

# Элементы классификации автономных инверторов

## и свойства согласованного инвертора с резонансной коммутацией. Часть 4

*Лучше совсем не помышлять об отыскании каких бы то ни было истин, чем делать это без всякого метода.*

*Р. Декарт*

*Всякой истине суждено одно мгновение торжества между бесконечностью, когда ее считают неверной, и бесконечностью, когда ее считают тривиальной.*

*А. Пуанкаре*

**При оценке величины кажущегося внутреннего импеданса (сопротивления: внутреннего, собственного, выходного, входного) инвертора, моделируемого в этом случае активным двухполюсником, схему замещения составляют для межкоммутационного интервала (интервала проводимости основного вентиля, который считают идеальным электрическим ключом), идеальные источники напряжения закорачивают, а идеальные источники тока и нагрузочную цепь размыкают, импедансы реактивных элементов схемы рассчитывают на частоте первой (основной) гармоники выходного сигнала (частоте, равной частоте управления основного вентиля, увеличенной в  $n$  раз, где  $n = 1, 2, 3, \dots$  — коэффициент умножения частоты) устройства. Если кажущийся внутренний импеданс (выходное сопротивление) инвертора значительно меньше кажущегося импеданса нагрузки на частоте первой гармоники выходного сигнала, такое устройство относят к классу инверторов напряжения. Инвертор тока имеет кажущийся внутренний (выходной) импеданс, существенно превышающий кажущийся импеданс нагрузки (обычно для практических устройств более чем в семь–девять раз). При сравнимых импедансах инвертора и нагрузки устройство следует относить к классу согласованных инверторов. Резонансные инверторы являются частным случаем согласованного инвертора.**

**Евгений Силкин, к. т. н.**

elsi-mail@ya.ru

**В** [1] даны определения для инверторов напряжения и тока соответственно: инвертор напряжения — «инвертор, питаемый от цепи постоянного тока с преобладающими свойствами (характеристиками) источника напряжения»; инвертор тока — «инвертор, питаемый от цепи постоянного тока с преобладающими свойствами источника тока».

Как записано в предисловии к [1] «при подготовке словаря использовались энциклопедический словарь «Электроника» (М.: Советская энциклопедия, 1991); Международный электротехнический словарь, гл. 551

«Силовая электроника», второе издание, 1997 — русская версия (International Standart, IEC 60050-551, Second Edition, Manuscript 1997–06); словарь терминов «Силовая электроника» (М., 2001), а также ряд государственных стандартов, ссылки на которые даны в тексте»; «несмотря на то, что некоторые определения, взятые из указанных (?) документов, нельзя признать удачными, составители оставили их без изменения, поскольку они являются официальными».

Трудно согласиться с подобным высказыванием по той причине, что большинство понятий в [1] все-таки не содержит ссылок на источники, а определе-

ния... из документов, которые «нельзя признать удачными», следует, вероятно, давать хотя бы с разъяснениями, почему они таковыми являются (иначе непонятно вообще назначение этого материала, когда уже есть «неудачные» стандарты с ошибками). Тем более составители считают, что «настоящий словарь позволяет специалистам в области силовой электроники, а также в смежных научно-технических областях правильно использовать термины, узнать точные и стандартизованные определения, лучше сопоставлять термины, употребляемые в русскоязычной или англоязычной литературе, словарь могут использовать также переводчики научной литературы и публикации в области силовой электроники, он будет полезен студентам и преподавателям вузов, в которых проходят подготовку специалисты в области электротехники, электроэнергетики, радиоэлектроники и др.»

Определений, которые «нельзя признать удачными», в [1] действительно достаточно, причем больше всего это относится к терминам и понятиям, не содержащим ссылок на источники.

Что же касается упомянутых инверторов напряжения и тока, то в определениях [1] для них... действительно указаны ссылки на соответствующие пункты МЭС. Однако если взять исходные тексты (IEC 60050-551:1998 International Electrotechnical Vocabulary), в них нет того, что записано по данной теме в [1]. Приводятся (в International Electrotechnical Vocabulary, IEV) для инверторов напряжения и тока только несколько словосочетаний (а именно, названий), которые, вероятно, считаются равнозначными. При этом смысл их состоит в том, что инвертор напряжения «конвертирует» напряжение (из постоянного в переменное, «инвертор источника напряжения»), а инвертор тока — «конвертирует» ток (инвертор источника тока). Если же применить определения из [1], то, питая инвертор тока «от цепи постоянного тока с преобладающими свойствами источника тока», имеем, как следует из текста, инвертор тока, а питая его же «от цепи постоянного тока с преобладающими свойствами (характеристиками) источника напряжения», будем иметь... инвертор напряжения. Но ведь в большинстве практических случаев применения инвертор тока запитывается именно «от цепи постоянного тока с преобладающими свойствами (характеристиками) источника напряжения» (выпрямитель, аккумуляторная батарея). От таких же источников питается, как правило, и инвертор напряжения (и это совсем не означает, что последний нельзя запитать от цепи со свойствами «источника тока»). Резонансные (согласованные) инверторы, аналогично, можно питать от источников с разными характеристиками (этот класс инверторов «с резонансами во всех возможных местах» в [1] упоминается совместно с «авторскими перечислениями» на русском и английском языках различного рода «резонансных» и «квазирезонансных» (?) преобразователей, из которых невозможно идентифицировать реальные устройства, и которые ни в одном источнике более не встречаются). Таким образом, определения для инверторов напряжения и тока в [1] не соответствуют оригинальным понятиям из International Electrotechnical Vocabulary, и вообще... ничего не обозначают. В IEV нет и «квазирезонансных ключей», «квазирезонансных» инверторов и преобразователей.

