

# Шунтирующий вентиль повышает надежность и долговечность

## тиристорных систем возбуждения

**В системах тиристорного возбуждения электромашин и аппаратов используют мостовые выпрямители, обеспечивающие форсированное нарастание и снижение тока. Как показано авторами, более рационально использовать схему с шунтирующим тиристором.**

**Илья Джус**

Выпрямители с шунтирующим вентилем снижают потребление реактивной и активной мощности и потери энергии и получили наибольшее применение в основном электроприводе постоянного тока [1]. Известно также их использование в так называемом вентильном каскаде — приводе с асинхронным двигателем с фазным ротором и инвертором, применяемым в мощных перекачивающих установках. Мало известно об использовании таких выпрямителей в системах питания различных намагничивающих устройств (систем возбуждения генераторов, в мощных магнитах). Как нам представляется, именно там они способны обеспечить значительный эффект, состоящий в продлении срока жизни изоляции.

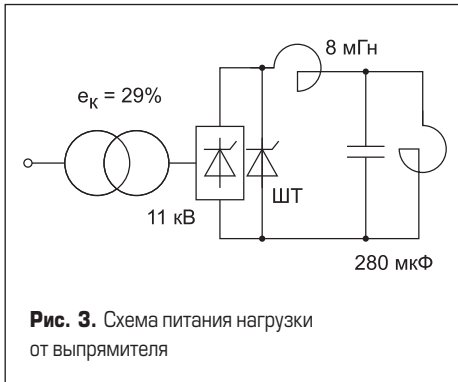
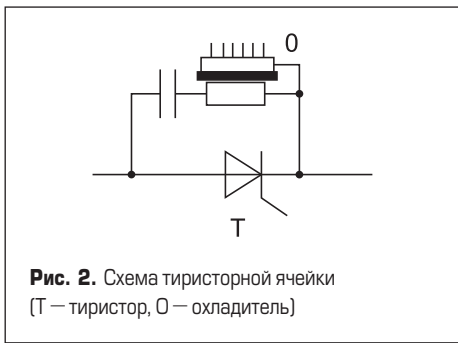
Приведем два примера из практики. В 2001 г. на одной ГРЭС произошел пробой изоляции ротора генератора. Коротко сообщим, что обмотка ротора представляет собой голые медные шины (для улучшения охлаждения, ибо ток составлял порядка 4 кА), вложенные в пазы на изоляционные стеклотекстолитовые прокладки (толщиной порядка 1 мм). Произошло это через пару лет

эксплуатации. В ходе обследования выяснилось, что запущенный в работу на несколько лет раньше аналогичный генератор на географически близкой другой ГРЭС успешно работает. Разница в условиях эксплуатации оказалась мизерной — в выпрямителе на второй ГРЭС в RC-цепи, защищающей тиристоры от перенапряжений в процессе переключения, использовались в два раза большие по емкости конденсаторы. Казалось бы, какое это влияние оказывает на цепь выпрямленного тока? Оказывается, это имеет значение, ибо импульсы перенапряжений, связанных с коммутацией тиристорov, наличествуют и в кривой выпрямленного напряжения [2]. Принимая во внимание известный факт — сокращение срока службы кабелей в промышленных сетях электропитания с вентильными нагрузками до двух-трех лет, вполне естественно было предположить, что здесь имеет место аналогичный эффект: ускоренное сокращение продолжительности жизни изоляции стеклотекстолита под действием импульсов напряжения, имеющих собственную частоту порядка 10 кГц. Частота же повторения этих коммутационных импульсов 200 Гц [3]. Напомним, что, например, кабель с изоляцией из сшитого полиэтилена на частоте 10 кГц имеет пробивное напряжение в четыре-пять раз ниже, чем на постоянном токе. Величина номинального напряжения выпрямителя невелика — 600–800 В, но учитывая, что из-за необходимости форсировки выпрямитель работает с номинальными углами регулирования порядка 80 эл. градусов, регулярные импульсы напряжения с частотой выпрямления 300 Гц становятся значительными. Среди других версий были: некачественный текстолит, механические истирания текстолита вследствие качаний (угла) ротора из-за переменного графика нагрузок и т. п.

