

# Элементы классификации автономных инверторов

## и свойства согласованного инвертора с резонансной коммутацией. Часть 3

*Если не высказаны противоположные мнения, то не из чего выбирать наилучшее.  
Геродот*

**В первой и второй части данного цикла статей (СЭ №№ 4, 5'2017) анализировалась проблема некорректного применения ряда основных терминов и определений, относящихся к области инверторной преобразовательной техники. В настоящей, третьей части рассматриваются возможные способы коммутации вентиля в автономных инверторах и других типах преобразователей (как принудительные операции выключения). Предлагается ввести в употребление понятие коммутационного цикла.**

**Евгений Силкин, к. т. н.**

elsi-mail@ya.ru

**В** настоящее время известно большое число различных схем силовой части АИ (автономный инвертор — устройство, способное работать на автономную нагрузку, когда в приемной сети нет источников активной энергии)... Однако основной особенностью каждой из известных схем, во многом определяющей... характеристики АИ, является способ осуществления коммутации тока... [1]. Классификация по этому признаку не является чисто формальной... [2]. Коммутация электрического вентиля в преобразователе — процесс перехода или перевода его из проводящего состояния в непроводящее (операция выключения). Выключение вентиля в инверторах может быть только «принудительным». Процесс переключения вентиля в преобразователе (с одного основного на очередной следующий, switching) представляет собой коммутационный цикл, т. е. совокупность коммутационных операций (включения и выключения основных или основных и неосновных вентилях, в общем случае разделенных паузами), осуществляющихся с заданными конечными интервалами времени, и периодически повторяющаяся (естественный, линейный или сетевой, искусственный, двухступенчатый и прочее). Способы коммутации вентиля в АИ следует классифицировать на: импульсную (коммутацию), резонансную, конденсаторную, прямую, непрямую, каскодную, квазирезонансную, управляемую.

В ГОСТ 18311-80 «Изделия электротехнические. Термины и определения основных понятий» под

«коммутацией электрической цепи» (ндп. коммутирование) 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 Большом энциклопедическом политехническом словаре (М.: «Большая Российская энциклопедия», 2000) словом «коммутация» обозначают переход тока от одного вентиля к последующему в выпрямителях, инверторах и др. вентилях преобразователях, а в Малом энциклопедическом словаре (М.: «Астрель», 2002) «коммутация электрических цепей» — это, аналогично ГОСТ 18311-80, процесс переключения электрических соединений. В Толковом словаре Кузнецова С. А. (СПб.: «Норинт», 1998) понятие «коммутация» трактуется как изменение соединений в электрических цепях (включение, отключение и переключение их отдельных частей), выполняемое при помощи специальной аппаратуры, а по [3] — «коммутация в электронных силовых преобразователях» — это

«переход тока с одного проводящего электрического вентиля... на следующий вентиль без прерывания тока в течение конечного временного интервала — интервала коммутации, на протяжении которого в проводящем состоянии одновременно находятся оба вентиля».

Последнее, отчасти, по смыслу соответствует устоявшемуся определению коммутации вентиля в выпрямителях, ведомых сетью инверторов и непосредственных преобразователей (низкой) частоты или числа фаз (и других типов устройств) для режимов с так называемой «естественной» коммутацией за счет напряжения питающей или приемной сети переменного тока (иначе: «сетевая», «линейная», «машинная» или «внешняя» коммутация) [1–5]. Для указанных устройств известен также способ и, соответственно, термин «искусственная» (иначе — «конденсаторная» или «высокочастотная») коммутация для обозначения перевода тока между работающими вентилями (за счет включения в контур или цепь коммутации дополнительного источника напряжения, в частности напряжения на т. н. «коммутирующем» конденсаторе — компенсационные преобразователи).

Часто определение «искусственная коммутация» употребляется как равнозначное словосочетанию «принудительная коммутация» [3, 6, 7]. Однако еще в [1] отмечалось, что «термин АИ с искусственной коммутацией является неудачным, поскольку в преобразовательной технике под преобразователями с естественной коммутацией принято понимать выпрямители и ведомые сетью инверторы, где коммутация происходит под действием переменного напряжения сети, а под преобразователями с искусственной коммутацией — выпрямители и инверторы с добавочными коммутирующими устройствами (как правило, содержащими конденсаторы и, часто, вспомогательные вентиля), которые вводятся для осуществления коммутации ранее того момента, когда она может происходить под действием переменного напряжения сети, и улучшения тем самым коэффициента мощности, поэтому представляется целесообразным коммутацию в автономных инверторах, когда питающая или приемная сеть переменного тока отсутствует (?), называть принудительной или вынужденной, эти термины к тому же ближе соотносятся с принятым Международной электротехнической комиссией английскому термину *forced commutation*). То есть, определение «принудительная коммутация» было предложено для АИ именно в качестве отличающей замены определения «искусственная коммутация». Кроме того, здесь необходимо иметь в виду, что коммутация вентиля в выпрямителях (зависимых инверторах и непосредственных преобразователях частоты) — это, как сегодня считается, процесс перехода или перевода (переключения) тока с одного силового вентиля (неуправляемого, однооперационного, двухоперационного в выпрямителях и управляемого — в инверторах и преобразователях частоты, числа фаз) на другой (основной) вентиль (то есть коммутационный цикл), а под понятием коммутации в АИ классически подразумевается операция выключения (запирания) управляемого основного вентиля (однооперационного или двухоперационного). Очевидно, что понятие коммутации как перехода тока с одного (основного) вентиля на другой основной не может быть применено для АИ в неизменной трактовке.

Автор настоящей статьи считает, что и определение «естественная коммутация» в общепринятом толковании для ведомых преобразователей (и, тем более, «общее» определение «коммутации в... преобразователях», приведенное, например, в [3], несмотря на то, что там сделана ссылка на МЭС 551-16-01), также является «неудачным». Это словосочетание возникло из определения т. н. «точки естественной коммутации» для неуправляемых выпрямителей. Для управляемых ведомых сетью преобразователей коммутационный цикл может относиться (и он задается устройством управления) к любой точке на кривой напряжения сети. Упомянутая «естественная коммутация» (как переход, перевод, переключение тока) в управляемых ведомых преобразователях не может состояться без отпирания очередного вентиля в результате подачи сигнала на его управляющий электрод (а сам «переход тока» происходит различным образом в управляемых и неуправляемых устройствах). В рабочих режимах коммутация (используем известные понятия) в любых ведомых преобразователях — это, скорее, «вынужденная» (или, точнее, «принужденная») коммутация за счет внешнего источника напряжения (она может происходить и не в «точках естественной коммутации» даже в неуправляемых выпрямителях). «Естественная

коммутация» имела бы место, более логично, в режимах, в частности, «разрывных токов» (характерный пример — выпрямители) тех же устройств (режимов для них, как считается, ограничено «рабочих»), когда, по существующим понятиям, коммутации (или перехода тока), как получается, вообще «нет» (?). Правильнее было бы называть, используя известные альтернативные термины, коммутацию напряжением сети, в частности, в ведомых сетью преобразователей, «сетевой» или «линейной» (или внешней, как это в настоящее время принято в зарубежных источниках, или внешней импульсной). На самом деле, если рассматривать коммутацию вентиля как процесс перехода тока с одного вентиля на следующий (очередной) вентиль, то практически не существует различий между выпрямителем или ведомым сетью инвертором и, например, автономным («ведомым нагрузочной цепью») инвертором тока с параллельной компенсацией реактивности нагрузки (в частности, электротермической, имеющей «высокую» добротность), коммутация в котором, в большинстве случаев, классифицируется как «принудительная». При «искусственной» же коммутации (в ведомых преобразователях) «добавочные коммутирующие устройства», как правило, являются, по определению, лишь «добавочными», и только «улучшают» процесс коммутации, вернее, энергетику устройства (внешний источник коммутирующего напряжения остается). То есть — последнее, более точно, — «квазисетевая» коммутация (или, менее правильно, — «квазиискусственная»). Действительно, вот как записано в Большой энциклопедии нефти и газа ([www.ngpedia.ru](http://www.ngpedia.ru), ссылка на выдержку из книги, стр. 7, — Вентильные преобразователи с конденсаторами в силовых цепях / А. В. Баев, Ю. К. Волков, В. П. Долинин и др. Под ред. А. В. Баева. М.: Энергия, 1969): впервые схемы с искусственной коммутацией предложены в СССР проф. Г. И. Бабатом... коммутация в таких схемах происходит не только за счет действия ЭДС обмоток анодного трансформатора (сети), но и под влиянием разности потенциалов обкладок конденсаторов (а именно, устройства искусственной коммутации), т. е. под воздействием результирующего напряжения... Любопытно в этой связи то, что, например, в [4] приводятся сведения о т. н. «компенсационных АИ» (автономных инверторах тока с одно- и двухступенчатой коммутацией, вернее, циклом, и компенсационных двухступенно). В соответствующем разделе по ним записано: в режиме автономного инвертора тока с одноступенчатой коммутацией могут работать все схемы компенсационных преобразователей (?), используемых в режимах выпрямителя и зависимого инвертора. Аналогичный вывод приводится также и в [1]. На этом следует остановиться, так как ведомые преобразователи, в принципе, не охватываются темой статьи.

По определению же коммутации из [3], которое повторено, в частности, и в [8], а ранее почти дословно приводилось в [6] (а также и по существу известного понимания коммутации как только операции перевода тока с вентиля на вентиль), этот реальный процесс, можно считать, отсутствует (?), например, во всех одновентильных (четвертьмостовых) устройствах, в управляемых выпрямителях с нулевыми вентилями, работающими на нагрузку с индуктивностью, или в ведомых преобразователях в режимах разрывных токов, в резонансных инверторах, в АИ с двухступенчатой (или непрямой) коммутацией, в преобразователях с «естественной конденсаторной коммутацией» по [5], когда однооперационный вентиль выключается за счет (экспоненциального) спада прямого тока до нуля (или до тока удержания), в инверторах напряжения (?) и проч. Важно же, из сказанного, то, отметим, что в различных режимах работы отдельных преобразователей электрической энергии, в принципе, возможны и различные виды (способы) коммутации вентиля, а также их комбинации (классификационный признак не всегда является однозначным, поэтому не может быть и «основным»).

