

Управление полупроводниковым преобразователем изменением светового потока

КОПТЯЕВ Е.Н., ПОПКОВ Е.Н., ИВЛЕВ М.Л.

Управление моментом включения рррп-структуры полупроводникового прибора изменением интенсивности освещения позволило управлять задержкой включения полупроводниковой структуры. Подобный эффект может быть положен в основу прямого управления полупроводниковым преобразователем, что исключает наличие узла синхронизации в составе системы управления выпрямителем и позволяет отказаться от использования сложных элементов. Экспериментально установлено отсутствие снижения надежности работы выпрямителя. Приводятся опытные данные по разбросу регулировочных характеристик тиристоров, взятых из одной партии, откуда следует пропорциональная взаимозависимость фототока и угла открытия тиристора, а также пропорциональность диапазона регулирования тока в разных экземплярах. Использованная в опытах принципиальная схема включения и расчет цепей управления оптотиристорами для заданного диапазона регулирования выходного напряжения позволяет реализовать управление выпрямлением, пропорциональное сигналу задания. Результаты опытов применимы на практике и допускают режимы с длительной непрерывной работой, поскольку при испытаниях не было зафиксировано отказов. Температурный дрейф характеристик может компенсироваться работой отрицательной обратной связи системы управления. Причем не было зафиксировано значительных колебаний выпрямленного напряжения, поскольку это в основном зависит от точности исходного регулирования. Применение такого способа управления наиболее целесообразно в высоковольтных сетях.

К л ю ч е в ы е с л о в а: полупроводниковый преобразователь, тиристор, оптотиристор, фототок, выпрямитель, трехфазная мостовая схема, угол управления

Полупроводниковые выпрямители широко применяются в силовой электротехнике, а используемые в них тиристоры долгое время были одними из самых распространенных типов полупроводниковых приборов в преобразовательной технике. Промышленностью был разработан широкий ряд тиристоров на практически все доступные диапазоны мощностей и напряжений [1–3]. Большинство используемых в промышленности выпрямителей имеют возможность регулирования выходного напряжения, что необходимо для управления мощностью, отдаваемой в нагрузку. Для систем постоянного тока нагрузкой являются как нагревательные элементы, так и различного рода технологические установки. Изменение угла открытия тиристоров обеспечивает регулирование действующего значения напряжения на выходе мостовой схемы выпрямления и, соответственно, отдаваемой в нагрузку мощности [4].

Управление силовыми тиристорами реализуется в импульсном режиме путем подачи тока через управляющий электрод, что требует не только наличия импульсного трансформатора для гальванической развязки системы управления с силовой частью, но и обеспечения необходимых значений длительности и амплитуды управляющего тока [5]. Существуют ограничения на параметры управляющего тока, причем уменьшение энергии управля-

щего импульса может нарушить процесс отпирания тиристора [6] вплоть до прекращения коммутации при понижении значений параметров управляющего импульса ниже пороговых.

Управляемые светом оптоэлектронные тиристоры не смогли заменить обычные тиристоры, однако представляют интерес для использования в преобразовательной технике. С 1980-х годов был освоен выпуск широкой номенклатуры оптотиристоров и оптосимисторов, в том числе и значительной мощности [2, 3]. К преимуществам таких приборов можно отнести наличие гальванической развязки сигналов системы управления от коммутируемой цепи, однако импульсный характер управления, как правило, сохраняется и здесь [7].

На рис. 1 представлена функциональная схема полупроводникового выпрямителя, широко используемая на практике. Выходное напряжение трансформатора выпрямляется трехфазным мостом, сигналы управления которого вырабатывает

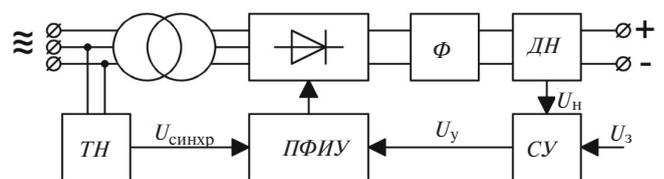


Рис. 1. Функциональная схема полупроводникового выпрямителя

панель фазово-импульсного управления. Она формирует управляющие импульсы, временной сдвиг которых зависит от сигнала управления U_y , получаемого от системы управления. Большинство таких систем имеют обратные связи для задания и стабилизации выходного напряжения U_3 и U_H , необходимые для управления выпрямителем. Кроме того, существует обратная связь по входу, необходимая для синхронизации с питающей сетью и привязки импульсов управления к началу периода в питающей сети. Узел синхронизации с питающей сетью содержит устройство согласования с питающей сетью (понижающий трансформатор либо цепи оптоэлектронной развязки) и является наиболее ответственным узлом, на входе которого – высокое напряжение питающей сети.

