

# Выбор полумостового резонансного LLC-преобразователя и MOSFET первичной стороны

Современные источники питания должны отвечать трем основным требованиям: иметь высокую эффективность, высокую плотность энергии и компонентов. В настоящее время все большее применение получают полумостовые LLC-преобразователи благодаря большей эффективности (меньшим коммутационным потерям) и высокой частоте коммутации. Правильный выбор силовых ключей для этих топологий — сложная задача, поскольку для реализации их рабочих режимов требуется одновременно выполнить два требования — обеспечить малые коммутационные потери и высокую надежность. В статье рассматриваются характеристики резонансной LLC-топологии и, в частности, механизм возможных отказов MOSFET при функционировании системы.

Альфио Скуто  
(Alfio Scuto)

Антонио Гайто  
(Antonino Gaito)

## Топология и характеристики резонансного полумостового LLC-преобразователя

На рис. 1 показана базовая топология резонансного полумостового LLC-преобразователя. Эта схема состоит из блока генератора прямоугольных импульсов, резонансной цепи, выпрямителя и фильтра. Блок генератора прямоугольных импульсов состоит из двух MOSFET ( $Q_1$  и  $Q_2$ ), которые генерируют однополярное напряжение. Резонансная цепь состоит из емкости  $C_r$  и двух индуктивностей  $L_r$  и  $L_m$ . Резонансный LLC-преобразователь отличается от последовательного резонансного LC-преобразователя (SRC) только индуктивностью  $L_m$ . Выпрямитель состоит из вторичной стороны преобразователя, двух диодов для двухполупериодного выпрямления и выходной емкости  $C_o$ , которая сглаживает выпрямленное напряжение, подаваемое на нагрузку  $R_L$ .

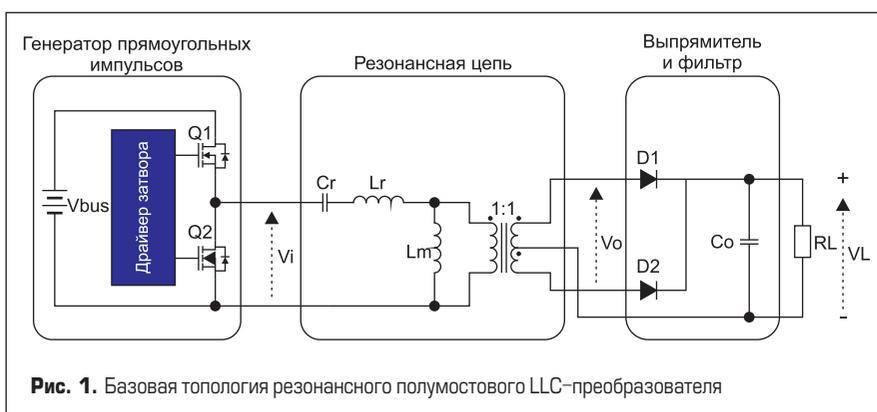


Рис. 1. Базовая топология резонансного полумостового LLC-преобразователя

На рис. 2 показаны рабочие области резонансного LLC-преобразователя двух типов: с коммутацией при нулевом токе (область ZCS) и при нулевом напряжении (ZVS). В первом случае частота переключения ниже резонансной  $f_{r2}$ , т. е. поведение резонансной цепи имеет емкостной характер. Иной режим возникает при работе в области ZVS: в этом случае частота переключения выше резонансной  $f_{r1}$ .

При коммутации преобразователя в диапазоне частот  $f_{r1}-f_{r2}$  режим его работы (ZVS или ZCS) определяется нагрузкой. В нормальном режиме резонансный LLC-преобразователь работает на частоте чуть выше  $f_{r1}$ . Это наилучшая рабочая точка, обеспечивающая высокую эффективность. При работе на резонансной частоте выходные параметры преобразователя не зависят от нагрузки. Преобразователю, работающему в этой точке, нет необходимости менять частоту коммутации при любом значении выходной мощности, пока входное напряжение остается неизменным.

## Нестандартные рабочие режимы

### Работа в емкостной области

Емкостная область работы силовых ключей потенциально опасна. В качестве примера можно привести работу системы в устойчивом режиме при малой нагрузке. В этих условиях рабочая частота системы находится вблизи нижней резонансной частоты, и реализуется режим ZVS.