Необходимо при этом также заметить, что понятия «инвертор напряжения» и «инвертор тока» в IEV перешли... из русскоязычных источников (и к недостаткам перевода их на английский язык в прошлом веке сегодня добавлены ошибки «обратного» перевода — на русский язык). И если понятия из IEV можно отнести к разряду неудачных, то определения из [1] — только к «ошибочным» (и, очевидно, наряду с некоторыми другими понятиями из этого же источника, к наносящим обиды знаний вред).

В [2], например, при попытке применить аналогичные [1] определения (согласно ссылке — из МЭС в переводе на русский язык) авторы были вынуждены дать дополнительные разъяснения довольно значительного объема, которые, по нашему мнению, вероятно, все равно нельзя совместить с их действительным смыслом: инвертор напряжения — «инвертор, подключенный к источнику постоянного тока с преобладающими свойствами источника напряжения»; инвертор тока — «инвертор, подключенный к источнику постоянного тока с преобладающими свойствами источника тока», в цепи постоянного тока инвертора (тока) «включен реактор с большой индуктивностью, тогда при коммутации ключевых элементов ток в реакторе меняется незначительно, ключевые элементы инвертора изменяют направление

(но не мгновенное значение) тока в нагрузке, поэтому можно считать, что нагрузка подключена к источнику тока»... в схеме (инвертора напряжения) «источник постоянного напряжения подключен к ключевым элементам (?), которые периодически коммутируют цепи нагрузки при изменении полярности напряжения, подаваемого к нагрузке, поэтому можно считать, что нагрузка подключена к источнику переменного напряжения... в цепях постоянного тока некоторых инверторов напряжения имеется индуктивность, обеспечивающая коммутацию тиристоров, поэтому наличие индуктивности в цепи постоянного тока еще не является достаточным признаком (?) для определения типа схемы (инвертор тока или инвертор напряжения), необходимо знать характер изменения входного тока инвертора, как правило, считают, что в инверторах тока входной ток непрерывен или прерывается (?) на незначительное по сравнению с межкоммутационным интервалом время», «...резонансными преобразователями называются преобразователи, в которых используются электрические цепи с индуктивными и емкостными элементами (?) для коммутации ключей со снижением потерь мощности при коммутации».

Отметим здесь только, что если нагрузка инвертора, например, активная, «реактор в цепи постоянного тока» может иметь индуктивность любой величины (не только «большой», и что значит — «большой»?), и «при коммутации ключевых элементов ток в реакторе меняется незначительно (может не изменяться совсем), ключевые элементы инвертора изменяют направление (но не мгновенное значение) тока в нагрузке», реактор может и отсутствовать (инвертор напряжения), а «ключевые элементы... (будут) изменять направление (но не мгновенное значение) тока в нагрузке». То есть уточняющее разъяснение вопроса [2], на самом деле, оказалось таким же бесполезным, как и сами понятия.

В IEV есть только одно определение (551-12-26) для резонансного преобразователя (не конкретно инвертора): резонансный преобразователь (resonant converter) — преобразователь с использованием резонансного контура(-ов) для обеспечения коммутации или уменьшения потерь на коммутацию. По смыслу, последнее отличается от соответствующей части цитаты из [2]. Но не это главное. Определение из IEV относится к одному классу резонансных инверторов и устройства, например, с квазирезонансной коммутацией (DC/AC, DC/DC и проч.). И определение это крайне «неудачное». В частности, для инверторов наличие резонансных контуров может иметь место в устройстве любого класса (специально организованное либо обусловленной спецификой схемы или нагрузки, или применения, режима), что не делает их всех «резонансными». Однако имеется в тексте 551-12-26 и один положительный момент (в условиях тотальной «гармонизации») — данное определение устанавливает факт, что в резонансных инверторах коммутация вентилях все-таки есть (отметим, в [1] коммутация в них «при естественном спаде тока» отрицается). Следует различать смысл английских терминов commutation (коммутация — относится к периодическому процессу) и quenching (гашение или «тушение», полное отключение «без коммутации» — это, вероятно, «однократный», непериодический процесс или операция). Преимуществом IEV является то, что международный словарь — это довольно тщательным образом структурированный документ (и что дополнительно способствует правильной или, во всяком случае, приемлемой интерпретации приводимых в нем терминов и определений), что совсем нельзя отнести к [1].

