

# Основные параметры и особенности применения твердотельных реле ЗАО «Протон-Импульс»

Николай АБРАМОВ

**Статья посвящена вопросам применения твердотельных реле на примере реле производства ЗАО «Протон-Импульс», рассчитанных на токи от 1 до 100 А. Данные рекомендации носят обязательный характер при применении твердотельных реле, изготавливаемых фирмой ЗАО «Протон-Импульс», однако их можно учитывать и при применении твердотельных реле других изготовителей.**

## Введение

Говоря об истории выпуска твердотельных реле (ТТР) в России, необходимо отметить, что первые реле с применением ДМОП-транзисторов и твердотельной фотоприемной матрицы, созданной с использованием технологии изоляции пористым кремнием, были разработаны в 1980-х годах в объединении «Протон». Но впоследствии эта технология была утрачена, и матрицы стали изготавливаться с изоляцией фотодиодов по технологии КСДИ (кремний с диэлектрической изоляцией).

Несколько ранее твердотельные реле с оптоэлектронной развязкой были изготовлены на московском заводе «Старт» и в НИИ «Сапфир», а также на некоторых других российских предприятиях. Данные реле, однако, могли только коммутировать нагрузки в сетях переменного тока.

Новое дыхание реле переменного тока получили с разработкой высоковольтных симисторных драйверов, выполненных в DIP-корпусах и имеющих изоляцию до 4000 В и выше. Стало возможным выпускать дешевые реле переменного тока с высокими параметрами гальванической развязки.

Что же касается ТТР постоянного тока, то они, как уже было сказано выше, обязаны своим появлением высоковольтному МОП-транзистору и фотовольтаическому оптрону, выполненному с применением фотодиодной матрицы, сигнал которой можно использовать непосредственно для управления затворами МОП-транзисторов.

В настоящее время в России выпускают или осваивают выпуск ТТР несколько фирм, такие, как ЗАО «Протон» (г. Орел) — слаботочные и специализированные реле;

ОАО НПП «Старт» (г. Великий Новгород), ОАО НПК «Северная заря» (г. Санкт-Петербург) — реле времени и специализированные реле, а также ряд частных мелких фирм, например, «Акустика» (г. Екатеринбург), «Электрум АВ» (г. Орел) и др.

Рекомендации по применению ТТР могут использоваться и при эксплуатации силовых тиристорных модулей, работающих, например, в режиме переключателей переменного тока (Switch AC).

В настоящее время элементы силовой электроники, и, в частности, твердотельные реле занимают все новые и новые позиции в различных электротехнических устройствах, изделиях автоматики, других устройствах и системах. Все большее количество разработчиков применяет их в своих изделиях без цепей защиты. Многие по привычке применяют ТТР так же, как и электромагнитные реле (ЭМР). Здесь их могут ожидать разочарования, и разработчики вновь возвращаются к старым испытанным ЭМР (иногда не без оснований), но время берет свое, ведь в большинстве случаев применение ТТР является не данью моде, а необходимостью. Ситуация с применением ТТР напоминает семидесятые годы прошлого столетия, когда начали появляться первые интегральные микросхемы (ИС). Тогда скептики говорили, что ИС не смогут завоевать широкие позиции в радиоэлектронных устройствах из-за своей низкой помехоустойчивости по сравнению с электронными лампами. И действительно, электронные лампы управлялись напряжением в несколько десятков вольт, а анодное напряжение составляло сотни вольт. Микросхемы ДТЛ и ТТЛ, которые появились одними из первых, имели полезные сигналы величины в единицы вольт, что было сравнимо с по-

мехами в ламповых схемах. Но преимущества полупроводниковых интегральных микросхем (ИС) были настолько очевидны, что они стимулировали быструю разработку всей необходимой инфраструктуры для нормальной работы ИС. Со временем были разработаны низковольтные стабилизированные источники питания, специальная электронная база, да и сами интегральные микросхемы стали более помехоустойчивыми. Благодаря всему этому ИС получили практически повсеместное применение. Конечно, это не является откровением — так, например, изобретение автомобиля также не привело сначала к его широкому применению, сначала нужно было создать дороги, заправочные станции, станции технического обслуживания, испытательные полигоны и т. п., и только после этого наша жизнь стала немыслимой без автомобилей.

Методы защиты и повышения устойчивой работы ТТР, безусловно, могут быть заимствованы от старых наработок по защите полупроводниковых приборов от помех, но имеются и специфические вопросы применения. Как правило, работа ТТР происходит с выделением определенного количества тепла, поэтому для их применения необходимо знать, как выбирать охладитель. Работа выходных цепей ТТР происходит при непосредственном подключении к питающей сети, где помехи иногда могут носить непредсказуемый характер (например, удар молнии, коммутация близстоящих мощных нагрузок и т. п.) Данная статья не претендует на всеобъемлемость, может быть, где-то покажется спорной или не полной, но автор надеется, что приведенные рекомендации помогут разработчикам радиоэлектронной аппаратуры, облегчат выбор ТТР, их защитных цепей и рабочих режимов.

### 1. Классификация ТТР

В отечественных ГОСТах отсутствует классификация ТТР, будем проводить ее на примере изделий, выпускаемых ЗАО «Протон-Импульс».

ТТР можно разделять по типу коммутируемых сигналов, по способу управления, быстродействию, скорости срабатывания, по конструктивно-присоединительным размерам и т. д.

Существуют реле с токовым и потенциальным (уровнем напряжения) управлением.

Под токовым управлением подразумевается реле, которое имеет входную (управляющую) цепь, состоящую из одного светодиода без токоограничивающего (балластного) резистора. Такое исполнение входной цепи позволяет разработчикам РЭА применять ТТР с управляющими напряжениями различного уровня. Расчет балластного резистора в этом случае проводит разработчик РЭА.

Понятие «токовое управление» отсутствует для электромагнитных реле, для которых используется потенциальное управление. Для ЭМР на контакты управляющей цепи необходимо подать то или иное напряжение (потенциал), чтобы произошло его замыкание.

Важно также отметить, что защита выходных контактов от импульсов повышенного напряжения у ЭМР практически отсутствует. Для ТТР такой подход неприемлем, так как даже кратковременное превышение напряжения на входных контактах ТТР приведет к пробое выходных силовых элементов реле. Поэтому вопросы защиты ТТР от импульсов перенапряжения выходят на первый план.

В таблицах 1–3 приведены параметры ТТР переменного и постоянного тока, а также ТТР общего назначения. Реле общего назначения предназначены для коммутации нагрузок в цепях переменного и постоянного тока.

Параметры прибора отображают его внутренние свойства прибора, часто это точка на какой-либо зависимости (например, на входной вольт-амперной характеристике). Под термином «параметры режима» подразумеваются входные воздействия на прибор, т. е. это предельно-допустимые режимы эксплуатации.

Такая трактовка этих терминов применяется и в нормативно-технической документации, например: микросхемы интегральные, система параметров РД 110325-86 (правда, теперь все РД отменены, но система терминов уже сложилась).

ТТР переменного тока могут управляться сигналами как переменного, так и постоянного тока в соответствии с условным обозначением.

ТТР постоянного тока и ТТР общего назначения управляются сигналами постоянного тока в соответствии с условным обозначением. Входные ВАХ ТТР с токовым управлением представлены на рисунках 1а–1г.