В [1] выделяют шесть способов выключения или запирания (как правильно классифицируется — коммутации) однооперационных вентиля (общие названия для способов авторами не приводятся), а именно: за счет подключения к запираемому вентилю параллельно предварительно заряженного конденсатора; за счет спадания к нулю его анодного тока, имеющего колебательный характер в результате включения последовательно с вентилем LC-контура; запирание вентиля в момент спадания к нулю его анодного тока, имеющего колебательный характер в результате подключения параллельно к нему LC-контура; за счет

включения последовательно с вентилем конденсатора, предварительно заряженного с необходимой полярностью (обычно такой конденсатор подключается с помощью вспомогательного тиристора); за счет энергии отдельных источников, подключаемых к вентилю параллельно или последовательно (например, с помощью транзистора или вспомогательного маломощного тиристора); способ коммутации (?), имеющий место в выпрямителях и ведомых сетью инверторах (перевод тока с одного вентиля на другой осуществляется под действием переменного напряжения сети, играющей роль источника энергии в случае выпрямителя и нагрузки в случае инвертора).

Включение же однооперационных вентилях осуществляется за счет подачи специального сигнала на управляющий электрод, т. е. это «управляемая» (коммутационная) операция.

Далее, исходя из перечисленных способов коммутации (выключения) вентилях, авторы [1] и выводят свою классификацию АИ (параллельные, последовательные, последовательно-параллельные инверторы и т. д.). Ограниченность этой классификации уже отмечалась нами в [9].

При классификации АИ в [4] также рассматривается шесть способов (групп) коммутации или запирающих вентилях (однако формулировки, при внешнем сходстве, отличаются от приведенных в [1], а названия аналогично, кроме 6 группы, отсутствуют): коммутация с помощью конденсатора или LC-контра, подключаемого другим силовым тиристором; коммутация с помощью последовательного колебательного LC-контра, включенного последовательно с тиристором, при спадающем токе LC-контра (анодного тока тиристора) до нуля происходит естественное выключение (?) тиристора; коммутация с помощью последовательного колебательного LC-контра, включенного параллельно тиристорам... (в момент равенства нулю суммарного тока через него); коммутация с помощью конденсатора или LC-контра, подключаемого к основному тиристорам с помощью вспомогательного (схема коммутации представляет собой тиристорный аналог полностью управляемого вентиля); коммутация с помощью внешнего источника энергии, подключаемого параллельно или последовательно с тиристором (тиристор можно выключить также с помощью трансформатора, одна из обмоток которого включена последовательно с ним, а на другую от генератора импульсов подаются импульсы соответствующей полярности; естественная коммутация (?) с помощью сети переменного тока. Отмечается [4], что «в реальных схемах автономных инверторов часто сочетается несколько принципов коммутации». Интересно то, что в [4] при перечислении способов коммутации однооперационных вентилях «естественная коммутация» упоминается дважды (2 и 6 группы) в отличающихся смыслах.

В [4] под коммутацией в зависимых преобразователях подразумевается процесс перехода тока с одного вентиля на другой (силовой или основной) вентиль, а в АИ — коммутационная операция выключения силового вентиля. На стр. 89 в [4] можно прочитать: отсутствие в питаемой сети автономного инвертора источников электрической энергии (?) не позволяет, в отличие от зависимого инвертора, осуществлять естественную коммутацию (?) вентилях за счет ЭДС сети переменного тока, в автономном инверторе необходимо применять полностью управляемые вентили, выполняющие функции ключей, которые поочередно подключают фазы нагрузки в цепи переменного тока к положительному и отрицательному полюсам источника постоянного тока, при использовании обычных (однооперационных) тиристоров возникает необходимость в принудительной коммутации (запирающей) тиристоров, сущность принудительной коммутации заключается в том, что за счет пропуска через проводящий тиристор обратного тока прямой ток его уменьшается до нуля, а точнее — до значения тока удержания, а затем к тиристорам прикладывается отрицательное анодное напряжение на время, достаточное для восстановления его запирающих свойств.

Под коммутацией для АИ в [2] также понимается операция выключения или запирающего вентиля, при этом термины «принудительная» и «искусственная» являются, по мнению автора книги, тождественными. На стр. 119 в [2] записано: отсутствие сетевого напряжения (или переменного напряжения каких-либо других источников) приводит к необходимости использовать различные способы принудительной или искусственной коммутации тиристоров. Для АИ характерны [2]

следующие способы искусственной коммутации тиристоров: коммутация посредством конденсатора, подключаемого другим тиристором; коммутация посредством подключения к основному тиристорам конденсатора через вспомогательный тиристор; коммутация за счет подключения к основному тиристорам колебательного LC-контра (параллельно); коммутация за счет резонансного характера сопротивления нагрузки (или сопротивления нагрузки с дополнительно установленными на выходе инвертора реакторами и конденсаторами). При классификации АИ по способам искусственной коммутации иногда различают инверторы с одноступенчатой и двухступенчатой коммутацией [2].

Авторы [5] констатируют, что «все многообразие устройств принудительной конденсаторной коммутации тиристоров можно разделить на три большие группы: последовательной коммутации, параллельной коммутации и с естественной коммутацией тока вследствие спада его до нуля путем соответствующей организации контра нагрузки».

В [10] утверждается: применение полностью управляемых ключей (транзисторов, запираемых тиристоров и др.) позволяет не только изменять параметры преобразователей, но и создавать новые типы электрических устройств. К последним [10] относятся автономные инверторы, или инверторы с самокоммутацией — преобразователи постоянного тока в переменный, в которых используются полностью управляемые ключи. Следует отметить [10], что автономные инверторы могут быть изготовлены на основе обычных тиристоров с принудительной коммутацией под воздействием напряжений, создаваемых устройствами принудительной коммутации, входящих в состав инвертора или его нагрузки,... так как обычный тиристор с устройством принудительной коммутации функционально сходен с полностью управляемым прибором. Однако [10] существует класс инверторов с коммутацией, обусловленной резонансными явлениями в выходных цепях, включающих в себя элементы инвертора и (или) нагрузки... Резонансными преобразователями называются преобразователи, в которых используются электрические цепи с индуктивными и емкостными элементами для коммутации ключей со снижением потерь мощности при коммутации. Раскрывая это определение более подробно, можно сказать [10], что явления резонанса напряжения или токов в схемах преобразователей используются для решения... задачи... выключения тиристоров за счет прохождения анодных токов через нуль («квазиестественная коммутация»).

Таким образом, авторы [10], по смыслу приводимого текста, «класс инверторов с коммутацией, обусловленной резонансными явлениями в выходных цепях», не относят к устройствам с принудительной коммутацией и вводят для них новое определение «квазиестественная коммутация». АИ же на двухоперационных вентилях в [10] — это «инверторы с самокоммутацией» (они также не классифицированы как устройства с «принудительной коммутацией... с узлами... принудительной коммутации, входящими в состав инвертора или (?) его нагрузки»).

В [11] дано объяснение термина «импульсная коммутация», когда «проводящий тиристор запирается коротким импульсом обратного напряжения». Обычно этот импульс [11] формируется с помощью колебательного LC-контра, требуемый период колебаний которого прямо пропорционален времени восстановления тиристора (по мере роста рабочей частоты коммутирующий импульс занимает все большую часть полупериода до тех пор, пока процесс коммутации уже становится невозможно отнести к импульсному). Сущность способа импульсной коммутации, записано далее в [11], наиболее ясно проявляется в тех устройствах, где импульс обратного напряжения генерируется вспомогательными элементами, отделенными от основной цепи (вспомогательно-импульсная коммутация). В схемах второго класса импульс обратного напряжения может быть получен при отпирании тиристора, связанного с запираемым (сопряженно-импульсная коммутация) [11]. В третьем классе импульс для коммутации тиристора образуется в результате включения его самого [11], т. е. цепь автоматически выключается через определенное время и выключение не зависит от дальнейшего действия цепи управления (самоимпульсная коммутация). Авторы [11] рассматривают принцип импульсной коммутации как развитие принципа коммутации напряжением высокой частоты (имеет место в компенсационных преобразователях

в соответствии с современными представлениями), однако отмечается, что «существует значительная разница между рабочими характеристиками инверторов, коммутируемых высокой частотой и импульсами».

Таким образом, устройства с первым типом коммутации в [11] — это инверторы с т. н. «двухступенчатой коммутацией» (по существующей сегодня терминологии), со вторым, например, — инверторы тока классического исполнения, а с третьим — резонансные инверторы.

Относительно же коммутации в резонансных (последовательных инверторах) в [11] говорится следующее: инвертор с последовательным подключением коммутирующего конденсатора имеет последовательную резонансную цепочку LC, обеспечивающую коммутацию, резонансная частота схемы определяет продолжительность прохождения затухающего синусоидального импульса тока через тиристор, резонансную цепочку и нагрузку, в этом случае нет необходимости включать тиристор, чтобы запереть другой тиристор, находившийся ранее в проводящем состоянии.

В [12] при описании «регуляторов переменного напряжения» на однооперационных вентилях их относят к устройствам с естественной коммутацией тиристоров, а процесс выключения тиристоров называют «линейной коммутацией». При этом отмечается, что «выходной и входной токи регулятора могут быть разрывными или несинусоидальными». Различают в [12] три способа коммутации тиристорного ключа: коммутация напряжением источника питания (переменного тока); коммутация напряжением нагрузки (спад тока по колебательному закону); принудительная коммутация (напряжением предварительно заряженного конденсатора и приложением импульса обратного тока — токовая коммутация, с использованием в обоих случаях двухтиристорных схем). Схемы принудительной коммутации могут успешно работать в инверторах напряжения, а в инверторах тока [12] они не применимы (?). На стр. 208 в [12] записано (инверторы напряжения): тиристорные мостовые схемы, работающие на индуктивную нагрузку (?), требуют применения устройств принудительной коммутации на основе независимых схем токовой коммутации каждого тиристора инвертора, одновременного выключения всех тиристоров при разрыве цепи первичного источника электропитания (коммутация по цепи питания), комбинированных схем коммутации (переключение одного тиристора подготавливает к работе схему переключения следующего, в частности при комплементарной или дополняющей коммутации включение одного тиристора автоматически приводит к выключению предыдущего, при коммутации с помощью вспомогательного тиристора включение вспомогательного тиристора вызывает запираание основного тиристора).