Конечно, и к другим (даже многим) статьям из IEV имеются вопросы (стандарт не должен быть сборником отличающихся высказываний, которые кем-то и когда-то были использованы; советские нормативные документы, в частности, этого не допускали). Приведу только один пример, если речь идет об автономных инверторах. Традиционно инверторы не разделяются на «прямые» (direct inverter, 551-12-13, инвертор без подключения или без звена постоянного тока) и «непрямые» (indirect inverter, 551-12-14, инвертор с контактом или со звеном постоянного тока), и то, как последнее (в совокупности) отражено в IEV, не позволяет однозначно понимать смысл указанных понятий. Инвертор (151-13-46) — это устройство («конвертер электрической энергии»), который преобразует постоянный ток в однофазный или многофазные переменные токи». Преобразователи частоты — могут быть «прямыми» (со скрытым звеном постоянного тока или, иначе, непосредственными, без промежуточного звена постоянного тока

по ГОСТ 23414-84) и «непрямыми» (с явно выраженным звеном постоянного тока, содержащими в структуре выпрямитель и автономный инвертор), а инверторы — только «прямыми» (такое разделение для инверторов не несет смысловой нагрузки).

Но если к материалам IEV целесообразны лишь замечания, то к источникам на русском языке следует уже предъявить претензии. «Гармонизация» не должна быть источником ошибок (противоречить действующим стандартам и представлениям) или быть средством получения из этого дохода (последнее, конечно, тема другой статьи).

Так что же может являться «универсальным критерием» оценки принадлежности автономного инвертора к определенному классу устройств?

В [3, 4] автономный инвертор любого типа моделируют пассивным четырехполюсником, входные выводы (постоянного тока) которого подключают к источнику постоянного напряжения или тока, а выходные выводы (переменного тока) — к нагрузке. Сам четырехполюсник [3, 4], в общем случае, «состоит из реактивных элементов (линейных и нелинейных: катушек само- и взаимной индукции, конденсаторов, резисторов) и (существенно) нелинейных элементов — управляемых и неуправляемых вентиляей». На вход инвертора «подают постоянное напряжение, а на выходе получают переменное напряжение заданной частоты, в стационарном режиме все токи и напряжения в схеме изменяются периодически, причем их частота задается частотой изменения параметров одного или нескольких нелинейных элементов (а именно, управляемых вентиляей), и в целом число  $v$  раз ( $v = 1, 2, 3, \dots$ ) меньше заданной частоты».

Моделью автономного инвертора может быть и активный двухполюсник, который, естественно, характеризуется некоторым внутренним сопротивлением (импедансом) и переменным выходным сигналом (током, напряжением) с заданными параметрами. К выводам двухполюсника подключается нагрузка, имеющая собственный импеданс (имеем каскадное соединение активной и пассивной цепей, хотя нагрузка, в некоторых случаях, может быть и активной). Фактически такая модель использована, например, в [5]: «влияние на выходное напряжение инвертора изменений сопротивления и характера нагрузки учитывается внутренним (выходным) сопротивлением инвертора, которое в общем виде может иметь реактивный характер —  $Z_{вн} = \Delta U_{вых} / \Delta I_{вых}$ », где  $\Delta U_{вых}$  — изменение действующего значения выходного напряжения, вызванное изменениями действующего значения тока нагрузки инвертора на  $\Delta I_{вых}$ .

Однако, применяя подобную модель, следует учитывать, что реальный инвертор имеет систему управления, которая, в общем, реализует различные способы управления — регулирования и алгоритмы с отличающимися целями, может содержать разного рода фильтры, схемы демпфирования и прочее, и необходимы специальные критерии оценки именно динамического (не дифференциального, если пользоваться терминологией ГОСТ Р 52002-2003) процесса — «переходных отклонений» (внешняя характеристика преобразовательного устройства, например, с инвертором тока на практике может не отличаться от характеристики устройства с инвертором напряжения).

Принцип оценивания автономных инверторов по импедансу «цепи постоянного тока» упомянут в [6]: «в зависимости от характера протекающих в схеме электромагнитных процессов автономные инверторы подразделяются на инверторы тока, инверторы напряжения и резонансные инверторы... за определяющий признак в этом случае принимается проводимость цепи постоянного тока со стороны непосредственно (?) преобразующей части (например, тиристорной мостовой схемы) относительно переменной составляющей напряжения» (то же практически дословно повторено в лекциях кафедры «Радиоэлектроника» Донского ГТУ — электронный ресурс [https://studopedia.ru/10\\_275351\\_i-osnovnie-ekspluatatsionnie-harakteristiki-invertorov.html](https://studopedia.ru/10_275351_i-osnovnie-ekspluatatsionnie-harakteristiki-invertorov.html), но с некоторым нарушением смысла, так как сказано: «...например, со стороны тиристорных, относительно переменной составляющей (?) выходного напряжения»).

