

# Обратный ток в синхронных выпрямителях

Виктор Жданкин (г. Москва)

Для обеспечения приемлемых энергетических характеристик в современных модулях питания с низкими выходными напряжениями и большими токами нагрузки применяется синхронное выпрямление. Замена диода Шоттки на MOSFET повышает эффективность, так как прямое падение напряжения на MOSFET более низкое благодаря его меньшему сопротивлению в открытом состоянии (и, следовательно, ниже потери) по сравнению с диодом. Работа двух MOSFET в данной схеме должна быть синхронизирована таким образом, чтобы они открывались и закрывались попеременно. Разработчики должны знать о некоторых проблемах, возникающих при проектировании синхронных выпрямителей. Об одной из этих проблем – токе через внутренний диод MOSFET во время необходимых задержек на переключение транзистора – рассказано в данной статье, которая является авторским переводом работы [1].

Синхронное выпрямление применяется в DC/DC-преобразователях с низкими выходными напряжениями и большими токами для достижения высокого КПД и повышения удельной мощности. Когда для выпрямления диод заменяется полевым транзистором MOSFET, необходимо помнить об одном важном различии между диодом и MOSFET: диод является однонаправленным устройством, тогда как MOSFET представляет собой двунаправленное устройство. Диод проводит ток в одном направлении, от анода к катоду, тогда как MOSFET допускает двунаправленный ток от стока к истоку и от истока к стоку. Так или иначе, неважно каким образом работает преобразователь, диод блокирует обратный ток, тогда как MOSFET этого не делает.

Синхронное выпрямление может воздействовать на постоянный ток в выходном дросселе, и ток становится отрицательным в режиме холостого

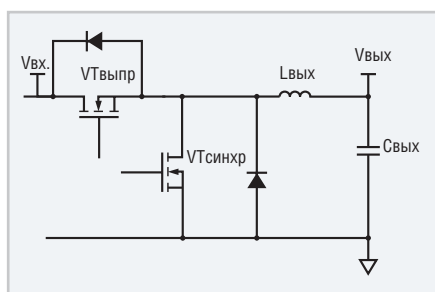


Рис. 1. а. Неизолированный понижающий DC/DC-преобразователь, сконфигурированный для синхронного выпрямления

хода или при низкой нагрузке. Обратный ток кроме снижения эффективности при низкой нагрузке может быть причиной повреждения источника питания. Следовательно, чтобы предотвратить серьёзный отказ при применении синхронного выпрямления, явление обратного тока должно быть контролируемым. Это справедливо для неизолированных понижающих преобразователей, а также для изолированных DC/DC-преобразователей в тех случаях, когда синхронное выпрямление используется на вторичной стороне преобразователя. На рис. 1 показаны упрощённые схемы изолированного и неизолированного DC/DC-преобразователей, сконфигури-

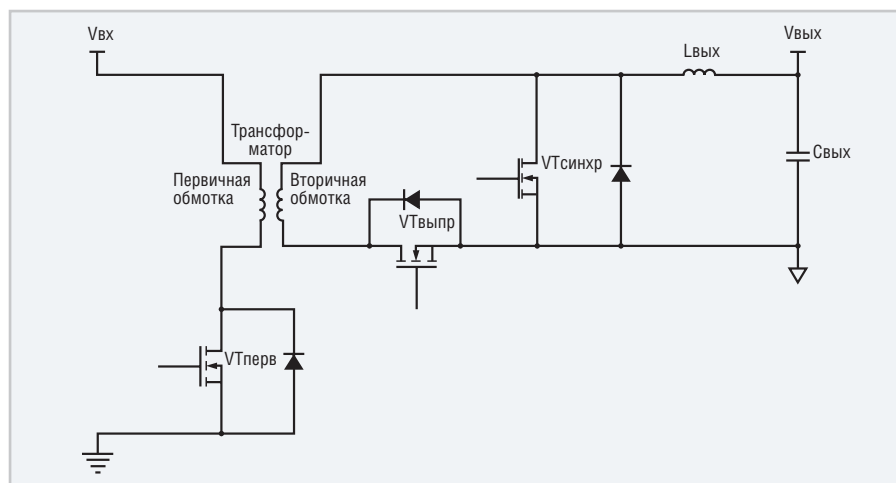


Рис. 1б. Изолированный DC/DC-преобразователь, сконфигурированный для синхронного выпрямления.

Примечание: показанные диоды являются встроенными (интегральными) в структуру транзистора

рованных для синхронного выпрямления.

