

Тиристоры с оптическим управлением

для импульсной энергетики

Для построения импульсных энергетических установок необходимы твердотельные коммутаторы. Для этих целей наиболее предпочтительно использование фототириستоров (ФТ) — ввиду простоты их последовательного включения и надежного способа оптического управления запуском. Более того, современные ФТ, рассмотренные в данной статье, предусматривают интеграцию в них таких защитных функций, как, например, защита от перенапряжения и защита по dv/dt .

Дж. Пржибилла
(J. Przybilla),
Р. Келлер (R. Keller),
У. Кельнер (U. Kellner),
Х.-Я. Шульце
(H.-J. Schulze),
Ф.-Я. Нидерностахейде
(F.-J. Niedernostheide),
Т. Пеппель (T. Peppel)

Перевод:
Анатолий Бербенец

berben@efo.ru

Конструкция ФТ

ФТ известны еще с 60-х годов прошлого века. Одна из задач, решаемых на заре их проектирования, заключалась в выборе достаточно мощного и недорогого источника света для запуска. Предпочтение было отдано лазерным диодам (ввиду их широкого использования в коммуникационных системах). В 1995 г. компания Еурес (с 2006 г. — Infineon Technologies) разработала 4-дюймовый фототиристор на напряжение 8 кВ, пригодный для реализации твердотельных коммутаторов. Поскольку ФТ были ориентированы на применение в высоковольтных цепях постоянного тока, их оснастили защитами от перенапряжения и по dv/dt . Оба вида защиты полностью интегрированы в тиристор. ФТ, подобно электрически управляемым тиристорам, изготавливаются с использованием тех же хорошо зарекомендовавших себя технологий. Единственное отличие между элементами данных типов заключается в наличии у ФТ светочувствительной управляющей области со встроенными защитными элементами по центру (рис. 1).

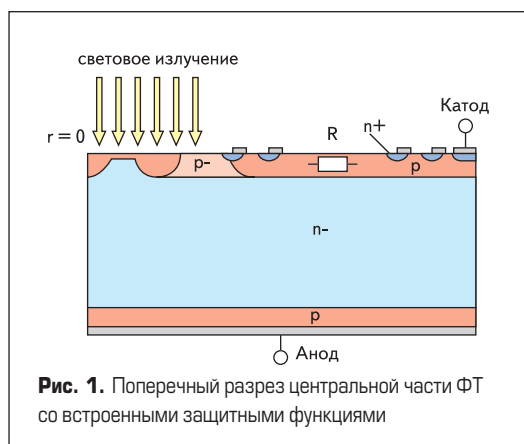


Рис. 1. Поперечный разрез центральной части ФТ со встроенными защитными функциями

Запуск ФТ осуществляется световым импульсом мощностью 40 мВт, который генерируется лазерным диодом. Длина волны излучаемого света должна лежать в пределах 850–1000 нм. Длительность импульса обычно составляет около 10 мкс. Импульс света передается по специальному световоду к светочувствительной области ФТ.

Центральная часть ФТ образована пусковым диодом (Breakover Diode — BoD) и множественной структурой усилительных ячеек (AG — Amplifying Gate). BoD-диод расположен внутри светочувствительной области. Если прямое падение напряжения превысит напряжение пробоя BoD-диода, то возникший лавинный ток BoD-диода запустит ФТ. Дальнейшее отпирание ФТ поддерживается AG-структурой. Структура BoD-диода разработана с учетом работы ФТ на частоте 50 Гц (60 Гц) и в пределах широких диапазонов температур и значений скорости нарастания тока (di/dt). Встроенная защита от быстрого нарастания напряжения (dv/dt) реализована подстройкой чувствительности к dv/dt на самом внутреннем усилительном каскаде AG-структуры. Таким образом, в случае появления импульса напряжения с чрезмерно высокой скоростью нарастания, возникший ток смещения запустит ФТ, а благодаря хорошему распределению тока с помощью AG-структуры дальнейшее отпирание тиристора будет происходить безопасным образом. Надежность этой защитной функции проверена в широких диапазонах изменения dv/dt и температуры. Способность работы с большой величиной di/dt реализована за счет интеграции в AG-структуру резистора (рис. 1), позволяющего контролировать скорость нарастания тока. Испытания показали, что фототиристоры с таким внутренним резистором способны оперировать с величинами di/dt до 10 кА/мкс при работе с одиночным импульсом и до 5 кА/мкс при периодической работе (60 Гц).

