

СОВРЕМЕННЫЕ ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ

ДЛЯ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

С. Волошин, С. Архипов

Продолжение*.

Устойчивость тиристорных оптореле к dU/dt и dI/dt . Быстрое нарастание напряжения на выходе закрытого реле может быть вызвано следующими факторами:

- подачей в цепь нагрузки напряжения в фазе, близкой к 90° ;
- появлением импульсных помех в цепи нагрузки;
- возникновением коммутационных скачков напряжения из-за фазового сдвига между током и напряжением при величине тока, ниже тока удержания тиристора в цепи с индуктивной нагрузкой.

Скачки напряжения могут привести к несанкционированному открыванию тиристорных выходов реле при превышении dU/dt некоторой критической величины. Для несимметричных тиристорных устройств устойчивость к dU/dt характеризуется критической скоростью нарастания напряжения в закрытом состоянии $(dU/dt)_{кр}$, или статическим dU/dt . Возникновение статического dU/dt обусловлено наличием паразитной емкости анод–управляющий электрод, ток через которую пропорционален dU/dt и может превысить ток отпирания тиристора.

Симистор, наряду с $(dU/dt)_{кр}$, характеризуется критической скоростью изменения коммутационного напряжения $(dU/dt)_{ком}$. Воздействие $(dU/dt)_{ком}$ связано с наличием остаточного заряда в материале симистора после предыдущего включения. Этот заряд при достаточно быстром нарастании обратного напряжения способствует включению симистора в обратном направлении в отсутствие сигнала управления. Таким образом, управление теряется. Величина остаточного заряда зависит от пикового тока перед включением и скорости пересечения током нуля $(dI/dt)_{ком}$. При малых значениях этих величин устойчивость симисторов возрастает и начинает определяться $(dU/dt)_{кр}$, которое значительно выше $(dU/dt)_{ком}$.

Самопроизвольное включение реле из-за случайных бросков напряжения в цепи нагрузки может не оказывать негативного влияния на некоторые виды нагрузок (например, нагреватели), поскольку в течение полупериода частоты сети реле выключается. Однако для таких нагрузок, как обмотки клапанов электродвигателей, самопроизвольное включение неприемлемо. Кроме того, несанкционированное включение тиристорных устройств может приводить к катастрофическим последствиям в реверсивных системах (межфазное замыкание) и в системах с емкостями в нагрузках (сверхтоки разрядов конденсаторов). Недопустима потеря управления и на индуктивных нагрузках.

Для устранения несанкционированного включения оптореле используется ряд мер, основная из которых – шунтирование выхода реле демпфирующей RC цепью. При этом увеличение C ведет к уменьшению dU/dt , а R служит для ограничения тока при разряде конденсатора C и уменьшения выбросов переходного процесса. Обычно для конкретной нагрузки величины C и R подбираются экспериментально, начиная с величин, рассчитанных приближенными методами.

Рассмотрим один из этих методов – резонансный. При индук-



тивности нагрузки L_n резонансная частота контура $L_n C$ должна удовлетворять условию

$$f_p < \frac{(dU/dt)_{кр}}{2\pi U}, \text{ где } U - \text{выброс напряжения в линии.}$$

$$\text{Поскольку } f_p = \frac{1}{2\pi LC}, \text{ то } C > \frac{1}{(2\pi f_p)^2 L_n}.$$

Если принять $\cos \varphi$ за коэффициент мощности в нагрузке, величина выброса напряжения будет равна $U = U_A \sin \varphi$ где U_A – значение амплитуды напряжения в линии.

$$\text{Отсюда: } C > \frac{U_A^2 \sin^2 \varphi}{(dU/dt)_{кр}^2 L_n}.$$

Для цепи с заданными номинальными значениями напряжения и тока U_n и I_n имеем

$$X_L = \frac{U_n}{I_n} \sin \varphi \text{ и } X_L = 2\pi f L, \text{ ,}$$

$$\text{тогда } L = \frac{U_n \sin \varphi}{2\pi f I_n} \text{ и } C > \frac{4\pi f U_n I_n}{(dU/dt)_{кр}^2} \sin \varphi.$$

Для оценки значения R рассмотрим соотношение для примерно 30%-ного выброса переходного процесса (коэффициент затухания 0,5). В терминах номинальных значений $(dU/dt)_{кр}$ получим

$$R = \frac{(dU/dt)_{кр}}{2\pi f I_n}.$$

Еще один способ повышения устойчивости реле к быстрым скачкам напряжения – введение в цепь нагрузки реактора задержки, представляющего собой элемент индуктивности на сердечнике с

*Начало см.: Электроника: Наука, Технология, Бизнес, 2000, №3, с.24–26.