Существует много способов управления затворами MOSFET в синхронных выпрямителях. Одним из широко распространённых методов является применение комплементарных импульсов для управления выпрямительным транзистором (VTвыпр) и синхронным транзистором (VTсинхр) с задержкой между импульсами для предотвращения одновременной проводимости верхнего и нижнего транзисторов. На рис. 2а и 2б показаны распределения временных интервалов напряжения управления затвором в неизолированном понижающем преобразователе, оптимизированные для обеспечения эффективности предотвращением пересекающейся проводимости транзисторов.

Обратный ток в синхронных выпрямителях может возникать в различных ситуациях. Например, он может возникнуть во время выключения источника питания в режиме холостого хода или неполной нагрузки, при включении предварительного смещения, отключения источника питания во время срабатывания защиты от перенапряжения (OVP) или перегрузки по току (OCP), или во время динамического изменения нагрузки от полной до холостого хода или близкой к холостому ходу и во время резкого снятия нагрузки. Проблема обратного тока объясняется различием харак-

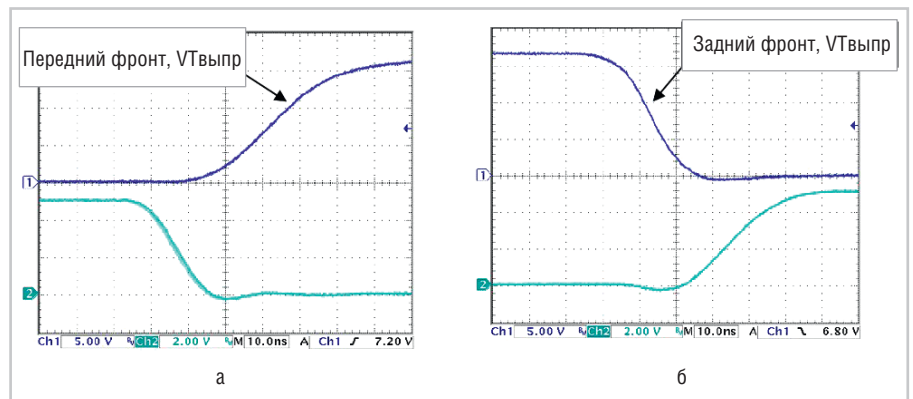
теристик диодов и MOSFET. В любом случае при использовании преобразователя с синхронным выпрямлением обратный ток должен тщательно контролироваться, иначе обратный ток может быть причиной аварийного включения/выключения и может повредить MOSFET.

Для предотвращения перенапряжения и отказа из-за обратного тока, ШИМ-контроллеры, используемые в синхронном выпрямлении, должны иметь управляемые функции запуска и выключения для нормального состояния, а также для условия предварительного смещения.

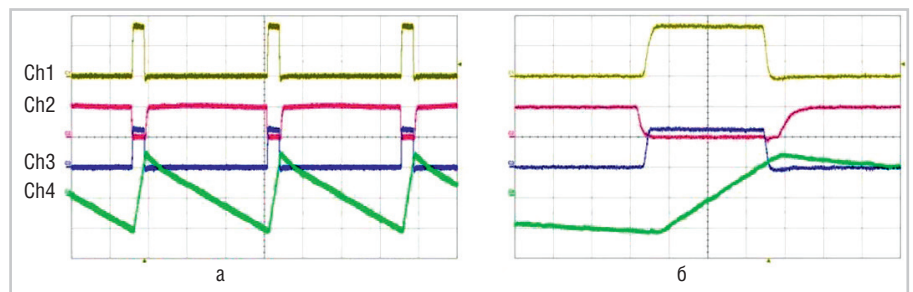
На рисунках 3...5 показаны различные временные диаграммы для неизолированного понижающего синхронного DC/DC-преобразователя, работающего в режиме холостого хода. На рис. 3 представлены временные диаграммы при нормальной работе, тогда как формы сигналов на рис. 4 сняты во время включения преобразователя, и сигналы, представленные на рис. 5, сняты во время выключения преобразователя.

Эти формы сигналов получены для понижающего преобразователя, работающего на частоте 500 кГц при входном напряжении 12 В и выходном напряжении 1,1 В. Преобразователь создан на основе микросхемы контроллера для схемы синхронного выпрямления IR3710 (International Rectifier в 2015 году была приобретена компанией Infineon). Компания Infineon предлагает линейку контроллеров, ориентированных на управление транзисторами на вторичной стороне полумостовых резонансных и прямо-, и обратных преобразователей, работающих в различных режимах тока дросселя выходного каскада. Более подробно контроллеры для схем синхронного выпрямления представлены в работе [2]. На рис. 6 представлены временные диаграммы выключения для изолированного понижающего преобразователя.