В [7] автор, рассматривая инверторы тока, пишет: в основу классификации (инверторов) необходимо положить отношение эквивалентных (кажущихся) импедансов (не смешивать с линейными электрическими) цепей постоянного и переменного тока (напряжения) схемы инвертора относительно определенных (характеристических) точек схемы... Увеличением сопротивления нагрузки в классическом параллельном инверторе тока (эквивалентный импеданс цепи посто-

янного тока существенно превышает эквивалентный импеданс цепи переменного тока, или, иначе, цепи нагрузки) всегда можно перевести указанный инвертор в резонансный режим работы (сравнимые эквивалентные импедансы цепей постоянного и переменного тока).

В [8] отмечается: под инвертором тока понимается автономное вентильное преобразовательное устройство (независимый инвертор), внутренний импеданс (ГОСТ 19880-74)  $Z_{и}$  которого относительно выходных выводов на частоте  $f$  основной гармоники выходного сигнала (выходной импеданс) значительно больше импеданса нагрузки  $Z_{н}$ , то есть нагрузочная цепь преобразователя частоты с инвертором тока питается (по определению) от источника (генератора) переменного тока.

В [9] можно прочитать, что «инвертор считается автономным, если частота его выходного тока (напряжения) определяется собственными параметрами (?), различают автономные инверторы с большим внутренним сопротивлением по отношению к эквивалентному сопротивлению нагрузки: инверторы тока, в которых нагрузка, по переменной составляющей тока, включается последовательно с инвертором (?), который, в свою очередь, питается от источника тока; автономные инверторы с малым внутренним сопротивлением называются инверторами напряжения, и нагрузка в них включается параллельно инвертору (?), который, в свою очередь, подключен к источнику постоянного напряжения, классификация инверторов с точки зрения протекания коммутационных процессов при изменении эквивалентного сопротивления нагрузки (коммутационной устойчивости) позволяет (?) выделить большой класс «резонансных» инверторов, в которых часто используются «обратные» диоды».

Интересно, что в [9] название «резонансные» инверторы (как и словосочетание «обратные» диоды) при описании выделено специальным образом, в отличие от инверторов тока и напряжения, которые даются без какого-либо выделения. Смысл такого особого представления (в едином контексте) «класса «резонансных» инверторов» в статье [9], к сожалению, не поясняется. При этом можно утверждать, что дополнительные разъяснения авторов (что, к чему и как в инверторах подключается) являются избыточными и неприменимыми к теме.

Здесь уместно было бы, в дополнение к последнему тезису, привести еще одну цитату из пособия для вузов [10]: по своим свойствам АИР (автономный резонансный инвертор) «в зависимости от соотношения параметров и схемы могут быть близки (?) либо к инверторам тока, либо к инверторам напряжения, в первом случае источник питания обладает высоким сопротивлением (?) для переменной составляющей входного тока (источник тока), а во втором — малым (?) сопротивлением (источник напряжения), АИР с питанием от источников тока называются инверторами с закрытым входом (?), а питающиеся от источников напряжения — с открытым входом (?), резонансным инверторам свойствен(ен) недостаток, заключающийся в том, что напряжения на элементах схемы могут в несколько раз превышать напряжение питания, одним из способов ограничения напряжения на элементах АИР является включение обратных или встречных диодов, с помощью которых накопленная на этапе проводимости тиристорных в конденсаторе энергия возвращается в источник питания или другой накопитель энергии».

При этом следует указать, что степень «близости АИР» [10] к инверторам тока и напряжения (как и сама «близость») не имеет вообще никакого отношения к тому, «обладает» ли резонансный инвертор «закрытым» или «открытым» входом (по какой схеме (?) реализуется), и тем более к тому, от какого источника (напряжения или тока) он питается, и даже... какое сопротивление «для переменной составляющей входного тока» такой источник питания имеет (все это совершенно различные и не связанные с темой вещи, которые никак не допускают подобной путаницы).

