

Вопросы терминологии и классификация инверторов

Часть 3

Евгений Силкин (elsi-mail@ya.ru)

Автономные инверторы по принципу действия могут быть разделены на три класса: инверторы напряжения, инверторы тока и согласованные инверторы (matched inverter). Резонансные инверторы являются частным случаем в классе согласованных инверторов. Как правило (но не всегда), резонансные (согласованные) инверторы – это устройства с резонансной коммутацией. Для вентильных устройств, кроме употребляемого термина «коммутация» (коммутационная операция выключения вентилей), необходимо ввести понятие коммутационного цикла.

В [1] можно прочитать, что, по мнению авторов этой классической работы, «основной особенностью каждой из известных схем» (имеются в виду схемы автономных инверторов – АИ), «во многом определяющей... характеристики АИ, является способ осуществления коммутации тока». Здесь заметим, что в различных режимах работы отдельных преобразователей электрической энергии, в принципе, возможны и различные виды (способы осуществления) коммутации вентилей, а также их комбинации (классификационный признак не всегда является однозначным, поэтому не может быть и основным, хотя, безусловно, относится к существенным [2] признакам, и классификация по этому признаку обычно «не является чисто формальной»). В IEC (International Electrotechnical Vocabulary – IEC 60050) коммутация (551-16-01, commutation) в «электронном силовом преобразователе – (это) перенос тока без прерывания тока от одного проводящего силового плеча к следующему очередному, причём оба плеча одновременно проводят ток в течение конечного временного интервала». В [3] со ссылкой на МЭС 551-16-01 в определении коммутации «плечи» заменены на «электрические вентили», а «конечный временной интервал» трактуется (расшифровывается) как «интервал коммутации».

Общее определение коммутации из IEC и [3] отчасти соответствует по смыслу известному (довольно распространённому) понятию коммутации вентилей в выпрямителях, ведомых сетью инверторах и непосред-

ственных преобразователях (низкой частоты или числа фаз (и других типов устройств) для режимов с так называемой «естественной» коммутацией за счёт напряжения питающей или приёмной сети переменного тока (иначе: «сетевая», «линейная», «машинная» или «внешняя» коммутация). Для указанных устройств применим также способ и, соответственно, термин «искусственная» (иначе: «конденсаторная» или «высокочастотная») коммутация для обозначения перевода или «перехода» (переноса) тока между работающими вентилями (за счёт включения в контур или цепь коммутации дополнительного источника напряжения, в частности напряжения на так называемом «коммутирующем» конденсаторе, – компенсационные преобразователи).

Рассмотренное общее определение коммутации, заметим, является, скорее всего, неудачным. По существу приводимого понятия коммутации как только операции «непрерывного» перевода тока с вентиля на вентиль этот реальный процесс, можно считать, отсутствует, например во всех одновентильных (одноключевых или четвертьмостовых) преобразовательных устройствах, в управляемых выпрямителях с нулевыми вентилями, работающими на нагрузку с индуктивностью, или во всех ведомых преобразователях в режимах разрывных токов, в резонансных инверторах, в АИ с двухступенчатой (или непрямой) коммутацией, в преобразователях с «естественной конденсаторной коммутацией», когда однооперационный вентиль выключается за счёт (экспоненциального) спада пря-

мого тока до нуля (или до тока удержания), в инверторах напряжения и проч.

Так и утверждается, в частности, в [4]. После упоминания в едином контексте в разделе 32.20 коммутации вентилей как операции выключения и как процесса «перехода» тока с одного вентиля на другой (или с одного вентильного плеча на другое) «в течение определённого интервала времени, которое в пределе при мгновенной коммутации стремится к нулю» и многократно смещения понятий авторы делают вывод, что одним из возможных способов (или «случаев») выключения вентилей в преобразовательных установках является «спад анодного тока вентиля к нулю без коммутации (т.е. без перевода тока на какой-либо другой, главный или вспомогательный, вентиль преобразователя)... такой спад тока к нулю может быть обусловлен либо наличием в цепи источника переменного напряжения (например, сети при работе выпрямителя или ведомого сетью инвертора в режиме разрывного тока) либо колебательным характером самой цепи (например, в автономных резонансных инверторах)».