Таблица 1. Реле переменного тока

| Серия     | Описание  | Выходной ключ      | I <sub>ком.г</sub> А     | I <sub>ком.им.г</sub> А    | U <sub>ос.г</sub> В | U <sub>лик.г</sub> В | Вход управления |           |               | Тип входной характеристики*   |
|-----------|---|--------------------|--------------------------|----------------------------|---------------------|----------------------|-----------------|-----------|---------------|-------------------------------|
|           |   |                    |                          |                            |                     |                      | mA (DC)         | В (DC)    | В (AC)        |                               |
| 5П19.01ТС | однофазные, без контроля «нуля» фазы, нормально замкнутые   | симистор, тиристор | 1, 3, 4, 10, 20, 60, 100 | 10, 30, 70, 160, 600, 1000 | 1,5                 | 600, 700             | 10–25           | 4–30      | 6–30, 110–280 | –                             |
| 5П19.10ТС | однофазные, без контроля «нуля» фазы, нормально разомкнутые | симистор, тиристор | 1, 3, 4, 10, 20, 60, 100 | 10, 30, 70, 160, 600, 1000 |                     | 600, 800, 1200       | 10–25           | 4–30      | 6–30, 110–280 | рис. 1а<br>рис. 1б<br>рис. 16 |
| 5П19.10ТМ | однофазные, с контролем «нуля» фазы, нормально разомкнутые  | симистор, тиристор | 1, 3, 4, 10, 20, 60, 100 | 10, 30, 70, 160, 600, 1000 |                     | 600, 800, 1200       | 10–25           | 3–30      | 6–30, 110–280 | рис. 1а<br>рис. 16            |
| 5П36.30ТС | трехфазные, без контроля «нуля» фазы, нормально разомкнутые | симистор, тиристор | 10, 20, 40, 100          | 70, 160, 400, 1000         |                     | 600, 800, 1200       | –               | 4–7, 3–30 | 6–30, 110–280 | –                             |
| 5П36.30ТМ | трехфазные, с контролем «нуля» фазы, нормально разомкнутые  | симистор, тиристор | 10, 20, 40, 100          | 70, 160, 600, 1000         |                     | 600, 800, 1200       | –               | 4–7, 3–30 | 6–30, 110–280 | –                             |
| 5П19.20ТМ | двухканальные, нормально разомкнутые                        | симистор           | 1                        | 10                         |                     | 600, 800             | 10–25           | –         | –             | рис. 16                       |
| 5П55.10ТМ | однофазные, реверсивные нормально разомкнутые               | симистор           | 10, 15, 25               | 70, 150, 350               |                     | 800                  | –               | 4–7       | –             | –                             |
| 5П55.20ТМ | двухфазные, реверсивные нормально разомкнутые               | тиристор           | 20, 30, 40, 50           | 160, 200, 300, 400, 550    |                     | 800, 1200            | –               | 4–6       | –             | –                             |
| 5П55.30ТМ | трехфазные, реверсивные нормально разомкнутые               | симистор, тиристор | 10, 15, 20, 40           | 70, 150, 350, 400          |                     | 800, 1200            | –               | 4–6       | –             | –                             |

Примечания:

\* — только для реле с токовым управлением;

I<sub>ком.</sub> — максимальный коммутируемый ток (среднеквадратическое значение);

I<sub>ком.им.</sub> — коммутируемый импульсный ток;

U<sub>лик.</sub> — максимальное пиковое коммутируемое напряжение;

U<sub>ос.</sub> — выходное остаточное напряжение (не более).

Таблица 2. Реле постоянного тока

| Серия       | Описание                                | Выходной ключ  | I <sub>ком.г</sub> А   | U <sub>ком.г</sub> В    | Вход управления |        | Тип выходной характеристики* |
|-------------|---|----------------|--|-------------------------|-----------------|--------|------------------------------|
|             |   |                |  |                         | mA (DC)         | В (DC) |                              |
| 5П20.01П    | нормально замкнутые                     | МОП-транзистор | 5;10;25;30;50;65;130;190<br>2;5;10;20;30;40;85;125<br>2;5;5;8;10;15;20;35;45;90;135<br>1;2;5;5;10;18;25;50;75    | 60<br>100<br>200<br>400 | –               | 4–6    | –                            |
| 5П20.10П    | нормально разомкнутые                   | МОП-транзистор | 5;10;25;30;50;65;130;190<br>2;5;10;15;20;30;40;85;125<br>2;5;5;8;10;15;20;35;45;90;135<br>1;2;5;5;10;18;25;50;75 | 60<br>100<br>200<br>400 | 10–25           | 4–10   | рис. 1в                      |
| 5П40.10П    | быстродействующие, с питанием по выходу | МОП-транзистор | 5;10;25;30;50;65;130;190<br>2;5;10;20;30;40;85;125<br>2;5;5;10;15;20;35;45;90;135<br>1;2;5;5;10;18;25;50;75      | 60<br>100<br>200<br>400 | 10–25           | 4–10   | рис. 1г                      |
| 5П59.10П    | реле с малым временем срабатывания      | МОП-транзистор | 25;30;50;65;130;190<br>5;10;20;30;40;85;125  | 60<br>100<br>200<br>400 | –               | 4–5,5  | –                            |
| 5П62.10П    | быстродействующие, с питанием по входу  |                | 5;10;18;25;50;75   | 60<br>100<br>200<br>400 | –               | 4–5,5  | –                            |
| 5П20.10G(D) | нормально разомкнутые                   | IGBT           | 10;20;40;60;80;120;160   | 600, 1200               | 10–25           | 4–10   | рис. 1в                      |
| 5П59.10G(D) | реле с малым временем срабатывания      | IGBT           | 10;20;40;60;80;120;160   | 600, 1200               | –               | 4–5,5  | –                            |
| 5Д62.10G(D) | быстродействующие, с питанием по входу  |                | 10;20;40;60;80;120;160   | 600, 1200               | –               | 4–5,5  | –                            |
| 5П40.10G(D) | быстродействующие, с питанием по выходу | IGBT           | 10;20;40;60;80;120;160   | 600, 1200               | 10–25           | 4–10   | рис. 1г                      |

Примечания:

\* — только для реле с токовым управлением;

I<sub>ком.</sub> — максимальный коммутируемый ток;

U<sub>ком.</sub> — максимальное коммутируемое напряжение.

Таблица 3. Реле общего назначения

| Серия    | Описание                           | Выходной ключ  | I <sub>ком.г</sub> А                              | U <sub>ком.г</sub> В    | Вход управления |        | Тип драйвера* |
|----------|------------------------------------|----------------|---|-------------------------|-----------------|--------|---------------|
|          |                                    |                |   |                         | mA (DC)         | В (DC) |               |
| 5П19.10П | нормально разомкнутые              | МОП-транзистор | 5;10;25;30<br>2;5;5;15;20<br>10;15;20<br>1;3;5;12 | 60<br>100<br>200<br>400 | 10–25           | 4–10   | рис. 1в       |
| 5П57.10П | реле с малым временем срабатывания | МОП-транзистор | 25;30<br>5;8;15;20<br>10;15;20<br>1;3;5;12        | 60<br>100<br>200<br>400 | –               | 4–6    | –             |

Примечания:

\* — только для реле с токовым управлением;

I<sub>ком.</sub> — максимальный коммутируемый ток;

U<sub>ком.</sub> — максимальное коммутируемое напряжение.

$$\frac{5\Pi}{0} \frac{20}{1} \cdot \frac{22}{2} \frac{GD}{3} \frac{T}{4} \frac{A}{5} \frac{1}{6} - \frac{5}{7} - \frac{4}{8} - \frac{D3}{9}$$

Ниже приведено условное обозначение ТТР:  
**0** — указывает, что напряжение изоляции между управляющими и силовыми цепями выполнено с помощью оптоэлектронной развязки.

- 1** — 19 (19...ТС и 19...ТМ) — реле переменного тока;  
 19 (19...П) — реле общего назначения для коммутации переменного и постоянного тока;  
 20 — реле постоянного тока;  
 36 — трехфазные реле переменного тока;  
 40 — быстродействующие реле постоянного тока с питанием по выходу ( $f \leq 100$  кГц);  
 55 — реверсивные реле;  
 57 — реле общего назначения с малым временем срабатывания ( $f \leq 10$  Гц);  
 59 — реле постоянного тока с малым временем срабатывания ( $f \leq 10$  Гц);  
 62 — быстродействующие реле постоянного тока с питанием по входу ( $f \leq 100$  кГц).
- 2** — **1-я цифра** — количество нормально разомкнутых контактов;  
**2-я цифра** — количество нормально замкнутых контактов.
- 3** — **реле переменного тока:**  
 ТМ — с контролем перехода фазы коммутируемого напряжения через «0»;

ТС — без контроля перехода фазы коммутируемого напряжения через «0».

**реле постоянного тока:**

П — выход на полевых транзисторах (в транзисторе имеется обратно включенный диод между стоком и истоком);  
 G — выход на IGBT;  
 GD — выход на IGBT + диод.