Сборка ФТ и блоки управления

Фототиристоры для применений в импульсной энергетике

Компания Еурес разработала несколько типов фототиристоров и один специальный диод для использования в импульсных энергетических установках (см. таблицу). Все представленные здесь ФТ являются симметрично-блокирующими со встроенными ВоD-диодом и защитой по dV/dt . До настоящего времени компания Еурес выпустила свыше 5000 фототиристоров; большинство из них используются в высоковольтных линиях передачи постоянного тока, статических преобразователях реактивной мощности, устройствах плавного запуска и импульсных энергетических установках.

Сборки фототиристоров

При участии клиентов был разработан специальный тип секционного монтажа для обработки высоковольтной последовательной цепочки фототиристоров. При таком секционировании (рис. 2) последовательно включены 14 ФТ (2×7 ФТ). Параллельно к каждому ФТ подключен резистор. Это необходимо для равномерного распределения между ФТ общего приложенного к секционной сборке напряжения. Стяжные шпильки сборки изготовлены из углеродного волокна, и необходимо при работе с ними избегать образования острых краев, которые могут стать причиной возникновения значительной напряженности электрического поля. В данном применении блок запуска установлен в нижней части секционной сборки.

Запуск фототиристоров

Фототиристоры используются в разнообразных применениях и работают в различных окружающих условиях. Это требует адаптации поведения блока запуска. Например,

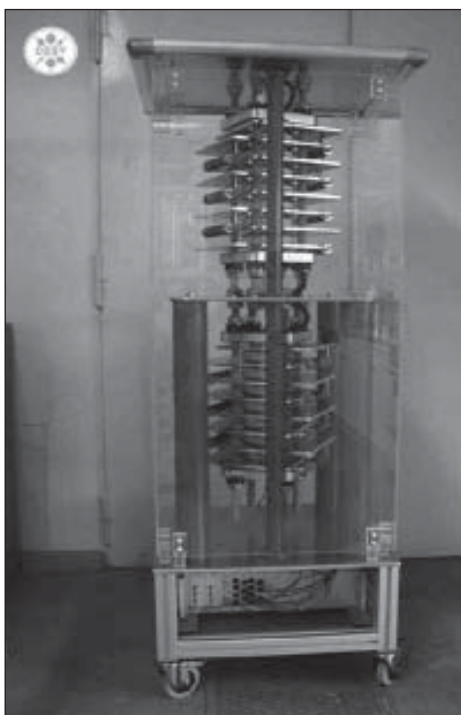


Рис. 2. Секционная сборка фототиристоров

Таблица. Ассортимент продукции Еурес для применений в импульсной энергетике

Тип	Блокирующее напряжение, кВ	Напряжение ВоD, кВ	Размер, дюйм	Ударный ток ($t_{имп} = 700$ мкс), кА
T1503NH	8	7,5	4	90
T2563NH	8	7,5	5	126
T4003NH	5,2	5,2	5	210
D2601NH	9	—	3	104
T553N*	7	6,5	2	24

Примечание:* — дальнейшая информация приведена в разделе «Перспективы»

в системах анализа кабелей оборудование целиком размещено в автомобиле, и поэтому расстояние между системой управления, драйверами ФТ и фототиристорами очень мало. В других же применениях расстояние между компонентами системы значительно больше.

В некоторых применениях с малым значением di/dt требуется генерация пакета импульсов. В большинстве других импульсных силовых применений вполне достаточно генерации одиночного импульса.