На рис. 3 отрицательный ток дросселя протекает в условиях холостого хода и неполной нагрузки. Во время выключения в условиях холостого хода или при близких к холостому ходу нагрузках, когда ток дросселя отрицательный, а оба MOSFET выключены, этот отрицательный ток может найти путь только через интегрированный в MOSFET-структуру транзистора  $V_{T\text{выпр}}$  диод на вход источника постоянного напряжения. В изолиро-



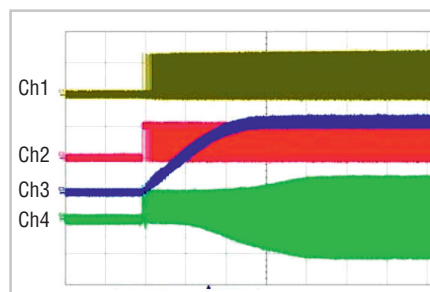
**Рис. 2.** Сигналы управления затворами для верхнего MOSFET ( $V_{T\text{выпр}}$ ) (форма сигнала на канале Ch1) (а) и нижнего MOSFET ( $V_{T\text{синхр}}$ ) (форма сигнала на канале Ch2) (б) в неизолированном понижающем преобразователе, представленном на рис. 1а



**Рис. 3.** Формы сигналов в нормальном режиме работы неизолированного понижающего преобразователя на холостом ходу показаны на осциллограмме (а) и фрагмент осциллограммы в увеличенном временном масштабе (б)

$V_{\text{вх}} = 12 \text{ В}$  и  $V_{\text{вых}} = 1,1 \text{ В}$ .

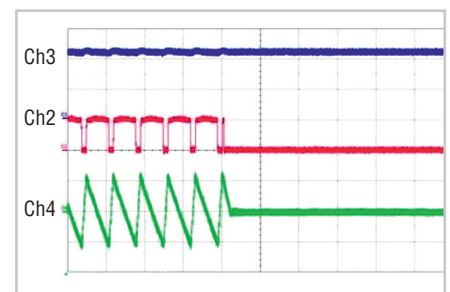
Представлены следующие формы сигналов: напряжение затвора верхнего MOSFET (Ch1), напряжения затвора нижнего MOSFET (Ch2), фазное напряжение (Ch3), и ток дросселя ( $2\text{А/деление}$ ) (Ch4)



**Рис. 4.** Формы сигналов неизолированного понижающего преобразователя при включении в режиме холостого хода

$V_{\text{вх}} = 12 \text{ В}$  и  $V_{\text{вых}} = 1,1 \text{ В}$

Представлены следующие формы сигналов: напряжение на затворе верхнего транзистора MOSFET (Ch1), напряжение на затворе нижнего MOSFET (Ch2), выходное напряжение  $V_{\text{вых}}$ . (Ch3) и ток дросселя ( $2\text{А/деление}$ ) (Ch4)



**Рис. 5.** Формы сигналов неизолированного понижающего преобразователя при выключении в режиме холостого хода

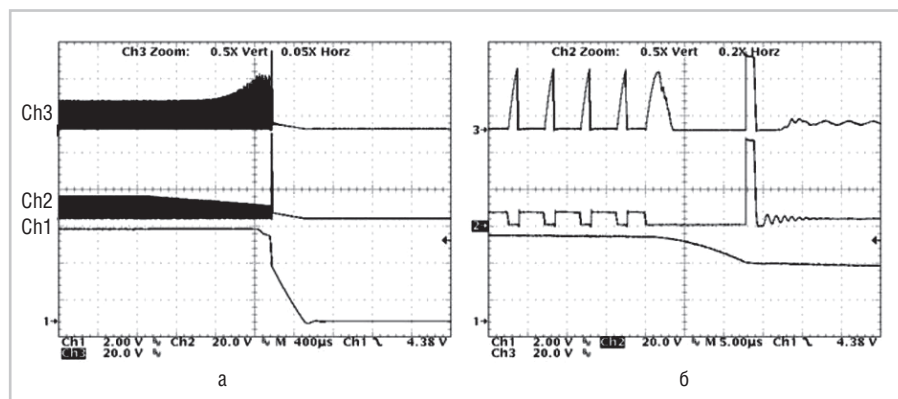
$V_{\text{вх}} = 12 \text{ В}$  и  $V_{\text{вых}} = 1,1 \text{ В}$