IEV же содержит 11 правил, касающихся различных выделяемых данным источником видов (методов) коммутации в электрических преобразователях (что, вероятно, подчёркивает важность признака): прямой (direct) и непрямой (indirect) коммутации, внешней (external) коммутации и самокоммутации (self-commutation), или, по аналогии, «внутренней» коммутации. При этом определение непрямой коммутации (551-16-10, серия коммутаций от одного основного (или главного) плеча к другому или обратно к исходному путём последовательных коммутаций через одно или несколько вспомогательных плеч) явно противоречит общему определению коммутации (551-16-01) в этом же документе. «Внешняя коммутация», по IEC, это коммутация за счёт сети или линии (line commutation), нагрузки (load commutation) и вращающейся электрической машины (machine

commutation). К методам самокоммутирования отнесены коммутация управляющим сигналом (valve device commutation), с помощью конденсатора в цепи коммутации (saracitor commutation) и «автоматическая последовательная коммутация» (auto-sequential commutation), под которой понимается процесс «перевода тока» при включении очередного плеча за счёт предварительно заряженного конденсатора, что, например, имеет место в классическом инверторе тока. Различие двух последних методов довольно трудноуловимо (по смыслу приводимых текстов). Поэтому в [3] текста, соответствующего последнему определению, нет. Остальное же со ссылками на правила МЭС в [3] содержится, но толкование в ряде понятий не соответствует смыслу исходных текстов IEV и (главное) критериям «законченности, полноты и общности». Однако в [3] дополнительно приводятся определения «естественной коммутации» (natural commutation, коммутация «под воздействием напряжения сети переменного тока») и «принудительной (искусственной) коммутации» (force commutation, «непрямая коммутация под воздействием напряжения вспомогательных источников энергии, в качестве которых обычно применяют предварительно заряженные конденсаторы»), аналогии которых в IEV отсутствуют. Недостатки словосочетания «естественная коммутация» подробно рассмотрены в [2], а понятие natural commutation не использовалось (и не используется) в англоязычных источниках. Определение же «принудительная коммутация», предложенное авторами [2] как отличающаяся замена понятию «искусственная коммутация», которое применялось для обозначения «гибридной» коммутации в «компенсационных» (ведомых сетью) преобразователях, признано ими неудачным для обозначения коммутации в инверторах и не являющимся синонимом словосочетания «принудительная коммутация». При этом «принудительная коммутация» (и «искусственная» тем более) не может быть только «непрямой коммутацией». «Искусственная коммутация» же, уточним, – это всегда «прямая коммутация». Примечание в определении (551-16-16, «...одновременно включается следующий электронный вентиль») IEV содержит явную смысловую ошибку в отношении, например, инверторов напряжения. «Коммутация конденсато-

рами», или «автоматическая последовательная коммутация» (auto-sequential commutation по IEV) зачастую бывает и «внешней», а не только «внутренней». Общим же недостатком правил по коммутации в IEV и [3] является противоречие между определением коммутации (551-16-01) как переноса тока с одного вентильного плеча на другое и определением, в частности, резонансного преобразователя (551-12-26), и касается оно наличия (отсутствия) явления коммутации вентилей в таких преобразователях (об остальных недостатках, обусловленных применением неудачного общего определения коммутации, сказано выше и в [2]).

В ГОСТ 18311-80 «Изделия электротехнические. Термины и определения основных понятий» под коммутацией электрической цепи понимается «процесс переключений электрических соединений элементов электрической цепи, выключения полупроводникового прибора». Согласно ГОСТ 17703-72 «Аппараты электрические коммутационные. Основные понятия. Термины и определения», коммутационная операция – это дискретный переход контактного или бесконтактного аппарата из одного коммутационного состояния в другое, а коммутационный цикл – совокупность коммутационных операций, производимых с заданными интервалами времени. Различают (примечание в этом документе) «коммутационные операции включения и отключения, а также включения и следующего за ним автоматического отключения».

В советских стандартах термин «коммутация» (коммутирование) всегда означал «процесс замыкания или размыкания электрической цепи», при котором «происходит практически скачкообразное изменение проводимости электрической цепи» (СТ СЭВ 1936-79, ГОСТ 18311-80). В инверторной преобразовательной технике классически (традиционно) под коммутацией понималось «явление выключения» (запирания) электрического вентиля (управляемого основного однооперационного или двухоперационного). Очевидно, что понятие коммутации как перехода тока с одного (основного) вентиля («главного» плеча) на другой основной (или другое «главное» плечо) не может быть применено для АИ в неизменной трактовке.