Другой похожий случай произошел совсем недавно. При эксплуатации системы намагничивания в тиристорном выпрямителе с линейным напряжением 11 кВ/300 А и низким (около 500 В) выходным напряжением использовались резисторы УХР600 (допустимое напряжение изоляции 6 кВ/50 Гц) водяного охлаждения в RC-цепях. После двух лет эксплуатации был зафиксирован пробой двух тиристорov и небольшое плавление/возгорание стопки (стека)



**Рис. 1.** Пробои керамической изоляции резисторов



тиристоров. Еще через два года эксплуатации там же были зафиксированы пробой пяти тиристоров 60 класса в плечах выпрямителя (шесть тиристоров последовательно в одном плече выпрямителя) и пробой керамической изоляции упомянутых резисторов (толщина керамики 1,2 мм) (рис. 1).

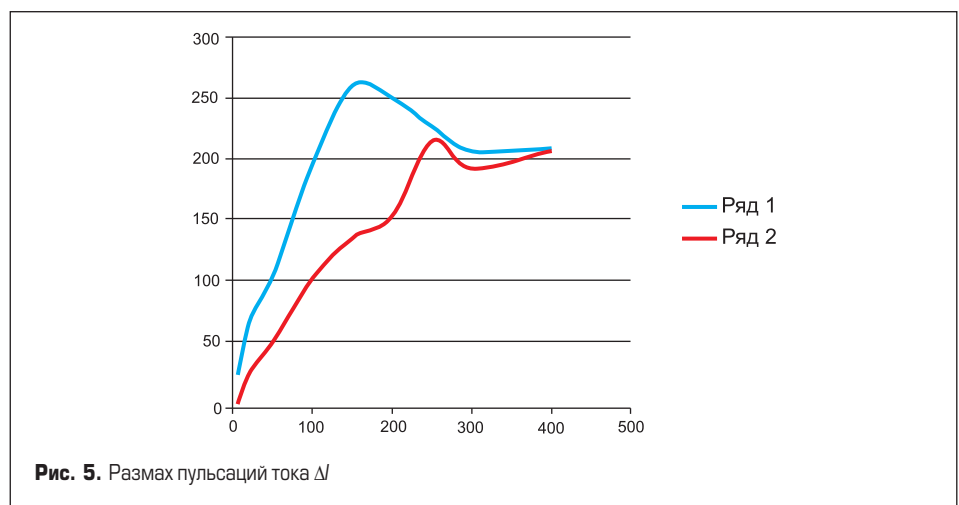
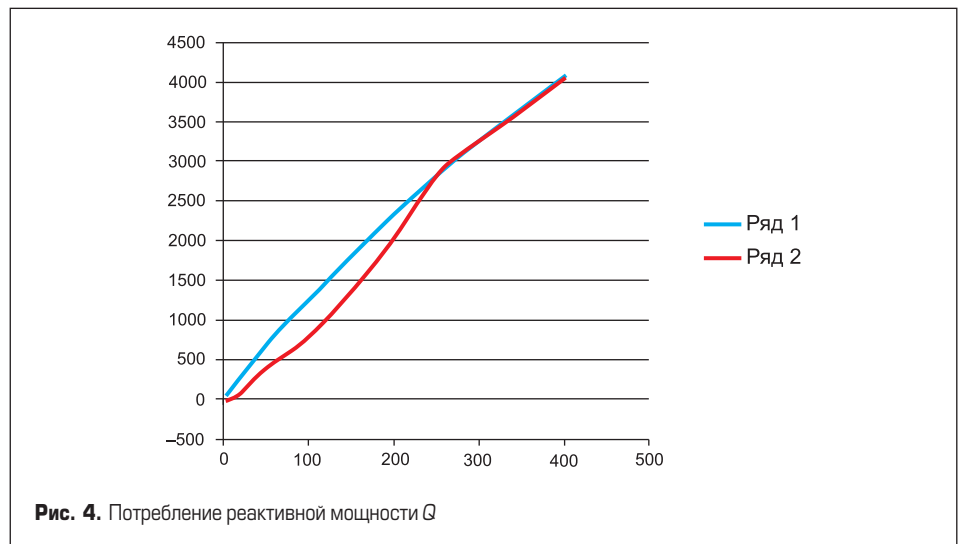
На рис. 2 приведен фрагмент схемы выпрямителя: одиночный тиристор с RC-цепью и охладителем. Номинальный угол регулирования выпрямителя приблизительно такой же, как и в предыдущем примере. Максимальный пик напряжения (импульсное), прикладываемого к тиристорам и, соответственно, к резисторам, может быть рассчитан как

$$U_{\text{пик}} = 1,41 \times 1,1 \times 0,16 \times 1,25 \times 1,65 \times 1,16 \times 11 = 6,54 \text{ кВ,}$$