Вместе с тем для управляемых светом *pnpn*-структур характерно пороговое значение тока светодиода, обеспечивающее достаточную для отпирания освещенность. Обычно в справочниках указаны значения максимально допустимого тока управления, безопасного для излучающего светодиода, и минимального тока управления, создающего достаточный для отпирания световой поток. Разброс фактических характеристик включения у отдельных экземпляров, как правило, не нормируется и может находиться в широком интервале значений – в зависимости от конкретного экземпляра.

Упомянутый выше разброс характеристик позволил предположить наличие у каждой *pnpn*-структуры интервала значений светового потока, обеспечивающих отпирание в зависимости от внешних факторов – напряжения и скорости нарастания фронтов его полувольт. В таком случае изменением уровня светового потока, падающего на *pnpn*-структуру, возможно прямое преобразование выходного постоянного напряжения системы управления в угол коммутации силовой части выпрямителя.

Из представленной на рис. 2 функциональной схемы, описывающей подобного рода выпрямитель, очевидно значительное упрощение схемотехники выпрямителя: отпадает необходимость в узле синхронизации с питающей сетью, а также в узле фазово-импульсного управления, формирующем дискретные импульсы для отпирания тиристоров. Таким образом, система управления СУ получает два сигнала обратной связи – сигнал задания U_3 и сигнал, пропорциональный выходному напряжению U_H . Выходное напряжение управления напря-

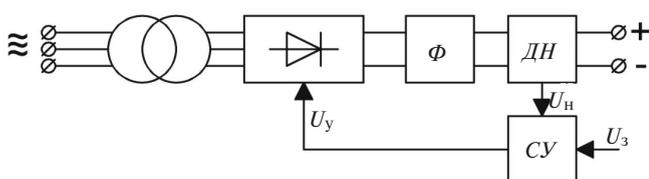


Рис. 2. Функциональная схема полупроводникового выпрямителя

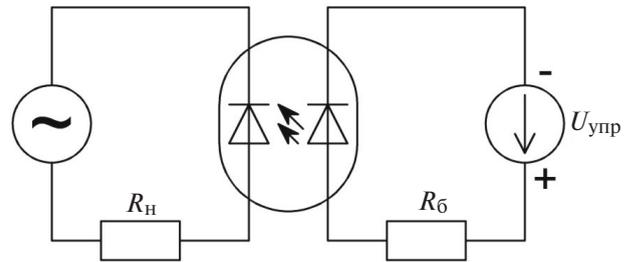


Рис. 3. Принципиальная схема прямого управления световым потоком

мую воздействует на регулируемую светом *pnpn*-структуру, которая преобразует напряжение на светодиоде в пропорциональный угол управления.

Управления *pnpn*-структурой воздействием светового потока может быть востребовано при необходимости создания выпрямителей с малым количеством деталей. Кроме того, отсутствие узла синхронизации с питающей сетью позволяет упростить работу при высоких значениях напряжения.

На рис. 3 представлена простейшая схема для прямого управления *pnpn*-структуры световым потоком. Сопrotивление R_6 предназначено для ограничения тока управления при питании от источника напряжения (выхода СУ). В таком случае фототок будет определяться выражением:

$$I = (U_{упр} - \Delta U) / R_6,$$

где ΔU – падение напряжения на светодиоде, равное приблизительно 1 В.

Результаты измерений характеристик оптотиристоров представлены в таблице, в которой показан диапазон токов управления для разных экземпляров оптотиристоров ТО-132-25. При минимальном токе управления тиристор полностью закрыт, а при максимальном – открывается в самом начале полувольты приложенного напряжения, что соответствует значению угла управления, равному нулю.