Коммутация в АИ как классификационный признак – это, конечно, обозначение процесса (операции) выключе-

ния электрического вентиля (ключа), в том числе основного (силового) и управляемого (однооперационного или двухоперационного), то есть перехода или перевода его из проводящего (открытого, «замкнутого») в непроводящее (закрытое, или запертое, «разомкнутое») состояние. Использование этого определения (коммутация электрического вентиля – процесс перехода или перевода его из проводящего в непроводящее состояние) устраняет очевидное несоответствие между понятиями коммутации как процесса «сопряжённого» переключения вентилей (или перевода тока с одного вентиля или плеча на другой вентиль или плечо, то есть, реально, коммутационного цикла, последовательности или последовательного ряда коммутационных операций включения и выключения основных или основных и неосновных вентилей, которые в общем случае могут быть и разделены конечными интервалами пауз) в зависимых преобразователях и коммутации как операции «выключения» вентиля (в АИ). Фактически отпадает и необходимость в отличающейся формулировке (и трактовке) термина для ведомых преобразователей (всё остальное сохраняется в неизменном виде, в том числе понятие продолжительности интервала коммутации, развитые методики анализа и прочее). Кроме того, приведённая формулировка полностью согласуется с соответствующим определением в действующем сегодня ГОСТ 18311-80.

В зависимости от режима работы, соотношения параметров АИ, типа используемых вентилей (однооперационные, двухоперационные), в принципе, могут иметь место различные способы коммутации (запирания или выключения) вентилей в одном и том же устройстве. Коммутация вентилей (ключей) в АИ всегда бывает только «принудительной» (принуждённой или вынужденной) операцией (как и в любых других вентильных преобразовательных устройствах). При этом реализуемый (основной или характеризующий) способ коммутации, отметим, и может являться не более чем дополняющим элементом в классификации АИ, который следует устанавливать по виду коммутационной операции для управляемого основного (силового) вентиля. Такое «дополнение» в некоторых случаях может быть полезным.

Имеющие практическое значение способы коммутации вентилей в АИ

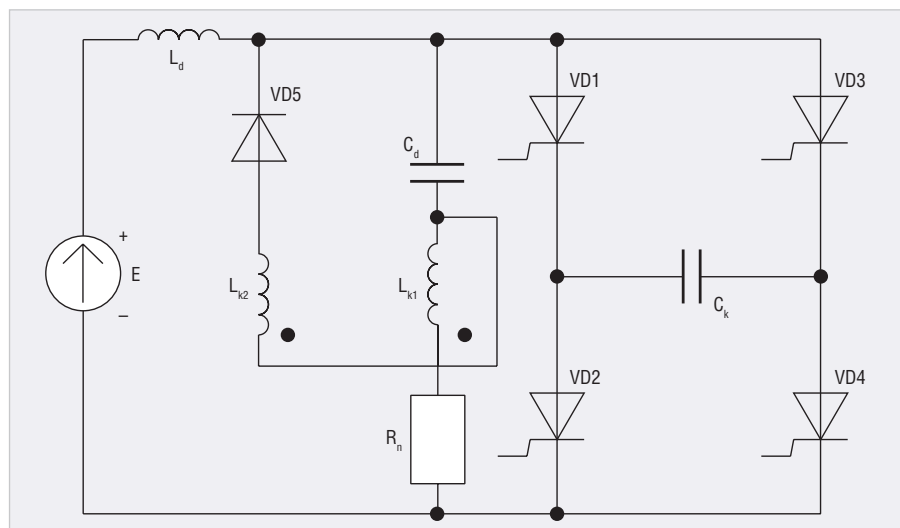


Рис. 1. Однофазный мостовой согласованный инвертор с отсекающим диодом и непрямой коммутацией (с закрытым входом)

следует разделять на импульсную, резонансную, конденсаторную, прямую, непрямую, каскадную, квазирезонансную, управляемую коммутации. Коммутация может быть внешней (external commutation) и внутренней (internal commutation, self-commutation, или interne Kommutierung (нем.)) за счёт приёмов или средств, элементов или, иначе, «компонентов», относящихся к самому инвертору. В ведомых преобразователях коммутация (принудительная) внешняя, а в АИ, как правило, применяется внутренняя коммутация.