Представим себе, что нагрузка изменяется с малого значения до высокого; при этом частота коммутации должна соответствовать новой резонансной частоте. Если этого не происходит, преобразователь может перейти в область 3 (рис. 2). Силовой MOSFET выключается, пока ток проходит через внутренний диод,

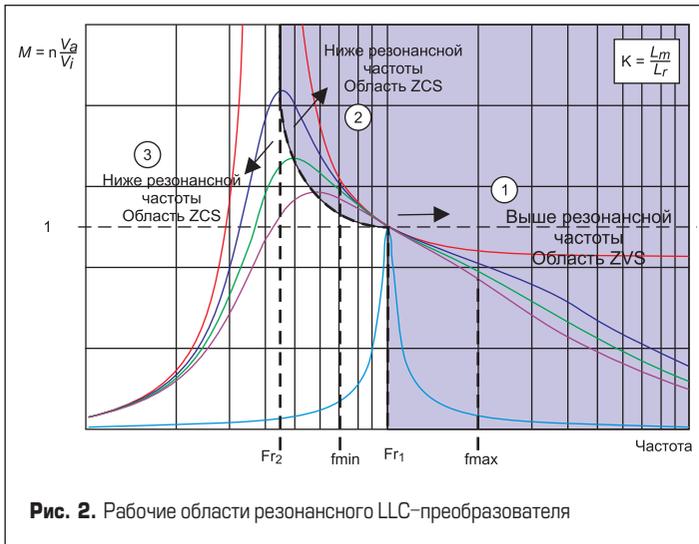


Рис. 2. Рабочие области резонансного LLC-преобразователя

и поскольку второй силовой MOSFET включен, диод может восстановиться, и начнет протекать сквозной ток. В этом случае происходит дополнительное рассеяние мощности, обусловленное прохождением тока через внутренний диод.

При одновременном включении обоих силовых ключей может возникнуть условие отказа полумостовой схемы. Как правило, во время восстановления внутренних диодов происходят выбросы тока большой величины. Этому риска можно избежать, воспользовавшись одним из нескольких решений. Например, специализированный контроллер драйвера затвора, который управляет мертвым временем или сложными контурами, позволяет увеличить этот показатель или обеспечить более высокие значения  $R_{gate}$ . Кроме того, в настоящее время производители полупроводников выпускают специализированные силовые ключи с меньшим временем восстановления. Например, компания STMicroelectronics разработала новую MOSFET-технологию MDmesh DM2, благодаря которой время восстановления встроенных диодов стало меньше 200 нс.

Как уже упоминалось, резонансный преобразователь может работать в емкостной или индуктивной областях (рис. 3). В индуктивной области коммутация осуществляется в режиме переключения по нулевому напряжению. При коммутации, когда основной ключ переходит из состояния ВКЛ. в ВЫКЛ., его ток  $I_p$  имеет положительную величину (область фиолетового цвета) и протекает от стока к истоку. В емкостной области (бежевого цвета) работа осуществляется в режиме переключения по нулевому току. В этом случае ток на основном ключе протекает от истока к стоку, в т. ч. через физический диод MOSFET-структуры. Рассмотрим работу LLC-системы в емкостном режиме при двух условиях.

