирующая воздух в межконтактном пространстве и понижающая его сопротивление до  $R_{пр} = 5 \dots 10 \text{ Ом}$  [7-8]. Емкости  $Cп$  и  $Cм$  разряжаются с постоянной цепи разряда, с,

$$\tau_{ср} = (R_{вн} + R_{пр}) (Cп + Cм), \quad (5)$$

где  $R_{вн}$  – внутреннее сопротивление источника питания;

$R_{пр}$  – сопротивление воздушного межконтактного промежутка в момент образования дуги (при «пробое»).

Поскольку  $(R_{вн}+R_{пр}) \ll R_p$ , разряд происходит значительно быстрее, чем заряд. Паразитные емкости разряжаются, а затем (поскольку сопротивление воздушного промежутка еще мало по сравнению с  $R_p$ ) заряжаются источником питания до напряжения  $U_{ип}$ . В этот момент происходит подпитка обмотки реле энергией источника. Примерная осциллограмма одного заряда и разряда паразитных емкостей обмотки и монтажа, построенная по результатам исследования переходных коммутационных процессов в типовых реле ЖАТ, приведена на рис. 4 (отрезок  $t_0 - t_1$ ). Напряжения на контактах К возрастает по закону, близкому к экспоненциальному (отрезок  $t_0 - «а»$ ). После достижения значения пробоя ( $U_{пр1}$ ) напряжение на Сп, См и контактах резко

падает, формируя задний фронт импульса («а» –  $t_1$ ). После разряда емкостей дуга гаснет, поскольку из-за значительного сопротивления обмотки  $R_p$  ток в цепи недостаточен для ее поддержания. Гашению дуги способствует и тот факт, что в момент подпитки реле скорость убывания тока через его обмотку снижается – реле, фактически, снова оказывается подключенным к источнику. Согласно выражениям (1), (2) стабилизация тока приводит к уменьшению ЭДС на выводах обмотки и созданию благоприятных условий для гашения дуги между контактами коммутатора (на рис. 4 – интервал  $t_1 - t_2$ ). Так как накопленная обмоткой реле энергия в течение одного импульса не исчерпалась, более того – частично пополнилась, процесс повторяется: снова возрастает напряжение на контактах К и в точке «в» оно снова достигает значения пробоя ( $U_{пр2}$ ).

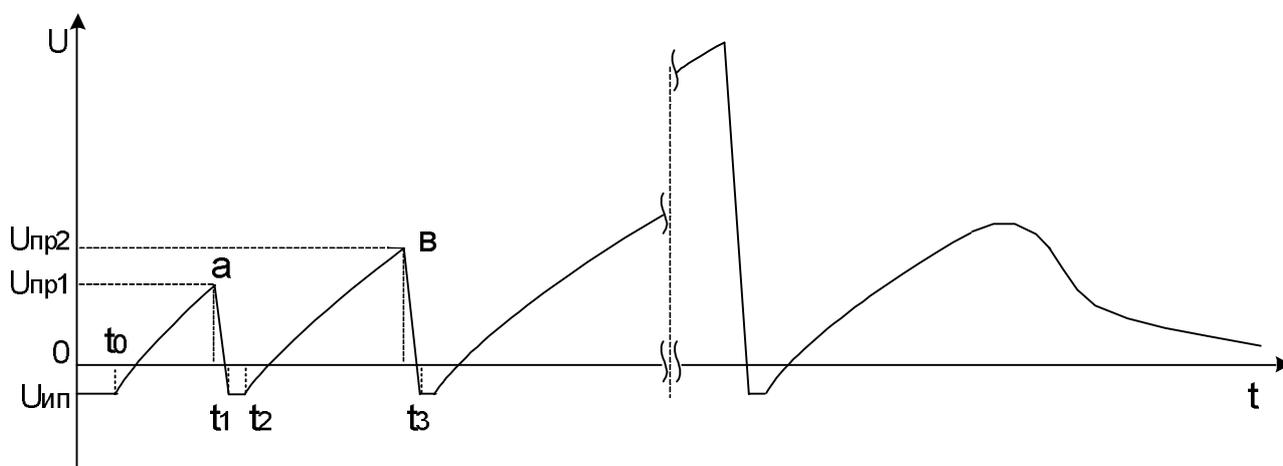


Рис. 4 Форма импульсов помех на обмотке реле

Учитывая, что за время  $t_1 - t_3$  контакты коммутатора успели разойтись еще на какое-то расстояние по сравнению с интервалом  $t_0 - t_1$ , благоприятные условия для пробоя промежутка  $\Delta_2$  возникают при большем напряжении ( $U_{пр1} < U_{пр2}$ ). Форма второго импульса аналогична форме первого импульса, а его длительность