высокой магнитной проницаемостью и квадратной петлей гистерезиса. При рабочих токах нагрузки реактор находится в режиме насыщения, т.е. не влияет на ток. При уменьшении тока реактор “восстанавливается”, внося в цепь большую индуктивность, что замедляет скорость изменения тока и, в частности, задерживает повторное приложение обратного напряжения, помогая запираанию тиристора. Следует отметить, что, уменьшая скорость нарастания тока на начальной стадии включения тиристора, реактор способствует равномерному распределению плотности тока по кристаллу, защищая тиристор от разрушительного воздействия высоких значений dI/dt , приводящих из-за высокой плотности тока к локальному разогреву областей кристалла сверх допустимого значения.

Особенности работы на индуктивную нагрузку. Работа реле постоянного тока на индуктивную нагрузку наряду с потерей управляемости реле из-за изменения коммутационного напряжения dU/dt сопровождается еще рядом эффектов. Так, при выключении реле (разрыве цепи нагрузки) опасность представляет напряжение самоиндукции нагрузки. Помимо методов защиты выхода реле из строя вследствие перенапряжений, приведенных в разделе 3*, возможна защита за счет включения однополярных реле в полумостовую схему (рис. 1). При коммутации плеч полумоста с диодами VD1 и VD2, внешними, с быстрым восстановлением или встроенными в VT1 и VT2, и при выключении VT1 ток нагрузки замыкается контуром, образованным VD2 и источником питания и т.д.

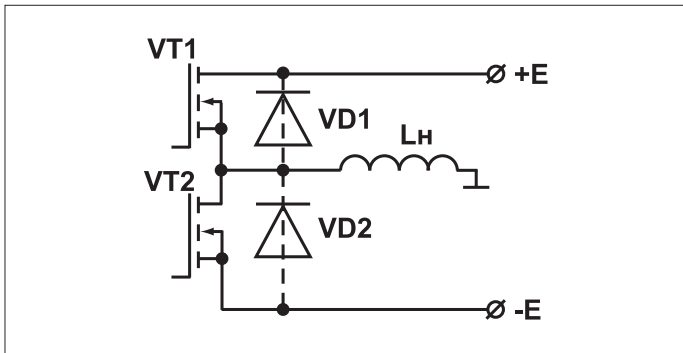


Рис. 1. Полумостовая схема защиты реле при работе на индуктивную нагрузку

Шунтирование индуктивной нагрузки диодом допустимо только при относительно небольших значениях энергии W_L , запасенной в нагрузке. Она определяется по формуле

$$W_L = \frac{L_H \cdot I_H^2}{2}$$

и ограничена допустимой импульсной мощностью используемого диода.

Значительное увеличение допустимого значения W_L можно получить при включении в цепь диода и резистора (рис. 2). При этом должны выполняться условия

$$R < \frac{U_{реле} - E}{I_H} \text{ и } P_R > \frac{L_H \cdot I_H^2}{2} \cdot f_{ком},$$

где $U_{реле}$ – максимально допустимое напряжение на реле, E – напряжение питания нагрузки; I_H – ток нагрузки, P_R – мощность резистора, $f_{ком}$ – средняя частота коммутации реле. Постоянная времени спада тока в нагрузке при этом равна L_H/R .

Напряжения самоиндукции, возникающие при выключении, не

влияют на работу тиристорных реле, поскольку разрыв цепи нагрузки происходит при значении тока нагрузки, близкой к нулю. Для реле этого типа существует опасность перегрузки по току в силу следующих причин:

- ◆ асимметрии включения выходных тиристорных (симисторных), приводящей к появлению постоянной составляющей тока и насыщению сердечника, а следовательно, к возникновению сверхтоков;
- ◆ насыщения сердечников при включении реле в точке пересечения напряжением нуля.

В свою очередь асимметрия включения может являться следствием:

- ◆ асимметрии углов проводимости из-за значительного различия токов управления (пороговых) разных полярностей;
- ◆ асимметрии углов проводимости при некорректном фазо-импульсном управлении реле;
- ◆ частичного (полуволнового) открывания реле при слишком быстром для включения тиристора пересечении обратным напряжением “окна разрешения включения” (для реле с контролем перехода напряжения через нуль) или в силу малого входного тока управления.