Импульсная коммутация (pulsed commutation, упоминаемые названия: принуждённая, принудительная, E-класса, эмиттерная, естественная, сетевая, линейная, natural commutation, impulsed switching) – выключение вентиля за счёт энергии отдельного источника (генератора) напряжения (или тока). К этому способу относятся, в частности, коммутация вторичной обмоткой трансформатора при подаче на первичную обмотку импульсов от генератора импульсов, коммутация сетевым источником энергии или нагрузочной аккумуляторной батареей, коммутация за счёт энергии электрической машины (machine commutation). В преобразователях, ведомых сетью в основных режимах, таким образом, реализуется «внешняя импульсная коммутация».

Резонансная коммутация (resonant commutation, самокоммутация, естественная, квазиестественная, самоимпульсная, коммутация нагрузкой, A-класса, resonant switching, load commutation, natural commutation, self-commutation) имеет место в резонансных инверторах (или, иначе, в согла-

сованных инверторах с резонансной коммутацией), выполненных на однооперационных и двухоперационных вентилях, и представляет собой процесс выключения за счёт колебательного (естественного) спада тока вентиля до нуля (или до тока удержания) в специальном образом организованной цепи (контуре) коммутации. При использовании транзисторов отпирающий управляющий сигнал в момент спада тока вентиля до нуля снимается. Способ резонансной коммутации, кроме АИ, может быть реализован и в других классах устройств, в том числе в преобразователях постоянного напряжения. Упоминается понятие в форме представленного словосочетания на стр. 345 в книге [5], хотя фактически описываемый в этом источнике способ коммутации (тиристоров) нельзя назвать резонансным (относится к типу квазирезонансной коммутации). Независимо вновь данное определение стало употребляться автором статьи в конце 90-х годов для обозначения процесса коммутации именно в резонансных инверторах (согласованных инверторах с резонансной коммутацией).

Конденсаторная коммутация (saracited commutation, естественная, saracitor commutation, saracitor switching) – выключение вентиля за счёт доминирующего естественного (экспоненциального) спада его тока до нуля (или до тока удержания) при заряде конденсатора, включённого в цепь коммутации последовательно [6].

Прямая коммутация (direct commutation, одноступенчатая, сопряжённо-импульсная, межфазная, пофазная, токовая, C-класса, комбиниру-

ванная, комплементарная, дополняющая, auto-sequential commutation) реализуется при такой организации процесса, когда включение очередного основного (силового) вентиля приводит к спаду тока и последующему выключению (коммутации) работающего (выключаемого, коммутируемого) основного вентиля. В IEV (551-16-09) определение прямой коммутации гласит: перенос тока или «коммутация между двумя главными плечами без передачи через любые вспомогательные плечи». Согласно определению МЭС 551-16-09 [3], прямая коммутация – это переход тока с одного главного вентиляного плеча на другое главное вентиляное плечо без передачи основного тока в какую-либо вспомогательную цепь. Этот способ коммутации получил широкое распространение, например в АИ для электротехнологических систем. Прямая коммутация применима в преобразовательных устройствах на одно- и двухоперационных вентилях. В параллельных инверторах тока для электротехнологий на SCR-тиристорах, в частности, реализуется именно «прямая коммутация» (внешняя или внутренняя).

Непрямая коммутация (indirect commutation, косвенная, вспомогательная, D-класса, двухступенчатая, побочная, комбинирующая), по определению МЭС 551-16-10 (ссылка в [3]), – последовательный ряд коммутаций от одного главного плеча к другому путём последовательных коммутаций через одно или несколько вспомогательных плеч. В этом определении МЭК на русском языке и, соответственно, в IEV (серия коммутаций от одного основного плеча к другому или обратно к исходному путём последовательных коммутаций через одно или несколько вспомогательных плеч) фактически даётся описание коммутационного цикла. Выключение основного вентиля при непрямой коммутации начинается и обеспечивается за счёт включения вспомогательного (неосновного) вентиля, (в общем случае) управляемого или неуправляемого. Непрямая коммутация за счёт неуправляемых вентилях (нетипичный пример) реализуется, в частности, в резонансных инверторах с отсекающими диодами (см. рис. 1). Чаще всего в качестве вспомогательных вентилях используются управляемые приборы (в том числе указанное имеет место в схемах инверторов напряжения на тиристорах SCR с управ-

ляемыми цепями принудительной коммутации). К этому же способу коммутации следует отнести процесс, когда выключение (основного) вентиля происходит за счёт его закорачивания при включении вспомогательного (шунтирующего) вентиля.