Для удовлетворения разнообразных требований был разработан универсальный драйвер ФТ LFTD18 (Light Fired Thyristor Driver). Для простоты использования в него были интегрированы все функции, необходимые для безопасного запуска. LFTD18 способен запустить как один, так и 18 ФТ одновременно. Структура драйвера показана на рис. 3.

Генерация сигнала и импульса запуска

Для запуска LFTD18 система управления должна сформировать импульс длительностью не менее 20 мкс. LFTD18 поддерживает два способа запуска: световым или электрическим импульсом. Для запуска световым импульсом драйвер выполняет преобразование входного импульса в один или несколько световых мощностью 40 мВт.

Для передачи светового импульса по оптоволокну используется универсальный модуль HFBR1528/HFBR2828 компании HP/Agilent. Из соображений безопасности необходим второй оптический приемник для подключения дополнительного входного сигнала. В этом случае оба входных канала пропускаются через оптический логический элемент ИЛИ (рис. 4а).

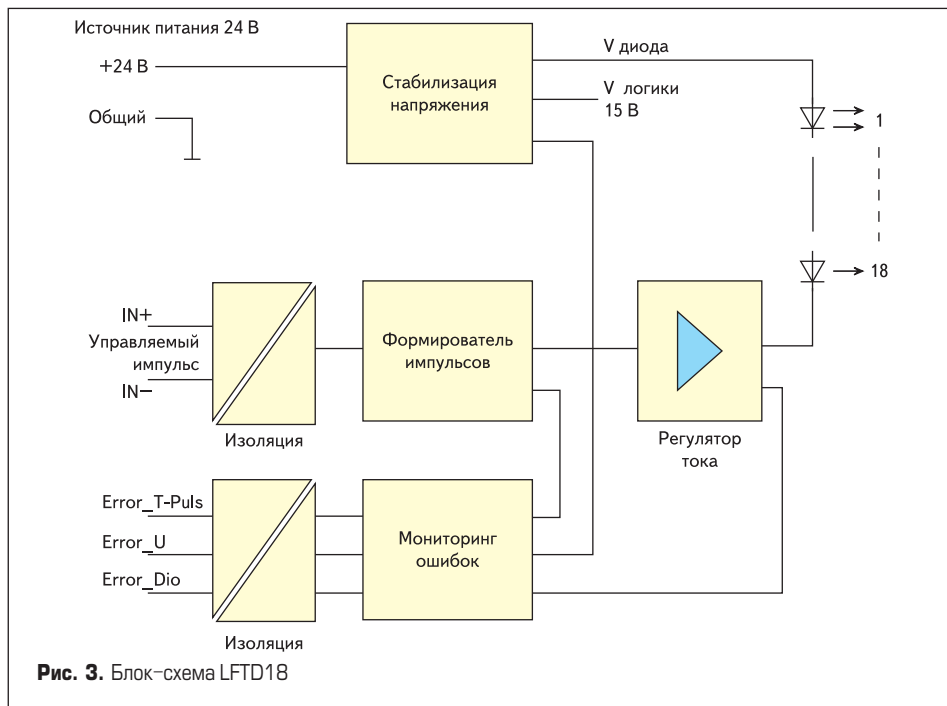


Рис. 3. Блок-схема LFTD18

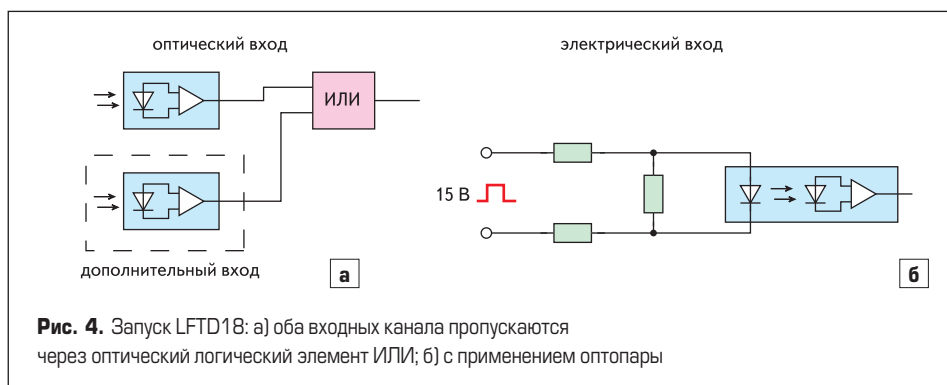


Рис. 4. Запуск LFTD18: а) оба входных канала пропускаются через оптический логический элемент ИЛИ; б) с применением оптопары

