

ОСОБЕННОСТИ КОММУТАЦИИ КОНДЕНСАТОРОВ УКРМ ТИРИСТОРНЫМИ КОММУТАТОРАМИ

Часть 2

Е.Н. ВАСИН (ЗАО «МЕАНДР»)



В первой части статьи были рассмотрены принципиальные электрические схемы построения ключей тиристорных коммутаторов для коммутации конденсаторов УКРМ.

Вторая часть посвящена анализу процесса включения и выключения конденсаторной батареи различными тиристорными коммутаторами и особенностям их работы.

Для лучшего понимания процессов включения и выключения рассмотрим процесс коммутации конденсаторной батареи коммутатором МТК-3 (рис. 1, 2). Этот коммутатор единственный из доступных автору трёхканальный коммутатор, ключи которого состоят из трёх встречнопараллельно включённых тиристоров, а значит, могут коммутировать как положительную, так и отрицательную полуволны сетевого напряжения. Другими словами его работа близка к идеальной. Все остальные коммутаторы имеют ключи другой конструкции и поэтому имеют определённые особенности коммутации, о чём будет рассказано ниже.

Как видно из осциллограммы, до поступления команды на включение ступени все ключи закрыты и напряжение на конденсаторах близко к нулевому. В течение 10 мс включаются все три тиристорных ключа. После поступления команды на отключение ступени, тиристоры закрываются на ближайшем по времени нуле тока, т.е. при смене полярности тока заряда конденсатора. Это время ($t_{\text{откл}}$), как правило, составляет менее 10 мс. После отключения конденсаторы остаются заряженными до некоторого напряжения, в зависимости от момента отключения.

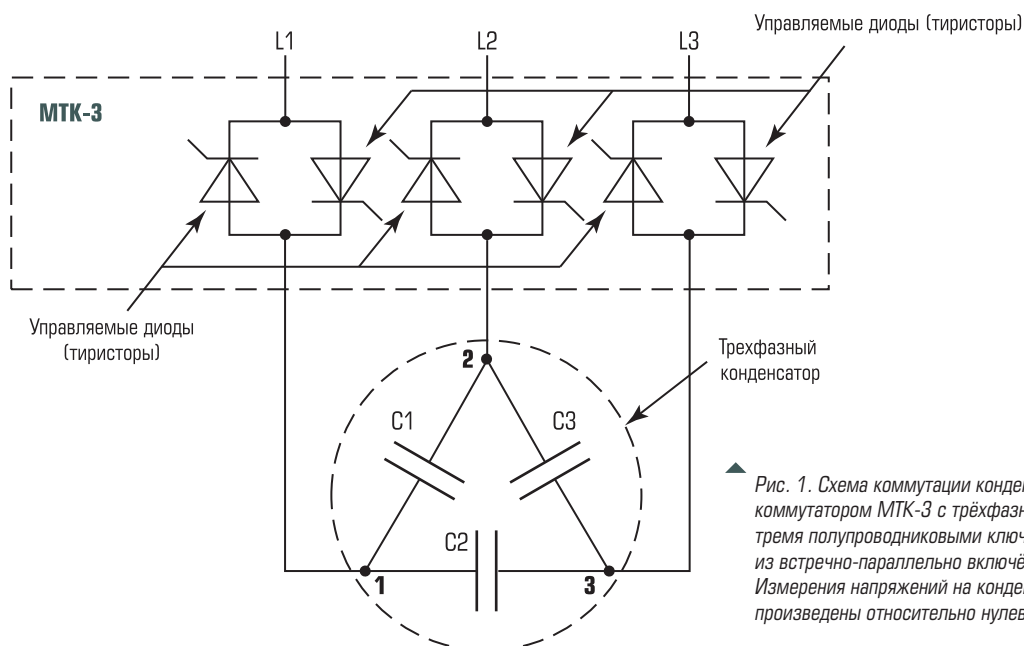


Рис. 1. Схема коммутации конденсаторов коммутатором МТК-3 с трёхфазной коммутацией тремя полупроводниковыми ключами, состоящими из встречно-параллельно включённых тиристоров. Измерения напряжений на конденсаторах произведены относительно нулевого провода сети N