Каскодная коммутация (cascode commutation, эмиттерная, катодная, коммутация по цепи питания, комбинированная, cascade commutation, cascode switching) осуществляется путём прерывания тока основного вентиля за счёт отключения (разрыва) цепи при выключении другого вентиля, включённого (соединённого) последовательно в эту же цепь. Известны каскодные (последовательные) схемы соединения вентилях, как правило, дискретных неодинакового типа (комбинированные), когда один вентиль используется для разрыва тока другого вентиля (например, более высоковольтного, но менее быстродействующего и т.д.). Однако один вентиль (или несколько – в общем случае) может применяться и для каскодной коммутации не одного, а нескольких (других) вентилях в схеме устройства.

Квазирезонансная коммутация (quasi-resonance commutation, дополняющая, quasi-resonant switching, quasi-resonant commutation) осуществляется, как правило, в АИ на полностью управляемых вентилях (квазиуправляемая коммутация). Однако она может быть реализована и в устройствах на однооперационных вентилях (в частности, в инверторах напряжения Л.Г. Кошечева, в инверторах тока со стабилизирующими диодами, где она является основной). Обязательными условиями применения (реализации) коммутации такого типа является наличие в схеме инвертора и участие в общем коммутационном процессе (цикле) «неосновных» вентилях (например, встречных или обратных, нулевых, стабилизирующих, отсекающих диодов и проч.) и LC-контуров с собственными частотами, соответствующими характеристическим временам процесса, которые значительно меньше периода выходной частоты АИ. При этом электромагнитные процессы в LC-контурах не должны оказывать существенного влияния на энергетику основных процессов в АИ и изменять принадлежность инвертора к соответствующему классу схем. Процесс выключения вентиля (здесь, точнее, интервал снижения или спада тока до нуля) при квазирезонанс-

ной коммутации заканчивается всегда раньше, чем полупериод собственных колебаний LC-контура, который образуется или, правильнее, в котором начинает протекать ток на начальном этапе коммутации, и колебательный процесс в этом же контуре продолжается и после спада тока вентиля до нуля (в отличие от резонансной коммутации, когда процесс прекращается после спада тока вентиля до нуля либо не прекращается, но LC-контур существует и колебательный процесс в нём имеет место в течение всего интервала проводимости вентиля, то есть до «значительно ранее момента начала» спада тока до нуля – резонансные инверторы со встречно-параллельными диодами). Последнее (а именно продолжение колебательного процесса) также один из признаков, который отличает квазирезонансную коммутацию от прямой коммутации, когда в контуре, например, имеется эквивалентная LC-цепь и коммутация силового вентиля (снижение тока до нуля) заканчивается также в течение интервала времени, соответствующего только части полупериода собственных колебаний LC-цепи (например, в реальном классическом параллельном инверторе тока для электротехнологии), но где колебательный процесс аналогично прекращается (прерывается, изменяет качество) при выключении вентиля. Сохранение LC-контура (его схемы, состава элементов) в неизменном виде после спада тока силового (коммутируемого) вентиля до нуля отличает квазирезонансную коммутацию от непрямой коммутации в резонансных (согласованных) инверторах с отсекающими диодами.