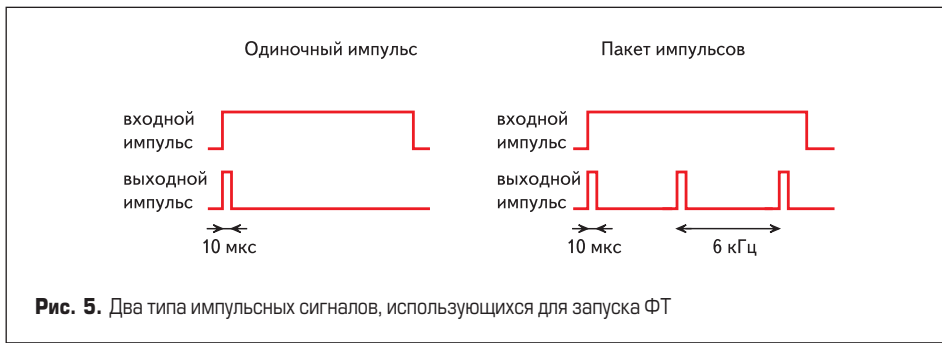


Рис. 5. Два типа импульсных сигналов, использующихся для запуска ФТ

Для электрического запуска применяется оптопара (рис. 4б). Входной каскад отвечает за преобразование формы входного импульса. В зависимости от назначения входной импульс преобразуется либо в одиночный импульс длительностью 10 мкс, либо в пакет импульсов, следующих с частотой 6 кГц (рис. 5).

Как уже упоминалось, для безопасного запуска фототиристоров в пределах их всего рабочего диапазона необходим световой импульс мощностью 40 мВт. При амплитуде тока 0,9 А длительность электрического импульса, управляющего лазерным диодом, не должна превышать 10 мкс. В противном случае мощность, рассеиваемая лазерным диодом, будет чрезмерной. Для более быстрого отпирания фототиристоров рекомендуется пропускать повышенный ток в течение первых 2 мкс импульса (ступенчатая форма импульса показана на рис. 6). Если быстрая коммутация не требуется, то отпадает необходимость и в генерации ступенчатого импульса, однако потребность в нем возникает при параллельной коммутации ФТ.

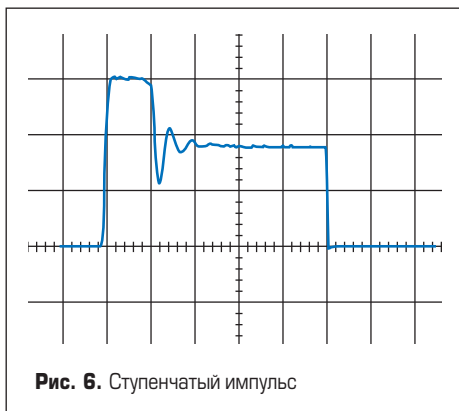


Рис. 6. Ступенчатый импульс

Для повышения тока, поступающего через лазерный диод, выбрана соответствующая рабочая точка и применен каскад опережающего управления (рис. 7). Поскольку через лазерный диод протекает повышенный ток, требуемая для запуска ФТ световая мощность создается за более короткий интервал времени.

Мониторинг LFTD18

Мониторинг сигналов LFTD18 необходим для обеспечения безопасного запуска тиристора, длительного срока службы связи драйвер-тиристор и высокой надежности в течение всего периода эксплуатации. Тем не менее безопасный запуск тиристора возможен также

и с помощью драйвера, не поддерживающего специальные функции управления.