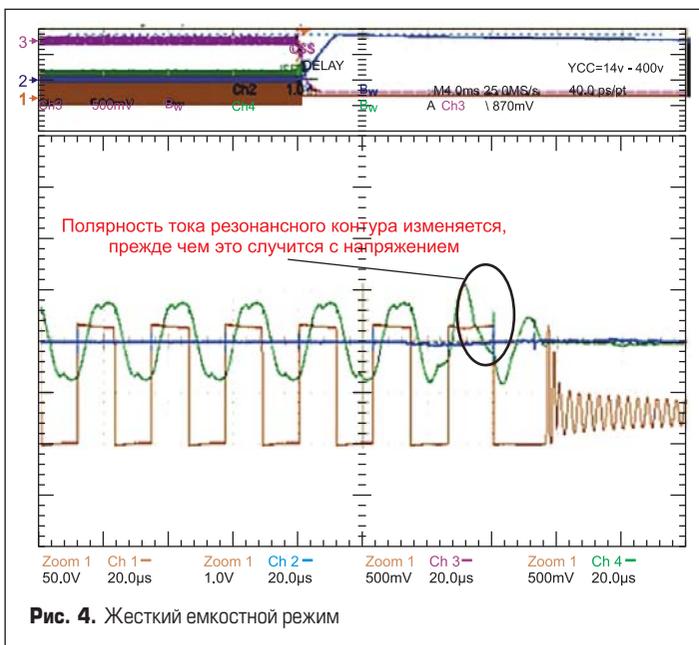


Рис. 4. Жесткий емкостной режим

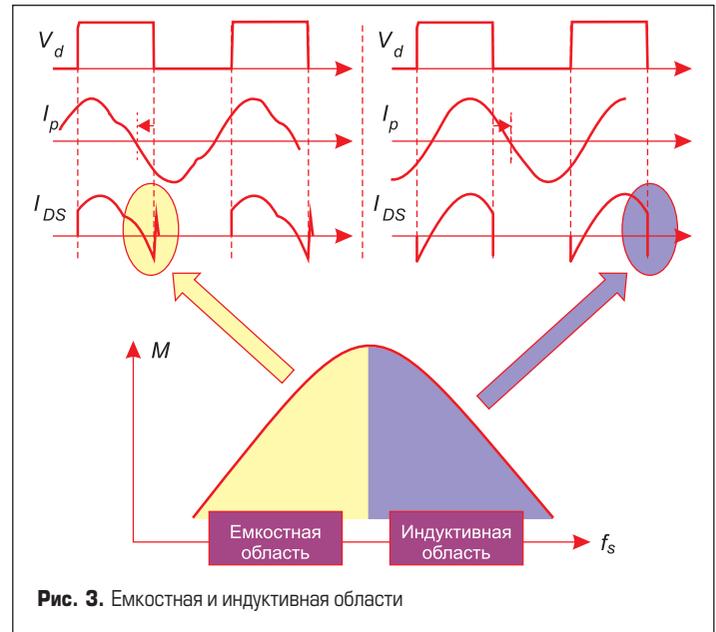


Рис. 3. Емкостная и индуктивная области

**Мягкий емкостной режим**

Этот режим возникает, когда фаза тока резонансного контура приближается к нулевому значению. Например, так происходит при выключении питания при максимальной нагрузке, когда входное напряжение становится небольшим. В этом случае срабатывает усовершенствованная защитная функция (антиемкостной режим) контроллера резонансного контура, например L6699A от STMicroelectronics. С ее помощью повышается частота коммутации, как в условиях перегрузки, что увеличивает фазу тока резонансного контура.

**Жесткий емкостной режим**

Этот режим возникает, когда фаза тока резонансного контура становится нулевой или отрицательной при переходе из одного цикла в другой, как в случае короткого замыкания на выходе (рис. 4). В этом случае силовой MOSFET выключается, работа преобразователя прерывается, и жесткой коммутации не происходит.

**Жесткое переключение при запуске**

При запуске системы режим ZVS может выключиться, что приведет к жесткой коммутации силовых ключей и появлению большого обратного тока при восстановлении диода. При запуске системы напряжение на емкости резонансного контура изначально отсутствует, и требуется ряд коммутационных циклов, прежде чем оно достигнет величины  $V_{in}/2$  в устойчивом режиме. В начале переходного процесса могут появиться большие всплески тока в резонансном контуре. Этот ток не меняет полярности в первом одном или в первых двух коммутационных циклах. В этих потенциально

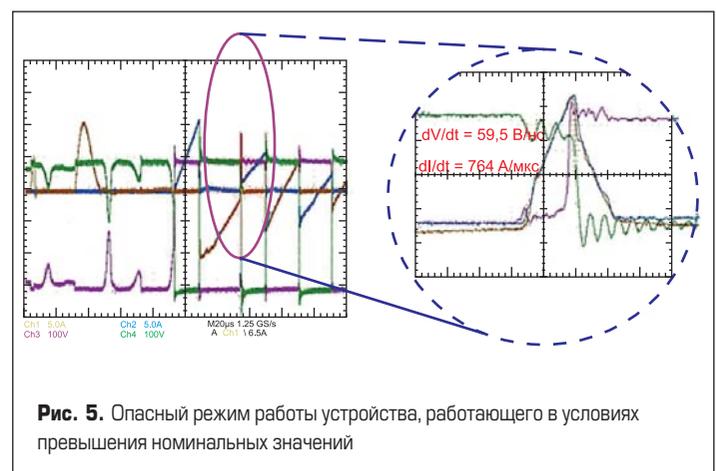


Рис. 5. Опасный режим работы устройства, работающего в условиях превышения номинальных значений