- 4** — без индекса — отсутствие дополнительных функций;  
 Т — токовая защита;  
 С — статусный сигнал;  
 ТС — токовая защита и статусный сигнал;  
 К — контроль температуры.

**5** — **реле переменного тока:**

без индекса — управление 10...25 мА (DC) для 5П19.01, 5П19.10;  
 4,5...7,5 В (DC)

для 5П36.30, 5П55.10ТМ, 5П55.20ТМ;

A — управление 3...30 В (DC) для 5П19.01, 5П19.10, 5П36.30;  
 4...5,5 В (DC) для 5П55.30;

B — управление 6...30 В (AC);  
 7 В (DC) для 5П55.30;

V — управление 1 1 0 ... 2 8 0 В (AC).

**реле постоянного тока:**

без индекса — управление 10...25 мА (DC);  
 4,5...5,5 В (DC) для 5П59, 5П62;

A — управление 4...10 В (DC);

B — управление 12...30 В (DC);

V — управление 30...70 В (DC);

Г — управление 70...120 В (DC);

Д — управление 120...200 В (DC).

**реле общего назначения:**

без индекса — управление 10...25 мА (DC)

для 5П19.10;

4...6 В (DC) для 5П57;

A — управление 4...10 В (DC).

**6** — напряжение изоляции постоянного тока (вход-выход, вход-радиатор, выход-радиатор):

без индекса — 1500 В;

1 — 4000 В.

**7** — предельно-допустимый коммутируемый ток, А.

**8** — предельно-допустимое коммутируемое напряжение ( $\times 100$ ), В.

**9** — тип корпуса.

## 2. Формирование управляющих сигналов ТТР

### 2.1. Режимы работы входных цепей

Режимы работы входных цепей твердотельных реле определяют надежную работу реле во всем диапазоне внешних воздействий, поэтому расчет этих режимов имеет важнейшее значение при применении ТТР.

Схемотехнически входные цепи ТТР выполнены токовыми или потенциальными (рис. 2а и 2б).

Такое разделение названия входных цепей имеет существенное различие, так как в первом случае параметром входной цепи реле является входное напряжение, а параметром режима, подаваемого на вход реле, является ток (токовое управление). Во втором случае входным параметром реле является ток, а параметром режима — напряжение (потенциальное управление).

Расчет входных цепей ТТР сводится к вызыванию электрических воздействий, подаваемых на вход реле, и параметров входных цепей реле с помощью различных схем включения. Иными словами, необходимо так рассчитать входную цепь питания реле, чтобы ток или напряжение управления оставались в границах предельно-допустимых значений во всем диапазоне климатических воздействий.

Следует отметить, некоторые типы ТТР имеют транзисторные цепи на входе и относятся также к реле с потенциальным управлением.

Коммутация входных цепей может быть осуществлена как параллельным, так и последовательным ключом.



**Рис. 1а.** Входная ВАХ реле переменного тока 6-го и 8-го классов для реле с коммутацией при переходе через «0» и 6-го класса для реле с коммутацией в произвольной фазе коммутируемого напряжения



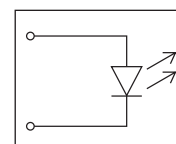
**Рис. 1б.** Входная ВАХ реле переменного тока 12-го класса для реле с коммутацией при переходе фазы через «0», а также для 8-го и 12-го классов для реле с коммутацией в произвольной фазе коммутируемого напряжения



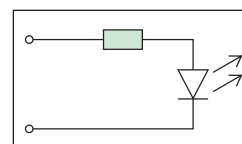
**Рис. 1в.** Входная ВАХ реле постоянного тока типа 5П20



**Рис. 1г.** Входная характеристика реле постоянного тока типа 5П40



**Рис. 2а.** Токовая входная цепь ТТР



**Рис. 2б.** Потенциальная входная цепь ТТР

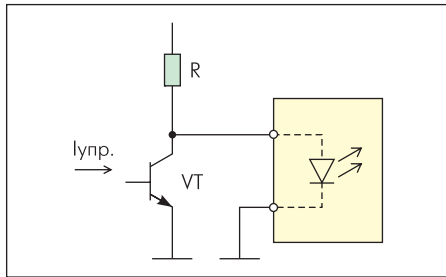


Рис. 3а. Параллельная коммутация входной цепи ТТР

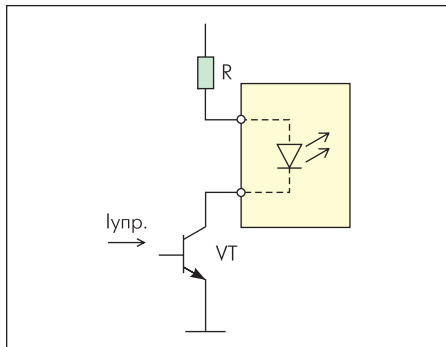


Рис. 3б. Последовательная коммутация входной цепи ТТР

На рис. 3а и 3б показаны схемы параллельной и последовательной коммутации входной цепи ТТР.

Как видно из схемы на рис. 3а, ток управления ТТР протекает через входную цепь реле в том случае, когда транзистор закрыт. При последовательном включении ток протекает при открытом транзисторе.

Строгий расчет необходимых номиналов входных резисторов для ТТР с токовым входом может быть проведен с помощью выражения для вольт-амперной характеристики (ВАХ) входного светодиода ТТР, которая описывается формулой:

$$I = I_0 \times (e^{\frac{U}{\phi T}} - 1), \quad (1)$$

где  $U$  — напряжение на р-п переходе диода;  $I$  — ток на р-п переходе диода;  $\phi T$  — температурный потенциал  $\approx T/11600$ ;  $I_0$  — тепловой ток.

Формула (1) описывает ВАХ идеального перехода; для реального перехода ВАХ описывается формулой:

$$I = 2 \times h \times I_0 \times e^{\frac{U}{m \times \phi T}}, \quad (2)$$

где  $h$  и  $m$  — технологические параметры, определяющие отклонение реальной ВАХ от идеальной.

Нахождение зависимости по формуле (2) для расчета входных режимов связано с определенными трудностями, так как необходимо предварительно определить параметры  $h$  и  $m$ . Определение этих параметров особенно полезно, когда расчет электрических режимов

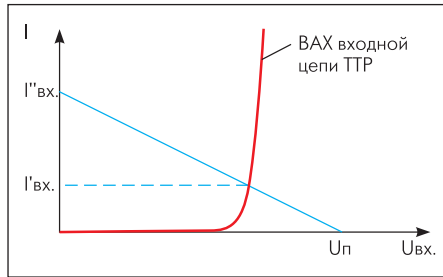


Рис. 4. Графический расчет входной цепи ТТР с токовым входом

проводят с помощью программ схемотехнических расчетов. Когда проводится примерный инженерный расчет, этого делать не нужно, так как расчет режимов входных цепей проводят с погрешностью 20–30%.

Поэтому для расчета (рис. 4) входных цепей могут быть использованы ВАХ входных цепей ТТР, которые в общем случае представляют собой усредненные характеристики для данного типа приборов.

Расчет проводится следующим образом:

1. На оси напряжения входной вольт-амперной характеристики откладывается величина питания входной цепи  $U_n$ .
2. На оси токов откладывается величина задаваемого входного тока  $I'_{вх}$ . Обычно эта величина может быть рассчитана по формуле  $I'_{вх} = (I_{вх.min} + I_{вх.max})/2$ , где  $I_{вх.min}$  и  $I_{вх.max}$  — минимальное и максимальное значения входного тока (берется из таблицы предельно-допустимых значений).
3. Из точки  $I'_{вх}$  проводим прямую, параллельную оси напряжения, до пересечения с ВАХ входной цепи.
4. Соединяем точку, полученную на ВАХ, с точкой  $U_n$  и получаем прямую линию, пересечение которой с осью тока образует точку  $I''_{вх}$ .
5. Определяем сопротивления резистора  $R_{вх}$  по формуле:

$$R_{вх} = U_n / I''_{вх}. \quad (3)$$

## 2.2. Защита входных цепей ТТР

Входные цепи ТТР могут подвергаться воздействию различных помех, так как реле работают в силовых цепях, где коммутируются большие токи и могут возникать шумы.