Управление лазерным диодом без соблюдения всех имеющихся ограничений снижает ожидаемый срок службы. С другой стороны, во многих случаях очень важно, чтобы драйвер и тиристор продолжали работу даже при возникновении ошибок. Таким образом, даже после поступления в систему сигналов об ошибках драйвер должен продолжать работать.

Все ошибки должны быть заблокированы. После проверки корректности функциониро-

вания драйвера генерируется импульс сброса, который подавляет все сигналы ошибок. Такой импульс формирует система управления (только электрический импульс) или собственно драйвер (автоматический сброс).

Недопустимое снижение напряжения

Контролю подвергаются также внутренние напряжения LFTD18 и напряжение питания 24 В. Если возникает недопустимое снижение напряжения, драйвер передает системе управления сигнал ошибки и предпринимает попытку остановить все процессы. В случае дальнейшего снижения напряжения отключаются выходные импульсы драйвера, так как в этой ситуации нельзя гарантировать безопасность управления тиристором.

Отклонение длительности импульса

Интегрированный в LFTD18 блок мониторинга также следит за корректностью преобразования входных электрических импульсов

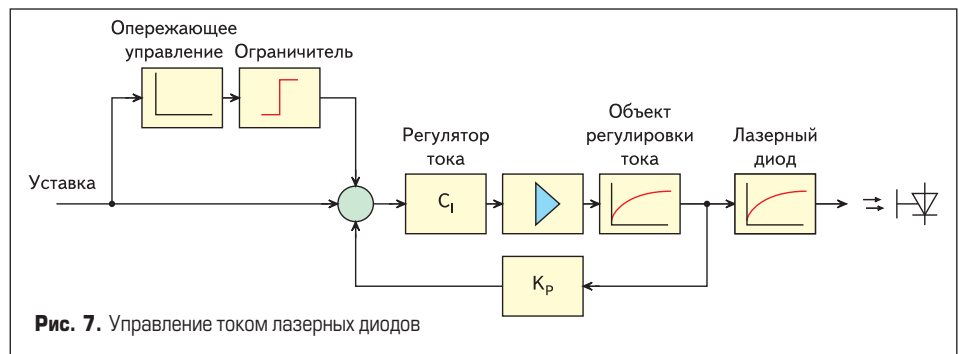


Рис. 7. Управление током лазерных диодов

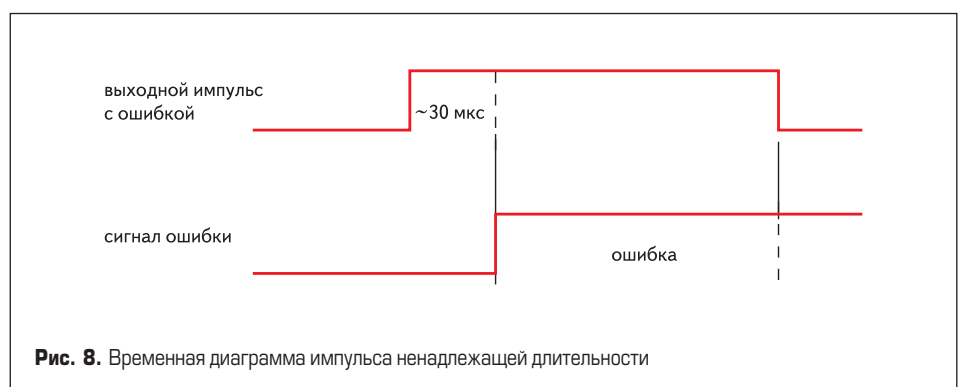


Рис. 8. Временная диаграмма импульса ненадлежащей длительности

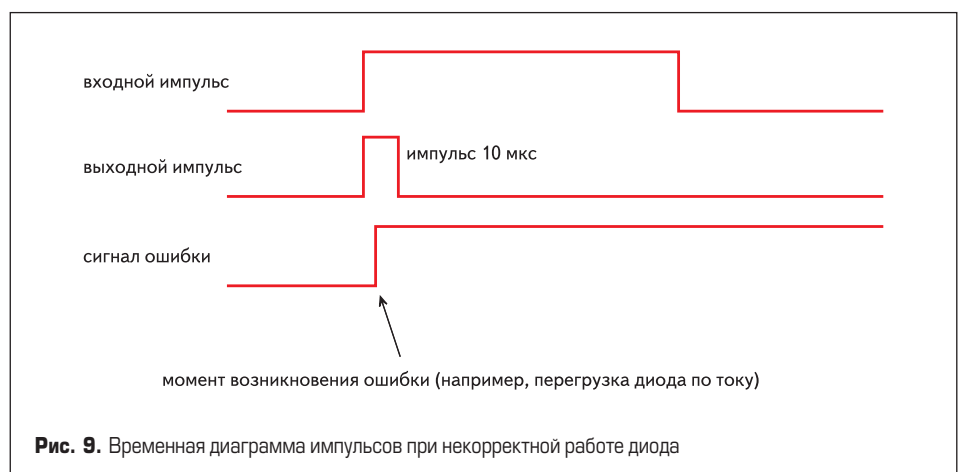


Рис. 9. Временная диаграмма импульсов при некорректной работе диода

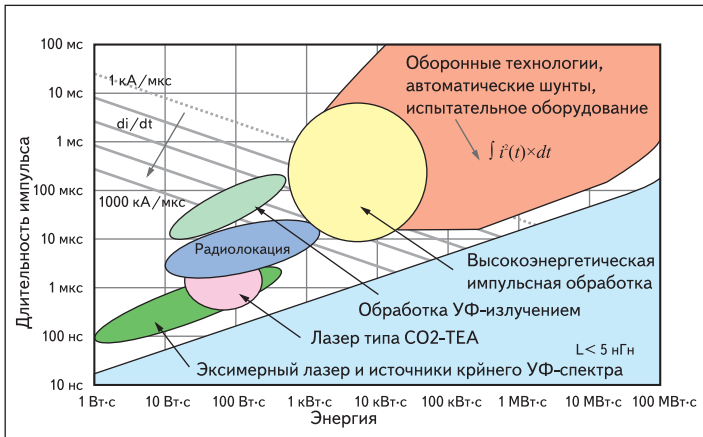


Рис. 10. Применения в импульсной энергетике