Отметим, что, согласно [12], коммутация (выключение) вентиля, например в резонансных инверторах и инверторах тока (?), не относится к «принудительной» коммутации, вводятся термины «комплементарной» или «дополняющей» принудительной коммутации (имеет место, в частности, как считает автор книги, в несимметричном согласованном инверторе на однооперационных вентилях с последовательным подключением конденсатора и магнитной связью коммутирующих дросселей в режимах управления с индуктивной расстройкой, рис. 1). Интересно, что в [4] по поводу свойств несимметричного (последовательного) инвертора записано: если собственная частота инвертора меньше, чем рабочая частота, то наблюдается режим с перекрытием токов, входной ток инвертора непрерывен, и такой инвертор не резонансный (?). В [11] несимметричный согласованный инвертор на однооперационных вентилях назван основной схемой класса последовательных инверторов. Параграф же в [4], где анализируется несимметричный инвертор, имеет название «последовательный резонансный инвертор». В этом разделе [4] также констатируется, что в «зависимости от соотношения собственной частоты  $\omega_0$  инвертора и рабочей частоты  $\omega$  возможны три режима работы последовательного инвертора:  $\omega_0 > \omega$  — режим естественного выключения тиристоров, в этом режиме ток открытого тиристора спадает до нуля раньше, чем отпирается очередной тиристор, ток нагрузки получается прерывистым;  $\omega_0 = \omega$  — граничный режим, в этом режиме ток открытого тиристора спадает до нуля в момент отпираания очередного тиристора, ток нагрузки начально непрерывен;  $\omega_0 < \omega$  — режим принудительной коммутации, в этом режиме ток открытого тиристора в момент

коммутации отличен от нуля, и напряжение на нагрузке имеет форму, близкую к прямоугольной, ток нагрузки непрерывен».

Приведенное нами описание из [4], в принципе, противоречит ранее установленному в том же источнике факту, что при использовании, в частности, «однооперационных тиристоров в АИ (всегда) возникает необходимость в принудительной коммутации (запирании) вентилях». Здесь же коммутация в резонансных инверторах (в «режиме естественного выключения тиристоров») не классифицируется как «принудительная». И второй важный момент заключается в том, что, согласно данному описанию из [4], для двух режимов работы несимметричного (согласованного или резонансного) инвертора устанавливается возможность реализации различных видов коммутации вентилях.

В [13] анализируется, фактически, та же схема несимметричного согласованного (резонансного) инвертора, но уже на полевых транзисторах (с внутренними диодами). Отмечается, что это «одна из наиболее интересных схем преобразователей с мягким переключением, коммутация силовых ключей без потерь возможна в этом преобразователе, если работа происходит с небольшой паузой между интервалами проводимости и если имеется небольшая индуктивность, включенная последовательно с обмоткой (согласующего трансформатора), этой индуктивностью может быть индуктивность рассеяния, после запираания одного из ключей ток, поддерживаемый индуктивностью рассеяния, перезаряжает выходные емкости транзисторов, на открывающемся ключе напряжение в течение короткого резонансного процесса спадает до нуля, и ток некоторое время проходит через внутренний диод транзистора, управляющий сигнал на отпираание транзистора должен подаваться в интервале времени, когда внутренний диод проводит ток, тогда транзистор включается при нулевом напряжении на нем, то есть с нулевыми потерями».

Таким образом, в [13] речь идет о т. н. «мягкой» (или квазирезонансной) коммутации вентилях в согласованном (резонансном) последовательном несимметричном АИ. Заметим, что такое включение полевого транзистора, о котором говорит автор (при проводимости внутреннего диода), является, в принципе, неудачной реализацией управления при работе на высокой частоте и может с большой вероятностью приводить к выходу вентиля из строя (патент РФ № 2395154 и [42]).

В [6] раздел 32.20 называется «Способы выключения вентилях в преобразовательных установках». В нем говорится, что «наряду с диодами и незапираемыми или, иначе, однооперационными тиристорами (которые с помощью управляющего электрода могут быть открыты в нужный момент времени, но не могут быть заперты) в преобразовательных установках в последнее время все шире применяются запираемые (двухоперационные) тиристоры и силовые транзисторы, используемые в ключевом режиме, и в соответствии с этим все возможные способы выключения вентилях могут быть сведены к трем случаям: коммутация, т. е. выключение вентиля (диода, тиристора, транзистора) за счет включения какого-либо другого прибора и образования при этом контура, содержащего наряду с другими элементами (индуктивности, активные сопротивления) источник напряжения (или тока) с такой полярностью, что ток в рассматриваемом венти́ле спадает

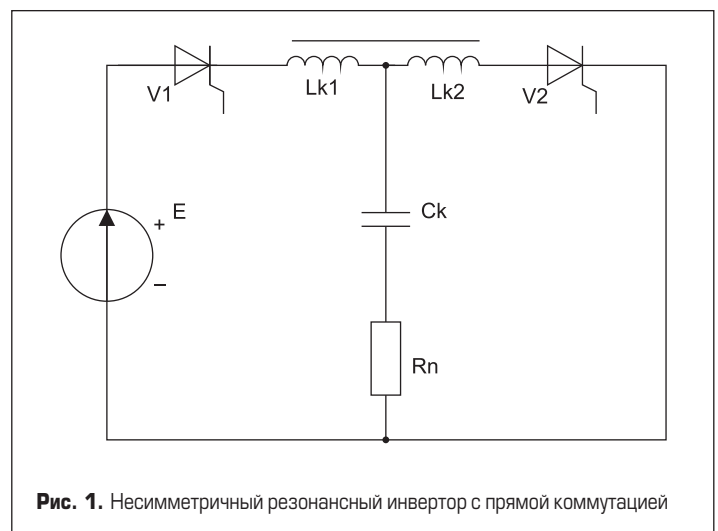


Рис. 1. Несимметричный резонансный инвертор с прямой коммутацией

к нулю, таким образом, под коммутацией в преобразовательной технике понимают процесс перехода (?) тока с одного вентиля на другой (или с одного вентиля плеча на другое), причем в течение определенного интервала времени, которое в пределе при мгновенной коммутации (?) стремится к нулю, ток проходит через оба вентиля одновременно, если коммутирующее напряжение, обуславливающее спад тока через вентиль к нулю, есть напряжение сети переменного тока, вводимое в контур коммутации непосредственно или через трансформатор, коммутацию называют естественной, если источником коммутирующего напряжения является специально введенный вспомогательный источник постоянного (или режы переменного) напряжения, не связанный непосредственно с сетью, коммутацию называют принудительной (в частности, — принудительной конденсаторной) или искусственной, принудительная коммутация может быть прямой (или одноступенчатой) или не прямой (двухступенчатой); запираение (выключение) вентиля по управляющему электроду (при использовании полностью управляемых приборов), здесь также можно говорить о принудительной коммутации, так как ток, протекающий через прибор, необходимо при его запираении перевести (?) на другой прибор (обычно диод); 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).

Недостатков у приведенного в [6] описания более чем достаточно. Во-первых, имеет место многократное смешение понятий. Во-вторых, согласно этому описанию, коммутация отсутствует в резонансных инверторах без диодов при работе с паузой (и есть в резонансных инверторах со встречно-параллельными, отсекающими или стабилизирующими диодами и в инверторах без диодов, но работающих без паузы), а также не реализуется, в частности, в преобразователях с «принудительной двухступенчатой (вернее, не прямой, двухступенчатая коммутация — это, скорее, обозначение коммутационного цикла) коммутацией», о которых совсем противоположное сообщается в этом же разделе 3.2.20 (выше, более развернуто и в несколько ином контексте представленное уже анализировалось по данному источнику). В-третьих, бесосновательно утверждается, что коммутации нет в ведомых преобразователях, работающих в режимах разрывных токов, и это... при наличии сетевого источника коммутирующего напряжения, обеспечивающего выключение вентиля. В-четвертых, не всегда «при запираении (выключении)... двухоперационного вентиля ток, протекающий через прибор, необходимо... перевести на другой прибор». В-пятых, если, например, взять классический инвертор напряжения на полностью управляемых вентилях, то, в соответствии с [6], при работе его на активно-индуктивную нагрузку реализуется принудительная коммутация, а при работе на активную — принудительной коммутации в том же инверторе нет, а по смыслу, совсем «отсутствует» (какая-либо) коммутация вентиля (в инверторе напряжения, работающем на чисто активную нагрузку, при смене нагрузки)...

В [14] отмечается, что «ток через тиристор можно прервать с помощью ключа, соединенного с тиристором как последовательно, так и параллельно, практически используются метод естественного или линейного переключения (когда источник переменного тока изменяет полярность (?) в цепях переменного тока) и метод ускоренного переключения (также, по смыслу, в цепях переменного тока), в цепях постоянного тока тиристор находится в проводящем состоянии до тех пор, пока через него протекает ток в прямом направлении, период проводимости продолжается до момента прерывания тока или до момента принудительного формирования обратного тока, процесс выключения тиристора обратным током называется принудительным выключением». Способы переключения (однооперационного) тиристора [14] подразделяются на пять классов: «А» — переключение за счет резонанса в нагрузке; «В» — с помощью последовательной LC-цепи (шунтирует тиристор); «С» — с помощью C- или LC-цепи, коммутируемой (смежным) шунтирующим тиристором; «D» — с помощью C- или LC-цепи, коммутируемой вспомогательным тиристором; «Е» — переключение с помощью внешнего импульса (получаемого от вторичной

обмотки трансформатора, к первичной обмотке которого подключен импульсный источник, соединяемой последовательно с тиристором); «F» — линейное переключение.

Таким образом, в [14] рассматриваются методы естественного (линейного) и ускоренного (искусственного, по отечественной терминологии) переключения вентиля в цепях переменного тока и принудительного выключения (собственно коммутации) — в цепях постоянного тока. Виды коммутации имеют в [14] буквенные обозначения. Кроме того, автор [14] пишет: в резонансных инверторах коммутационные потери минимальные, поскольку включение (?) и выключение (способ переключения А) ключа происходят в моменты времени, когда напряжение и ток в цепи проходят через нулевое значение, замена обычных ключей в преобразователе (постоянного тока) с широтно-импульсной модуляцией резонансными ключами позволила создать новый тип — квазирезонансные преобразователи (коммутация в них является дальнейшим развитием метода принудительной коммутации), представляющие собой нечто среднее между преобразователями с широтно-импульсной модуляцией и резонансными преобразователями. Здесь можно было бы сказать (по нашему мнению) — нечто последующее в ряду: преобразователь без демпфирующих цепей, преобразователь с демпфирующими цепями... Далее в [14] «схема квазирезонансного преобразователя напоминает схему преобразователя с широтно-импульсной модуляцией, однако (в первом) всегда присутствует колебательный LC-контур, к которому подключен силовой ключ, и LC-контур используется не только для формирования временной диаграммы тока и напряжения ключа (как при применении какой-либо схемы демпфирования), но также для накопления и передачи энергии от источника питания к нагрузке, так же как в обычном резонансном (?) преобразователе». Указывается также в данном источнике, что используемый в «резонансном ключе» вентиль может проводить ток в одном или двух направлениях (например, быть зашунтированным встречным диодом). Вследствие резонанса [14] ток, протекающий через ключ, через некоторое время становится отрицательным и, таким образом, происходит естественная коммутация (имеется в виду выключение силового вентиля при нулевом токе).