Представлены формы сигналов: напряжение затвора верхнего транзистора MOSFET (Ch1), напряжение затвора нижнего MOSFET (Ch2), выходное напряжение  $V_{\text{вых}}$ . (Ch3) и ток дросселя ( $2\text{А/деление}$ ) (Ch4)

ванном преобразователе это создаёт перенапряжение на MOSFET, так как этот ток не может найти прямой путь для протекания. Результатом является более высокое воздействие напряжения на устройства. Этот обратный ток в итоге заряжает выходную ёмкость MOSFET и таким образом может быть отражён в первичную цепь и может вызвать дополнительное напряжение

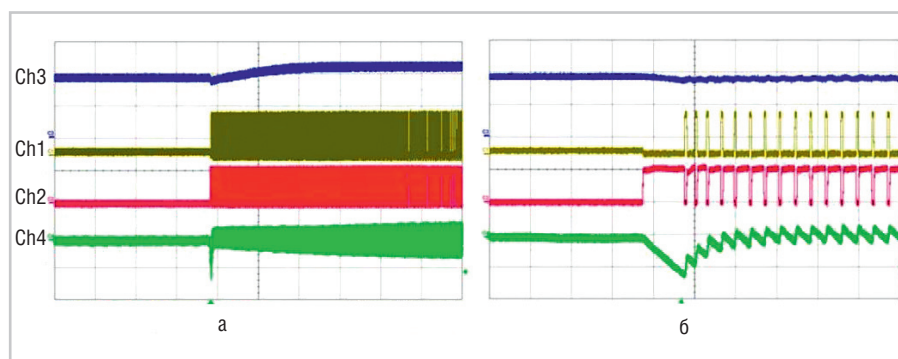
на MOSFET первичной цепи, в итоге приведя к его отказу.

Во время включения, если синхронный MOSFET  $V_{T\text{синхр}}$  открыт, какое-то предварительное напряжение смещения присутствующее на выходе, будет разряжаться через него. Это вызывает увеличение обратного тока в выходном дросселе и может быть причиной падения выходного напряжения.



**Рис. 6. Формы сигналов изолированного понижающего преобразователя при выключении (а) и с расширенным визуальным отображением (б)**

Показаны следующие формы сигналов: выходное напряжение  $V_{\text{вых}}$  (Ch1), напряжение на стоке транзистора  $V_{\text{Tсинхр}}$  (Ch2) и напряжение на стоке MOSFET  $V_{\text{Tвыпр}}$  (Ch3)



**Рис. 8. Формы сигналов включения предварительного смещения для неизолированного понижающего преобразователя с проблемой (а) и то же в увеличенном масштабе (б)**

$V_{\text{вх}} = 12 \text{ В}$  и  $V_{\text{вых}} = 1,1 \text{ В}$ .

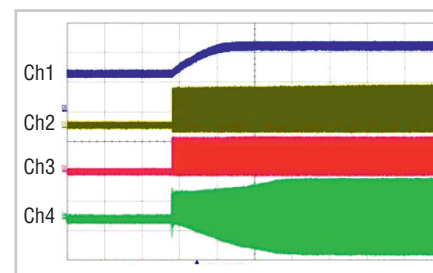
Формы сигналов приведены для напряжения на затворе верхнего MOSFET (Ch1), напряжения на затворе нижнего MOSFET (Ch2), выходного напряжения  $V_{\text{вых}}$  (Ch3) и тока дросселя (2А/деление) (Ch4)

На рис. 7 показано включение предварительного смещения без какой-либо проблемы. На рис. 8 показано нарастание обратного тока и падение выходного напряжения, когда не обеспечено фиксирование предварительного напряжения смещения. Нижний транзистор MOSFET остаётся во включённом состоянии в течение определённого времени, ток дросселя увеличивается и становится отрицательным. Большой обратный ток с выхода служит причиной падения выходного напряжения, что недопустимо.

Для предотвращения этой ситуации (для того чтобы достигнуть включения с предварительным смещением) синхронный MOSFET должен быть удержан в выключенном состоянии во время включения устройства. Существуют различные методы для успешного включения с предварительным смещением в синхронных выпрямителях. Может быть использован компаратор для удержания синхронного MOSFET в выключенном состоянии во время включения до момента, пока выход-

ное напряжение достигнет приблизительно 60...70% своего конечного значения. Недостатком является то, что пока синхронный MOSFET не включён, его внутренний диод проводит ток, и это может привести к значительным потерям. Затем синхронный MOSFET деблокируется, и он может начать переключение. При условии холостого хода и при нагрузках, близких к холостому ходу, до тех пор пока синхронный MOSFET не включится, микросхема ШИМ-контроллера IR3710 будет работать в режиме пропуска импульсов.