где: 1,41 — переход к амплитуде; 1,1 — учет неравномерности деления напряжения между последовательно включенными (шесть) тиристорами в плече; 0,16- (1/6); 1,25 — учет возможного повышения напряжения сети; 1,65 — учет коммутационного выброса напряжения; 1,16 — учет срабатывания релейной защиты на закрытие импульсов моста (или отключения от сети) при пробое одного из тиристоров в плече; 11 кВ — линейное напряжение сети.

Между тем, и резистор имеет номинальную амплитуду напряжения  $6 \times 1,41 = 8,5 \text{ кВ}$ , то есть был выбран правильно.

В связи с этим нами было обращено внимание на возможность использования выпрямителя с шунтирующим вентиляем. Нужно сказать, что установка такого вентиля вовсе не обязательна, если использовать так называемое двукратное включение [1] тиристоров в трехфазном мостовом выпрямителе. В этом случае на тиристоры выпрямителя, кроме основных регулирующих импульсов управления, подаются дополнительные импульсы



с углами регулирования –60 эл. градусов. Если инверторный режим не требуется, то вместо шунтирующего тиристора (ШТ) устанавливают диод. При использовании инверторного режима ШТ в выпрямительном режиме всегда включен (или используется импульсное управление им), а в инверторном режиме ШТ выключен. Отметим также, что шунтирующий вентиль проводит ток только в диапазоне с углами регулирования 60–120 эл. градусов. При меньших углах указанный вентиль не про-

водит ток. Управление таким выпрямителем несколько усложняется [4].

Было проведено моделирование режимов трехфазного мостового выпрямителя в схеме (рис. 3) для двух вариантов: обычного управления и с ШТ (или двукратным управлением). Для первого режима результаты верифицировались с реальным преобразователем. На рис. 4 показано потребление реактивной мощности Q, размах пульсаций тока ΔI — на рис. 5, а на рис. 6 приведены графики максимальных

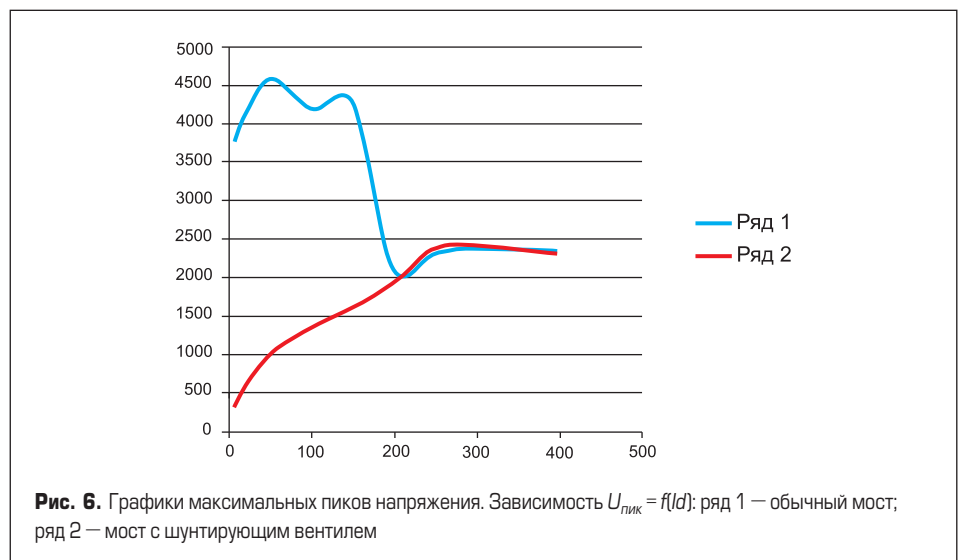


Таблица. Максимальные значения коэффициента

№ схемы	1	2	3	4	5	6	7
$k_{max}$	1,57	0,97	0,605	0,443	0,384	0,1422	0,1184

Значение  $k_{max}$  — максимальная величина на графике рис. 8.