Довольно сложно, по [14], провести границу между «обычным резонансным преобразователем» и т. н. «квазирезонансным». Это объяснимо, так как принцип (quasi-resonant converter technology) изначально был сформулирован для преобразователей постоянного тока, и различие может заключаться лишь в вариации способа коммутации вентиля, но не типа устройства. Указанное «различие» вообще не просто выделить и довести до понимания, особенно если в преобразователях используются только однооперационные вентиля.

В [15] автор пишет (не сделать ссылку на эту книгу по вопросу коммутации в преобразователях нельзя): полупроводниковые приборы в энергетической электронике представляют интерес с точки зрения ключевого режима работы, роль ключа заключается в коммутации различных частей схемы, практические ключи могут лишь в той или иной степени приближаться к «идеальным». На стр. 180 упоминается «естественная» коммутация вентиля в ведомых сетью преобразователях, а на стр. 190 — «эммиттерная коммутация» биполярного транзистора, заключающаяся в предварительном выводе его из режима глубокого насыщения с последующим форсированным запираением за счет размыкания цепи эмиттера. На стр. 290 в [15] рассматриваются возможные способы запираения тиристорных ключей: прерывание силового тока путем размыкания цепи или шунтировки ключа (данный метод может быть применен к любому тиристор с регенеративным механизмом включения, однако сопровождается высоким значением скорости нарастания напряжения в схеме); принудительная коммутация путем подключения дополнительного источника питания, обеспечивающего протекание выходного обратного тока (методы принудительной коммутации подразделяются на несколько классов и применяются к однооперационным тиристорам SCR); выключение по цепи управления, свойственное только двухоперационным тиристорам (при этом используется либо воздействие импульсов отрицательного тока управления — GTO, GCT, либо положительным смещением в цепи изолированного затвора — MCT); комбинированные методы выключения, осуществляемые совместным воздействием импульсов обратного напряжения и отрицательного тока управления (данные

методы применяются для специальных типов тиристорных преобразователей, называемых GATT — комбинированно выключаемые приборы).

Таким образом, в [15] «классы» принудительной коммутации выделяются в отдельный «метод», применимый для однооперационных приборов (SCR), и говорится о самостоятельных, т. е. «комбинированных» методах выключения (для GATT). Отметим, что последние целесообразно применять в некоторых схемах АИ и для двухоперационных вентилях, а выключение «путем размыкания цепи» (каскадная коммутация) может не сопровождаться «высоким значением скорости нарастания напряжения в схеме».

На стр. 109 в [16] по теме, касающейся методов коммутации вентилях в АИ, записано: широкий класс схем автономных резонансных инверторов объединяет общий колебательный характер электромагнитных процессов, механизм естественной коммутации вентилях, прерывистый характер входного тока.

В [8] приводится определение «квазирезонансной коммутации» (при этом «квазирезонансные преобразователи» в книге выделены в отдельный класс устройств силовой электроники): иногда преобразователи классифицируют «по... способам коммутации тиристорных (конденсаторная, LC-контуром, под воздействием резонансных процессов в нагрузке и др.) и наличию резонансных цепей для снижения коммутационных потерь (квазирезонансные преобразователи постоянного тока и др.), принцип квазирезонансной коммутации ключей состоит в формировании гладких (?) траекторий переключения на интервалах коммутации за счет использования явлений резонанса в индуктивных и емкостных элементах (?), соединенных с полупроводниковым управляемым ключом, поскольку явление резонанса связано с возникновением колебательных процессов в резонансном LC-контуре (?), то создаются условия для переключения ключа в нуле тока или напряжения в зависимости от схемы и типа квазирезонансного ключа, так как полупроводниковый ключ является существенно нелинейным элементом на интервалах коммутации (?), то форма тока или напряжения в контуре, включающем коммутируемый ключ, несинусоидальна и не соответствует закону, описывающим резонансные процессы (?), кроме того, длительность колебаний обычно не превышает одного или двух полупериодов (?) из-за перехода схемы после переключения ключа в новое состояние с другим числом переменных, описывающих траекторию изменения рассматриваемых параметров, поэтому схемы, реализующие рассматриваемый принцип (?) коммутации, называют схемами с квазирезонансной коммутацией, целью использования квазирезонансной коммутации является уменьшение потерь мощности при переключении за счет «мягкой» коммутации ключей — в нуле тока или в нуле напряжения».

Из сложного для понимания текста [8], который, вероятно, ничего не объясняет, можно выделить только то, что авторы связывают понятие «квазирезонансной коммутации» со схемами на «квазирезонансных ключах» (почему-то — не на «резонансных ключах», как принято) с полностью управляемыми вентилями, а назначение (что важно) — с «уменьшением потерь мощности при переключении».

В [17] относительно «квазирезонансных преобразователей» написано следующее: для улучшения характеристик переключения транзисторов разработано два метода формирования процессов коммутации, первый состоит в переключении транзисторов при нулевом токе, второй — при нулевом напряжении. Реализуются оба метода путем введения в схему резонансных LC-контуров и созданием, таким образом, резонансных ключей, в которых либо формируются квазисинусоидальные колебания тока через ключ, в результате чего создаются условия для его коммутации при нулевом токе как при включении, так и при выключении, либо формируются квазирезонансные колебания напряжения на ключе и обеспечивается его включение и выключение при нулевом напряжении; поскольку в резонансных схемах транзистор не испытывает одновременного воздействия напряжения и тока с большими амплитудами, то перегрузки и потери на переключение сводятся к минимуму, принцип резонансного переключения может быть применен к большому числу преобразователей, путем простой замены в силовой части схемы обыкновенного ключа на резонансные можно получить квазирезонансный (?) преобразователь.

Таким образом, в [17] аналогично [8] «квазирезонансный преобразователь» — это устройство на «резонансных ключах» (за исключением

того (?), что ключи все-таки не «квазирезонансные») с полностью управляемыми вентилями (в данном учебном пособии — с транзисторами). Отметим, что, согласно англоязычным источникам, схемы преобразователей, в которых осуществляется «нулевой переход» одновременно для тока и напряжения, называются «мультирезонансными конвертерами» (multi-resonant converters).

В [18] можно прочитать: принцип работы преобразователя основан на периодическом включении и выключении тех или иных полупроводниковых приборов (вентилей), под включенным понимается проводящее или открытое, а под выключенным — непроводящее или закрытое (запертое) состояние полупроводникового прибора, особое значение имеет принцип выключения или запирающего прибора, приводящий к размыканию соответствующей ветви силовой цепи, способ выключения зависит от вида источника напряжения, который обеспечивает ток, необходимый для выключения полупроводникового прибора, в большинстве случаев ток, проходящий через прибор, который выключается, переводится под действием этого источника напряжения в другую ветвь цепи за счет включения (отпирания) прибора в этой ветви, такой процесс называется коммутацией, если источником коммутирующего напряжения является первичная или вторичная сеть переменного тока, коммутацию называют сетевой (или иногда естественной), если источником коммутирующего напряжения является вспомогательное напряжение, получаемое с помощью элементов, входящих в специальные коммутирующие цепи (коммутирующие устройства) самого преобразователя (вентилей, конденсаторов, дросселей и т. д.), коммутацию называют принудительной (или иногда искусственной), в последнем случае могут быть также использованы приборы, которые полностью или частично (т. е. в комбинации с другими средствами) выключаются с помощью управляющего электрода, например транзисторы или специальные запираемые тиристоры. В отличие от ведомого сетью инвертора [18], автономный инвертор может работать и при отсутствии в приемной сети других источников переменного напряжения, необходимых для коммутации, и может обеспечивать любую частоту выходного переменного напряжения. При переводе [18] редактором сделано примечание, касающееся резонансных инверторов, классифицируемых в оригинале как устройства, «коммутируемые нагрузкой» или «ведомые нагрузкой», и не относимых к автономным («самокоммутируемым»), следующего содержания: в отечественной литературе (имеется в виду — на русском языке) обычно принято относить к автономным также и резонансные инверторы (называемые иногда колебательными). Инверторы, ведомые нагрузкой [18], применяются для питания устройств с большой индуктивностью, например нагревателей при индукционном нагреве, при этом индуктивность нагрузки совместно с компенсирующим конденсатором образуют колебательный контур с высокой добротностью, процессы в котором и обеспечивают выключение вентиля инвертора через каждый полупериод резонансной частоты, поэтому дополнительные коммутирующие элементы не требуются (прим. ред. перевода к этому тексту — «в режим инвертора ведомого нагрузкой или резонансного инвертора, по принятой в СССР терминологии, инвертор переходит, если входной ток имеет прерывистый характер (?), когда обязательным условием является...  $\omega_0 > \omega$ , где  $\omega_0$  — круговая резонансная частота контура нагрузки,  $\omega$  — круговая рабочая частота инвертора, определяемая частотой импульсов управления, т. е. при емкостной расстройке колебательного контура»).