Многие производители тиристорных коммутаторов заявляют время включения тиристорного коммутатора не более 5 мс. Это не совсем так. Это, как правило, время от момента включения первого ключа до включения последнего. Для двухфазных коммутаторов это время на 1/3 меньше, чем у трёхфазных, так как коммутируются только две фазы. Реально суммарное время включения, от момента подачи команды на включение ступени до включения последнего ключа, для некоторых моделей коммутаторов, может составлять почти 30 мс. Это зависит от особенностей (точности) работы узла включения и схемы “детектирования нуля”, т.е. совпадения напряжения на конденсаторе и сетевого напряжения $U_{сети} = U_{конд}$.

Рассмотрим особенности работы двухфазного коммутатора с диодно-тиристорными ключами BEL-TS H2 мощностью 25 квар ф. Beluk (Германия). На рис. 3 представлена схема подключения такого коммутатора.

Как видно из схемы подключения фаза L2 подключена напрямую к выводу 2 конденсатора, это значит, что независимо от того включена ступень или нет, напряжение в этой точке всегда будет равно напряжению фазы L2. Фазы L1 и L3 подключены к конденсаторам через ключи коммутатора к выводам 2 и 3 соответственно. Так как ключи состоят из встречно-параллельно включённых диода и тиристора, конденсаторы заряжаются через открытый диод ключа до амплитудного значения линейного напряжения, т.е. конденсаторы C1 и C3 оказываются заряженными до напряжения $U_c = U_{лин} \cdot 1.41$, т.е. напряжение в точках 1 и 3, относительно точки 2 равно примерно минус 566 В (при линейном напряжении сети 400 В). При этом конденсатор C2 остаётся разряженным, т.е. напряжение между точками 1 и 3 конденсатора равно нулю.

Рассмотрим процесс включения/выключения конденсаторов с помощью этого коммутатора на осциллограмме (рис. 4).

В выключенном состоянии коммутатора, до поступления команды на включение ступени, напряжение на выводе 2 трёхфазного конденсатора равно фазному, так как он подключён напрямую к одной из фаз (на рисунке – канал 2, голубая линия). На двух других выводах конденсатора (выводы 1 и 3 конденсатора на рисунке 3, каналы 3 и 4, зелёная и красная линии) присутствует переменное относительно нулевого провода, но постоянное относительно вывода L2 напряжение

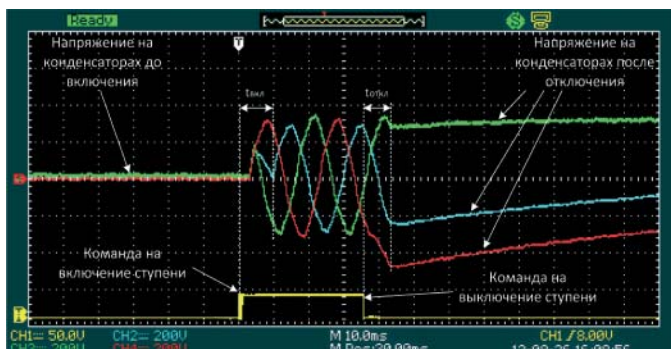


Рис. 2. Осциллограмма включения и выключения конденсаторной батареи коммутатором MTK-3