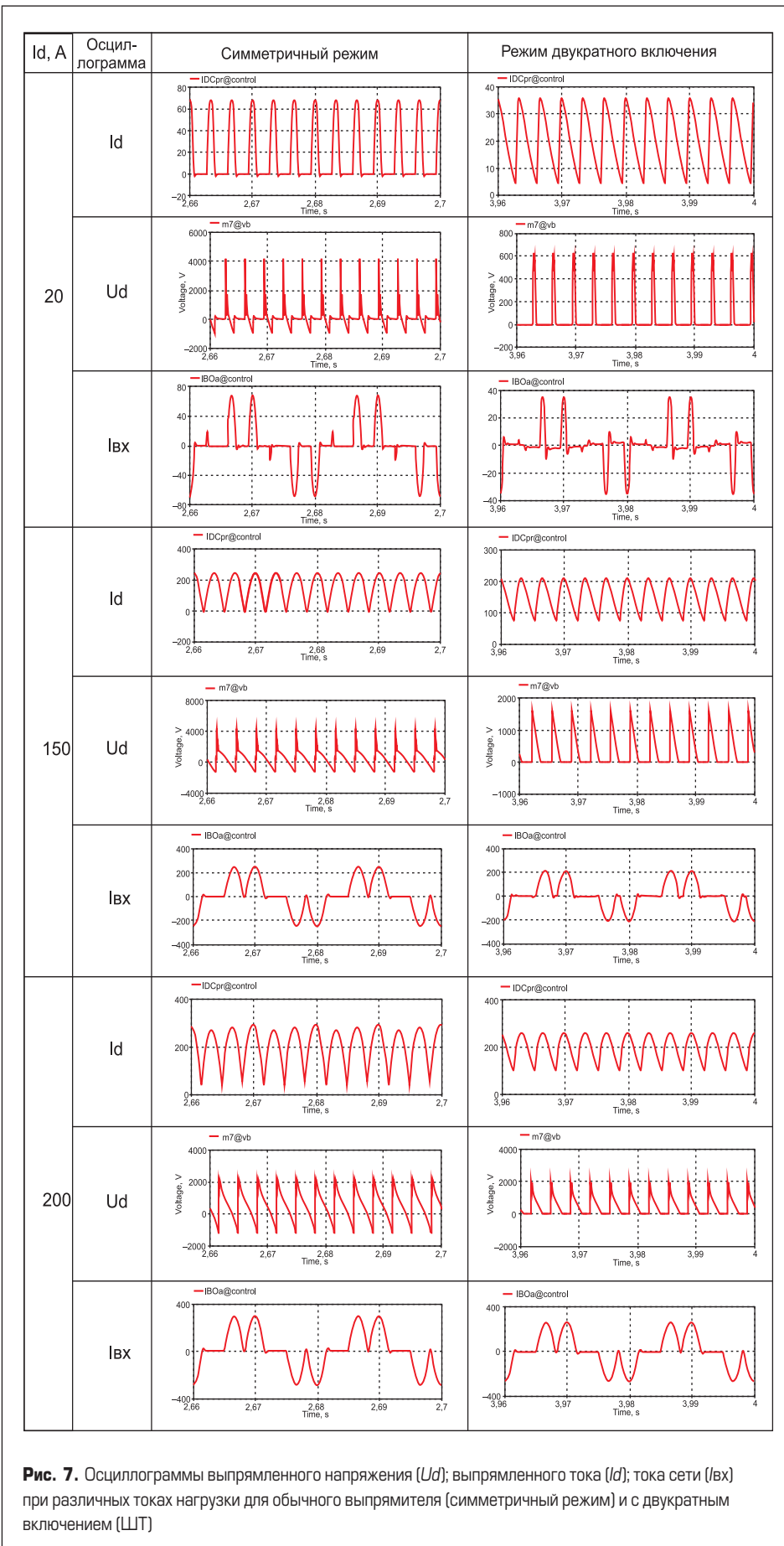


Рис. 7. Осциллограммы выпрямленного напряжения ( $U_d$ ); выпрямленного тока ( $I_d$ ); тока сети ( $I_{bx}$ ) при различных токах нагрузки для обычного выпрямителя (симметричный режим) и с двукратным включением (ШТ)