В первом случае реле не может применяться с индуктивными нагрузками, во втором – решение очевидно, в третьем – следует уменьшить изменение коммутационного напряжения dU/dt описанными выше методами и обеспечить достаточный входной ток.

При чисто индуктивных нагрузках с насыщающимися ферромагнитными сердечниками, такими как контакторы или трансформаторы на холостом ходу, реле при включении может перейти в насыщение. При этом случай включения реле с переходом напряжения через нуль – наихудший. Многоцикловые пусковые токи могут во много десятков раз превосходить номинальные значения. Для таких нагрузок оптимальные условия запуска – включение реле в максимуме напряжения или мягкий запуск с малыми начальными углами проводимости.

Особенности работы на емкостную нагрузку связаны с

появлением в цепи реле больших пусковых токов ($I \gg C \frac{dU}{dt}$)

с высоким dI/dt или с возникновением перенапряжения на реле из-за остаточного напряжения на емкости. Сверхтоки возможны как в цепях переменного, так и постоянного тока, однако для защиты от них в этих цепях используются разные методы. В цепи постоянного тока с заданным напряжением питания U_0 амплитуду тока при включении можно оценить (пренебрегая активным сопротивлением цепи) по формуле

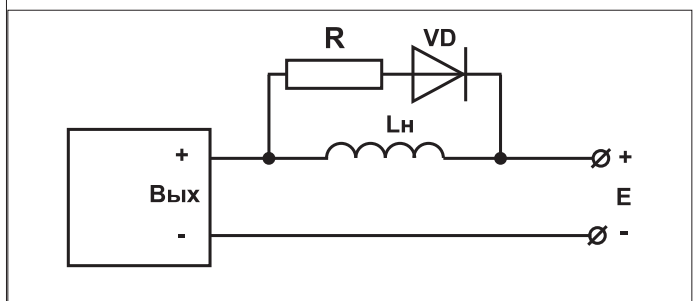


Рис. 2. Шунтирование индуктивной нагрузки диодом и резистором

*Электроника: Наука, Технология, Бизнес, 2000, №3. с.24–26.



$$I = C \frac{U_0}{\Delta t},$$

где Δt – время включения реле. При работе с быстродействующими реле, у которых $\Delta t \gg 10^{-6}$ с, ток может быть чрезмерно большим. Например, при $C = 10$ мкФ и $U_0 = 100$ В получим $I \gg 10^3$ А.

Чтобы ограничить пусковой ток, можно использовать токоограничивающий резистор или индуктивность в цепи нагрузки. В последнем случае пусковой ток будет иметь колебательный характер.

В цепях переменного тока с реле на тиристорах скачки тока появляются в следующих случаях:

- при отклонении фазы напряжения от нуля в момент включения реле. В этом случае возникает однократный импульс тока, пропорциональный по амплитуде напряжению в линии в момент включения;
- при отклонении от нуля напряжения включения выхода тиристорных реле, что приводит к периодическим скачкам тока при пересечении напряжением в линии нуля (при включенном реле).

При работе реле с емкостной нагрузкой без контроля перехода напряжения через нуль однократный импульс тока в момент включения может оказаться недопустимо большим. В частности, при значении емкости около 100 мкФ (таков порядок емкости в фазокомпенсирующих системах), номинальном напряжении сети 380 В и времени включения тиристорных реле порядка 10^{-6} с значение тока для худшего случая составляет

$$I = \frac{10^{-4} \cdot 380}{10^{-6}} \cdot 2 \approx 53 \cdot 10^3 \text{ А}.$$

Из соотношения $C \Delta U = I \Delta t$ получим длительность импульса тока

$$\Delta t = \frac{10^{-4} \cdot 5 \cdot 10^2}{5 \cdot 10^4} = 10^{-6} \text{ с}.$$

В реальных условиях из-за сопротивления и индуктивности цепи значение амплитуды тока меньше, а длительность больше оценочных величин. Но все равно, значение тока превосходит допустимый ударный ток тиристора, приведенный к длительности импульса. Кроме того, такие скачки тока порождают значительные электромагнитные помехи.

Существенное уменьшение амплитуды импульса тока при включении достигается за счет применения реле с контролем перехода фазы через нуль. При этом напряжение запрета включения должно быть как можно ниже нуля. При значении этого напряжения 10 В ток, согласно оценочному уравнению, будет равен 10^3 А, а реально – порядка сотни ампер, что при малой длительности импульса вполне приемлемо. При необходимости большего подавления всплеска тока можно последовательно емкости включить небольшую индуктивность (~ 10 мкГн). Отсюда следует, что с емкостными нагрузками можно использовать только реле с контролем перехода фазы через нуль (типа ТМ).