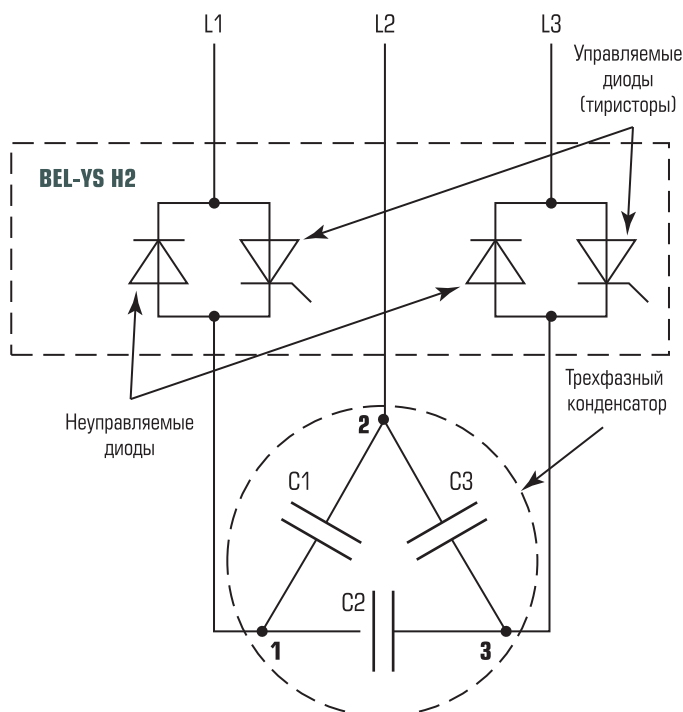


Рис. 3. Схема коммутации конденсаторов коммутатором BEL-TS H2 с двухфазной коммутацией двумя полупроводниковыми ключами, состоящими из встречно-параллельно включённых диода и тиристора

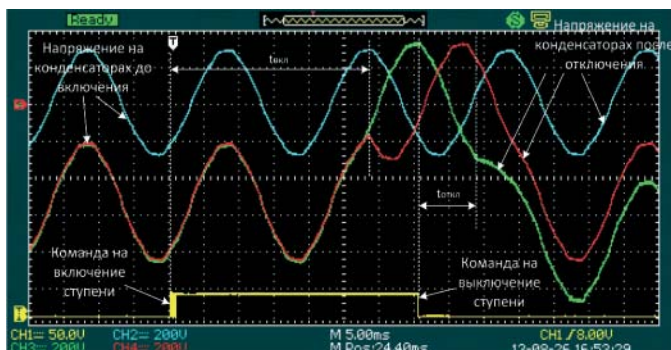


Рис. 4. Осциллограмма включения и выключения конденсаторной батареи коммутатором BEL-TS H2

Таблица 1. Сравнение тиристорных коммутаторов

№	Тип коммутатора	Параметр										
		BEL-TS H2 Veluk (Германия)	BEL-TS Veluk (Германия)	DSTM3 Lovato (Италия)	TSM-LC Ercos (Германия)	TSM-HV50 Ercos (Германия)	СТУ-02-400 BMR (Чехия)	СТУ-03-400 BMR (Чехия)	МТК-2 МЕАНДР (Россия)	МТК-21 МЕАНДР (Россия)	МТК-3	МТК-31
1	Количество коммутируемых фаз	2	3	2	2	3	3	3	2	2	3	3
2	Тип коммутирующего ключа*	д/т	д/т	д/т	д/т	д/т	д/т	д/т	т/т	т/т	т/т	т/т
3	К-во коммутаций в секунду	20	20	?			25	25	20	20	20	20
4	Время включения, примерно, мс				5	5						
5	Наличие предохранителей									•		•
6	Работа с разрядными дросселями		•			•	•	•	•	•	•	•
7	Работа по схеме "треугольник"	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
8	Работа по схеме "звезда"	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
9	Работа по схеме "разорванный треугольник"							•			•	•

* Тип ключа: д/т – диодно-тиристорный; т/т – тиристорно-тиристорный

BEL-TS H2 мощностью от 25, 50, 75, 100 и 300 квар ф. Veluk (Германия).

DSTM3 мощностью 30, 50 и 100 квар ф. Lovato (Италия).

TSM-LC мощностью 10, 25, 50, 200 квар и TSM-HV мощностью 50 квар ф. Ercos (Германия).

СТУ-02-400, мощностью от 10 до 72 квар ф. BMR (Чехия).

BEL-TS Veluk (Германия).

TSM-HV50 Ercos (Германия).