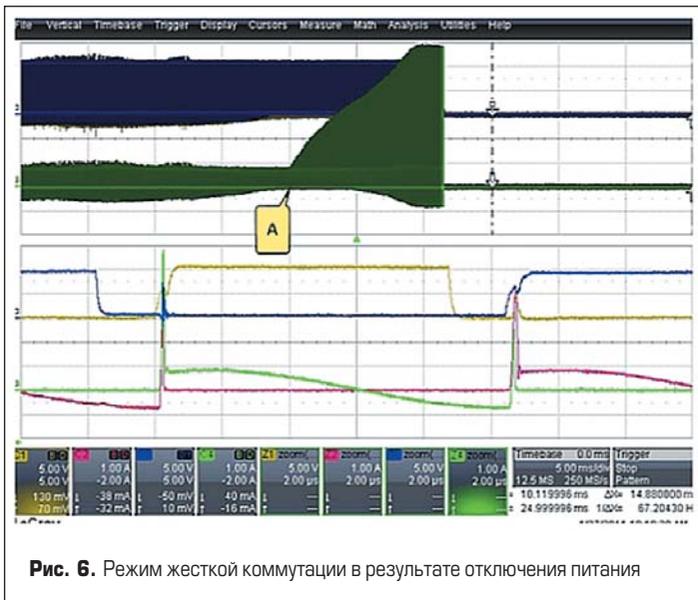


Рис. 6. Режим жесткой коммутации в результате отключения питания

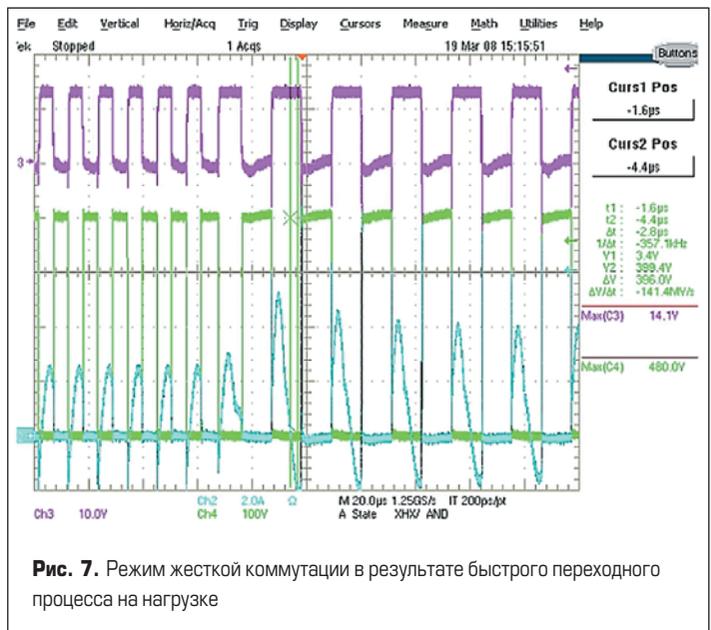


Рис. 7. Режим жесткой коммутации в результате быстрого переходного процесса на нагрузке

опасных условиях работы в емкостном режиме и с жесткой коммутацией может оказаться очень ограниченной по времени.  $dV/dt$  и  $dI/dt$  силового ключа могут превысить номинальные значения (рис. 5) и привести к отказу.

Замедление динамики переходных процессов в схеме с комбинацией диода и резисторов, установленных последовательно двум затворам, помогает избежать этих отказов.

**Жесткая коммутация в результате отключения питания**

Во время нормальной работы импульсного источника питания может возникнуть режим жесткого переключения. Если отключить систему от основного источника питания, она может перейти в емкостной режим (рис. 6). На рисунке видно, что после отключения основного источника питания (точка A) мертвого времени, установленного драйвером, недостаточно для дальнейшего продолжения работы в индуктивном режиме. В этих условиях сквозной ток ключей увеличивается.

**Жесткая коммутация из-за быстрого переходного процесса на нагрузке**

В этом случае система не в состоянии достаточно быстро изменить частоту коммутации. В результате возникает емкостной режим работы,

пока управляющий блок пытается восстановить нормальную работу импульсного источника питания в индуктивном режиме.

По сигналу напряжения  $V_{gs}$  (фиолетового цвета) на рис. 7 видно, как меняется рабочая частота при быстром переходном процессе на нагрузке. Сигнал тока (бирюзового цвета) имеет типичный вид для резонансного LLC-преобразователя. Напряжение  $V_{ds}$  (зеленого цвета) отстает от сигнала тока. Далее этот сигнал принимает типовой вид для емкостной цепи.

**Выводы**

Мы рассмотрели характеристики резонансной LLC-топологии, и в частности, механизмы возникновения отказов силовых ключей при работе системы. Для их предотвращения применяются специализированные ключи, например серии DM2 от компании STMicroelectronics.

**Литература**

1. [www.st.com](http://www.st.com)
2. Mohan N., Undeland T. M. and Robbins W. P. Power Electronics, converters, applications, and design. S. I. John Wiley & Son. New York 1995. 2nd Edition.