Для компенсации помех могут применяться стабилитроны, последовательно включенные с входной цепью ТТР (рис. 5).

Действие стабилитрона при подавлении помехи показано на рис. 6.

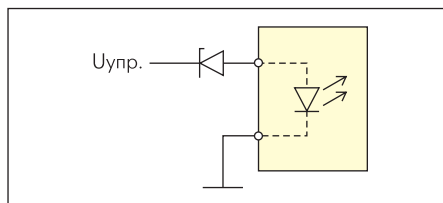


Рис. 5. Включение стабилитрона для защиты от помех

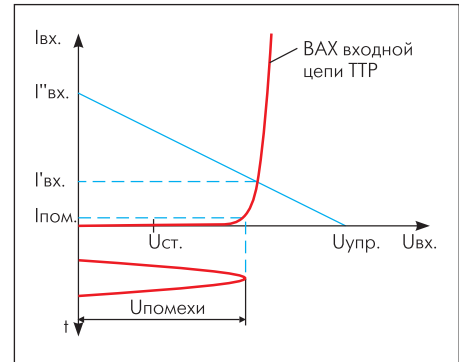


Рис. 6. Подавление входной помехи стабилитроном

В этом случае расчет тока входного резистора должен быть проведен с учетом падения напряжения на стабилитроне:

$$I_{вх} = (U_{упр} - U_{ст} - U_{сд}) / R_{вх}, \quad (4)$$

где  $U_{упр}$  — напряжение управления;  $U_{ст}$  — падение напряжения на стабилитроне;  $U_{сд}$  — прямое падение напряжения на светодиоде входной цепи ТТР;  $R_{вх}$  — сопротивление входного резистора.

Подавление входных помех можно обеспечить и путем включения параллельного резистора (рис. 7).

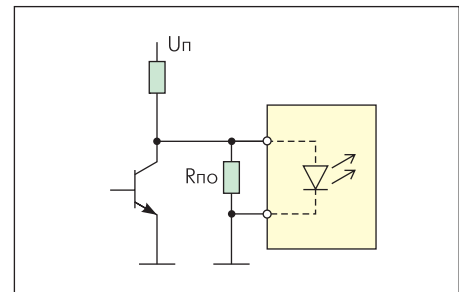


Рис. 7. Включение параллельного резистора для подавления входных помех

В этом случае подавление помехи осуществляется «ответвлением» тока помехи через резистор  $R_{по}$ .

Действие такой схемы включения показано на рис. 8. Суть работы схемы заключается в том, что до определенного момента, когда входное напряжение меньше  $U_1$ , почти весь входной ток протекает через параллельно включенный резистор.

Ограничение помехи может быть осуществлено с применением как стабилитрона, так и параллельного резистора.

С помощью стабилитрона можно защититься от выбросов, которые по амплитуде меньше управляющего напряжения входной цепи. Способ ограничения помех резистором может применяться и для случая, когда амплитудное напряжение помехи превышает напряжение питания, но мощность помехи должна быть меньше мощности сигнала. В этом случае резистор исполняет роль шунта помехи.

Иногда во входной цепи могут присутствовать высокочастотные составляющие тока,

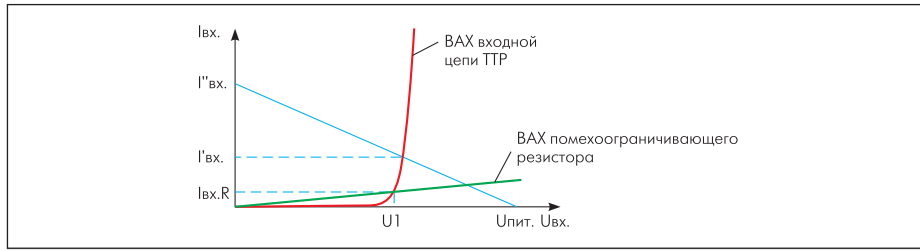


Рис. 8. Ограничение тока помехи параллельным резистором

Таблица 4. Методы удержания входных сигналов

| Результаты, причина, защита            | Состояние входных сигналов   |   |  |   |   |
|--|--|---|--|---|---|
|  | Входной сигнал в выключенном состоянии ниже предельно допустимого    | Входной сигнал в выключенном состоянии соответствует ТУ | Входной сигнал выше предельно допустимого в выключенном состоянии (или ниже предельно допустимого во включенном состоянии) | Входной сигнал во включенном состоянии соответствует ТУ | Входной сигнал выше предельно допустимого во включенном состоянии   |
| Причины возникновения                  | Импульсные выбросы входного обратного напряжения                     | Обеспечивается правильным расчетом входных цепей        | 1. Импульсные помехи.<br>2. Колебания входного питающего напряжения.<br>3. Большая длительность фронта входного сигнала    | Обеспечивается правильным расчетом входных цепей        | 1. Импульсные помехи.<br>2. Колебания входного питающего напряжения.<br>3. Изменение входной вольт-амперной характеристики вследствие теплового воздействия |
| Результат воздействия входных сигналов | Пробой входных светодиодов большим обратным напряжением              | Нормальная работа ТТР                                   | Активное состояние силовых элементов, перегрев ТТР. Эффект локального перегрева тиристоров, снижение срока службы ТТР      | Нормальная работа ТТР                                   | Перегорание входных светодиодов   |
| Методы защиты                          | Установка обратно включенного защитного диода параллельно входу реле | —   | Правильный расчет схемы входной цепи. Длительность фронта входных импульсов не должна превышать 0,1 мкс ТТР                | —   | Установка защитных стабилитронов параллельно входным контактам ТТР  |

тогда вместо резистора необходимо включить емкость величиной 0,01–0,1 мкФ.

Следует указать, что очень чувствительными к воздействию входных помех являются ТТР типа 5П157, 5П62, 5П69, у которых в процессе «накачки» входной емкости, встроенной в ТТР, недопустима подача открывающего сигнала, так как в этот момент включение ТТР приведет к выделению большей мощности на выходном силовом элементе реле с возможным тепловым повреждением выходной цепи реле. Поэтому управление такими реле рекомендуется выполнять с применением стробирующих цепей.

**2.3. Форсирование времени включения ТТР**

Переключение ТТР должно быть проведено за возможно более короткое время, чтобы сократить тепловые потери, которые в конеч-

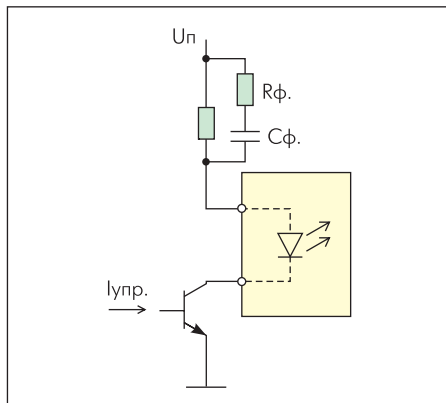


Рис. 9. Схема форсирования входных цепей ТТР

ном счете могут снизить нагрузочные возможности реле. Для увеличения скорости переключения ТТР и повышения его нагрузочных и частотных свойств можно применить цепи форсажа (рис. 9).

Под словом «форсаж» подразумевается ускорение переходных процессов реле за счет увеличения входного тока (тока управляющей цепи). Форсаж применяется с целью снижения динамических тепловых потерь при переключении твердотельных реле.

Расчет токоограничивающего резистора проводится обычным методом. Расчет резистора Rф и емкости Cф проводят исходя из условий, что импульс тока не должен превышать 0,8–1 А, а его длительность — 100 мкс, причем действующее значение входного тока Iвх.д должно быть ограничено значением предельно допустимого входного тока для данного типа ТТР.

Действующее значение входного тока реле для прямоугольных импульсов определяется по формуле:

$$I_{вх.д} = \frac{I_a}{\sqrt{\theta}}, \quad (5)$$

где  $I_a$  — амплитудное значение импульса;  $\theta = T/t$  — скважность следования импульсов ( $T$  — период следования импульсов;  $t$  — длительность импульса).

Таким образом, расчет сводится к определению минимально допустимой скважности и минимально допустимого периода частоты следования импульсов:

$$\theta \geq (I_a / I_{вх.д})^2. \quad (6)$$

Форсаж может быть применен к ТТР постоянного тока типа 5П20 с целью повышения их частотных свойств.