равное по величине амплитудному линейному напряжению: $U_c = U_{\text{лин}} \cdot 1.41$, т.е. примерно минус 566 В. В выключенном состоянии ступени УКРМ два из трёх конденсаторов постоянно заряжены до амплитудного значения линейного напряжения. Вряд ли постоянное нахождение конденсаторов под напряжением продлевает срок их службы. Именно наличие постоянного напряжения на конденсаторах обусловило появление в различной технической литературе запрета на использование разрядных дросселей для разряда конденсаторов совместно с тиристорными коммутаторами [1, 14, 16, 17, 18]. На самом деле, этот запрет касается только коммутаторов с двухфазной коммутацией двумя полупроводниковыми ключами, состоящими именно из встречно-параллельно включённых диода и тиристора. Все остальные типы коммутаторов прекрасно работают с разрядными дросселями (таблица 1).

При поступлении команды на включение ступени (канал 1 – жёлтая линия) все тиристоры включатся только через время $t_{\text{вкл}}$. Это время определяется особенностью схемы управления коммутатором и варьируется от

нескольких миллисекунд до, почти, тридцати миллисекунд. Может быть, это особенность работы только экземпляра, имеющегося у автора? – Неизвестно. Но в результате такой работы при попытке осуществить динамическую компенсацию реактивной мощности в реальном времени может возникнуть большая ошибка компенсации при импульсных нелинейных нагрузках.

Закрытие тиристоров происходит менее чем за 10 мс.

Выводы:

- Из-за наличия постоянного напряжения на выходе, с этим коммутатором нельзя использовать разрядные дроссели.
 - Разрядные резисторы надо выбирать исходя из воздействия на них постоянного высокого напряжения (566 В).
 - В выключенном состоянии ступени, на резисторах выделяется мощность: $P = U^2 r / R = (U_{\text{лин}} \cdot 1.41)^2 / R$, во включённом состоянии: $P = U_{\text{лин}}^2 / R$, т.е. в 2 раза меньше.
- Теперь рассмотрим работу коммутатора с аналогичными диодно-тиристорными ключами, но только коммутирующего все три фазы. По аналогичной схеме выполнен

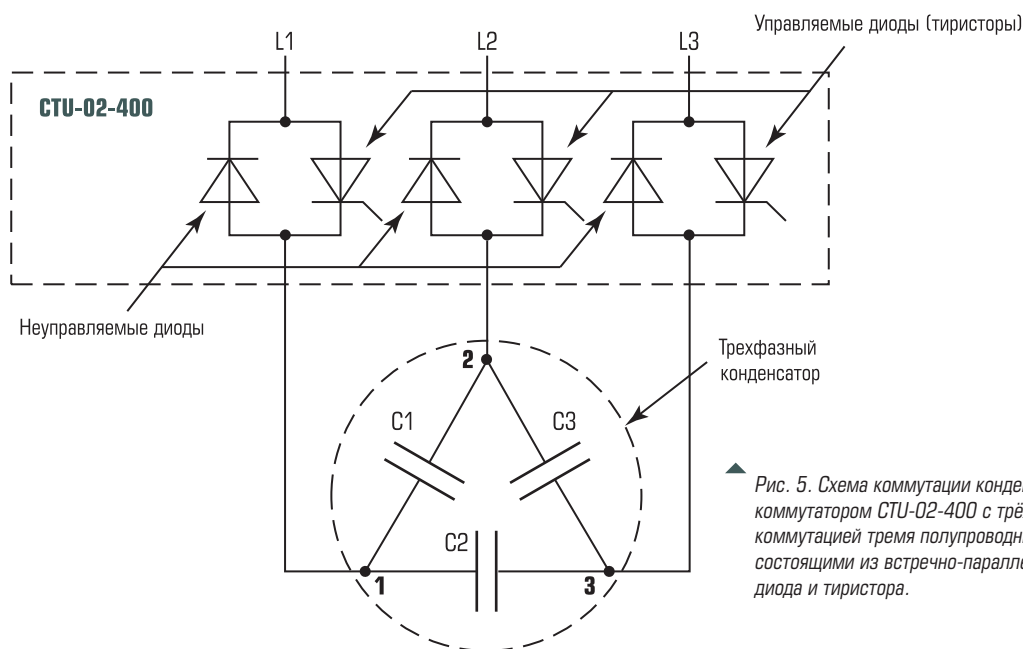


Рис. 5. Схема коммутации конденсаторов коммутатором STU-02-400 с трёхфазной коммутацией тремя полупроводниковыми ключами, состоящими из встречно-параллельно включённых диода и тиристора.