Как следует из приведенного описания, в [18] под коммутацией в преобразователях понимают только процесс перевода (коммутационный цикл) тока с работающего вентиля на любой другой вентиль (именно к нему в книге относят названия: сетевая, естественная, принудительная, искусственная коммутация). Здесь возникает противоречие, связанное, в частности, с инверторами, «коммутируемыми нагрузкой»: с одной стороны, «коммутируемыми» по [18] чем-то (коммутируемыми «нагрузкой» можно назвать и инверторы, ведомые сетью), а с другой — не только не являющимися «автономными», но и не относящимися к преобразователям с «принудительной коммутацией» и к устройствам, в которых... вообще имеет место коммутация вентилях. Принудительная же коммутация может быть, согласно источнику, применена и в устройствах на приборах, «которые полностью или частично (т. е. в комбинации с другими средствами) выключаются с помощью управляющего электрода». При этом также не уточняется,

происходит ли в этом случае «переход тока» и как он осуществляется. Относительно прим. ред. перевода можно сказать следующее: резонансный инвертор, работающий в гранично-непрерывном режиме и в режиме с индуктивной расстройкой, не перестает быть резонансным, точнее — согласованным инвертором (в противном случае следовало бы указать, чем он становится). То же можно отнести и к соответствующему заключению по несимметричному последовательному (резонансному) инвертору, сделанному в [4] (очевидно, смена принципа коммутации или, в определенной степени, режима, скорее всего, не должна изменять принадлежность АИ к тому или иному классу). Здесь уместно упомянуть о резонансных (согласованных) инверторах с отсекающими диодами [19, 20], в которых не реализуется в рабочих режимах «резонансная коммутация» (иначе, согласно известным обозначениям, — естественная, квазиестественная, самоимпульсная, А-класса коммутация, коммутация нагрузкой, самокоммутация) вентилей за счет «естественного» спада тока до нуля в ходе колебательного процесса в эквивалентном (коммутирующем) LC-контуре без перевода его на другие вентили. На рис. 2 приведена одна из схем резонансных инверторов с отсекающими диодами (в схеме:  $L_D$  — дроссель фильтра «большой» индуктивности;  $C_{D1}$ ,  $C_{D2}$  — конденсаторы фильтра или «разделительные конденсаторы» при включении нагрузки в режиме «удвоения частоты»;  $L_{K1}$ ,  $L_{K2}$  — коммутирующие дроссели;  $C_K$  — коммутирующий конденсатор;  $V_5$  — отсекающий диод;  $R_H$  — нагрузка). Работа этого инвертора происходит следующим образом: при включении тиристоров какой-либо диагонали (например,  $V_1$  и  $V_4$ ) ток в контуре коммутации ( $C_K - R_H - V_4 - [C_{D1} - L_{K1}, C_{D2} - L_{K2}] - V_1 - C_K$ ) нарастает по колебательному (квазисинусоидальному) закону до максимального значения, а затем начинает снижаться; напряжения на коммутирующих дросселях  $L_{K1}$ ,  $L_{K2}$  при спаде тока изменяют знак; в момент равенства напряжений на коммутирующих дросселях ( $L_{K1}$ ,  $L_{K2}$ ) напряжениям на соответствующих конденсаторах фильтра  $C_{D1}$ ,  $C_{D2}$  включается отсекающий диод  $V_5$ ; LC-контур (коммутации) выводится из работы, при этом ток тиристоров ( $V_1$ ,  $V_4$ ) за счет встречного тока разряда через них коммутирующего конденсатора  $C_K$  быстро падает до нуля, и тиристоры ( $V_1$ ,  $V_4$ ) выключаются; далее энергия, накопленная в электромагнитном поле коммутирующих дросселей ( $L_{K1}$ ,  $L_{K2}$ ), через отсекающий диод ( $V_5$ ) передается в конденсаторы фильтра ( $C_{D1}$ ,  $C_{D2}$ ). Таким образом, в схемах резонансных инверторов с отсекающими диодами, на самом деле, осуществляется не «резонансная» коммутация, а, скорее, «двухступенчатый» процесс переключения (непрямая, косвенная коммутация) в основных режимах функционирования (вот почему словосочетание «резонансный инвертор» не совсем правильное и универсальное обозначение). Коммутация силового вентиля в рассматриваемом инверторе начинается с включения «вспомогательного вентиля» — отсекающего диода  $V_5$ , на который и «переводится ток» (при этом «практически на всем межкоммутационном интервале процессы в схеме имеют колебательный характер», что, по устоявшимся представлениям [9], безусловно, относится именно к резонансным АИ). Интересно и важно здесь то, что вспомогательный вентиль — неуправляемый. Отметим в этой связи, что и в регулируемых выпрямителях с т. н. «нулевыми» вентилями (диодами) включение нулевого вентиля «обеспечивает»

(с «участием» сети и нагрузки, естественно) коммутацию (выключение) основного вентиля и — это также «непрямая коммутация» (а коммутационный цикл или переключение — «двухступенчатый»). Конечно, можно принять (с целью «гармонизации» с зарубежными представлениями, сегодня у нас активно внедряемой, и не выделять резонансные, точнее, согласованные инверторы в самостоятельный класс) то, что было на ранних этапах развития преобразовательной техники, например в 70-х годах прошлого века [21]: четкую границу между инверторами тока и резонансными инверторами провести трудно (?), поэтому в литературе резонансные инверторы иногда не выделяют в отдельный класс схем, рассматривая их как частный случай инверторов тока (?), работающих с прерывистыми входными токами. Такой подход, заметим, долгое время сохранялся в зарубежной литературе [18], но там ситуация изменилась. В РФ же в настоящее время наблюдается «возврат» к представлениям начала 70-х годов [22]: по характеру протекающих в схеме электромагнитных процессов автономные инверторы подразделяются на инверторы тока и инверторы напряжения. Однако чаще, все-таки, сейчас в нашей стране «смешивают» резонансные (согласованные) инверторы с инверторами напряжения [23]. В [18], тем не менее, подчеркивается, что «особое значение имеет принцип (способ) выключения или запираания прибора» в преобразователе.

Рассмотрим материал из еще одной публикации [24]: компромиссным решением проблемы снижения суммарных потерь мощности являются преобразователи с квазирезонансной коммутацией. Данные преобразователи, как правило, строятся по топологии импульсных схем с ШИМ-регулированием путем замены в них обычных силовых ключей на резонансные, коммутация в резонансном ключе протекает либо при нулевом токе, либо при нулевом напряжении с помощью относительно короткого по времени резонансного процесса, который носит вспомогательный характер и по этой причине называется квазирезонансным (?), квазирезонансная коммутация эффективно снижает коммутационные (динамические) потери и, в отличие от обычных резонансных преобразователей, не приводит к существенному росту статических потерь.

В [24] (при всех достоинствах определения цели и преимуществ применения) также имеем «резонансные ключи» и «квазирезонансную коммутацию». В тексте, кроме прочего, упоминаются «квазирезонансные преобразователи» (и это при «вспомогательном характере... относительно короткого... резонансного процесса»). К сожалению, в рассматриваемом материале отсутствуют ссылки на какие-либо источники.

Подведем некоторый итог. Коммутация в АИ, как классификационный признак, — это обозначение процесса (операции) выключения 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 различие между понятиями «коммутации» как процесса «сопряженного» переключения вентилей (или перевода тока с одного вентиля на другой вентиль, то есть, реально — коммутационного цикла, последовательности или последовательного ряда коммутационных операций включения и выключения основных или 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 необходимость в отличающейся формулировке (и трактовке) термина для ведомых преобразователей (все остальное сохраняется в неизменном виде, в том числе: понятие продолжительности интервала коммутации, развитые методики анализа и проч.). Кроме того, приведенная формулировка полностью согласуется с соответствующим определением в ГОСТ 18311-80. В зависимости от режима работы, соотношения параметров АИ, типа используемых вентилей (однооперационные, двухоперационные), в принципе, могут иметь место различные способы коммутации (запираания или выключения) вентилей в одном и том же устройстве. Коммутация вентилей (ключей) в АИ всегда бывает только «принудительной» операцией. При этом реализуемый (основной или характеризующий) способ коммутации, отметим, может являться не более чем дополняющим элементом

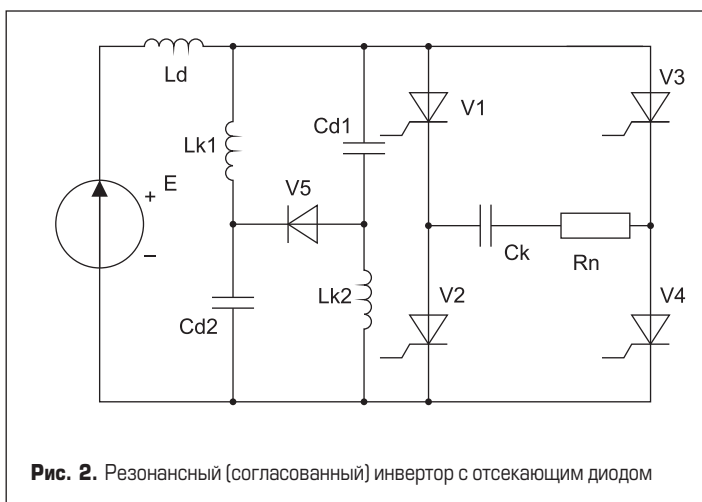


Рис. 2. Резонансный (согласованный) инвертор с отсекающим диодом

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 вентиляй в АИ следует разделять на: импульсную коммутацию; резонансную; конденсаторную; прямую; непрямую; каскодную; квазирезонансную; управляемую. Коммутация может быть внешней (external commutation) и внутренней (internal commutation, self-commutation [3] или interne Kommutierung (нем.), за счет приемов или средств, элементов («компонентов»), относящихся к самому инвертору). В ведомых преобразователях коммутация внешняя, а в АИ, как правило, применяется внутренняя коммутация.

Импульсная коммутация (pulsed commutation, упоминаемые названия: принужденная, E-класса, эмиттерная, естественная, сетевая, линейная, natural commutation, impulsed switching) — выключение вентиля за счет энергии отдельного источника (генератора) напряжения (или тока). К этому способу относится, 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 счет 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 согласованных инверторах с резонансной коммутацией), выполненных на однооперационных и двухоперационных вентилях, и представляет собой процесс выключения за счет колебательного спада тока вентиля до нуля (или до тока удержания) в специальном образом организованной цепи (контуре) коммутации. При использовании транзисторов опирающийся 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 в форме представленного словосочетания на стр. 345 в [25], 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 (или согласованных инверторах с резонансной коммутацией).

Конденсаторная коммутация (capacited commutation, естественная, capacitor commutation, capacitor switching) — выключение вентиля за счет доминирующего естественного экспоненциального спада его тока до нуля (или до тока удержания) при заряде конденсатора, включенного в цепь коммутации последовательно [5].