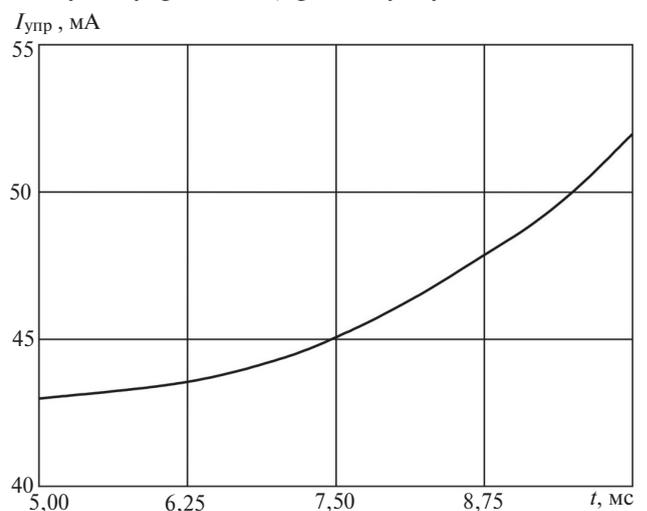
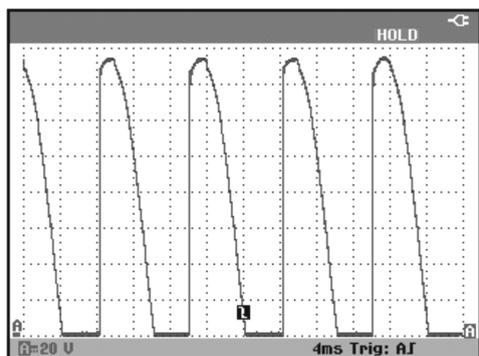


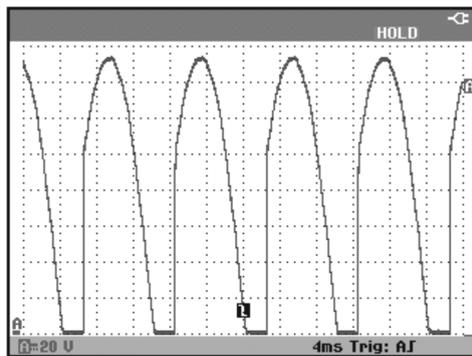
Рис. 4. Зависимость длительности открытого состояния от тока управления для произвольно выбранного экземпляра оптотиристора ТО-132-25

$I_{\text{упр. min}}, \text{ mA}$	$I_{\text{упр. max}}, \text{ mA}$	$\Delta I_{\text{упр}}$	k
27	33	6	0,18
50	63	13	0,21
43	52	9	0,17
46	58	12	0,21
27	32	5	0,19
38	44	6	0,14
55	67	12	0,18
50	60	10	0,17
42	52	10	0,19
53	65	12	0,18

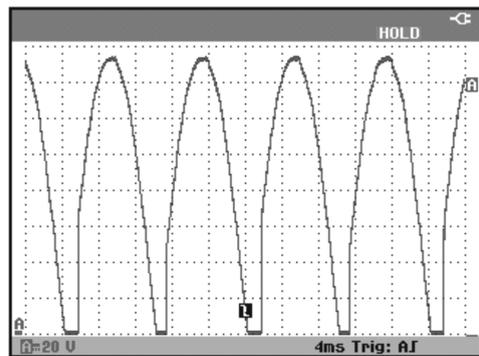
Представленные в таблице результаты в целом закономерны – при малых токах управления отпирание *pnpn*-структуры затруднено и происходит при максимальных значениях коммутируемого напряжения, при большем значении тока происходит более раннее отпирание с меньшими значениями коммутируемого напряжения. В регулировочной характеристике наблюдается характерная зависимость: отношение разности минимального и максимального значений тока управления к его максимуму в первом приближении имеет сравнимое значение для всех экземпляров, что говорит о закономерности. Значение коэффициента пропорциональности $k = I_{\text{упр. max}} / \Delta I_{\text{упр}}$ приведено в таблице, из которой очевиден ограниченный разброс его значений для большей части экземпляров.



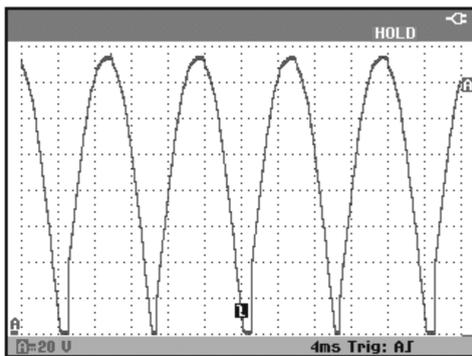
а)



б)



в)



г)

Рис. 6. Осциллограммы выходного напряжения опытного выпрямителя при различных уровнях управляющего напряжения: а – при напряжении 4,8 В; б – 5,0 В; в – 5,2 В; г – 5,4 В

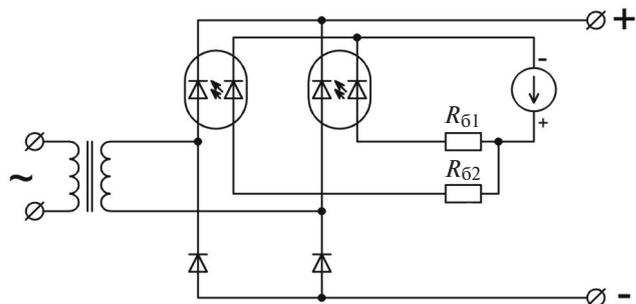


Рис. 5. Упрощенная схема однофазного выпрямителя с прямым управлением *pnpn*-структуры световым потоком

На рис. 4 представлена характеристика зависимости «ток управления – продолжительность открытого состояния» для случая периода полуволн 10 мс (50 Гц), из которой виден ее экспоненциальный характер.