коммутатор STU-02-400 ф. BMR (Чехия), рис. 5.

На рис. 6 хорошо видно, что в выключенном состоянии коммутатора, до поступления команды на включение ступени, напряжение на всех выводах трёхфазного конденсатора равно выпрямленному фазному напряжению, так как коммутатор, благодаря наличию в ключах неуправляемых диодов, выполняет функцию трёхфазного однополупериодного выпрямителя. При этом все три конденсатора разряжены. При поступлении команды на включение все три ключа включаются в течение времени $t_{\text{вкл}}$.

С этим коммутатором можно безбоязненно использовать разрядные дроссели.

А как же быть с грозными предупреждениями о невозможности применения разрядных дросселей с тиристорными коммутаторами?

Например:

- “При коммутации конденсаторной батареи тиристорными контакторами различной модификации [2, 3, 10] разрядные дроссели применять нельзя, так как это приведёт к короткому замыканию силовых электронных ключей по цепи постоянного тока” [1]. — “In dynamic PFC systems discharge reactors cannot be used (this would be a short circuit of the high-voltage DC)” [14].
- “...Интервал переключения конденсаторной установки во время автоматического режима работы можно снизить при помощи подключения разрядного дросселя с двумя V-образными обмотками взамен

разрядных резисторов. Такая замена позволяет увеличить допустимое число разрядов конденсаторных батарей за одинаковые интервалы времени в 2–2,5 раза. Но при коммутации ступеней конденсаторных батарей тиристорными контакторами разрядные дроссели применять запрещено!” [17].

- “...Использовать стандартные разрядные резисторные модули или разрядные дроссели не допускается.” [18].
- Хотя этот “запрет” касается всего-лишь трёх типов коммутаторов из представленных в таблице 1 одиннадцати моделей.

Выводы:

1. Прежде, чем приступить к разработке УКРМ с коммутацией конденсаторов тиристорными коммутаторами необходимо внимательно изучить все нюансы их работы.

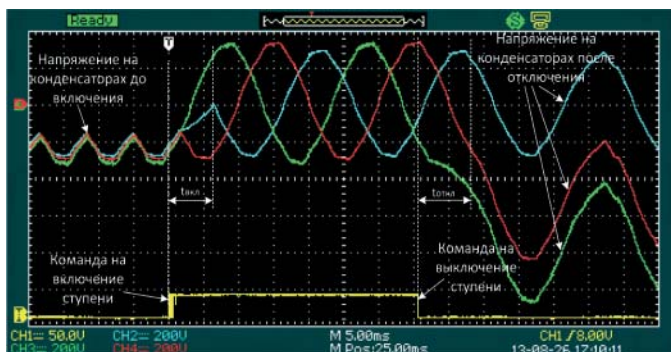


Рис. 6. Осциллограмма включения и выключения конденсаторной батареи коммутатором STU-02-400, ф. BMR (Чехия)

