

УДК 621.316

Н.О.РАК

Харьковская национальная академия городского хозяйства

ТОКОВАЯ НАГРУЗКА НА СИЛОВЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ ГИБРИДНЫХ КОММУТАЦИОННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ АППАРАТОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА В НОРМАЛЬНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ

Исследуется токовая нагрузка на силовые полупроводниковые приборы наиболее распространенных вариантов трехфазных полупроводниковых ключей гибридных коммутационных аппаратов в нормальных режимах их работы и предложены аналитические выражения для расчета токовой нагрузки на тиристоры указанных ключей при различных углах включения тиристоров.

В настоящее время начали широко применяться полупроводниковые аппараты как гибридные, так и бесконтактные [1]. Этому способствует, с одной стороны, то, что классические контактные аппараты перестают уже удовлетворять жестким требованиям, предъявляемым к ним современным высокоэффективным производством, а с другой – интенсивное развитие силовой электроники привело к созданию высоконадежных управляемых полупроводниковых ключей, которые в состоянии коммутировать без дуги токовые потоки очень большой мощности (до нескольких мегаватт). Особенно перспективными являются гибридные коммутационные полупроводниковые аппараты (КПА), в которых удачно сочетаются преимущества контактных аппаратов (малые потери мощности во включенном состоянии) и бесконтактных (бездуговая коммутация силовой электрической цепи). Основным элементом гибридного КПА является силовой гибридный полупроводниковый ключ (ГПК), включающий главные контакты (ГК) коммутационного аппарата и полупроводниковый ключ (ПК). При этом во включенном состоянии аппарата ток главной цепи протекает по ГК, и только при отключении аппарата этот ток в момент размыкания ГК переходит на короткий промежуток времени (обычно не более полупериода питающей сети) в ПК, где и осуществляется его бездуговая коммутация. Как известно [1], стоимость и габариты гибридного КПА в основном определяются блоком ПК, поскольку, невзирая на интенсивное развитие силовой электроники, бесконтактный ПК все еще существенно превосходит по стоимости и габаритам классический контактный ключ. В этой связи расчет токовой нагрузки на силовые полупроводниковые приборы (СПП) ГПК, которая и определяет тип этих приборов, является актуальной задачей. Решение этой задачи заметно усложняется специфическим характером этой нагрузки [1].

В работах [3, 4] уделяется значительное внимание токовой нагрузке на электронный ключ (ЭК) в различных режимах его работы, т.к. ЭК является основным узлом полупроводникового аппарата, определяющим его функциональные возможности. В [3] представлены основные расчетные соотношения, позволяющие выбирать тиристоры и определять характер их воздействия на нагрузку. В [4] исследована токовая нагрузка на СПП при активной и индуктивной нагрузке и выведены основные соотношения, позволяющие определять зависимости средних и действующих значений токов тиристоров от угла управления.

Целью настоящей работы является расчет токовой нагрузки на СПП гибридных КПА переменного тока в нормальных режимах работы.

Разработку гибридных КПА переменного тока наиболее целесообразно выполнить на базе однооперационных тиристоров (симисторов), которые по сравнению с другими управляемыми СПП (IGBT-транзисторами, IGCT-тиристорами, ГТО-тиристорами) имеют наименьшее падение напряжения во включенном состоянии, отличаются очень высокой перегрузочной способностью и невысокой стоимостью, а технология их производства достаточно отработана. Низкие частотные характеристики этих приборов не являются определяющими при использовании их в составе этого класса устройств.

На рис.1 представлены наиболее распространенные варианты выполнения трехфазных силовых ГПК для гибридных КПА. Очевидно, что в каждом из этих ключей два встречно-параллельно включенные тиристоры могут быть заменены одним симистором.

Ниже приводится аналитическое выражение для тока в тиристоре ГПК, представленного на рис.1, а

$$i_T = I_M \cdot \sin(\vartheta + \alpha), \quad (1)$$

где I_M – амплитуда фазного тока; $\vartheta = \omega t$, $\omega t = 2\pi f$ – угловая частота; α – угол включения тиристора, который с равной вероятностью может изменяться в пределах от 0 до 2π .

Форма этого тока представляет усеченную полуволну синусоиды. В зависимости от угла включения тиристора α , который определяется моментом размыкания контактов, длительность ее может изменяться от 0 до π/ω .