Прямая коммутация (direct commutation, одноступенчатая, сопряженно-импульсная, межфазная, пофазная, токовая, C-класса, комбинированная, комплементарная, дополняющая) реализуется при такой организации процесса, когда включение очередного основного (силового) вентиля приводит к спаду тока и последующему выключению (коммутации) работающего (выключаемого, коммутируемого) основного вентиля. Согласно определению МЭС 551-16-09, прямая коммутация — это переход тока с одного главного вентильного плеча на другое главное вентильное плечо без передачи основного тока в какую-либо вспомогательную цепь. Этот способ коммутации получил широкое распространение в АИ для электротехнологических систем. Прямая коммутация применима в преобразовательных устройствах на одно- и двухоперационных вентилях. В параллельных инверторах тока на SCR-тиристорах, в частности, реализуется именно прямая коммутация.

Непрямая коммутация (indirect commutation, косвенная, вспомогательно-импульсная, D-класса, двухступенчатая, побочная, комбинированная), по определению МЭС 551-16-10, — последовательный ряд коммутаций от одного главного плеча к другому путем последовательных коммутаций через одно или несколько вспомогательных плеч. В этом определении МЭК фактически дается описание коммутацион-

ного цикла. Выключение основного вентиля при непрямой коммутации начинается и обеспечивается за счет включения вспомогательного (неосновного) вентиля, в общем случае, управляемого или неуправляемого. Пример непрямой коммутации за счет неуправляемых вентиляй рассмотрен нами выше (резонансные инверторы с отсекающими диодами). Чаще всего в качестве вспомогательных вентиляй используются управляемые приборы (в том числе в схемах инверторов напряжения на тиристорах SCR с управляемыми цепями принудительной коммутации). К этому же способу коммутации можно отнести процесс, когда выключение вентиля происходит за счет его закорачивания при включении вспомогательного (шунтирующего) вентиля.

Каскодная коммутация (cascade commutation, эмиттерная, катодная, коммутация по цепи питания, комбинированная, cascade commutation, cascade switching) осуществляется путем прерывания тока основного вентиля за счет отключения (разрыва) цепи при выключении другого вентиля, включенного (соединенного) последовательно в эту же цепь. Известны каскодные (последовательные) схемы соединения вентиляй, как правило, дискретных неодинакового типа (комбинированные), когда один вентиль используется для разрыва тока другого вентиля (например, более высоковольтного, но менее быстродействующего [15, 26–28] и т. д.). Однако один вентиль (или несколько, в общем случае) может применяться для каскодной коммутации не одного, а нескольких (других) вентиляй в схеме устройства [27, 28].

Квазирезонансная коммутация (quasi-resonance commutation, дополняющая, quasi-resonant switching) 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 (рис. 3), где она является основной) [29–32]. Обязательными условиями применения (реализации) коммутации такого типа является наличие в схеме инвертора и «участие» в общем коммутационном процессе (цикле) «неосновных» вентиляй (например, встречных или обратных, нулевых, стабилизирующих, отсекающих диодов и проч.) и LC-контуров с собственными частотами, соответствующими характеристическим временам процесса [31, 32], которые значительно меньше периода выходной частоты АИ. Причем электромагнитные процессы в LC-контуре 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 «квазирезонансной коммутации» заканчивается всегда раньше, чем заканчивается полупериод собственных колебаний LC-контра, 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 нем имеет место в течение всего интервала проводимости вентиля, то есть до (значительно ранее) момента «начала» спада тока до нуля — резонансные инверторы со встречно-параллельными

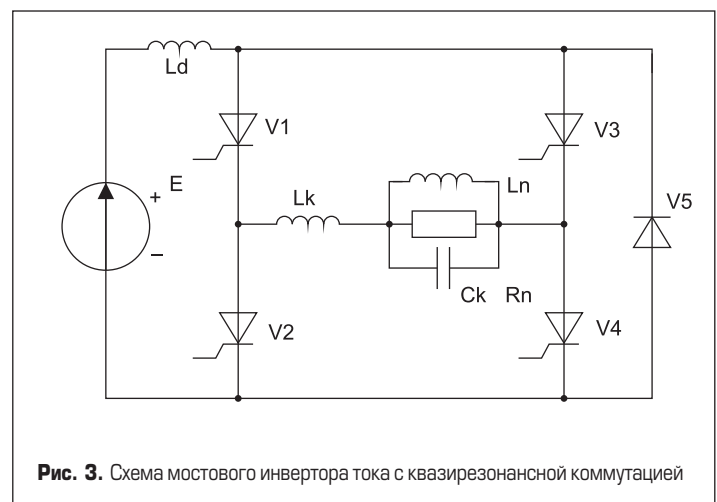


Рис. 3. Схема мостового инвертора тока с квазирезонансной коммутацией



диодами). Последнее (а именно, колебательный процесс продолжается) — также один из признаков, который отличает «квазирезонансную коммутацию» от «прямой коммутации», когда в контуре имеется LC-цепь и когда 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), 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», «мультирезонансная коммутация» употреблять нецелесообразно, так как, в частности, «квазирезонансный» инвертор от «мультирезонансного» отличить было бы невозможно, 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 же коммутация может быть реализована во всех трех типах АИ: согласованных инверторах, инверторах тока и инверторах напряжения [31–33] (и это лишь, как правило, «вспомогательный процесс», только «снижающий», а точнее, в определенной мере, перераспределяющий динамические потери на переключение вентиля, и, вероятно, приставку «квази» можно было бы отнести к названию соответствующего инвертора). Нет тем более никаких оснований выделять «квазирезонансные инверторы» (или преобразователи, не только АИ) в отдельный самостоятельный класс [14]. Эта группа устройств (достаточно широкая), конечно, обладает определенными специфическими свойствами, но не более того (топологию т. н. «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, например [34–36] (это, кстати, диссертации и публикации на основе последних, как оценивать их, можно понять из [37]), то в них вообще речь идет... 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 [14, 38] (в «квази-» и «мультирезонансных преобразователях» почему-то при этом используются «резонансные ключи» (?), а способы коммутации силовых вентиля для разных вариантов могут быть вообще различными, и нигде «авторами идеи» не применяются определения «квази-» или «мультирезонансной коммутации» силовых вентиля). Да и для этих случаев метод (технология) «мягкого» (soft-switching) переключения вентиля 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 того, всегда все равно приходится уточнять, как именно происходит «мягкое» переключение). Но вопрос состоит не в этом. Проблема заключается в классификации самого преобразователя (АИ, в нашем случае). Словосочетание «мультирезонансная коммутация» образовано по аналогии и получает распространение в РФ также по аналогии с определением «квазирезонансная коммутация» (переключение — цикл и коммутация — это различные процессы и понятия, соответственно). Впервые последнее словосочетание («квазирезонансная коммутация») было приведено в патенте РФ № 2085013 (заявл. в 1992 г., опубл. в 1997 г.). На самом деле преобразователь, заявляемый в указанном патенте, выполнен на основе

схемы согласованного АИ с резонансной коммутацией (как и большинство известных, упомянутых выше, «квазирезонансных» импульсных DC/DC-преобразователей реализуют именно такую коммутацию) или просто — резонансного инвертора 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 в качестве прототипа устройство на полностью управляемых вентилях — «резонансных ключах», с иным способом коммутации вентиля и несоответствующего назначения). Независимо определение «квазирезонансная коммутация» применительно к АИ (характерных явных топологий [30, 32, 33] управляемых «резонансных ключей», кстати, в них может и не использоваться) было сформулировано [39] в середине 90-х годов. Правильнее, повторим, ее было бы назвать «квазиуправляемая коммутация», однако, как уже отмечалось выше, 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, а также не противоречат другим устоявшимся более точным определениям и, явно, здравому смыслу), а также, без необходимости, не расширять перечень применяемых электротехнических терминов и определений. Нового и существенного (и правильного) словосочетание «мультирезонансная коммутация» к терминологии по АИ не добавляет. В этой связи следовало бы упомянуть аннотацию к одному из англоязычных (откуда из-за неточности интерпретаций все это и «пошло») источников по т. н. (в переводах на русский язык) «квазирезонансным преобразователям», которая, в определенной мере, ставит знак равенства между различными терминами, обозначающими «мягкое» переключение вентиля в них: преобразователи с мягким переключением (не выключением, 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 вентиля (controlled commutation, самокоммутация, коммутация по управляющему электроду, выключение за счет управляющего вывода, внутренняя, self-commutation, controlled switching) реализуется только в АИ на полностью управляемых (двухоперационных вентилях). Коммутация является «управляемой», если выключение вентиля осуществляется путем подачи запирающего сигнала на управляющий электрод, сам процесс начинается с момента такой подачи, и не используются никакие дополнительные средства и приемы для ее обеспечения и улучшения характеристик. Наиболее характерный пример массового применения «управляемой коммутации» — современные преобразователи частоты с классическими инверторами напряжения на транзисторах (или на запираемых тиристорах) со 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) вентиля, например прямая коммутация [40] (о резонансном и квазирезонансном способах сказано выше).

Коммутационный цикл — перевод или переход (переключение) тока между силовыми вентилями в ведомых преобразователях (для определенности — без работающих несюльных или нулевых вентилях) — состоит из интервалов выключения (коммутации) 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 диодов), например, коммутационный (естественный, резонансный) цикл может включать (если она имеет место) интервал «паузы». В инверторах напряжения на двухоперационных вентилях со 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 (рис. 3) 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 терминологию по вентиляльным устройствам.

На рис. 4 изображена схема автономного однофазного мостового согласованного инвертора на двухоперационных вентилях со встречно-параллельными диодами и демпферным дросселем ( $L_k$ ), нагрузкой которого является параллельный колебательный контур, образованный индуктором ( $L_n$ ,  $R_n$ ) и компенсирующей батареей конденсаторов ( $C_k$ ).

На рис. 5, в качестве иллюстрации рассмотренных определений, приводятся диаграммы токов и напряжений на нагрузке автономного согласованного инвертора (рис. 4), в котором, в зависимости от режима, реализуются разные способы коммутации вентиляей, а именно: резонансная (инвертор может быть выполнен по этой же схеме с одинаковыми параметрами элементов, режимами работы и на однооперационных вентилях (а)), квазирезонансная (только на полностью управляемых вентилях (б)) и управляемая коммутация (в) (резонансный контур в последнем случае не обеспечивает ограничения уровней коммутационных потерь, не «улучшает» процесс коммутации).