в выходные импульсы длительностью 10 мкс. Это необходимо для ограничения рассеиваемой лазерным диодом мощности. Сигнал ошибки генерируется при обнаружении слишком длительных выходных или слишком часто повторяющихся входных импульсов (рис. 8).

Некорректная работа диода

Возможны два варианта некорректной работы диода. Первый проявляется при ошибках регулировки тока. Так происходит, когда LFTD18 неисправен или сигнал управления имеет недостаточный уровень. Другой вариант проявляется, когда лазерный диод оказывается короткозамкнутым. Такую ситуацию можно обнаружить по падению напряжения на нем (рис. 9).

В стандартной конфигурации при возникновении сигнала ошибки выходной импульс не отключается автоматически (кроме ошибки недопустимого снижения напряжения). Тем не менее добиться такого отключения возможно (по запросу). Более того, все сигналы об ошибках можно объединить в один оптический сигнал ошибки (передатчик HFBR2815 (HP/Agilent), по запросу).

Применения в импульсной энергетике

На рис. 10 приведены различные области применения ФТ в импульсной энергетике. Длительности импульсов изменяются от нескольких десятых микросекунд до ста миллисекунд. Энергия импульсов охватывает широкий энергетический интервал: от 1 Вт·с в лазерных применениях до 5 МВт·с в устройствах автоматического шунтирования при перенапряжении.

Далее рассмотрены применения, в которых целесообразно использовать ФТ, приведены примеры реализованных проектов.

Устройства автоматического шунтирования при перенапряжении

Устройства автоматического шунтирования при перенапряжении предназначены для защиты дорогостоящего оборудования в случае возникновения неисправностей.