ГОСТ 19880-74 утратил статус действующего нормативного документа в РФ в 2003 г. (в настоящее время применяют ГОСТ Р 52002-2003, который фактически аналогичен по содержанию ГОСТ 19880-74). В ГОСТ Р 52002-2003 нет термина «импеданс» (приводится определение 145 «полного электрического сопротивления» для «синусоидальных электрического напряжения и электрического тока»). В ГОСТ 19880-74, введенном в СССР в 1975 г., термин 139 «импеданс», или «кажущееся электрическое сопротивление», имел обозначение «нрк» (не рекомендуемый к применению: «для каждого понятия установлен один стандартизованный термин, применение терминов — синонимов стандартизованного термина не рекомендуется»). В IEV понятие 131-12-43 «импеданс» (impedance, complex impedance) обозначает комплексную величину  $Z$ , используе-

мую для характеристики линейных двухполюсников или двухконтактных схем при синусоидальных воздействиях. Правилom 131-12-44 в IEV вводится определение «кажущегося сопротивления» (кажущийся импеданс, apparent impedance) как «отношения среднеквадратичного (действующего) значения напряжения между выводами двухполюсного элемента или двухконтактной схемы к среднеквадратичному (действующему) значению электрического тока в элементе или цепи... при синусоидальных условиях кажущийся импеданс является модулем полного сопротивления». Таким образом, можно предполагать, что последним понятием IEV допускается нелинейность «двухполюсников и цепей» и, в общем случае, — несинусоидальность «условий». В тексте 131-14-11 IEV «выходным импедансом» (output impedance) обозначают «импеданс сети, наблюдаемый на терминалах выходного порта». Импедансом, или «полным сопротивлением», для цепей переменного тока в [11] называют отношение амплитуды напряжения к амплитуде тока (или их среднеквадратичных значений) без учета величины фазового сдвига и отличают от комплексного сопротивления цепей переменного тока (?) — как отношения амплитуды напряжения к амплитуде тока (или их среднеквадратичных значений) с учетом фазового сдвига напряжения относительно тока, протекающего через данное сопротивление. При этом к «цепям переменного тока» в [11] относят цепи с «изменяющимися во времени сигналами, среднее значение которых в течение длительного интервала времени близко к нулю», например к синусоидальными, или, иначе, «гармоническими» (периодические переменные сигналы): «периодические переменные сигналы, в том числе все элементарные сигналы в цепях переменного тока (и с определенными допущениями некоторые непериодические), могут считаться гармоническими, и для их описания часто применяются методы Фурье-анализа». Отметим, что в [11] определение «гармонический сигнал» трактуется довольно широко.

Внутренний импеданс (внутреннее сопротивление) согласно «теории цепей», по сути, является основной характеристикой любого двухполюсника или «двухконтактной электрической цепи» (схемы). При этом для двухполюсников, содержащих источники (генераторы) энергии, можно говорить именно о «внутреннем импедансе». Если же двухполюсник не содержит источников, то внутренний импеданс для него означает то же самое, что и просто «импеданс» (или сопротивление). В случае двухполюсника, содержащего некую электрическую схему, внутреннее сопротивление рассредоточено (распределено) в ее элементах, включая источники активной энергии. Эффект «кажущегося импеданса» (или внутреннего сопротивления) является неотъемлемым (и неустраняемым) свойством активного двухполюсника. Основным результатом (следствие) его наличия — это ограничение мощности, которую можно получить в нагрузке, питаемой от этого двухполюсника. Внутренний импеданс, в общем случае, не является постоянной и стабильной величиной. Он может изменяться при изменении каких-либо внешних (напряжения питания, нагрузка, ток, частота сигнала), а также и внутренних (нагрев, истощение реагентов, разряд) условий, то есть зависит от времени.

Изначально понятие «импеданса» было использовано исключительно для линейных электрических цепей переменного или сетевого тока (то есть цепей, состоящих только из «линейных элементов»). «Импеданс» позволяет «строго» описывать поведение линейного двухполюсника, в частности, с реактивными свойствами при воздействии на него гармонического сигнала (синусоидального, переменного периодического сигнала одной частоты). Если схема замещения двухполюсника содержит реактивные элементы (конденсаторы, индуктивности, элементы с взаимной индукцией), то расчет, например, внутреннего (кажущегося) импеданса выполняется так же, как и чисто активного, но вместе с сопротивлениями резисторов учитываются и «комплексные импедансы реактивных элементов», входящих в схему, а вместо напряжений и токов — их «комплексные амплитуды», то есть расчет производится известным «методом комплексных амплитуд» с использованием любых правил эквивалентных преобразований линейных схем. Причем самим «импедансом» называется отношение комплексной амплитуды напряжения гармонического сигнала, прикладываемого к двухполюснику, к комплексной амплитуде тока, протекающего через него. Электрический импеданс, или полное сопротивление (и также комплексное сопротивление), в общем случае зависит от частоты. Считается, что понятие «импеданса» без ограничений применимо только, если при приложении к двухполюснику гармонического (синусоидального) напряжения (сигнала) ток, вызванный этим