изменяется пропорционально изменению напряжения пробоя. Поскольку заряд паразитных емкостей происходит с одинаковой постоянной цепи заряда  $\tau_{сз}$ , а пробой воздушного промежутка с каждым импульсом наступает при более высоком напряжении, длительность  $i$ -го импульса в

общем случае оказывается больше длительности  $i-1$ -го.

Следует отметить, что в результате искровых разрядов в межконтактном промежутке появляются продукты горения контактов, которые могут изменять величину воздушного зазора  $\Delta_i$ , условия ионизации, а следовательно, и напряжение пробоя. Поэтому амплитуда и длительность отдельных импульсов носят в значительной степени случайный характер. Вместе с тем тенденция увеличения длительности импульсов к концу пачки помех сохраняется.

Приведенная на рис. 4 диаграмма не учитывает увеличение сопротивления дуги по мере увеличения воздушного промежутка между контактами коммутатора, поэтому нижняя граница импульсов показана на уровне напряжения источника питания. На практике только первые импульсы помех имеют такую форму. К концу пачки на задних фронтах импульсов дуга гаснет еще до полного разряда паразитных емкостей, вследствие чего нижняя граница импульсов растет и может достигать 150 – 200 В (рис. 5).

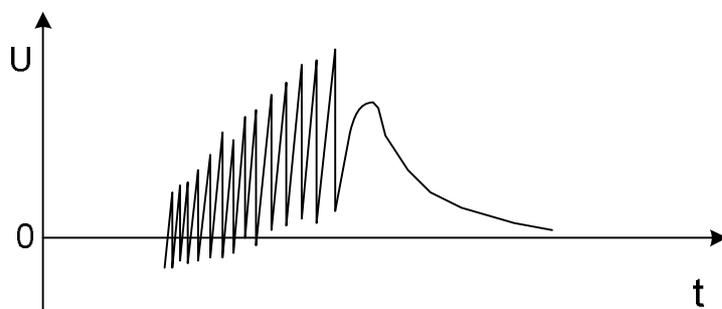


Рис. 5 Диаграмма изменения напряжения помех

Описанный выше процесс формирования импульсов продолжается до тех пор, пока исчерпается накопленная обмоткой реле энергия, а межконтактный промежуток станет настолько большим, что за счет ЭДС самоиндукции уже не будет пробиваться. За период одной такой коммутации возникает от нескольких десятков до нескольких сотен импульсов с переменной длительностью и амплитудой. Длительность первых импульсов в пачке 200 – 300 нс, последних – 400 – 500 мкс. Однако, поскольку емкость монтажа  $C_m$  соизмерима с емкостью обмотки  $C_p$  и влияет на суммарное значение паразитной емкости ( $C_m + C_p$ ), временные параметры импульсов помех на реальных объектах могут отличаться от указанных.

Суммарная вольт-секундная площадь импульсов в пачке определяется запасенной обмоткой реле энергией и

зависит от рабочего тока реле и его индуктивности. Эта площадь практически не меняется от образца к образцу реле определенного типа. В наибольшей степени на амплитуду и длительность пачки импульсов влияет скорость размыкания контактов в цепи питания реле: чем быстрее размыкаются контакты, тем больше длительность отдельных импульсов, их амплитуда, максимальное напряжение огибающей, но меньше длительность пачки. Чем медленнее размыкаются контакты, тем меньше амплитуда помех, но больше длительность.

Так, при коммутации цепи питания реле НМШ1-1440 контактами реле КДР максимальное напряжение огибающей пачки помех достигает 2,5 кВ, длительность 2,0 ... 2,5 мс. При коммутации цепи питания реле НМШ1-1440 контактами аналогичного реле максимальное

напряжение огибающей пачки помех достигает 1,5 кВ, длительность 4...5 мс. При использовании в качестве коммутирующего устройства медленнодействующего реле (НМШМ, например) длительность пачки импульсов достигает 10 мс с максимальной амплитудой огибающей 500-600 В. Приведенные значения параметров помех получены для «уединенного» реле с емкостью монтажа не более 100 пФ.