Для ТТР типа 5П157, 5П62, 5П69 он не применим, так как скорость их переключения определяется внутренними емкостями, и внешним воздействием ее изменить нельзя.

Возможные различные варианты состояния ТТР в зависимости от входных сигналов и методы удержания входных сигналов в заданных пределах приведены в таблице 4.

Расчет входного резистора  $R_{вх}$  для реле с токовым управлением можно проводить по формуле:

$$R_{вх} = 2 \times U_{вх.с} / (I_{вх.мин} + I_{вх.мах}), \quad (7)$$

где  $U_{вх.с}$  — входное напряжение реле при среднем значении рабочего диапазона температур  $T_{ср}$ . (этот параметр реле определяется по входной ВАХ реле);  $I_{вх.мин}$ ,  $I_{вх.мах}$  — соответственно входной минимально допустимый и входной максимально допустимый ток во включенном состоянии. Эти параметры режима реле берут из таблицы предельно допустимых значений для данного типа реле.

Затем рассчитываются минимальный рабочий входной ток  $I_{мин}$  и максимальный рабочий входной ток  $I_{мах}$ .

Расчет минимального рабочего входного тока  $I_{мин}$  проводится по формуле:

$$I_{мин} = (U_{вх.мин} - U_{вх.рмах}) / (1 + k) \times R_{вх.}, \quad (8)$$

где  $U_{вх.мин}$  — минимальное значение входного напряжения, задаваемое потребителем;  $U_{вх.рмах}$  — максимальное значение входного напряжения реле при минимальной отрицательной рабочей температуре (определяется по входной ВАХ);  $R_{вх.}$  — сопротивление внешнего входного токоограничивающего резистора;  $k$  — относительный процентный разброс номинала резисторов.

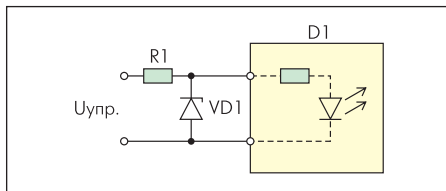
Расчет максимального рабочего входного тока  $I_{мах}$  проводится по формуле:

$$I_{мах} = (U_{вх.мах} - U_{вх.рмин}) / (1 - k) \times R_{вх.}, \quad (9)$$

где  $U_{вх.мах}$  — максимальное значение входного напряжения, задаваемое потребителем;  $U_{вх.рмин}$  — максимальное значение входного напряжения реле при максимальной положительной рабочей температуре.

После расчета  $I_{мин}$  и  $I_{мах}$  необходимо проверить, что их значения не выходят за пределы, задаваемые параметрами режима, в противном случае необходимо применить специальные меры по стабилизации входного тока или ограничить диапазон рабочих температур.

Рассмотренные выше случаи расчета режимов работы входных цепей относятся к реле с токовым управлением. Соблюдение вход-



**Рис. 10.** Схема управления при управляющем напряжении выше предельно допустимого управляющего напряжения ТТР

ных режимов реле с потенциальным управлением сводится к тому, чтобы входное напряжение управления не выходило за пределы паспортных значений для данного типа реле. При этом необходимо обеспечивать втекающий ток во входную часть реле в соответствии с паспортными значениями. Иногда в распоряжении разработчика, применяющего реле D1 с потенциальным входом, имеется входное управляющее напряжение выше требуемого — в этом случае можно установить добавочный гасящий резистор R1 и стабилитрон VD1 (рис. 10).

Примерный расчет R1 проводится по формуле:

$$R1 = (U_{упр.} - U_{вх.вкл.})/I_{вх.}, \quad (10)$$

где  $U_{упр.}$  — напряжение питания управляющей цепи;  $U_{вх.вкл.}$  — входное напряжение ТТР во включенном состоянии (в середине диапазона входного напряжения во включенном состоянии);  $I_{вх.}$  — входной ток ТТР во включенном состоянии, соответствующий  $U_{вх.вкл.}$  (определяется по входной вольт-амперной характеристике реле).

Напряжение стабилизации  $U_{ст.}$  стабилитрона VD1 выбирается из условия:

$$U_{вх.вкл.макс.} > U_{ст.} > U_{вх.вкл.мин.}, \quad (11)$$

где  $U_{вх.вкл.макс.}$  — максимально-допустимое напряжение реле во включенном состоянии;  $U_{вх.вкл.мин.}$  — минимально допустимое напряжение реле во включенном состоянии.

#### 2.4. Выводы и рекомендации

- Подавайте на вход реле токи и напряжения, не выходящие за пределы минимальных и максимальных входных токов и напряжений, определенных в ТУ, как во включенном, так и в выключенном состоянии реле.
- Следите за длительностью фронтов входных сигналов, они не должны превышать десяти процентов времени срабатывания реле.
- Убедитесь в отсутствии высокочастотных помех или других помех по входной цепи, в противном случае применяйте цепи подавления помех.
- Перед включением реле с токовым входом необходимо установить токоограничивающий резистор во входную цепь реле. В противном случае реле моментально выйдет из строя.

- Применяя форсажные входные цепи, проведите испытания на надежность перед введением схемы в эксплуатацию.
- Правильность расчета входных цепей ТТР подтверждает непосредственным измерением входного тока по падению напряжения на входном резисторе и напряжения на входе реле.

### 3. Выбор электрических режимов и защита выходных цепей ТТР

Выбор ТТР по электрическим режимам заключается в выборе класса реле по напряжению и по току, соответствующим данному типу нагрузки, коммутируемой ТТР, состоянию электромагнитной обстановки в сети и предельным отклонениям питающих напряжений. В составе условного обозначения ТТР указываются предельно-допустимые режимы по коммутируемому току и по напряжению. Фирмы-изготовители рекомендуют различные значения коэффициентов запаса — обычно коэффициент нагрузки по току не должен превышать  $0,7 I_{мах}$ , где  $I_{мах}$  — предельно допустимое значение по коммутируемому току. Определение класса реле по напряжению желательно проводить после выбора защитных элементов. Выбор защитных элементов определяется исходя из коммутируемого тока, характера нагрузки, напряжения питающей сети и возможных импульсных помех в питающей сети. В качестве защитных элементов для ТТР переменного тока обычно применяют варисторы, а для ТТР постоянного тока — стабилитроны и диоды.

#### 3.1. Защита выходных каскадов ТТР

##### 3.1.1. Защита ТТР переменного тока от импульсных помех RC-цепями

Необходимость защиты ТТР переменного тока вызвана двумя основными причинами. Во-первых, их ключевые каскады, как правило, выполнены на тиристорах или симисторах, которые могут самостоятельно открываться под действием импульсных помех. Во-вторых, напряжение, прикладываемое к полупроводниковым ключам ТТР, не должно превышать предельно допустимых значений, в противном случае произойдет электрический пробой и ключ выйдет из строя.

Способность тиристоров и симисторов оставаться в закрытом состоянии при воздействии импульсных помех характеризуется параметром «критическая скорость нарастания напряжения»  $(dU/dt)_{крит.}$ . Защита ТТР RC-цепями предназначена для изоляции ТТР от высокочастотных составляющих напряжения по цепи питания. Вместе с индуктивностью питающих проводов RC-цепь образует LRC-фильтр, который защищает выходные контакты ТТР от импульсных помех. LC-фильтр обеспечивает наилучшую фильтрацию, но он имеет резонансную частоту, на которой сигнал на выходе фильтра может иметь большую величину, чем при его отсутствии, поэтому последовательно с емкостью

фильтра включают резистор, чтобы ограничить сигнал вблизи резонансной частоты. Коэффициент передачи LC-фильтра на резонансной частоте обратно пропорционален декременту затухания фильтра:

$$\zeta = \frac{R\phi}{2} \times \sqrt{\frac{C}{L}}, \quad (12)$$

где  $R$  — активное сопротивление фильтра;  $L$  и  $C$  — индуктивность и емкость фильтра.

Частота  $f$ , связанная со скоростью нарастания напряжения  $dV/dt$ , определяется по формуле:

$$f = (dV/dt)/2\pi Va, \quad (13)$$

где  $Va$  — амплитуда помехи.