Словосочетания «квазирезонансный инвертор», «мультирезонансный инвертор» (а также, тем более, «бирезонансный», «полирезонансный» и прочее подобное), «мультирезонансная коммутация» употреблять не следует, т.к., в частности, «квазирезонансный» инвертор было бы невозможно отличить от «мультирезонансного», а оба вместе – выделить из ряда реальных устройств с их демпфирующими цепями и «паразитными элементами»; приставка «квази-» в данном случае означает «близкий» или «почти (резонансный)», что в основном не является справедливым. Квазирезонансная коммутация же может быть реализована во всех трёх типах АИ: согласованных инверторах, инверторах тока и инверторах напряжения (и это лишь, как правило, «вспомогательный про-

цесс», только «снижающий», а точнее, в определённой мере, перераспределяющий динамические потери на переключение вентилях, и, вероятно, приставку «квази-» можно было бы отнести к названию соответствующего инвертора). Тем более нет никаких оснований выделять «квазирезонансные инверторы» (или преобразователи, не только АИ) в отдельный самостоятельный класс. Эта группа разнотипных устройств (достаточно широкая), конечно, обладает определёнными специфическими свойствами, но не более того (топологию так называемого «резонансного ключа» всегда можно найти, в явном или неявном виде, в любом реальном АИ на управляемых вентилях, в первую очередь с двухсторонней проводимостью, вернее, для практических решений, на их аналогах). Определения же «мультирезонансный инвертор» и «мультирезонансная коммутация» ничего не обозначают. В принципе, любой инвертор может быть назван таковым (поэтому более чем достаточно уже известного и получившего распространение в настоящее время в РФ для АИ понятия «квазирезонансная коммутация» как отличающего определения от словосочетания «резонансная коммутация»). Если даже рассматривать изначальные англоязычные источники (это, кстати, диссертации и публикации на основе последних – как оценивать их, можно понять из [7]), то там речь идёт именно о соответствующих «технологиях» (методах) применительно к маломощным импульсным преобразователям DC/DC на двухоперационных вентилях (и упомянутым «резонансным ключам») и, предполагается, существенно затрагивающих саму энергетику электромагнитных процессов в устройствах (причём в квази- и мультирезонансных преобразователях, как уже отмечалось, используются резонансные ключи, а способы коммутации силовых вентилях для разных вариантов могут быть вообще различными, и нигде авторами идеи не применяются определения квази- или мультирезонансной коммутации силовых вентилях). Да и для этих случаев метод (технология) «мягкого» (soft-switching) переключения вентилях при нулевых напряжениях (ZVS) и, соответственно, токе (ZCS) в отдельности называется «квазирезонансным» (quasi-resonant), а для их (ZVS, ZCS) комбинации (в совершенно сравнимой топологии) метод становится сразу, почему-то, «мультирезонансным» (multi-resonant), что кажется даже нелогичным (кроме

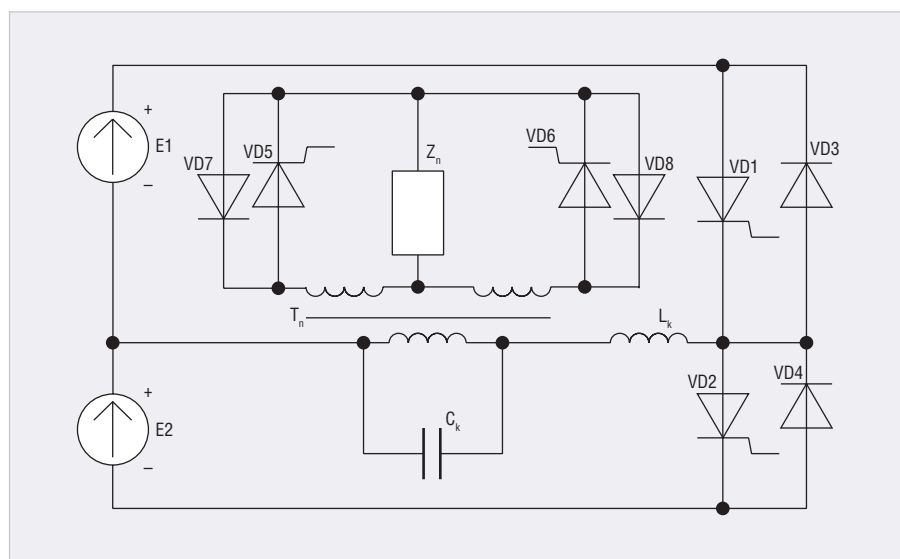


Рис. 2. Однофазный полумостовой согласованный инвертор с резонансной коммутацией (с трансформаторным выходом)