Очевидно, что аналогичное выражение для i_T имеет место и при отключении ГК одной фазы цепи переменного тока. Выражение (1) получено при допущении, что ток из цепи контактов в СПП перетекает

мгновенно. Реально этот процесс занимает от десятков микросекунд до десятых долей миллисекунды и поэтому для практических расчетов при частоте промышленной сети $f = 50$ Гц этим временем можно пренебречь.

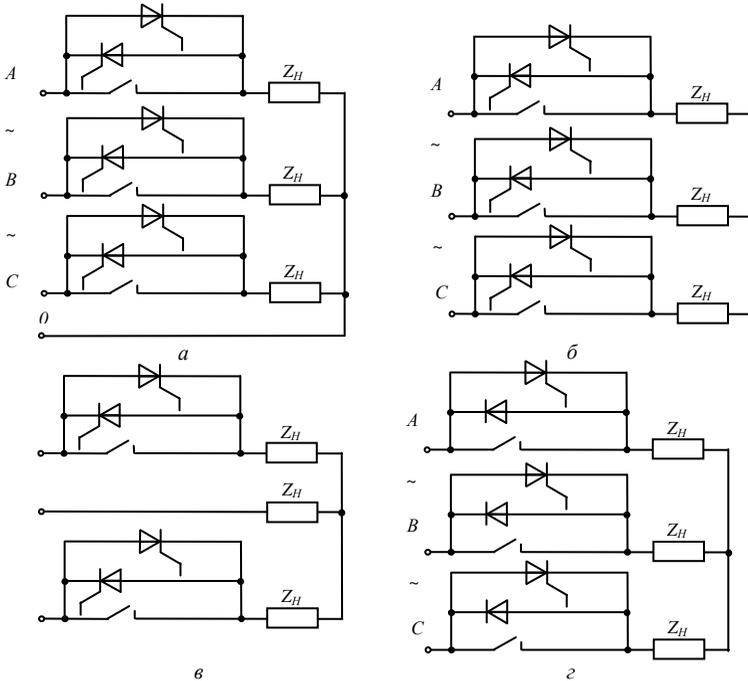


Рис.1 – Варианты исполнения трехфазных силовых гибридных ключей:
 а – с нулевым проводом; б, в, г – без нулевого провода.

При отключении трехфазных цепей ГПК (рис.1, б, в, г) форма токового импульса в тиристоре усложняется. Это объясняется тем, что в момент перехода тока в тиристоре одной из отключаемых фаз через нуль он выключается, и трехфазная цепь превращается в однофазную с новым законом изменения тока в оставшихся открытыми тиристорах.

Анализ начнем со схемы на рис.1, б, которая является основной. Рассмотрим вначале процесс выключения активной нагрузки. На рис.2 приведены кривые изменения фазных токов и линейных напряжений в данной цепи. Кривые изменения фазных напряжений не приводятся, так как они повторяют характер изменения фазных токов. Для удобства изложения рассмотрим характер токовой нагрузки тиристора фазы

А при размыкании контактов в положительную полуволну тока.

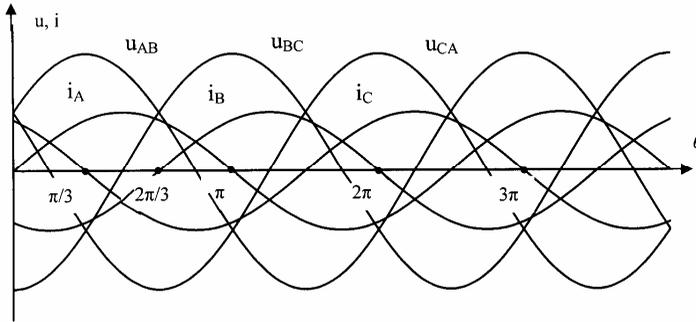


Рис.2 – Кривые изменения фазных токов и линейных напряжений при активной нагрузке

Как следует из рис.2, в зависимости от значения α ток в тиристоре будет описываться следующими выражениями:

$$\text{при } 0 < \alpha \leq \frac{\pi}{3} \quad i_T = I_M \sin(\vartheta + \alpha) \quad \text{для } 0 < \vartheta \leq \frac{\pi}{3} - \alpha, \quad (2)$$

$$i_T = \frac{\sqrt{3}}{2} I_M \sin(\vartheta + \alpha + \frac{\pi}{6}) \quad \text{для } \frac{\pi}{3} - \alpha < \vartheta \leq \frac{5\pi}{6} - \alpha, \quad (3)$$

$$\text{при } \frac{\pi}{3} < \alpha \leq \frac{2}{3}\pi \quad i_T = I_M \sin(\vartheta + \alpha) \quad \text{для } 0 < \vartheta \leq \frac{2}{3}\pi - \alpha, \quad (4)$$

$$i_T = \frac{\sqrt{3}}{2} I_M \sin(\vartheta + \alpha - \frac{\pi}{6}) \quad \text{для } \frac{2}{3}\pi - \alpha < \vartheta \leq \frac{7}{6}\pi - \alpha, \quad (5)$$

$$\text{при } \frac{2}{3}\pi < \alpha \leq \pi \quad i_T = I_M \sin(\vartheta + \alpha) \quad \text{для } 0 < \vartheta \leq \pi - \alpha. \quad (6)$$