Выполненные проекты:

- Автоматический шунт на постоянное напряжение 55 кВ (5 кА/мкс), состоящий из 14 последовательно включенных ФТ типа T1503NH75TS02, для защиты клистронов источника питания передатчика в исследовательском центре DESY, г. Гамбург (Германия; см. также рис. 2).
- Два автоматических шунта на постоянное напряжение 130 кВ (5 кА), состоящие из 52 последовательно включенных ФТ типа T553N70TOH (Испания).
- Четыре автоматических шунта (35 кВ/80 кА), состоящие из 6 ФТ T2563N75TS01 в последовательном включении с 2 параллельными секциями (Италия).

Система передачи энергии (PTST)

Выполненный проект:

- Четыре системы передачи энергии (35 кВ, 80 кА, 200 А/мкс, 700 мкс), состоящие из 6 последовательно включенных ФТ типа T2563N75TS01 и 2 параллельных секций (Италия).

Системы анализа кабелей

Основой систем анализа кабелей является аппаратура диагностики и локализации повреждений в высоковольтных кабельных сетях (до 250 кВ) методом измерения частичных разрядов (рис. 11).

Выполненные проекты:

- Система анализа кабелей, состоящая из 40 последовательно включенных ФТ типа T553N70TOH; встречно-параллельно с каждым тиристором включен диод типа D711N68T (Швеция).
- Передвижная система анализа кабелей (60 кВ), состоящая из 18 последовательно включенных ФТ типа T553N70TOH (Германия).

Магнитно-импульсная формовка

Магнитно-импульсная формовка предназначена для соединения двух и более трубчатых конструкций. Преимуществами такого метода являются высокая производительность и высокое качество образуемой структуры.

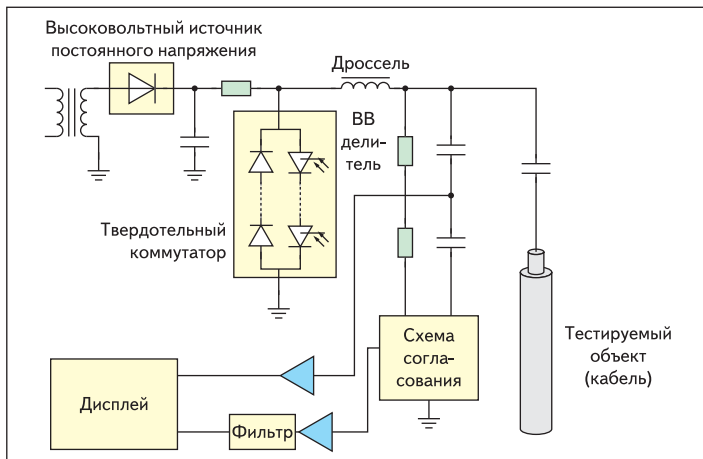


Рис. 11. Схема системы анализа кабелей

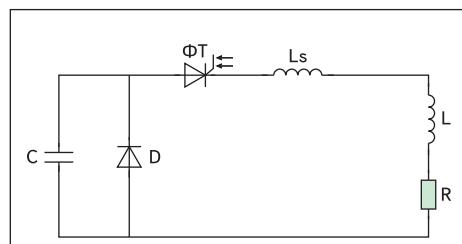


Рис. 12. Схема устройства магнитной формовки

Выполненный проект:

- Система магнитно-импульсной формовки (6 кВ, 35 кА, 5 кА/мкс), состоящая из ФТ типа T1503NH75TOH (Германия).

Перспективы

ФТ на напряжение 13 кВ

Компания Euprec (Infineon Technologies) ведет разработку асимметричных ФТ на напряжение 13 кВ. За счет последовательного включения таких тиристоров с диодом на 13 кВ и их размещения в едином корпусе типа PRESS-PAK можно легко создать симметрично-блокирующий тиристор на напряжение 13 кВ.

Теоретические и экспериментальные исследования показали, что такая комбинация позволяет снизить потери мощности по сравнению с одним твердотельным симметрично-блокирующим тиристором, в частности — для высоковольтных линий передачи постоянного тока.

Увеличение di/dt

Целевым значением di/dt для ФТ, используемого в применениях импульсной энергетике, является 15 кА/мкс при максимальном токе до 100 кА. Для достижения такого значения сейчас продолжаются исследования процесса отпирания фототиристоров.