2. Если тип и модель коммутатора ещё не определены и есть свобода выбора – рекомендовать остановить свой выбор на тиристорных коммутаторах с тиристорно-тиристорными ключами (правда тип ключа, как правило, производители не пишут, ограничиваясь общим названием – тиристорный ключ). Это позволит, для ускорения разряда конденсаторной батареи, безбоязненно применять разрядные дроссели или активные разрядные устройства (например, МДР-1).
 3. В большинстве случаев оправдано применение 2-х фазных тиристорных коммутаторов. Они на 1/3 меньше выделяют тепла, чем 3-х фазные, более быстродействующие, меньше по габаритам и дешевле.
 4. Применение 3-х фазных тиристорных коммутаторов оправдано в некоторых специфических условиях. Например; коммутация конденсаторов по схеме “разорванный треугольник”, использование коммутаторов на рабочее напряжение 400 В в сети с линейным напряжением 690 В, включённых по схеме “звезда с нейтралью”.
Применение тиристорных коммутаторов со встроенными предохранителями позволит не увеличивать объёмы шкафа УКРМ и уменьшить объём монтажных работ.
Сейчас появились новые модели 2-х и 3-х фазных тиристорных коммутаторов (МТК-26 и МТК-34), имеющих не только быстродействующие встроенные предохранители, но и встроенную схему ускоренного разряда конденсаторов, а также, светодиодный индикатор наличия опасного напряжения на конденсаторной батарее, что позволяет значительно уменьшить габариты и цену конденсаторных установок компенсации реактивной мощности.
- Список литературы**
1. Шишкин С.А. “Разряд конденсаторных батарей установок компенсации реактивной мощности”, Силовая электроника, № 2, 2006. http://www.power-e.ru/2006_02_50.php
 2. Шишкин С.А. “Тиристорные контакторы для коммутации низковольтной емкостной нагрузки”, Силовая электроника, № 2, 2005.
 3. “Тиристорные коммутаторы КАТКА и основные проблемы их применения в системах компенсации”, Milan Bleha, KMB systems, s.r.o. <http://ukrm.ru/content/view/50>, <http://www.kmb.cz>
 4. “КАТКА 20/80 – Operating Manual” <http://www.kmb.cz/index.php/en/component/phocadownload/category/9-power-factor-controllers?download=100:katka-operating-manual>
 5. “Discharge resistor EW-22”, EPCOS AG, 2010, B44066T0022E400.
 6. “Discharge Reactor”, EPCOS AG, 2004, B44066E9900S001. <http://www.service.epcos.in/manuals/discharge%20reactors.pdf>
 7. “Installation and maintenance instructions for thyristor modules TSM-HV series” EPCOS AG, 2011.
 8. “CTU-02 Thyristor switching module for fast PF compensation”, BMR, – <http://www.bmr-trading.com/en/downloads/manuals/power-factor-correction?download=4:ctu02-user-and-service-manual>
 9. “CTU-03 Thyristor switching module for fast PF compensation”, <http://www.bmr-trading.com/en/downloads/manuals/power-factor-correction?download=5:ctu03-user-and-service-manual>
 10. “Thyristor switch for reactive current compensation. User manual” KBR, EDEBDA0200-2112-1_EN.
 11. Power Factor Correction. Product Profile 2005. Published by Epcos AG. Ordering No EPC: 26013-7600. Germany. 2005. – 103p.
 12. Power Factor Correction. Product Profile 2003/2004. Published by Epcos AG. Ordering No EPC: 26011-7600. Germany. 2003. – 87p.
 13. Reactive Power Controller Prophi. Operating instructions. Janitza electronics GmbH. Dok Nr 1.020.009.a Serie II. Germany. 2003. – 56p.
 14. Thyristor Module TSM-Series. Published by Epcos AG. Germany. July 2006 – http://sashthapower.com/pdf/4._Catalog_of_TSM_-_Dynamic_PFC-1.pdf
 15. “Power Factor Correction”, 01 December 2006, <http://www.powerguru.org/power-factor-correction>
 16. FAQ “Какие дроссели применяются в УКРМ?” – <http://ukrm.ru/content/view/17/55/>
 17. “Выбор конденсаторной установки” – <http://forca.ru/stati/podstancii/vybor-kondensatornoy-ustanovki.html>
 18. “Тиристорные контакторы для коммутации конденсаторных батарей” – http://old.compensation.com.ua/index.php?option=com_content&task=view&id=27&Itemid=18

Васин Евгений Николаевич – главный конструктор ЗАО “МЕАНДР”. <http://www.meandr.ru>