**Выводы.** Вольт-секундная площадь импульсов в пачке зависит от рабочего тока реле и его индуктивности и практически

не зависит от образца и типа. Амплитуда и длительность пачки импульсов в наибольшей степени определяется скоростью коммутации электрической цепи питания реле. При возрастании скорости коммутации увеличивается длительность отдельных импульсов, амплитуда, максимальное напряжение огибающей. Как следует из приведенных результатов, использование в качестве коммутирующих устройств электронных компонентов без принятия мер по их защите недопустимо.

### Список литературы

1. Кустов, В.Ф. Основи теорії надійності та функціональної безпечності залізничної автоматики [Текст]: навч. посібник / В. Ф. Кустов. – Харків: УкрДАЗТ, 2008. – 156 с.
2. Сертификация и доказательство безопасности систем железнодорожной автоматики [Текст] / под ред. В.В. Сапожникова. – М.: Транспорт, 1997. – 288 с.
3. Сапожников, В.В. Общие требования к программам обеспечения безопасности для систем железнодорожной автоматики и телемеханики [Текст] / В.В. Сапожников // Автоматика, телемеханика и связь. – 1992. – № 12. – С. 26 – 27.
4. Стрельников, В.П. Оценка и прогнозирование надежности электронных элементов и систем [Текст] / В.П. Стрельников, А.В. Федухин. – К.: Логос, 2002. – 486 с.
5. Стрельников, В.П. Вероятностно – физический подход к расчету показателей надежности механических узлов средств вычислительной техники [Текст] / В.П. Стрельников, А.В. Федюлин, М.Ф. Яковлев // Математические машины и системы. – 1998. – №2. – С. 74 – 79.
6. Safety-critical computer systems. Addison – Wesley, Harlow (UK) – NY, 1996. – 453 p.
7. ДСТУ 3433 - 96. Надійність техніки. Моделі відмов. Основні положення [Текст]. - Введ. 1997-01-01. – К.: Вид-во стандартів, 1996. – 42 с.
8. Надежность и эффективность в технике [Текст]: справочник: в 10 т. / ред. совет В.С. Авдеевский [и др.]. Т.3. Эффективность технических систем; под общ. ред. В.Ф. Уткина, Ю.В. Крючкова. – М.: Машиностроение, 1988. – 328 с.

**Ключевые слова:** электромагнитное реле, контакты, помеха, информационно-управляющие системы, цепи питания.

### Аннотации

У статті розглянуто механізм виникнення електромагнітних завод під час комутації кола контактної групою реле першого класу залізничної автоматики. Наведені результати дослідження впливу швидкості розмикання контактів у колі живлення на амплітуду і тривалість пачки імпульсів з урахуванням робочого струму реле та його індуктивності. Показано, що при замиканні кола живлення реле першого класу контактами аналогічного реле максимальне значення амплітуди напруги кривої, що огинає пачку завади, сягає 1,5 кВ, з тривалістю пачки імпульсів до 10 мс та максимальним значенням амплітуди кривої, що огинає імпульси, до 600 В.

В статье рассмотрен механизм возникновения электромагнитных помех при коммутации цепи контактной группой реле первого класса железнодорожной автоматики. Приведены результаты исследования влияния скорости размыкания контактов в цепи питания на амплитуду и длительность пачки импульсов с учетом рабочего тока реле и его индуктивности. Показано, что при замыкании цепи питания реле первого класса контактами аналогичного реле максимальное напряжение огибающей пачки помех достигает 1,5 кВ с длительностью пачки импульсов до 10 мс и максимальной амплитудой огибающей до 600 В.

The article describes the mechanism of electromagnetic interference switching circuit relay contact group of first class railway automation. The results of investigation of the effect speed opening of the contacts in the food chain on the amplitude and duration of the pulse burst, taking into account the operating current relay and its inductance. It is shown that for the closure of the food chain relay contacts of the first class the same maximum voltage relay packet envelope noise reaches 1.5 kV, pulse burst duration of 10 ms and the maximum amplitude of the envelope up to 600.