2-дюймовые ФТ с повышенным di/dt

На основе T553N70TOH разрабатывается 2-дюймовый ФТ с улучшенным параметром di/dt. Такой вид ФТ может использоваться в применениях с большими значениями di/dt

и максимальными токами до 10 кА. Типичные примеры — лазерные системы.

38-мм ФТ

Для применений с максимальными токами до 4 кА разрабатываются небольшие ФТ с диаметром таблетки 38 мм и блокирующей способностью 7 кВ. Данный вид тиристоров необходим в таких применениях, как лазеры с электронным запуском и др.

Новые методы для мониторинга драйверов

На данный момент мониторингу подвергаются только электрические характеристики.

При монтаже приемного и передающего диодов в одном корпусе появляется возможность контролировать оптические свойства лазерного диода. Точный анализ интенсивности свечения позволяет обнаружить изменения оптических характеристик диода, например изменение интенсивности свечения с учетом световода и т. п.

В критичных к безопасности применениях, например в автоматическом шунтировании при перенапряжении, необходим непрерывный мониторинг драйвера. Для выполнения данного требования мониторинг лазерных диодов выполняют в отключенном состоянии. Для этого формируют импульсы ультракороткой длительности, которые позволяют драйверу

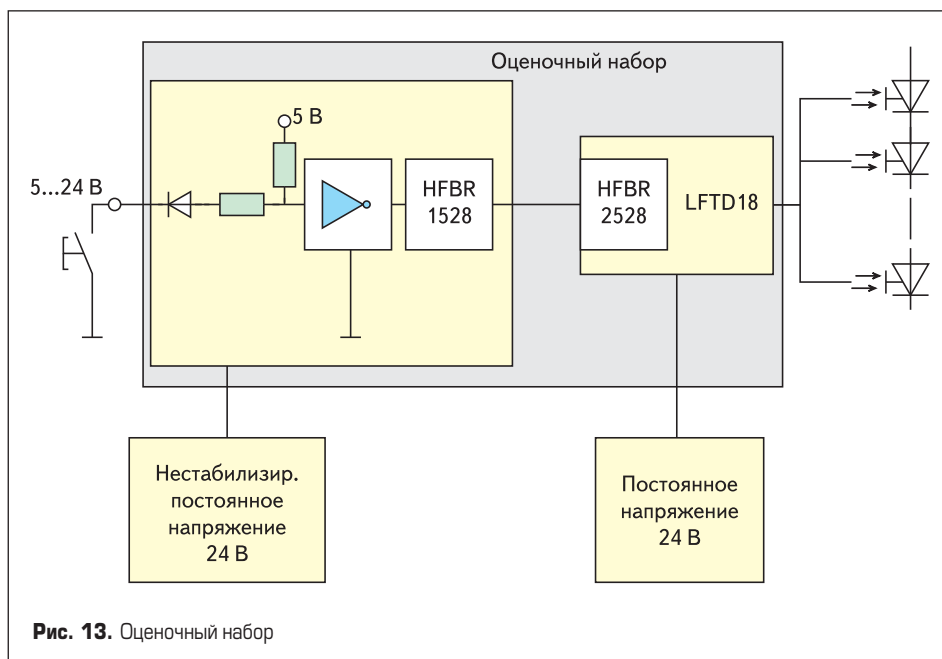


Рис. 13. Оценочный набор

проанализировать состояние лазерных диодов и при этом не приводят к запуску ФТ.

Поддержка проектирования

Для минимизации длительности проектирования компании Еурес и М&Р предлагают оценочные наборы, выполненные на основе

LFTD18 с оптическим входом. Оценочный набор (рис. 13) состоит из LFTD18 и платы передатчика HFBR1528 для запуска LFTD18. Запуск LFTD18 инициируется установкой уровня 0 В на входе платы передатчика HFBR1528. Предусмотрен запуск ФТ с помощью платы микроконтроллера или с помощью кнопки.