того, каждый раз всё равно приходится уточнять, как именно происходит «мягкое» переключение). Но вопрос состоит не только в этом. Проблема заключается в классификации самого преобразователя (в данном случае АИ). Словосочетание «мультирезонансная коммутация», появившееся в некоторых публикациях в последнее время, образовано по аналогии и получает распространение (в РФ) также по аналогии с определением «квазирезонансная коммутация» (переключение (цикл) и коммутация – это различные процессы и, соответственно, понятия). Впервые словосочетание «квазирезонансная коммутация» («квазирезонансная коммутация тока») было приведено в патенте РФ № 2085013 (заявлен в 1992, опубликован в 1997 г.). На самом деле преобразователь, рассмотренный в указанном патенте, выполнен на основе схемы согласованного (полумостового) АИ с резонансной коммутацией (как и большинство известных упомянутых выше «квазирезонансных» импульсных DC/DC, реализующих именно такую коммутацию) или просто – резонансного инвертора (см. рис. 2) на однооперационных вентилях с нагрузкой, подключаемой параллельно коммутирующему конденсатору через согласующий трансформатор (даже по современной англоязычной терминологии это LC-T resonant converter). Как таковой «квазирезонансной коммутации» в данном устройстве нет (однако авторы, выражая некую терминологическую тонкость, вводят такое словосочетание в название патента, используя при этом в качестве прототипа устройство на полностью управляемых вентилях – резонансных

ключах – с иным способом коммутации вентилях и несоответствующего назначения). Независимо определение «квазирезонансная коммутация» (quasi-resonant commutation – перевод ФИПС) применительно к АИ (характерные явные топологии управляемых резонансных ключей, кстати, в них могут и не использоваться) было сформулировано автором статьи в ряде патентов в середине 90-х годов. Правильнее было бы назвать её «квазиуправляемая коммутация», однако это может быть отнесено не ко всем АИ данной группы и, что безусловно, следует максимально сохранять известные (получившие распространение) терминологические понятия и определения (если они, конечно, на самом деле что-то обозначают, являются действительно необходимыми, не противоречат другим устоявшимся более точным определениям и здравому смыслу), а также без необходимости не расширять набор применяемых электротехнических терминов и определений. Нового и существенного (и правильного) словосочетание «мультирезонансная коммутация» к терминологии, касающейся АИ, не добавляет. В этой связи следовало бы упомянуть аннотацию к одному из англоязычных источников (откуда из-за неточности интерпретаций все это [8] и пошло) по так называемым (в переводах на русский язык) «квазирезонансным преобразователям», которая в определённой мере ставит знак равенства между различными терминами, обозначающими мягкое переключение вентилях в них: преобразователи с мягким переключением (не выключением и не «мультирезонанс-

ной коммутацией», заметим), обычно классифицируются как резонансный (resonant converter – RC), квазирезонансный (quasi-resonant converter – QRC), мультирезонансный (multi-resonant converter – MRC) преобразователи, преобразователь квазипрямоугольного сигнала (quasi-squarewave converter – QSC) и преобразователь с нулевым переходом (zero transition converter – ZTC).

Управляемая коммутация вентилях (controlled commutation, самокоммутация, коммутация по управляющему электроду, выключение за счёт управляющего вывода, внутренняя, self-commutation, controlled switching, valve device commutation) реализуется только в АИ на полностью управляемых (двухоперационных) вентилях. Коммутация является управляемой, если выключение вентиля осуществляется путём подачи запирающего сигнала на управляющий электрод, сам процесс начинается с момента такой подачи и не используются никакие дополнительные средства и приёмы для её обеспечения и улучшения характеристик. Наиболее характерный пример массового применения управляемой коммутации – современные преобразователи частоты с классическими инверторами напряжения на транзисторах (или на запираемых тиристорах) с встречно-параллельными диодами, в частности для электроприводов переменного тока. Отметим, что в устройствах на полностью управляемых вентилях, естественно, могут иметь место и другие виды коммутации (выключения) вентилях, например прямая коммутация (о резонансном и квазирезонансном способах сказано выше), и их комбинации. «Коммутация (самокоммутация) вентиляем» (valve device commutation) определяется правилом IEC 551-16-16 – «способ самокоммутации, при котором коммутирующее напряжение создаётся путём выключения проводящего электронного вентиля с помощью управляющего сигнала». В этом определении имеется примечание («одновременно включается следующий электронный вентиль»), о некорректности которого упоминалось выше.