Учитывая, что резонансная частота LC-фильтра рассчитывается по формуле:

$$f = 1/(2\pi\sqrt{LC}), \quad (14)$$

получаем формулу для расчета емкости:

$$C = 1/(2\pi f)^2 L, \quad (15)$$

Сопротивление  $R$  рассчитывается по формуле (принимая  $\xi = 0,5$ ):

$$R = \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (16)$$

Обычно индуктивность линии составляет несколько десятков микрогенри.

Иногда специально вводят дополнительную индуктивность, как, например, при защите реверсивных реле (см. ниже). Емкость RC-цепи лежит в диапазоне  $0,01-0,6$  мкФ, а сопротивление RC-цепи составляет, как правило, единицы или десятки ом.

##### Пример

Рассчитать элементы защитной RC-цепи твердотельного реле с параметром  $(dU/dt)_{крит.} = 500$  В/мкс, коммутирующего нагрузку в цепи переменного тока с частотой 50 Гц. Индуктивность линии принять равной 50 мкГн. Амплитуда помехи = 400 В.

1. Определяем резонансную частоту по формуле (13):

$$f = 500 \times 10^6 / 2\pi \times 400 \approx 200 \text{ кГц}. \quad (17)$$

2. По формуле (15) определяем емкость RC-цепи:

$$C = 1/(2\pi \times 200 \times 10^3)^2 \times 50 \times 10^{-6} = 0,012 \text{ мкФ}. \quad (18)$$

3. Определим сопротивление RC-фильтра по формуле (16):

$$R\phi = \sqrt{\frac{50 \times 10^{-6}}{0,012 \times 10^{-6}}} = 64,5 \text{ Ом}. \quad (19)$$

### 3.1.2. Методика выбора варисторов для защиты однофазных и трехфазных твердотельных реле переменного тока от перенапряжений

Необходимость применения защитных элементов для ТТР обусловлена тем, что полупроводниковые ключи ТТР имеют предельно допустимые нагрузки по напряжению в закрытом состоянии. Даже кратковременное превышение этих напряжений приводит к пробоем р-п-перехода, то есть к выходу ключей из строя. Часто причиной выхода ключей из строя является наличие в сети импульсов перенапряжения, которые могут быть вызваны коммутацией индуктивных или емкостных нагрузок, но могут быть и случайные импульсы перенапряжения, например, удар молнии и т. д.

Наибольшее применение в качестве защитных элементов получили варисторы, так как они являются дешевыми и компактными приборами. Варисторы — это полупроводниковые элементы, которые имеют нелинейную симметричную ВАХ. Благодаря большой площади р-п-перехода они выдерживают импульсы тока в несколько сотен и тысяч ампер.

Отечественные варисторы выпускаются ухтинским заводом «Прогресс». Варисторы типов СН2-1 и ВР-1 имеют проволочные выводы, варисторы типа СН2-2 имеют массивные выводы, благодаря чему могут рассеивать более высокую энергию. Классификационный ток (ток, при котором нормируется классификационное напряжение варисторов), составляет 1 мА. Коэффициент напряжения отрицательный, не более 0,05% на 1 °С.

Варисторы включаются параллельно защищаемым полупроводниковым ключам. В случае трехфазной нагрузки они включаются параллельно защищаемому ключу в каждой фазе. Предпочтительно устанавливать их непосредственно на контактах ТТР. Введение в электрическую схему защитного варистора — не тривиальная задача, этот выбор зависит от многих факторов: напряжения сети, мощности нагрузки, характера нагрузки и др. Учитывая тот факт, что один и тот же тип ТТР может использоваться в различных режимах, а при выходе из строя варисторы могут быть заменены, они не устанавливаются в составе ТТР и должны рассчитываться разработчиком РЭА.

Выбор типа используемого варистора и определение его классификационного напряжения осуществляется на основе анализа работы варистора в рабочем и импульсном режиме.

Анализ работы варистора в рабочем режиме состоит в определении классификационного напряжения  $U_{кл.}$ , которое при длительной работе на предельном напряжении не приводит к перегреву варистора. Выбор проводится по таблице 5, исходя из максимального напряжения сети, которое рассчитывается в соответствии с формулой:

$$U_{max} \geq 1,15 \times U_{ном.}^{скв.}, \quad (20)$$

Таблица 5. Соответствие классификационного напряжения варистора и максимально допустимого напряжения, приложенного к варистору

| Классификационное напряжение варистора $U_{кл.}$ , В | Максимально-допустимое длительно действующее переменное напряжение $U_{rms}$ , В | Максимально-допустимое длительно действующее постоянное напряжение $U_{dc}$ , В | Классификационное напряжение варистора $U_{кл.}$ , В | Максимально-допустимое длительно действующее переменное напряжение $U_{rms}$ , В | Максимально-допустимое длительно действующее постоянное напряжение $U_{dc}$ , В |
|--|--|---|--|--|---|
| 10   | 6  | 8   | 270  | 175  | 225   |
| 15   | 9  | 12  | 300  | 190  | 245   |
| 22   | 14   | 18  | 330  | 210  | 270   |
| 27   | 17   | 22  | 360  | 230  | 300   |
| 33   | 20   | 26  | 390  | 250  | 320   |
| 39   | 25   | 31  | 430  | 275  | 350   |
| 47   | 30   | 38  | 470  | 300  | 385   |
| 56   | 35   | 45  | 510  | 320  | 400   |
| 68   | 40   | 56  | 560  | 350  | 450   |
| 82   | 50   | 65  | 620  | 385  | 505   |
| 100  | 60   | 85  | 680  | 420  | 560   |
| 120  | 75   | 100   | 750  | 460  | 615   |
| 150  | 95   | 125   | 820  | 510  | 670   |
| 180  | 115  | 150   | 910  | 550  | 745   |
| 200  | 130  | 170   | 1000   | 625  | 825   |
| 220  | 140  | 180   | 1100   | 680  | 895   |
| 240  | 150  | 200   | 1200   | 750  | 1060  |

Таблица 6. Энергия рассеивания варисторов

| Классификационное напряжение $U_{кл.}$ , В | Максимальная энергия рассеивания варисторов $W_{рас}$ , Дж |        |        |        |        |        |
|--|--|--------|--------|--------|--------|--------|
|  | СН2-2А   | СН2-1а | СН2-1б | СН2-1в | ВР-1-1 | ВР-1-2 |
| 56   | —  | —      | —      | —      | 1,9    | 0,30   |
| 68   | —  | —      | —      | —      | 2,3    | 0,76   |
| 82   | —  | —      | —      | —      | —      | —      |
| 100  | —  | 17,0   | 10     | 2,7    | —      | —      |
| 120  | —  | 25,2   | 12     | 3,0    | —      | —      |
| 150  | —  | 31,5   | 15     | 3,8    | —      | —      |
| 180  | —  | 37,8   | 18     | 4,5    | —      | —      |
| 200  | —  | 42,0   | 20     | 5,0    | —      | —      |
| 220  | —  | 46,2   | 22     | 5,5    | —      | —      |
| 240  | —  | 50,4   | 25     | 6,0    | —      | —      |
| 270  | —  | 56,7   | 28     | —      | —      | —      |
| 300  | —  | 63,0   | 31     | —      | —      | —      |
| 330  | 104  | 69,3   | 34     | —      | —      | —      |
| 360  | 115  | 75,6   | 37     | —      | —      | —      |
| 390  | 125  | 81,9   | 40     | —      | —      | —      |
| 430  | 138  | 90,3   | 43     | —      | —      | —      |
| 470  | 152  | 98,7   | 47     | —      | —      | —      |
| 510  | 168  | 107    | —      | —      | —      | —      |
| 560  | 187  | 118    | —      | —      | —      | —      |
| 620  | 207  | 130    | —      | —      | —      | —      |
| 680  | 227  | 143    | —      | —      | —      | —      |
| 750  | 248  | 158    | —      | —      | —      | —      |
| 820  | 280  | 172    | —      | —      | —      | —      |
| 910  | 312  | 312    | —      | —      | —      | —      |
| 1000                                       | 347  | 210    | —      | —      | —      | —      |
| 1100                                       | 385  | 233    | —      | —      | —      | —      |
| 1200                                       | 424  | 252    | —      | —      | —      | —      |
| 1300                                       | 463  | —      | —      | —      | —      | —      |
| 1500                                       | 508  | —      | —      | —      | —      | —      |

где  $U_{ном.}^{скв.}$  — номинальное значение действующего напряжения сети.