При отключении активно-индуктивной цепи в установившемся режиме характер токовой нагрузки в тиристорах не изменится. Фазные токи и напряжения в этом случае определяются следующими выражениями:

$$i_A = I_M \sin(\vartheta + \alpha), \quad i_B = I_M \sin(\vartheta + \alpha - \frac{2}{3}\pi), \quad i_C = I_M \sin(\vartheta + \alpha + \frac{2}{3}\pi); \quad (7)$$

$$u_A = U_M \sin(\vartheta + \alpha + \varphi_H), \quad u_B = U_M \sin(\vartheta + \alpha - \frac{2}{3}\pi),$$

$$u_C = U_M \sin(\vartheta + \alpha + \frac{2}{3}\pi), \quad (8)$$

где U_M – амплитуда фазного напряжения; $\varphi_H = \arctg \frac{\omega L_H}{R_H}$; L_H, R_H – индуктивность и активное сопротивление нагрузки.

Рассмотрим случай, когда $0 < \alpha \leq \frac{\pi}{3}$. Очевидно, что для $0 < \vartheta \leq \frac{\pi}{3} - \alpha$ ток в тиристоре фазы А определяется выражением (2).

При $\vartheta + \alpha = \frac{\pi}{3}$ $i_C = 0$, а $i_T = \frac{\sqrt{3}}{2} I_M$, т.е. трехфазный режим превращается в однофазный

$$U_{AB} = \sqrt{3} U_M \cos(\vartheta' + \varphi_H), \quad (9)$$

где $\vartheta' = \vartheta + \alpha - \frac{\pi}{3}$, т.е. отсчет времени начинается от момента

$$\vartheta + \alpha = \frac{\pi}{3}.$$

Переходный процесс во вновь образованной цепи будет описываться дифференциальным уравнением

$$iR + L \frac{di}{dt} = \sqrt{3} U_m \cos(\vartheta' + \varphi_H), \text{ где } R = 2R_H \text{ и } L = 2L_H.$$

Решение этого уравнения в соответствии [2]:

$$i = Ae^{-\frac{R}{L}t'} + \frac{\sqrt{3}}{2} I_M \cos(\vartheta' + \varphi_H - \varphi'_H), \quad (10)$$

где $\varphi'_H = \arctg \frac{\omega L}{R} = \arctg \frac{\omega L_H}{R_H}$, $t' = \frac{\vartheta'}{\omega}$.

Или после преобразований с учетом того, что при $\vartheta' = 0$

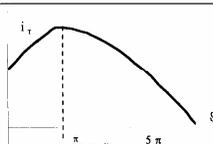
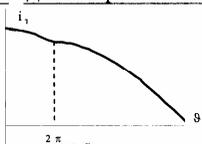
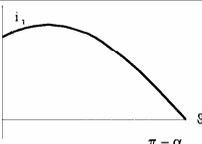
$$i(0) = I_M \sin \frac{\pi}{3}$$

$$i_T = \frac{\sqrt{3}}{2} I_M \cos \vartheta' = \frac{\sqrt{3}}{2} I_M \sin(\vartheta + \alpha + \frac{\pi}{6}), \quad (11)$$

т.е. ток в тиристоре такой, как и в случае активной нагрузки. Подобным образом показывается идентичность токовых нагрузок тиристорov и при других значениях угла включения α .

Аналогично определяется характер токовой нагрузки тиристоров в схемах на рис.1, в, г. В таблице для всех этих схем приведены аналитические выражения примерных форм кривых для тока в тиристоре при различных углах его включения.