напряжением, также является гармоническим и имеет ту же частоту. Здесь как раз необходимо и достаточно, чтобы двухполюсник был линейным и его свойства не изменялись со временем. При этом импеданс не должен зависеть от времени (если время, например в выражении для импеданса, не сокращается, значит, для данного двухполюсника понятие импеданса считается неприменимым). Однако и в случае негармонического сигнала (и не только негармонического) понятие «импеданс» может использоваться столь же успешно. Сигнал для таких систем просто раскладывается на спектральные составляющие при помощи ряда (или преобразования) Фурье, и рассматривается воздействие на двухполюсник (элемент или цепь) каждой спектральной компоненты. Вследствие, в частности, линейности двухполюсника (если, конечно, она имеет место) сумма откликов на спектральные составляющие сигнала будет равна отклику на исходный негармонический сигнал. В Википедии, по этому поводу говорится: «...импеданс может быть вычислен для любого двухполюсника, состоящего из резисторов, катушек индуктивности и конденсаторов, то есть из линейных пассивных элементов, также импеданс хорошо применим для активных цепей, линейных в широком диапазоне входных сигналов... для цепей, импеданс которых не может быть найден (?) в силу указанного выше ограничения (существенно нелинейные электрические цепи), бывает полезным найти импеданс в малосигнальном приближении для конкретной рабочей точки, для этого необходимо перейти к эквивалентной схеме и искать импеданс для нее». В [12], в частности, понятие «импеданса» использовано применительно к характеристике аккумуляторной батареи (?), являющейся источником знакопостоянного напряжения (со ссылкой на методику расчетов распределительных сетей постоянного тока и доклад А. Х. Андерсена «Импеданс аккумуляторных батарей» на 3 семинаре Ericsson Energy Systems, М., 1998). На стр. 35 записано [12]: «полное сопротивление (импеданс) аккумуляторной батареи  $Z_B$ , составленной из  $n$  последовательно включенных элементов на круговой частоте  $\omega$ » (величина и принцип выбора не указаны), определяется «следующим выражением:  $Z_B = \{(nR_I)^2 + (n\omega L_I)^2\}^{1/2}$ , где  $R_I$  — внутреннее активное сопротивление аккумулятора (нелинейная величина, зависящая от времени),  $L_I$  — индуктивность одного аккумулятора».

Заметим, что на самом деле линейных электрических цепей (систем) в природе не существует. Линейная электрическая цепь как объект анализа (синтеза) — это лишь более или менее удачное применение с определенной степенью точности какого-либо метода (принципа) линеаризации к исходной нелинейной системе (то есть просто «хорошая» аппроксимация реальной цепи или «субъективная» модель этой цепи, отвечающая задаче). «Хорошей линеаризацией» является, в частности, и использование в преобразовательной технике понятия «силовой вентиль» (или идеальный ключ) в качестве модели практических устройств (полупроводниковых, газоразрядных, электронных — явно нелинейных силовых приборов).

Таким образом, «импеданс» (внутренний кажущийся импеданс или сопротивление), заключим, — своего рода универсальная характеристика (свойство) электрической цепи и любого активного двухполюсника, каковым можно представить и инвертор. Понятие «внутренний импеданс» (или кажущееся внутреннее сопротивление) ранее уже применялось рядом авторов для описания свойств автономных инверторов. Нагрузка инвертора (нагрузочная цепь), добавим (точнее, повторим), также может быть охарактеризована собственным импедансом (полным сопротивлением) для выходного сигнала инвертора. И, что существенно, целесообразно применять все-таки следующие определения, отличающие данные понятия от иных терминов в нормативных документах: кажущийся внутренний импеданс инвертора; кажущийся импеданс нагрузки (инвертора).

В общем случае кажущийся внутренний импеданс инвертора  $Z_H$  может быть представлен только нелинейной величиной, зависящей от целого ряда параметров (алгоритм, характеристики и частота управления, напряжения, токи, спектр, параметры нагрузки, напряженность поля, индукция, температура и прочее) и времени  $t$ , которая должна определяться для соответствующей рабочей точки системы «инвертор–нагрузка»:

$$Z_H = F_1(\mathbf{p}, \mathbf{u}, \mathbf{q}, t),$$

где:  $F_1$  — функция;  $\mathbf{p}$  — вектор параметров, относящихся к инвертору;  $\mathbf{u}$  — вектор параметров управления;  $\mathbf{q}$  — вектор параметров, относящихся к нагрузке.

Кажущийся импеданс нагрузки  $Z_H$  также является нелинейной величиной, зависящей от определенных параметров (спектр сигнала, напряжения, токи, геометрия, напряженность поля, индукция, температура и так далее) и времени  $t$ , и которая также определяется в рабочей точке системы «инвертор–нагрузка»:

$$Z_H = F_2(s, g, t),$$

где:  $F_2$  — функция;  $s$  — вектор параметров, относящихся к нагрузке ( $q\subset s$ );  $g$  — вектор параметров, относящихся к инвертору ( $g\subset p$ ). Например, плавильная индукционная печь как электротехнологическая нагрузка инвертора характеризуется особенностями конструктивного исполнения, величинами токов и напряжений на выводах, частотой основной гармоники и спектром потребляемого тока, распределением температуры в нагрузке (температурным полем), размерами кусков шихты, массой, видом материала и геометрией частей нагрузки, напряженностью и геометрией поля в индукторе, условиями охлаждения. Система является существенно нелинейной, и большинство параметров зависят от времени.