Анализ работы варистора в импульсном режиме состоит в расчете максимальной мгновенной энергии и расчете по максимальному напряжению.

Расчет максимальной мгновенной энергии проводят по формуле:

$$E = \frac{P \times tg(\varphi)}{2\pi f \eta}, \quad (21)$$

где  $E$  — мгновенная энергия;  $P$  — номинальная мощность нагрузки, приходящаяся на одну фазу;  $f$  — частота переменного на-

пряжения;  $\eta$  — КПД нагрузки;  $\varphi$  — угол сдвига фазы между током и напряжением.

Расчет варистора по максимальному напряжению проводится по формуле:

$$U_{max.вар.} = K \times U_{кл.}, \quad (22)$$

где  $U_{max.вар.}$  — максимальное напряжение, которое может быть на варисторе во время действия импульсной помехи;  $K$  — коэффициент защиты варистора (для варисторов на основе оксида цинка находится в пределах 1,4–1,6 и характеризует отношение напряжений на варисторе при токах 1 мА и 100 А);  $U_{кл.}$  — классификационное напряжение.

Для импортных варисторов, например, фирмы EPCOS, параметр  $U_{max.var}$  приводится в каталогах.

Данная методика выбора варисторов не предусматривает защиту от мощных помех, например, грозовых разрядов и мощных коммутационных импульсов, здесь выбор варистора проводится с учетом наличия в сети первичной защиты, которая ограничивает максимальный ток от импульсных помех до величины 100 А.

Рассчитанное максимальное напряжение варистора определяет выбор ТТР по классу напряжения.

**Пример**

Выбор защитного варистора и ТТР по классу коммутируемого напряжения.

От 3-фазной сети с напряжением 380 В по схеме «треугольник» работает электродвигатель мощностью 50 кВт с КПД = 90%,  $\cos \varphi = 0,92$ .

1. По формуле (21) рассчитаем мгновенную энергию на варисторе:

$$E = \frac{P \times \sqrt{1 - \cos^2 \varphi}}{2\pi f \eta} = \frac{50000 \times \sqrt{1 - (0,92)^2}}{2 \times 3,14 \times 50 \times 0,9} = 75,37 \text{ Дж} \quad (23)$$

2. По формуле (20) рассчитаем максимальное действующее напряжение в питающей сети с учетом 15-процентного разброса напряжения сети:

$$U_{max} = 1,15 \times 380 = 437 \text{ В} \quad (24)$$

3. По таблице 5 определяем классификационное напряжение варистора:

$$U_{кл.} = 750 \text{ В} \quad (25)$$

4. По формуле (22) определим максимальное напряжение на варисторе:

$$U_{max.var.} = 750 \times 1,6 = 1200 \text{ В} \quad (26)$$

- Исходя из полученной в п. 4 величины, выбираем ТТР 12-го класса по напряжению.
- По таблице 6 определяем тип варистора, учитывая энергию, полученную в п. 1. Для данного случая подходит варистор типа СН2-1а.

**3.1.3. Защита выходных цепей твердотельных реверсивных реле**

Трехфазное реверсивное реле, например, типа 5П55.30ТМ1-10-8, необходимо включать с наблюдением всех приведенных ниже рекомендаций. В противном случае, даже кратковременное использование без указанных мер защиты выведет реле из строя.

Цель введения добавочных резисторов и индуктивностей заключается в том, чтобы

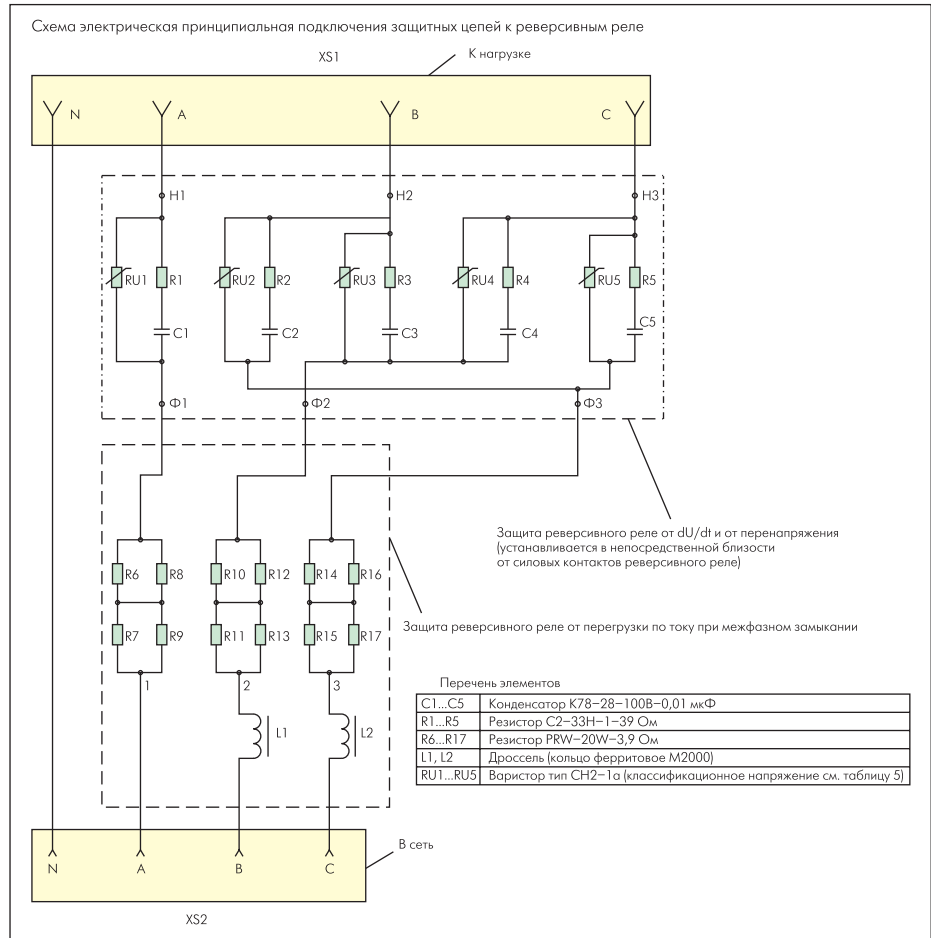


Рис. 11. Схема включения реверсивного ТТР

ограничить токи короткого замыкания, которые могут возникнуть при работе на двигатель.

Выбор варисторов производить в соответствии с таблицей 7.

Данные элементы устанавливаются при коммутации двигателей до 1,5 кВт. При больших мощностях двигателей необходимо пересчитать мощность резисторов и увеличить площадь сечения провода катушек индуктивностей.

Информация для изготовления дросселя:

- Сердечник ферритовый М2000 НМ(32×16×8).
- Для обмотки использовать провод ПЭВТЛ-1.2 длиной 600 мм. Выводы, отходящие от кольца, оставить длиной 40 мм.
- Количество витков  $N = 14$ . Намотку распределить равномерно по окружности.
- Внутренний слой изоляции с перекрытием 1/2 ширины проволочными полосами лакоткани ЛКМ-105-1. Намотку распределить равномерно по окружности.

Таблица 7. Выбор варисторов для защиты реверсивных ТТР

| Коммутируемая цепь, Uc | Классификационное напряжение варистора, Uкл | Класс реле  |
|------------------------|---|-------------|
| ~220 В                 | 430 В                                       | восьмой     |
| ~380 В                 | 750 В                                       | двенадцатый |

Защита реверсивного реле от dU/dt и от перенапряжения (устанавливается в непосредственной близости от силовых контактов реверсивного реле)

Защита реверсивного реле от перегрузки по току при межфазном замыкании

Перечень элементов

|           |  |
|-----------|--|
| C1...C5   | Конденсатор К78-28-100В-0,01 мкФ                                 |
| R1...R5   | Резистор С2-33Н-1-39 Ом  |
| R6...R17  | Резистор PRW-20W-3,9 Ом  |
| L1, L2    | Дроссель (кольцо ферритовое М2000)                               |
| RU1...RU5 | Варистор тип СН2-1а (классификационное напряжение см. таблицу 5) |

5. Наружный слой изоляции с перекрытием 1/2 ширины проволочными полосами лакоткани ЛКМ-105-1. Намотку распределить равномерно по окружности.