Аналитические выражения для токов в тиристорах при различных углах включения α

Схема	Зона α		
	$0 < \alpha \leq \frac{\pi}{3}$	$\frac{\pi}{3} < \alpha \leq \frac{2\pi}{3}$	$\frac{2\pi}{3} < \alpha \leq \pi$
Рис. 1,б	Для всех фаз		
	 <p style="text-align: center;">$0 < \vartheta \leq \frac{\pi}{3} - \alpha$</p> <p style="text-align: center;">$i_T = I_M \sin(\vartheta + \alpha)$</p> <p style="text-align: center;">$\frac{\pi}{3} - \alpha < \vartheta \leq \frac{5\pi}{6} - \alpha$</p> <p style="text-align: center;">$i_T = \frac{\sqrt{3}}{2} I_M \sin(\vartheta + \alpha + \frac{\pi}{6})$</p>	 <p style="text-align: center;">$0 < \vartheta \leq \frac{2\pi}{3} - \alpha$</p> <p style="text-align: center;">$i_T = I_M \sin(\vartheta + \alpha)$</p> <p style="text-align: center;">$\frac{2\pi}{3} - \alpha < \vartheta \leq \frac{7\pi}{6} - \alpha$</p> <p style="text-align: center;">$i_T = \frac{\sqrt{3}}{2} I_M \sin(\vartheta + \alpha - \frac{\pi}{6})$</p>	 <p style="text-align: center;">$0 < \vartheta \leq \pi - \alpha$</p> <p style="text-align: center;">$i_T = I_M \sin(\vartheta + \alpha)$</p>
	Для фазы А		
Рис. 1,в	Аналогично схеме рис. 1, б		 <p style="text-align: center;">$0 < \vartheta \leq \pi - \alpha, i_T = I_M \sin(\vartheta + \alpha)$</p>
	Для фазы С		
	 <p style="text-align: center;">$0 < \vartheta \leq \frac{2\pi}{3} - \alpha, i_T = I_M \sin(\vartheta + \alpha)$</p> <p style="text-align: center;">$\frac{2\pi}{3} - \alpha < \vartheta \leq \frac{7\pi}{6} - \alpha, i_T = \frac{\sqrt{3}}{2} I_M \sin(\vartheta + \alpha - \frac{\pi}{6})$</p>	Аналогично схеме рис. 1, б	
Рис. 1,г	Для всех фаз		Аналогично схеме рис. 1, в фаза С
	Аналогично схеме рис. 1, в фаза С		Аналогично схеме рис. 1, б

Из проведенного анализа токовой нагрузки тиристоров в различных схемах ГПК при работе аппарата в режиме нормальных коммутаций следует:

- длительность импульса тока в процессе работы непрерывно меняется в пределах от 0 до π / ω , подчиняясь вероятностным законам;
- характер нагрузки тиристоров при коммутации трехфазных цепей значительно сложнее, чем при коммутации однофазных;
- форма кривых тока в тиристорах в установившемся режиме не зависит от характера отключаемой нагрузки;
- в упрощенных схемах бездуговой коммутации трехфазных цепей (рис.1, в, г) тиристоры более нагружены, чем в основной (рис.1, б);
- общим в характере токовой нагрузки для всех схем является то, что форма кривых тока во всех случаях определяется синусоидальным законом, т.е. все они в какой-то мере являются производными от формы тока в однофазном режиме.

1.Сосков А.Г., Соскова И.А. Полупроводниковые аппараты: коммутация, управление, защита. – К: Каравелла, 2005. – 344 с.

2.Зевеке Г.В., Ионкин П.А. и др. Основы теории цепей. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.

3.Дикань С.В., Намитокоев К.К. Аппараты систем бесперебойного снабжения. – К.: Техніка, 1989. – 184 с.

4.Чебовский О.Г., Моисеев Л.Г., Недошивин Р.П. Силовые полупроводниковые приборы. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 400 с.

Получено 26.02.2007

УДК 693.54

В.П.ШПАЧУК, д-р техн. наук, Д.Н.БАЙДАЛИНОВ

Харьковская национальная академия городского хозяйства

В.В.ДУДКО

Казенное предприятие «Харьковское конструкторское бюро по машиностроению им. А.А.Морозова»

К ЭФФЕКТУ ПОДДИАПАЗОННОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ РЕЗОНАНСНОЙ ЧАСТОТЫ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ ОБЪЕКТОВ НА ВИБРОНАДЕЖНОСТЬ

Рассматриваются вопросы повышения достоверности стендовых испытаний объектов колебательной структуры на механические воздействия. Устанавливается наличие эффекта поддиапазонного перемещения резонансной частоты объекта при переходе от метода испытаний с постоянной амплитудой виброперемещений к методу испытаний с постоянным виброускорением.

При испытаниях объектов на механические воздействия диапазон $\Omega = [\omega_n - \omega_b]$ рабочих частот представляет собой совокупность [1-3]