Коммутационный цикл – (периодический, циклический) перевод или переход (переключение, перенос) тока между силовыми вентилями в ведомых преобразователях (для определённости – без работающих неосновных или нулевых вентилях); состоит из интервалов выключения (коммута-

ции) основного (проводящего) вентиля и включения очередного (основного) вентиля, которые непосредственно сопряжены, то есть операции (включения-выключения) осуществляются (практически, не совсем точно) одновременно в рамках единого (непрерывного) процесса – «без прерывания тока...», когда в проводящем состоянии одновременно находятся оба вентиля», а в резонансных инверторах (без встречных, стабилизирующих, отсекающих диодов), например, коммутационный (естественный, резонансный) цикл может включать интервал «паузы» (если она имеет место). В инверторах напряжения на двухоперационных вентилях с встречно-параллельными диодами, работающих, в частности, в составе современных электроприводов, коммутационный цикл состоит из интервала выключения (коммутации) работающего основного вентиля, интервала dead time, когда проводит ток неосновной вентиль (диод), и интервала включения очередного основного вентиля (в течение которого происходит, в том числе, коммутация диода – неосновного вентиля).

В инверторах тока с квазирезонансной коммутацией коммутационный цикл состоит из интервалов выключения (спада тока до нуля) проводящего вентиля и проводимости стабилизирующего диода (внутри которого лежит интервал включения очередного основного вентиля). Из перечисленного очевидно, что понятие «коммутационный цикл» следует ввести в используемую терминологию по вентиляльным устройствам.

В заключительной, 4-й части статьи будут рассмотрены определения применяемых принципов управления-регулирования инверторов, а также элементы классификации инверторных устройств по типам силовых схем и понятия умножения частоты, закрытого и открытого входов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Лабунцов В.А., Ривкин Г.А., Шевченко Г.И.* Электроприводы с полупроводниковым управлением. Автономные тиристорные инверторы. – М., Л.: Энергия, 1967. – 160 с.
2. *Силкин Е.* Элементы классификации автономных инверторов и свойства согласованного инвертора с резонанс-

ной коммутацией. Часть 3. Силовая электроника. 2017. № 6. С. 28–39.

3. Силовая электроника: краткий энциклопедический словарь терминов и определений / под ред. Ф.И. Ковалёва и М.В. Рябчицкого. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. – 90 с.
4. Электротехнический справочник: в 3 т. Т. 2. Электротехнические изделия и устройства / под ред. И.Н. Орлова. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 712 с.
5. Управляемые полупроводниковые вентиля: принципы действия и области применения р-п-р-п-устройств / под ред. В.М. Тучкевича. – М.: Мир, 1967. – 455 с.
6. *Булатов О.Г., Царенко А.И., Поляков В.Д.* Тиристорно-конденсаторные источники питания для электротехнологии. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 200 с.
7. *Силкин Е.* Элементы классификации автономных инверторов и свойства согласованного инвертора с резонансной коммутацией. Часть 2. Силовая электроника. 2017. № 5. С. 58–66.
8. *Jovanovic M.* Resonant, quasi-resonant, multi-resonant and soft-switching techniques – merits and limitations. International Journal of Electronics, vol. 77, n. 5, 1994, pp. 537–554. ©

XLight

Источники питания INVENTRONICS со стабилизацией выходного тока и напряжения



Компания XLight представляет широкий спектр источников питания INVENTRONICS для систем светодиодного освещения мощностью от 36 до 300 Вт

Преимущества

- Питание от сети 90...305 В
- Возможность управления яркостью освещения
- Показатель эффективности до 94%
- Коэффициент мощности до 99%
- Отсутствие пульсаций
- Защита от перенапряжения, короткого замыкания и перегрева
- Диапазон рабочих температур от –40 до +70°C
- Режим работы не менее 65 000 часов
- Водонепроницаемый корпус IP67



Реклама

(495) 232-1652

info@xlight.ru

www.xlight.ru

Свобода проектирования



САПР электроники

В состав Delta Design, обеспечивающей сквозной цикл проектирования печатных плат, входят модули:

- Менеджер библиотек
- Схемотехнический редактор
- Схемотехническое моделирование
- HDL-симулятор
- Редактор правил
- Редактор печатных плат
- Топологический редактор плат TopoR
- Коллективная работа для предприятий