Очевидно, «точное» определение указанных величин импедансов (естественно, для конкретной рабочей точки) возможно только путем специальных измерений или, например, по результатам имитационного моделирования. Однако для целей настоящей статьи необходимости в «точном» определении импедансов нет, и вполне достаточна простая оценка порядка этих величин с использованием известных допущений и приемов линеаризации (аппроксимации).

Рассмотрим схему инвертора на рис. 1 [13]. Чисто активной (но, в этом случае, нелинейной) нагрузкой  $R_H$  может быть представлена, например, газоразрядная лампа. Пары транзисторов  $V_1, V_4$  и  $V_2, V_3$  включаются поочередно с частотой  $f$  (или круговой частотой  $\omega = 2\pi f$ , частотой управления вентилями). Частота основной (первой) гармоники выходного сигнала (напряжения и тока) инвертора, очевидно, равна  $f$  (период  $T = 1/f$ ). Для случая нагрузки  $R_H$ , которую можно было бы представить «линейной», в установившемся режиме мгновенное напряжение  $u_H(t)$  и мгновенный ток  $i_H(t)$  в ней будут иметь одинаковую (прямоугольную) форму и, соответственно, спектры:

$$u_H(t) = 2U_M \pi^{-1} \sum_{n=1}^{\infty} n^{-1} (1 - (-1)^n) \sin(n\omega t), \quad n = 1, 2, 3, \dots, \infty;$$

$$i_H(t) = 2I_M \pi^{-1} \sum_{n=1}^{\infty} n^{-1} (1 - (-1)^n) \sin(n\omega t), \quad n = 1, 2, 3, \dots, \infty,$$

где:  $n$  — номер спектральной составляющей;  $U_M$  — амплитуда кривой выходного напряжения инвертора;  $I_M$  — амплитуда кривой выходного тока ( $I_M = U_M / R_H$ ). Действующее значение выходного напряжения  $U_H$  инвертора (в установившемся режиме) не зависит от сопротивления нагрузки  $R_H$  и равно напряжению питания инвертора  $E$ , а выходной действующий ток  $I_H$  определится просто из закона Ома:

$$U_H = (f \int_0^T u_H^2(t) dt)^{1/2} = U_M = E;$$

$$I_H = (f \int_0^T i_H^2(t) dt)^{1/2} = I_M = U_M / R_H = E / R_H;$$

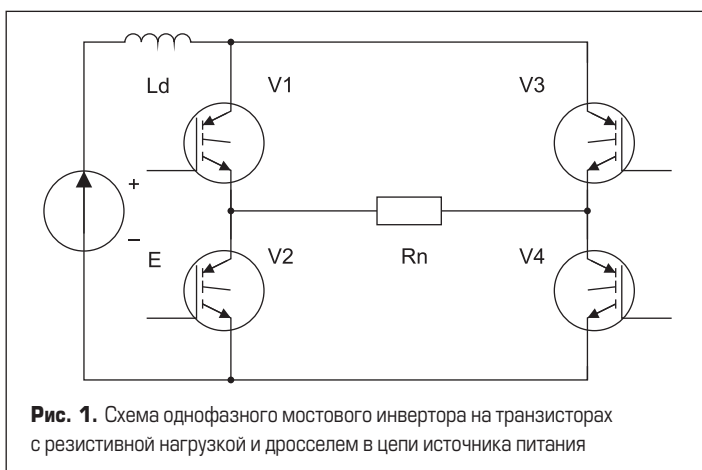


Рис. 1. Схема однофазного мостового инвертора на транзисторах с резистивной нагрузкой и дросселем в цепи источника питания

$$P_H = f \int_0^T u_H(t) i_H(t) dt = U_M I_M = U_H I_H = U_H^2 / R_H = I_H^2 R_H$$

где  $P_H$  — мощность нагрузки.

Ни напряжение  $U_H$ , ни ток  $I_H$ , ни формы кривых напряжения  $u_H(t)$  и тока  $i_H(t)$ , ни мощность  $P_H$  для рассматриваемого инвертора (линейная нагрузка  $R_H$ ) в установившемся режиме, очевидно, не зависят от величины индуктивности  $L_D$  во входной цепи.