Приведенные в [8] выражения для управляемой световым потоком *pnpn*-структуры при воздействии слабым сигналом описывают происходящие процессы. Предлагается модель двухступенчатого механизма включения, обусловленная пороговой зависимостью коэффициента передачи тока *pnpn*-транзистора ($\alpha_{pnp} = 0$ при фототоке, меньшем некоторого порога, и $\alpha_{pnp} > 0$ при превышении порога). Модель предлагает нелинейную зависимость момента отпирания от значения управляющего тока и в целом совпадает с опытными данными, приведенными в таблице. Подобная зависимость показывает возможность реализации управления

оптотиристорами не моментом подачи управляющего тока, а его уровнем. Представленная на рис. 4 зависимость времени открытия тиристора от тока управления имеет вид экспоненты, что в общем виде подтверждает предлагаемую в [8] модель включения тиристора.

Зависимость имеет достаточную крутизну, что означает приемлемый диапазон изменения управляющего тока, который делает возможным создание системы управления, упрощенно показанной на рис. 5 с управлением по катодной группе тиристор.

На рис. 6 приведены осциллограммы напряжения при различных углах отпирания тиристор, управляемых световым потоком. Измерения проводились при напряжении питающей сети 220 В и нагрузке около 50 Ом. Значения балластных сопротивлений $R_{б1}$ и $R_{б2}$ были подобраны для выравнивания регулировочных характеристик оптотиристор и благодаря малому разбросу значений коэффициента k обеспечивают равномерное управление. Разброс значений момента отпирания тиристор при этом определялся в основном погрешностью подбора балластных сопротивлений в цепи питания фотодиодов.

Главное преимущество управляемых световым потоком приборов — отсутствие необходимости в импульсных трансформаторах для гальванической развязки системы управления от силовых цепей. При этом в предлагаемом варианте не нужна также и синхронизация управляющих импульсов с питающей сетью, что существенно упрощает выпрямительную установку.

При работе выпрямителя не было выявлено отказов оптотиристор, т.е. подтверждена надежность такого способа регулирования. Это можно объяснить тем, что работа оптотиристора по сути мало отличается от функций обычного тиристора, включение которого характеризуется наличием участка отрицательного дифференциального сопротивления на ВАХ прибора при достижении суммарного коэффициента передачи по току $\alpha=1$ [5] с высокой крутизной. Таким образом, процесс носит лавинообразный характер, что и обеспечивает на-

дежную работу при управлении световым потоком [9–11].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рыбак Р.И., Тетерьвова Н.А., Белая С.Н., Насекан О.С. Новые типы силовых оптронных тиристор. — Электротехника, 1988, № 5, с. 5–6.
2. Григорьев О.П., Замятин В.Я., Кондратьев Б.В., Пожидаев С.Л. Тиристоры: справочник. М.: Радио и связь, 1990, 272 с.
3. Силкин Е.И. Оptronные тиристоры в управляемых выпрямителях большой мощности. — Компоненты и технологии, 2009, № 11, с. 79–86.
4. Аверин С.В., Следков Ю.Г. Сравнение способов регулирования переменного напряжения с помощью коэффициента регулирования. — Практическая силовая электроника, 2005, № 20, с. 27–29.
5. Пасынков В.В., Чиркин Л.К. Полупроводниковые приборы. СПб.: Лань, 2002, 480 с.
6. Ансельм А.И. Введение в теорию полупроводников: учебное пос. СПб.: Лань, 2008, 624 с.
7. Волле В.М., Воронков В.Б., Грехов И.В., Левинштейн М.Е., Сергеев В.Г., Чашников И.Г. Мощный полупроводниковый коммутатор наносекундного диапазона, управляемый импульсом света. — Электротехника, 1981, № 6, с. 45–47.
8. Евсеев Ю.А. К вопросу о включении *rprn*-структуры светом. — Электротехника, 2006, № 10, с. 19–20.
9. Булатов О.Г., Гуния Р.Г., Дерменжи П.Г., Ковров А.М., Одынь С.В. Влияние режима коммутации на время выключения тиристор ТБК171. — Электротехника, 1988, № 5, с. 38–43.
10. Беспалов Н.Н., Гейфман Е.М. Экспериментальное исследование площади начального включения и потерь в тиристорах при включении по цепи управления. — Электротехника, 1996, № 1, с. 48–51.
11. Бардин В.М., Пономарев Е.П. Надежность силовых полупроводниковых приборов при работе в циклических режимах. — Электротехника, 1998, № 10, с. 59–61.