В [23] сравниваются по энергетическим параметрам и электрическим потерям два устройства безотносительно к области использования: «нерезонансный» и «резонансный инверторы напряжения» (?), как их называет автор. На самом же деле «сравнение» делается между просто «инвертором напряжения» с квазирезонансной («мягкой») коммутацией и согласованным (или «резонансным») инвертором с резонансной же коммутацией (как вариант, который также упоминается, и с «улучшающей» или квазирезонансной «дополняющей» коммутацией, своего рода — комбинированный принцип, обеспечиваемый шунтирующими вентилями конденсаторами, обозначаемыми в работе как «демпфирующие»). По большому счету, это несравнимые устройства, если учесть, что и критерии выбора параметров схем в [23] автором не определены. Весь материал направлен на доказывание преимуществ по энергетическим характеристикам и величинам потерь «резонансного инвертора напряжения» (приводятся и соответствующие «диаграммы» зависимостей, коэффициенты полезного действия отличаются до 10%, мощности потерь — до 100% (?), в пользу, естественно, «резонансного инвертора напряжения»). А окончательный вывод («поэтому использование резонансных инверторов напряжения в качестве звена промежуточной частоты в источниках питания... предпочтительнее») сформулирован на основе следующего предложения: как показывают диаграммы, потери в нерезонансном инверторе напряжения ниже (?) во всем диапазоне регулирования выходной мощности. Конечно, можно посчитать последнее цитируемое предложение опечаткой в исходном тексте (в «диаграммах» [23] имеет место прямо противоположное), но более вероятно, что именно оно является истинным. Резонансные инверторы получили развитие из специфических потребностей (и особенностей) электротехнологических, в частности индукционных, нагрузок, когда требовались повышенная частота и компенсация (значительной) реактивной составляющей мощности нагрузки («резонансное устройство» получалось как бы «само собой»). По энергетическим характеристикам же они всегда уступали инверторам тока и напряжения в «конкурирующих» областях применения из-за высоких установленных мощностей реактивных элементов, амплитудных и действующих значений токов и напряжений, что увеличивает общие потери (известно, что чем больше «контуров» и реактивных элементов в устройстве, тем «хуже энергетика»), и необходимы соответствующие критерии выбора и оценки. В расчетной схеме «нерезонансного инвертора напряжения» [23] активное сопротивление равно 5 Ом, индуктивность (нагрузки) составляет 2 мкГн, добротность — 0,25, а в схеме «резонансного инвертора напряжения», соответственно, активное сопротивление — 4,2 Ом, индуктивность — 30 мГн,

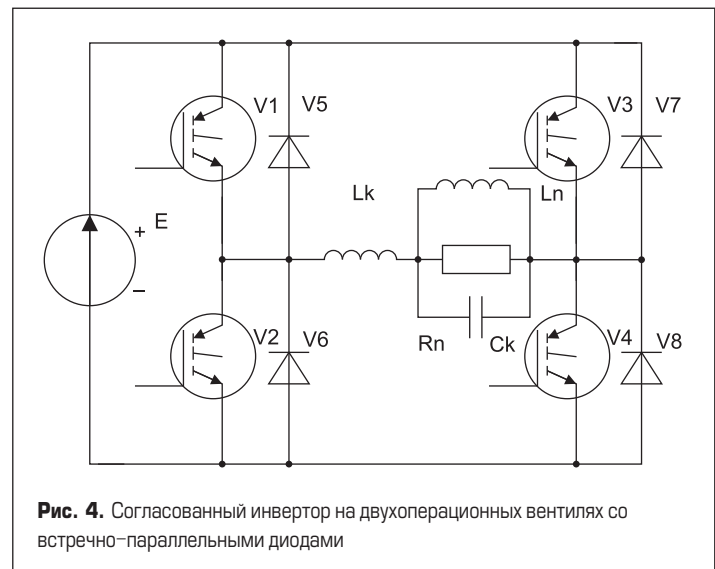


Рис. 4. Согласованный инвертор на двухоперационных вентилях со встречно-параллельными диодами

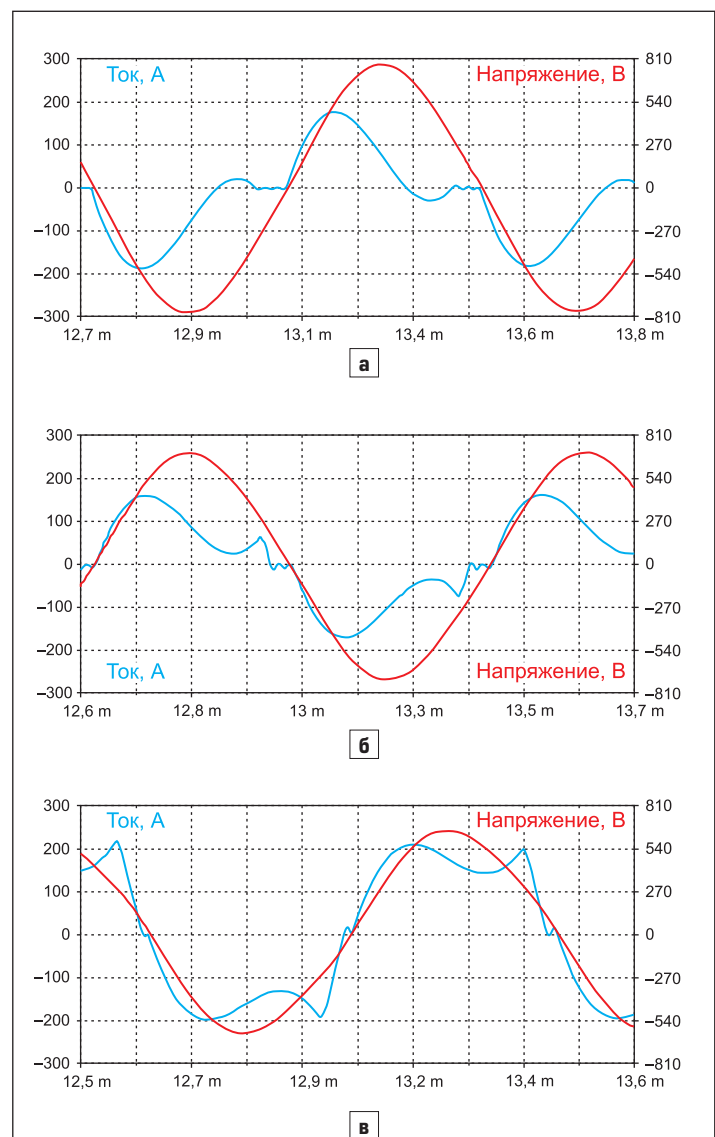


Рис. 5. Осциллограммы выходного тока и напряжения согласованного инвертора: а) при резонансной коммутации ( $E = 530$  В; выходная мощность  $P \approx 38$  кВт; частота  $f = 1,30$  кГц; добротность нагрузки  $Q \approx 6,53$ ; отношение  $L_k/L_n = 1$ ); б) при квазирезонансной коммутации ( $E = 530$  В; выходная мощность  $P \approx 40$  кВт и частота  $f = 1,27$  кГц; добротность нагрузки  $Q \approx 5,02$ ; отношение  $L_k/L_n = 1$ ); в) при управляемой коммутации ( $E = 530$  В; выходная мощность  $P \approx 66$  кВт и частота  $f = 1,23$  кГц; добротность нагрузки  $Q \approx 2,59$ ; отношение  $L_k/L_n = 1$ )

добротность — 4,5 (при этом последовательно с нагрузкой в резонансном инверторе включен еще и коммутирующий конденсатор «без потерь»). Вид «диаграмм» и результат в этом случае можно было представить и без «расчетов» (не говорим, каким реальным устройствам и нагрузкам это все соответствует и для чего подобное, ничего не доказывающее, сравнение делалось)... В статье [23] при классификации исследуемых инверторов («нерезонансный», «резонансный инвертор напряжения») приводятся ссылки на зарубежные источники, однако в последних такие устройства не упоминаются.

В публикации [41], в которой есть ссылка на [23], резонансный инвертор с дополнительными, шунтирующими вентилями, «демпфирующими конденсаторами» называется «последовательным резонансным (?) инвертором напряжения» (схема, по сути, идентична приведенному в [23] устройству (рис. 6), называемому там «резонансным инвертором напряжения»), а преобразователь на его основе — «типовым». В аннотации к [41] записано, что «предложен способ кодово-импульсного регулирования технологического параметра преобразователя частоты для установки индукционного нагрева, при использовании... способа значительно уменьшаются мощность потерь на переключение силовых коммутирующих приборов, массогабаритные показатели и увеличивается КПД преобразователя частоты». А далее в [41] можно прочитать: КИМ (кодово-импульсная модуляция) в (?) технологии индукционного нагрева является новым (?) и очень перспективным направлением, т. к. позволяет при достаточной точности регулирования (?) практически исключить динамические потери на переключение силовых коммутирующих приборов, что в принципе не сможет обеспечить ни один из методов регулирования (?), применяемых в индукционном нагреве. При этом в разделе статьи «Теория КИМ» указывается, что «регулирование среднего значения потребляемой от сети энергии при КИМ достигается за счет изменения количества вынуждающих импульсов, подключаемых к нагрузке за некоторый интервал времени... выходная частота инвертора в данном случае постоянно настроена на резонанс, обеспечивая таким образом нулевой ток включения (?) и выключения силовых коммутирующих приборов». И это... при наличии в схеме шунтирующих вентили «демпфирующих конденсаторов», разряд которых (для такого способа управления, априори и, вероятно, авансом, учитываем еще, что интервал dead time новым способом все-таки предусматривается, несмотря на отсутствие сведений о нем в тексте и отображения на временных диаграммах) при включении вентилей, что очевидно, имеет место и ничем не ограничен (не выполняется условие «мягкой» или квазирезонансной коммутации, одна из основных причин выхода из строя вентилей в схемах АИ с указанным способом выключения, которая привела даже к массовым разработкам специальных типов транзисторов для подобных схем). Непонятно, зачем «демпфирующие конденсаторы» вообще включены в схему «последовательного резонансного инвертора напряжения» с предложенной КИМ. Оставляя без комментария, какое отношение к рассмотренному способу регулирования АИ имеет КИМ (или ИКМ, импульсно-кодовая модуляция), которая представляет собой вариант кодирования цифровой информации при передаче данных, и как КИМ может «практически исключить динамические потери на переключение силовых коммутирующих приборов», отметим только, что