6. Собранный дроссель покрыть лаком ЭФ-9179, кроме выводов, отходящих от кольца.

**3.1.4. Особенности электрических режимов ТТР переменного тока**

Как уже указывалось выше, выходные цепи ТТР переменного тока, как правило, выполнены на симисторах или тиристорах, а микросхема оптодрайвера включена между анодным и управляющим электродами тиристора. Такая схема выходных каскадов налагает некоторые ограничения на работу ТТР. При включении ТТР ток нагрузки всегда протекает сначала через слаботочную цепь драйвера и управляющий электрод силового элемента, поэтому нельзя использовать такие реле для емкостных нагрузок, поскольку они имеют большие пусковые токи с высокой скоростью нарастания тока, которые могут повредить цепи драйвера.

Другая особенность связана с тем, что ТТР не может включаться строго в нуле фазы коммутируемого напряжения, поэтому коммутируемое напряжение ограничивается не только максимальным предельно допустимым напряжением, но и минимальным предельно допустимым напряжением,



которое необходимо для включения цепей управления.

Коммутируемый ток также имеет двустороннее ограничение. Сверху это ограничение определено максимально допустимой температурой перехода и предельными электрическими возможностями силовых элементов. Снизу этот ток ограничен током срабатывания силовых элементов и составляет десятки миллиампер.

Приведем некоторые другие особенности, которые необходимо учитывать при работе с ТТР переменного тока:

- фактор мощности не менее 0,4;
- диапазон рабочих частот 25–70 Гц;
- диапазон рабочих температур окружающей среды от –40 до +85 °С.

### 3.2. Работа выходных цепей ТТР постоянного тока

#### 3.2.1. Защита выходных цепей ТТР постоянного тока при работе на индуктивную нагрузку

Процессы в индуктивности  $L$  описываются дифференциальным уравнением

$$U = L(di/dt). \quad (27)$$

Из этого уравнения видно, что при приложении напряжения ток в индуктивности возрастает по линейному закону. Таким образом, при включении ТТР ток в индуктивности возрастает линейно, обратно пропорционально  $L$ .

Из фундаментального уравнения электромагнитной индукции:

$$e = -(d\Phi/dt), \quad (28)$$

где  $\Phi$  — магнитный поток, следует, что в индуктивности возникает электродвижущая сила самоиндукции:

$$e = -L(dI/dT). \quad (29)$$

Знак «минус» в формуле говорит о том, что ЭДС стремится вызвать токи, направленные таким образом, чтобы воспрепятствовать изменению магнитного потока. Из последней формулы следует, что при разрыве цепи с индуктивностью на контактах ТТР возникает ЭДС самоиндукции, которая по величине может значительно превышать напряжение питания и приводить к пробоем полупроводниковых ключей ТТР. Для защиты от ЭДС самоиндукции применяют обратно включенные диоды параллельно выходным контактам ТТР. Мощность защитных диодов ( $P$ ) рассчитывается исходя из электромагнитной энергии  $W$ , накапливаемой в катушке:

$$W = I^2 L / 2, \quad (30)$$

где  $I$  — ток, протекающий через катушку индуктивности, а также частоты переключения  $f$ , в соответствии с формулой:

$$P = Wf. \quad (31)$$

Для снижения рассеиваемой мощности на защитных диодах применяют резисторы, включенные последовательно с защитными диодами, но в этом случае необходимо следить за тем, чтобы напряжение, вызванное протеканием тока через дополнительный резистор, не превысило предельно допустимого напряжения ТТР. Из вышесказанного следует, что при работе на индуктивность электрическая цепь обладает некоторой инерцией, в данном случае величина индуктивности  $L$  является мерой инерции, и это явление необходимо учитывать при работе ТТР постоянного тока на индуктивность.

#### 3.2.2. Особенности применения быстродействующих реле постоянного тока

К быстродействующим ТТР постоянного тока относятся реле с дополнительным источником питания выходных цепей. Прежде всего данный раздел касается ТТР типа 5П40 — эти ТТР могут работать на частотах в несколько сотен килогерц. Следует обратить внимание на подключение дополнительного источника питания выходных цепей ТТР. Источник питания должен подключаться непосредственно к выводам ТТР с помощью витой пары (шаг скрутки не более 5 мм), а это значит, что токи нагрузки ТТР и токи по цепи потребления дополнительного источника питания (как по цепи минуса, так и по цепи плюса) не должны протекать по одному и тому же участку цепи. При этом сам источник питания выходной цепи должен быть гальванически развязан от силового питания и сигналов управления. Параллельно проводам источника питания необходимо включить дополнительный керамический конденсатор величиной 0,1–1,0 мкФ. Поскольку сами быстродействующие ТТР могут быть источником высокочастотных помех, необходимо провода, идущие к нагрузке, заключать в экран.

#### 3.3. Выводы и рекомендации

- Во всех случаях применения ТТР переменного тока устанавливайте параллельно выходным выводам реле защитные варисторы, а при отсутствии встроенных RC-цепей — защитные RC-цепи.
- Выбор класса ТТР по напряжению проводите после расчета защитных варисторов.
- Учитывайте все возможные электромагнитные помехи в питающей сети и расчет варисторов проводите по максимально возможному помехам. Защищайте не только реле, но и нагрузку.
- Работа на предельно допустимых режимах по коммутируемому току и напряжению резко снижает надежную работу и срок службы реле.
- Используйте реверсивные твердотельные реле только с применением цепей защиты по п. 3.1.3.
- При работе ТТР постоянного тока на индуктивную нагрузку устанавливайте защитные диоды параллельно индуктивностям и контактам ТТР.

- В быстродействующих реле, имеющих дополнительный источник питания выходных каскадов, ток питания не должен иметь общих продолжительных (не более 5 мс) цепей с током нагрузки.

## 4. Защита ТТР от статического электричества

Выполнение всех рекомендаций по защите ТТР от электростатического разряда (ЭСР) является важнейшим фактором повышения надежности РЭА. Воздействие ЭСР может приводить к мгновенным отказам, но могут возникать и так называемые скрытые дефекты, которые будут проявляться при дальнейшей работе ТТР (при этом снижается надежность ТТР). Этот факт подтверждается тем, что изделия, подвергшиеся воздействию ЭСР после ЭТТ, имеют больший процент отказов.

Емкость человеческого тела составляет примерно 150 пФ. При ходьбе человек, который является одной обкладкой конденсатора «человек-земля», заряжается до 0,1–5 мкКл, что примерно составляет 20 кВ.

Все электронные компоненты, имеющие р-п-переход, в той или иной степени чувствительны к ЭСР и могут быть им повреждены. ТТР полностью состоят из полупроводников, а значит, могут пострадать от ЭСР, поэтому проводить мероприятия по защите ТТР от ЭСР — безусловная задача как разработчиков ТТР, так и их потребителей.

Требования по защите от статического электричества:

- ТТР необходимо держать в антистатической транспортной таре, либо они должны быть помещены в металлический контейнер до тех пор, пока не будут установлены в схему;
- ТТР следует брать за корпус, а не за выводы. При проверке ТТР следует выполнять требования предосторожности;
- в помещении должны быть проводящие полы, а токопроводящие коврики должны быть заземлены;
- не подавать напряжение на ТТР, пока все выводы не будут запаяны в схему;
- при переключении диапазонов напряжения на источниках питания, применяемых для запитки цепей ТТР, необходимо снизить напряжение до нуля;
- паяльники должны быть заземлены. ■

## Литература

1. Нейман Л. Р., Демирчан К. С. Теоретические основы электротехники. Л.: Энергия. 1981.
2. Степаненко И. П. Основы микроэлектроники: Учебное пособие для вузов. М.: Сов. радио. 1980.
3. Трегубов С. В., Пантелеев В. А., Фрезе О. Г. Общие принципы выбора варисторов для защиты от импульсных напряжений.