[26.08.2019]

А в т о р ы: Коптяев Евгений Николаевич — Аспирант Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

Попков Евгений Николаевич — доктор техн. наук, заведующий кафедрой Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, диссертацию защитил в 2004 г.

Ивлев Марк Леонидович — кандидат техн. наук, директор филиала Северного (арктического) федерального университета в Северодвинске, диссертацию защитил в 2006 г.

Controlling a Semiconductor Converter by Changing the Light Flux

КОПТЯЙЕВ Eugene N. (Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia) — Ph. D.-student

ПОПКОВ Eugene N. (Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia) — Head of the Department, Dr. Sci. (Eng.)

ИВЛЕВ Mark L. (Branch of Northern (Arctic) Federal University, Severodvinsk, Russia) — Director; Cand. Sci. (Eng.)

Controlling the semiconductor device pnpn-structure switching-on moment by changing the illumination intensity opened the possibility to control the semiconductor structure switching-on delay moment. Such effect can be laid at the heart of a semiconductor converter direct control technology. With such technology, there is no need to have a synchronization unit in the rectifier control system, and it becomes possible to do away with using complex elements. It has been shown experimentally that there is no degradation in the rectifier operation reliability. Experimental data on the scatter in the adjustment characteristics of thyristors taken from the same batch are given. It follows from these data that there is a proportional dependence between the photocurrent and thyristor opening angle, and that there is a proportionality of the current adjustment range in different specimens. By applying the basic electric circuit used in the experiments and using the results from calculating the optothyristor control circuits for the specified output voltage adjustment range, it becomes possible to implement control of the rectifier output proportional to the setpoint (reference) signal. The obtained experimental results can be applied in practice and allow continuous operation modes to be realized, because no failures were recorded during the tests. The temperature drift of the characteristics can be compensated by operation of the control system's negative feedback. No significant fluctuations of the rectified voltage were recorded, because this mainly depends on the initial control accuracy. The application of this control method is most relevant in high-voltage networks.

Key words: semiconductor converter, thyristor, optothyristor, photocurrent, rectifier, three-phase bridge circuit, control angle

REFERENCES

1. Rybak R.I., Teter'vova N.A., Belaya S.N., Nasekan O.S. *Elektrotehnika – in Russ. (Electrical Engineering)*, 1988, No. 5, pp. 5–6.
2. Grigor'yev O.P., Zamyatin V.Ya., Kondrat'yev B.V., Pozhidaev S.L. *Tiristory: spravochnik (Thyristors: Handbook)*. Moscow, Radio and svyaz', 1990, 272 p.
3. Silkin Ye.I. *Komponenty i tekhnologii – in Russ. (Components and Technologies)*, 2009, No. 11, pp. 79–86.
4. Averin S.V., Sledkov Yu.G. *Prakticheskaya silovaya elektronika – in Russ. (Practical Power Electrical Engineering)*, 2005, No. 20, pp. 27–29.
5. Pasyukov V.V., Chirkin L.K. *Poluprovodnikovye pribory (Semiconductor apparatus)*. St. Petersburg, Lan', 2002, 480 p.
6. Ansel'm A.I. *Vvedeniye v teoriyu poluprovodnikov: uchebnoe pos. (Introduction to theory of semiconductors: teaching aid)*. St. Petersburg, Lan', 2008, 624 p.
7. Volle V.M., Voronkov V.B., Grekhov I.V., Levinshtein M.Ye., Sergeev V.G., Chashnikov I.G. *Elektrotehnika – in Russ. (Electrical Engineering)*, 1981, No. 6, pp. 45–47.
8. Yevseyev Yu.A. *Elektrotehnika – in Russ. (Electrical Engineering)*, 2006, No. 10, pp. 19–20.
9. Bulatov O.G., Guniya R.G., Dermenzhi P.G., Kovrov A.M. *Elektrotehnika – in Russ. (Electrical Engineering)*, 1988, No. 5, pp. 38–43.
10. Bespalov N.N., Geifman Ye.M. *Elektrotehnika – in Russ. (Electrical Engineering)*, 1996, No. 1, pp. 48–51.
11. Bardin V.M., Ponomarev Ye.P. *Elektrotehnika – in Russ. (Electrical Engineering)*, 1998, No. 10, pp. 59–61.

[26.08.2019]