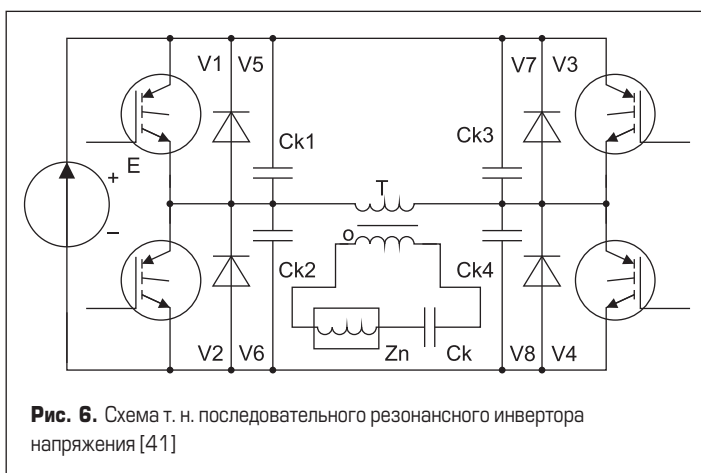


Рис. 6. Схема т. н. последовательного резонансного инвертора напряжения [41]

способ регулирования мощности за счет «изменения относительного числа полупериодов прохождения тока к числу полупериодов, в течение которых ток отсутствует» хорошо известен, имеет недостатки принципиального характера, неустранимые никакой «модификацией», и периодически кем-то «использовался», в том числе в установках индукционного нагрева, как минимум, с момента, как стал применяться сам индукционный нагрев. В некоторых источниках из указанной области техники этот способ регулирования (не модуляции) называют: число-импульсным (наиболее точное определение), с ударным возбуждением, широтно-импульсным на низкой частоте, низкочастотным широтно-импульсным управлением (или регулированием), широтно-импульсным управлением с «постоянной паузой» или «с переменным периодом» (?), частотно-широтно-импульсным регулированием, наконец, релейным регулированием (если рассматривать «модификацию с постоянным количеством пропусков периодов резонансного тока» и с «варьируемым» периодом модуляции, другой класс дискретных систем), а также импульсной модуляцией на низкой частоте и просто широтно-импульсной модуляцией согласно определению МЭС 551-16-30 (и нигде — КИМ, не упоминается такое определение и в источниках, включая ГОСТ Р 51317.3.2-99, на которые ссылаются авторы статьи; при этом на последнюю книгу (Кобзев А. В., Михальченко Г. Я., Музыченко Н. М. Модуляционные источники питания РЭА. М.: Радио и связь, 1990), указанную под № 11 в списке цитируемых или используемых, ссылки в тексте нет совсем). Однако в данной книге, согласимся, все-таки встречается на одном из рисунков аббревиатура ИКМ без расшифровки понятия, а также названия «кодо-импульсный модулятор» (КИМ) и «кодовый модулятор» (КМ), но применить это к вопросу невозможно...

## Литература

1. Лабунцов В. А., Ривкин Г. А., Шевченко Г. И. Электроприводы с полупроводниковым управлением. Автономные тиристорные инверторы. Под ред. М. Г. Чиликина. М.—Л.: Энергия, 1967.
2. Розанов Ю. К. Основы силовой электроники. М.: Энергоатомиздат, 1992.
3. Силовая электроника: краткий энциклопедический словарь терминов и определений. Под ред. Ф. И. Ковалева и М. В. Рябчицкого. М.: Издательский дом МЭИ, 2008.
4. Справочник по преобразовательной технике / И. М. Чиженко, П. Д. Андриенко, А. А. Баран и др. Под ред. И. М. Чиженко. К.: Техніка, 1978.
5. Булатов О. Г., Царенко А. И., Поляков В. Д. Тиристорно-конденсаторные источники питания для электротехнологии. М.: Энергоатомиздат, 1989.
6. Электротехнический справочник. В 3 т. Т. 2. Электротехнические изделия и устройства. Под ред. И. Н. Орлова. М.: Энергоатомиздат, 1986.
7. Зиновьев Г. С. Силовая электроника: учебное пособие для бакалавров. 5-е изд., испр. и доп. М.: Изд-во Юрайт, 2012.
8. Справочник по силовой электронике / Ю. К. Розанов, П. А. Воронин, С. Е. Рыбкин и др. Под ред. Ю. К. Розанова. М.: Издательский дом МЭИ, 2014.
9. Силкин Е. Элементы классификации автономных инверторов и свойства согласованного инвертора с резонансной коммутацией. Ч. 1 // Силовая электроника. 2017. № 4.
10. Силовая электроника: учебник для вузов / Ю. К. Розанов, М. В. Рябчицкий, А. А. Кваснюк. 2-е изд., стереотип. М.: Издательский дом МЭИ, 2009.
11. Бедфорд Б., Хофт Р. Теория автономных инверторов. Пер. с англ. Под ред. И. В. Антика. М.: Энергия, 1969.
12. Уильямс Б. Силовая электроника: приборы, применение, управление. Спр. пособие. Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1993.
13. Мелешин В. И. Транзисторная преобразовательная техника. М.: Техносфера, 2006.
14. Рама Редди С. Основы силовой электроники. Пер. с англ. Под ред. Д. П. Приходько. М.: Техносфера, 2006.
15. Воронин П. А. Силовые полупроводниковые ключи: семейства, характеристики, применение. М.: Издательский дом Додэка-XXI, 2001.

16. Васильев А. С., Гуревич С. Г., Иоффе Ю. С. Источники питания электротермических установок. М.: Энергоатомиздат, 1985.
17. Кобзев А. В., Коновалов Б. И., Семенов В. Д. Энергетическая электроника: уч. пособие. Томск: Томский межвузовский центр дистанционного образования, 2010.
18. Энергетическая электроника: справочное пособие. Пер. с нем. Под ред. В. А. Лабунцова. М.: Энергоатомиздат, 1987.
19. С. В. Шапиро, В. Г. Казанцев, В. В. Карташев и др. Тиристорные генераторы ультразвуковой частоты. М.: Энергоатомиздат, 1986.
20. Силкин Е. М. Многоячейковый резонансный инвертор // Полупроводниковые преобразовательные устройства. Межвуз. сб. науч. тр. Чувашский государственный университет. Чебоксары, 1987.
21. Розанов Ю. К. Основы силовой преобразовательной техники: учебник для техникумов. М.: Энергия, 1979.
22. Лукутин Б. В., Обухов С. Г. Силовые преобразователи в электрооборудовании: уч. пособие. Томск: Изд-во ТПУ, 2007.
23. Патанов Д. А. Общие проблемы снижения коммутационных потерь в инверторах напряжения // Схемотехника. 2001. № 7.
24. Баранов А. М. Сравнительный анализ современных стабилизаторов напряжения // NovaInfo.Ru. 2016. № 49.
25. Управляемые полупроводниковые вентили: принципы действия и области применения р-п-р-п-устройств. Пер. с англ. Ф. Джентри, Ф. Гутцвиллер, Н. Головьяк и др. Под ред. [и с предисл.] В. М. Тучкевича. М.: Мир, 1967.
26. S. Chin, D. Chen. A GTO circuit using IGT and MOSFET as gate driver. Conf. Rec. IEEE Ind. Appl. Soc. 22 ng Annu. Meet., New York, Oct. 18–23, 1987.
27. Пат. 2516451 РФ, МКИ H03 K 17/08. Резонансный коммутатор (варианты)/ И. П. Воронин, П. А. Воронин // Бюл. 2014. № 14.
28. Юегин А. Н. Технические характеристики генераторов для индукционного нагрева пятого поколения серии ТПЧ-5 в диапазонах от 50 Гц до 22 кГц, от 25 кВт до 4 МВт. [www.aljuel.eu/](http://www.aljuel.eu/)
29. Кошечев Л. Г., Третьяк Т. П. Мощные автономные инверторы напряжения // Электричество. 1970. № 3.
30. А. с. 1683150 (заявка № 4658381 от 03.03.1989) СССР, МКИ H02 M 5/45. Преобразователь частоты / Е. М. Силкин // Бюл. 1991. № 37.
31. Силкин Е. М. Релейно-импульсное управление в инверторах тока и напряжения с квазирезонансной коммутацией // Труды 3 МНК, посвящ. методам и средствам управления технол. процессами. Саранск, 25–27 окт. 1999.
32. Силкин Е. М. Применение нулевых схем инверторов тока с квазирезонансной коммутацией // Силовая электроника. 2005. № 3.
33. Пат. 2453946 (заявка № 2009128887 от 27.07.2009) РФ, МКИ H02 M 7/523. Автономный согласованный инвертор с квазирезонансной коммутацией / Е. М. Силкин // Бюл. 2012. № 17.
34. K. Liu. High-frequency quasi-resonant converter techniques. Ph. D. Dissertation, Electrical Engineering Department, Virginia Polytechnic Institute and State University, Oct. 1986.
35. M. M. Jovanovic. High-frequency, off-line power conversion using quasi-resonant and multi-resonant techniques. Ph. D. Dissertation, Electrical Engineering Department, Virginia Polytechnic Institute and State University, Sept. 1988.
36. F. C. Lee, W. A. Tabisz, M. M. Jovanovic. High-frequency quasi-resonant and multi-resonant converter technologies // Archiv für Elektrotechnik. 1990. №74.
37. Силкин Е. Элементы классификации автономных инверторов и свойства согласованного инвертора с резонансной коммутацией. Ч. 2 // Силовая электроника. 2017. № 5.
38. M. M. Jovanovic. Resonant, quasi-resonant, multi-resonant and soft-switching techniques merits and limitations // J Electron. 1994. Vol.77. № 5.
39. Силкин Е. М. Импульсные методы в технологиях водоподготовки и водоочистки // Тез. докл. НТК, посвящ. альтернативной энергетике и проблемам экологии. Кемер, 21–28 ноября 1995.
40. Пат. 2321146 (заявка № 2005118389 от 14.06.2005) РФ, МКИ H02 M 1/16. Способ управления двухоперационным тиристором / Е. М. Силкин // Бюл. 2008. № 9.
41. Земан С. К., Сандырев О. Е. Кодово-импульсный способ регулирования технологического параметра преобразователя частоты установки индукционного нагрева // Известия Томского политехнического университета. 2007. Т. 310. № 1.
42. Силкин Е. М. Применение силовых МДП-транзисторов в высокочастотных автономных инверторах напряжения с квазирезонансной коммутацией // Силовая электроника. 2009. № 4.