Периодические скачки тока по амплитуде в каждом полупериоде рабочей частоты зависят от значения выходного напряжения включения реле. Наряду с помехами и локальным разогревом кристалла такие всплески могут привести к деградации некоторых типов конденсаторов вследствие расширения за счет них спектрального состава тока. Напряжение включения реле определяет цепь драйвера силовых тиристорных реле общего назначения содержит защитный резистор ($U_{вкл} \sim R I_{упр}$, где R – сопротивление защитного резистора, $I_{упр}$ – ток отпирания управляющей цепи тиристора). Назначение этого резистора – защита драйвера по току при

работе на индуктивные нагрузки. При работе на емкостную нагрузку резистор может быть устранен, что позволяет снизить напряжение включения до 3–4 В. ЗАО “Протон-Импульс” выпускает специальные реле (типа ТМК) для конденсаторных нагрузок с нормированными значениями $U_{вкл} = 4$ В и $U_{запр} = 10$ В. Использовать эти реле при работе на индуктивную нагрузку не рекомендуется. При работе с активными нагрузками его применение допустимо.

Рассмотрим напряжение на выходе реле при работе на емкостную нагрузку. При снятии сигнала включения на входе реле выходной тиристор выключается при токе, близком к нулю. При этом напряжение на конденсаторе по амплитуде оказывается равным сетевому. В следующем полупериоде напряжение в линии меняет знак и на выходе закрытого реле оказывается сумма напряжений сети и конденсатора, значение которой достигает удвоенной амплитуды напряжения сети. Таким образом, в случае емкостной нагрузки предельно допустимое напряжение используемого реле должно не менее чем в два раза превышать напряжение реле, работающего с активной и индуктивной нагрузкой.

В однофазной цепи допустимо использование двух реле с последовательно соединенными выходами и обычным предельно допустимым напряжением. При этом следует предусмотреть выравнивание напряжений на них с помощью резисторов или варисторов. Более сложный случай представляет собой трехфазная система (рис. 3), используемая для компенсации сдвига фаз в сетях. Здесь в каждой межфазной цепи используются два последовательно включенных тиристора, поэтому после выключения сумма остаточных напряжений емкостей и напряжений фаз будет распределяться между ними, т.е. они могут иметь обычные предельно допустимые напряжения (800 В для сети 380 В). Однако есть один нюанс, требующий рассмотрения. Как правило конденсаторы С1 – С3 шунтированы высокоомными разрядными резисторами и, если до следующего включения они успели разрядиться, проблем не возникает. В отсутствие разрядных резисторов или при малом промежутке времени между включениями напряжение конденсатора не успевает разрядиться и суммируется с линейным. Поскольку в процессе включения тиристорных всегда сначала открываются два из них, а через не-

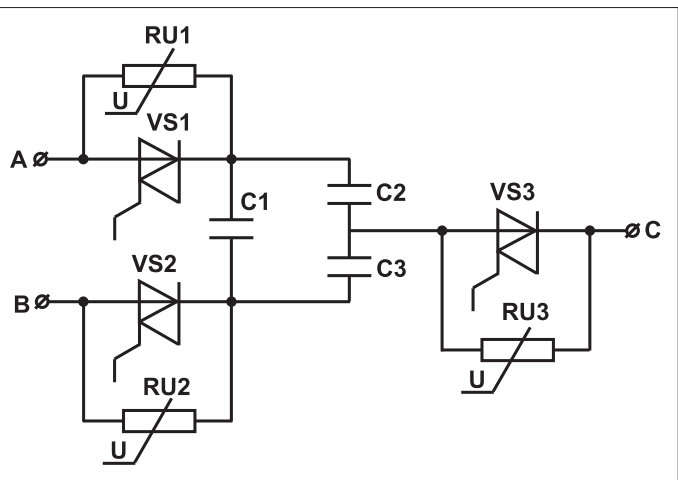


Рис.3. Трехфазная система компенсации сдвига фаз в сетях

сколько миллисекунд – третий, то в течение этих миллисекунд суммарное напряжение будет приложено к нему. Варистор, шунтирующий этот тиристор, возьмет на себя перенапряжение, и тем самым, возможно, рассеет излишнюю энергию конденсаторов. Нужно только, чтобы эта энергия с учетом частоты коммутаций не была слишком велика для варистора.