пиков напряжения  $U_{тик}$  полученные в результате моделирования. На рис. 7 приведены кривые процессов. Обращает на себя внимание прежде всего тот факт, что в обычной схеме режим непрерывного тока начинается при токах свыше 180 А, в схеме с шунтирующим вентилем — 4 А. Именно в режиме прерывистого тока заметны значительные импульсы напряжений в кривой выпрямленного напряжения, исчезающие при переходе в режим непрерывного тока. В связи с этим важен правильный расчет границ непрерывного тока. Пренебрегая активным сопротивлением сглаживающих дросселей и трансформатора, можно утверждать, что пульсация тока (его перепад от минимального до максимального значений) определяется интегралом превышения выпрямленного напряжения над его средним значением. На рис. 8 приведены кривые, позволяющие определить зависимость пульсаций от угла регулирования  $\alpha$ , а в таблице указаны максимальные значения этого коэффициента.

Размах пульсации тока в амперах определяется как  $k U_d 0$ :

$$\Delta I = \omega \times L,$$

где  $k$  — коэффициент (см. рис. 8);  $U_d 0$  — максимально возможное выпрямленное напряжение в схеме (при угле регулирования, равном нулю), [В];  $\omega = 314$  (если сеть 50 Гц);  $L$  — индуктивность в цепи выпрямленного тока в сумме с индуктивностями рассеяния питающего выпрямителя трансформатора, [Гн].

Предполагая, как это часто принято и видно из рассмотрения рис. 7, что пульсация тока имеет синусоидальный характер, получим, что граничное значение тока, при котором он переходит из непрерывного режима в прерывистый и наоборот, равно:

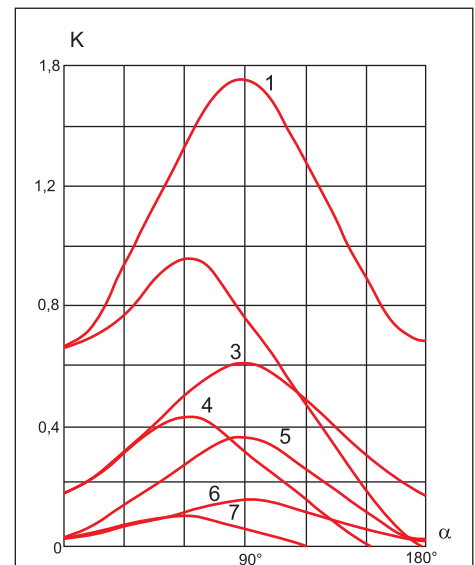


Рис. 8. Зависимость коэффициента  $k$  от угла регулирования: 1 — однофазная мостовая схема или двухполупериодная нулевая; 2 — то же, но с ШТ; 3 — трехфазная нулевая; 4 — то же, но с ШТ; 5 — трехфазная мостовая полупроводящая; 6 — трехфазная мостовая; 7 — то же, но с ШТ

$$I_{гр} = 0,637 \Delta I.$$

Хотелось бы также обратить внимание на то, что использование схемы с шунтирующим вентилем значительно снижает потери энергии в RC-цепях, устанавливаемых параллельно тиристорам для снижения перенапряжений.

Таким образом, для повышения надежности и долговечности тиристорные системы возбуждения с большой кратностью форсировки должны использовать вентиль, шунтирующий выпрямительный мост, или эквивалентный этому режим управления.

## Литература

1. Маевский О. А. Энергетические показатели вентильных преобразователей. М: Энергия, 1978.
2. Поссе А. В. Схемы и режимы электропередач постоянного тока. Л: Энергия, 1973.
3. Диоды и тиристоры в преобразовательных установках. М: Энергоатомиздат, 1992.
4. Пат. № 2264686 кл. H02M7/12 (РФ). Способ управления выпрямителем с шунтирующим тиристором.