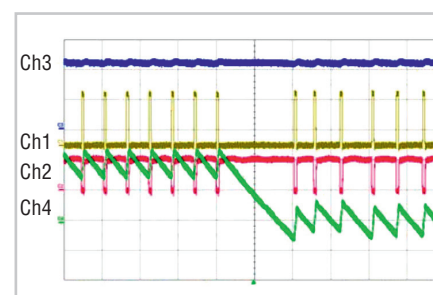
В некоторых структурах схем с предварительным смещением обеспечивается мягкий запуск при управлении затвором синхронного MOSFET, для того чтобы время включения синхронного MOSFET увеличивалось постепенно. Микросхема запускается в асинхронном режиме и удерживает синхронный MOSFET в выключенном состоянии до тех пор, пока не будет сформирован первый импульс для затвора верхнего MOSFET. Синхронный MOSFET всегда начинает работать с



**Рис. 7. Формы сигналов включения предварительного смещения для неизолированного понижающего преобразователя.**

$V_{\text{вх}} = 12 \text{ В}$  и  $V_{\text{вых}} = 1,1 \text{ В}$

Приведены формы сигналов для напряжения на затворе верхнего MOSFET (Ch1), напряжения на затворе нижнего MOSFET (Ch2), выходное напряжение  $V_{\text{вых}}$  (Ch3) и ток дросселя (2 А/деление) (Ch4)



**Рис. 9. Быстрое изменение 100% нагрузки в неизолированном DC/DC-преобразователе**

$V_{\text{вх}} = 12 \text{ В}$  и  $V_{\text{вых}} = 1,1 \text{ В}$ .

Представлены формы сигналов для напряжения на затворе верхнего MOSFET (Ch1), напряжения на затворе нижнего MOSFET (Ch2), выходного напряжения  $V_{\text{вых}}$  (Ch3) и тока дросселя (5А/деление) (Ch4)

импульсом небольшой длительности и постепенно увеличивает длительность импульса с шагом 25, 50, 75 и 100% до тех пор, пока он не достигнет установленного значения. Это будет гарантировать, что обратный ток в выходном дросселе не увеличится.

Измерение тока дросселя и выключение синхронного MOSFET в момент пересечения током нуля является другим методом осуществления контролируемого включения. Другой способ – отслеживать длительность импульса  $V_{\text{Tвыпр}}$  и затем включать MOSFET  $V_{\text{Tсинхр}}$  только когда длительность импульса  $V_{\text{Tвыпр}}$  достигнет некоторой заранее определённой длительности. Это может также предотвратить работу синхронного MOSFET с повышенной нагрузкой во время включения.

Должно быть уделено внимание обеспечению такого режима, при котором выходное напряжение повышается равномерно и не создаёт никаких выбросов на выходе, когда открывается транзистор



VT-синхр. Равномерный запуск обеспечивает безопасное начало работы в предварительно смещённом выходе, тогда как обычные понижающие регуляторы без этого состояния могут разряжать выходной конденсатор, создавая падение напряжения на выходе, что может повредить чувствительную нагрузку.

На рис. 9 показаны формы сигналов для неизолированного понижающего преобразователя, где нагрузка полностью снимается от 100% до состояния холостого хода. В результате ток дросселя может измениться до очень большого отрицательного значения.

В неизолированном понижающем преобразователе это состояние является допустимым, поскольку обратный ток может направиться обратно на вход источника постоянного напряжения через внутренний диод верхнего MOSFET. Но в изолированных DC/DC-преобразователях это является проблемой. Если синхронный MOSFET закрывается, когда протекающий через него ток является отрицательным, из-за прерывания обратного тока может возникнуть сильное напряжение. Этой проблемы можно избежать, если синхронный MOSFET выключить, когда ток дросселя будет положительным, или когда он достигнет нуля (например, прямо перед переходом в отрицательное значение).

Во время выключения синхронный MOSFET должен быть выключен первым в синхронизации с сигналом на затворе выпрямительного MOSFET. В таком случае выпрямительный транзистор MOSFET выключится через несколько циклов переключения, для того чтобы ток дросселя мог вернуться к положительному значению, до того как выпрямительный MOSFET окончательно выключится. Этот способ сложен. Более простым решением является измерение тока дросселя и выключение синхронного MOSFET в моменты равенства тока дросселя нулю, что не позволит ему изменить направление.

## Заключение

Синхронные выпрямители широко распространены в настоящее время благодаря существенному уменьшению сопротивления сток-исток MOSFET и времени их переключения. Ведущие производители полупроводниковых компонентов предлагают транзисторы MOSFET с малым сопротивлением открытого канала, обратным диодом с улучшенными характеристиками, уменьшенным зарядом затвора, что делает возможным оптимальный выбор транзисторов для применения в качестве синхронного и выпрямительного. Для упрощения разработки схем синхронных выпрямителей предлагаются семейства управляющих микросхем

синхронными схемами для организации синхронного выпрямителя на вторичной стороне преобразователей. Помимо этого, компания Infineon предлагает доступный на сайте компании инструмент [2], позволяющий быстро и точно рассчитать элементы схемы. Применение контроллеров и оптимизированных силовых транзисторов позволяет повысить КПД конечного устройства, а также избежать многих проблем при создании синхронных выпрямителей: изменения напряжения ( $Cdv/dt$ ), которое является причиной нежелательного включения синхронного транзистора [3], добиться уменьшения обратного тока через внутренний диод MOSFET-структуры, исключив тем самым потерю мощности при смене направления потока энергии.

## Литература

1. *Kariyadan Suresh*. Reverse-Current Phenomenon in Synchronous Rectifiers. International Rectifier. 2009.
2. *Соломатин М.* Применение компонентов International Rectifier для синхронного выпрямления. Электронные компоненты. 2010. № 6.
3. *Жикленков Д.В., Исаков М.С.* Наведённое  $Cdv/dt$  включение полевого транзистора в синхронном понижающем регуляторе. Практическая силовая электроника. 2005. № 19.



## НОВОСТИ МИРА

### LG INNOTEK ПРЕВРАЩАЕТ СМАРТФОН В КЛЮЧ ОТ МАШИНЫ

Компания LG Innotek разработала модуль цифрового автомобильного ключа, который устанавливается в автомобиле и обеспечивает беспроводную передачу данных между автомобилем и смартфоном, позволяя пользователям открывать или запирают дверь автомобиля или запускать двигатель с помощью смартфона. Водитель может использовать свой смартфон, чтобы с первого взгляда контролировать состояние транспортного средства, включая расстояние пробега, топливную экономичность, давление в шинах и т.д., а также управлять транспортным средством. Пользователи могут предоставить цифровой ключ другому человеку или разрешить ему только определённые функции, такие как открытие или закрытие багажника, с помощью приложения для смартфона. Пользователям не нужно носить с собой физический ключ, что снижает риск его потери. Кроме того, для управления автомобилем смартфон должен находиться внутри автомобиля, что снижает риск угона автомобиля.



Поскольку в последнее время услуги каршеринга и аренды выросли, спрос на модуль цифрового автомобильного ключа растёт с каждым годом. Но существующие модули цифровых ключей для автомобилей имеют низкую точность определения местоположения и, соответственно, – низкую безопасность. В модуле цифрового автомобильного ключа, разработанном LG Innotek, используется сверхширокополосная (UWB) технология, которая представляет собой технологию беспроводной связи LAN, и собственный алгоритм, повышающий точность определения местоположения. Кроме того, в модуле повышена безопасность за счёт применения запатентованной технологии пре-

дотвращения взлома. Модуль может определять местонахождение смартфона в пять раз точнее, чем существующие ключевые модули. Чем точнее модуль цифрового автомобильного ключа определяет местонахождение смартфона, тем более разнообразные и удобные функции могут быть реализованы. Например, можно определить местоположение смартфона и заранее открыть дверь водительского сиденья или автоматически запустить двигатель. Когда несколько человек используют одну и ту же машину, модуль может распознавать конкретный смартфон и автоматически настраивать сиденье водителя или боковые зеркала заднего вида для соответствующего водителя. Когда несколько человек с одним и тем же цифровым автомобильным ключом садятся в автомобиль, модуль точно обнаруживает человека на сиденье водителя. Цифровой модуль автомобильного ключа компактный и тонкий, он размером с USB-флешку, при этом содержит около 60 компонентов, включая ВЧ-тракт и элементы блока питания.

[www.lginnotek.com](http://www.lginnotek.com)