Определим кажущийся внутренний импеданс  $Z_H$  инвертора для межкоммутационного интервала (интервала проводимости пар вентилях  $V_1, V_4$  или  $V_2, V_3$ , которые считаем идеальными электрическими ключами) при замкнутом источнике питания  $E$  и разомкнутой нагрузке  $R_H$  на частоте  $\omega$  первой гармоники выходного сигнала как:

$$Z_H = \omega L_D.$$

Для «комплексного» сигнала (нелинейные искажения прямоугольных колебаний составляют 33%) импеданс, конечно, имел бы (еще) большую величину. Кажущийся импеданс (сопротивление) нагрузки  $Z_H$  при этом равен:

$$Z_H = R_H.$$

Аналогично [10], для рассматриваемого инвертора имеют место следующие три отличающихся случая, которые можно выделить:

- $Z_H \ll Z_H$  (кажущийся внутренний импеданс инвертора намного меньше  $\omega L_D \rightarrow 0$  кажущегося импеданса нагрузки  $R_H$ , входное напряжение на импедансе нагрузки приблизительно равно напряжению источника питания  $E$  (в том числе, с определенной точностью, допуском — в динамике) или напряжению холостого хода инвертора, и это напряжение практически не зависит от импеданса нагрузки).
- $Z_H \gg Z_H$  (кажущийся внутренний импеданс инвертора намного больше кажущегося импеданса нагрузки,  $\omega L_D \rightarrow \infty$  или  $R_H \rightarrow 0$ , в этой ситуации ток (конечно, динамический) в выходной цепи устройства в основном определяется импедансом инвертора и слабо зависит или «не зависит» от импеданса нагрузки, для реальных устройств импедансы могут различаться приблизительно на порядок (и более)).
- $Z_H \rightarrow Z_H$  ( $Z_H \approx Z_H$  или, в общем,  $Z_H \approx Z_H^*$ , где  $Z_H^*$  является комплексно-сопряженным числом для  $Z_H$ , инвертор и нагрузка считаются согласованными по мощности).

В «основах электротехники» согласование с нагрузкой рассматривается чаще всего применительно к волновым свойствам длинных линий, в том числе при передаче высокочастотных сигналов. Согласование по волновому сопротивлению ( $\rho = (L_0 / C_0)^{1/2}$ , где  $L_0$  — индуктивность единицы длины линии,  $C_0$  — емкость единицы длины линии), то есть получение максимального «коэффициента бегущей волны» ( $\kappa_{БВ} = \max = 1, \kappa_{БВ} = \rho / R; \rho \leq R \leftrightarrow R / \rho; \rho > R$ ), через амплитуды падающей  $U_{ПА}$  и отраженной  $U_{ОТ}$  волн коэффициент  $\kappa_{БВ}$  выражается формулой:

$$\kappa_{БВ} = (U_{ПА} - U_{ОТ}) / (U_{ПА} + U_{ОТ}),$$

в линии передачи (в теории длинных линий и технике СВЧ) — это то же самое, что и согласование по мощности (сопротивление нагрузки  $R$  должно быть равно внутреннему или волновому сопротивлению  $\rho$  источника сигнала — линии с действующим генератором, отраженная волна отсутствует, мощность, переносимая падающей волной, полностью выделяется в нагрузку, в СВЧ-технике применяется практически всегда, в результате словосочетание «согласованная нагрузка» получило распространение и трактуется, как правило, именно в этом смысле). Однако во всех источниках по «основам электротехники» и «теории электрических цепей», «теории автоматического управления» можно также найти и информацию относительно «передачи энергии от активного двухполюсника к нагрузке» при условии максимальной мощности в ней («выбор величины сопротивления нагрузки, равного входному сопротивлению активного двухполюсника, называют согласованием нагрузки... в этом режиме активный двухполюсник отдает нагрузке максимально возможную мощность... коэффициент полезного действия... равен 0,5»). В [11], стр. 23, по этому поводу, в частности, записано: «в некоторых случаях важным является не коэффициент полезного действия источника питания, а передача им максимальной мощности... выражение  $R_L = R_S$ , здесь  $R_L$  — сопротивление нагрузки,  $R_S$  — внутреннее сопротивление источника питания,

известно как «условие согласования импедансов»... при  $R_L = R_S$  нагрузка потребляет максимальную мощность, а коэффициент полезного действия... составляет 50 %». Википедия же относительно возможных режимов согласования активного двухполюсника и нагрузки приводит текст следующего содержания: «согласование источника и нагрузки — это выбор соотношения сопротивления нагрузки и внутреннего сопротивления источника с целью достижения заданных свойств полученной системы (как правило, стараются достичь максимального значения какого-либо параметра для данного источника), наиболее часто используются следующие типы согласования: согласование по напряжению — получение в нагрузке максимального напряжения, для этого сопротивление нагрузки должно быть как можно большим, по крайней мере, много больше, чем внутреннее сопротивление источника, другими словами, двухполюсник должен быть в режиме холостого хода, при этом максимально достижимое в нагрузке напряжение равно ЭДС генератора напряжения; согласование по току — получение в нагрузке максимального тока, для этого сопротивление нагрузки должно быть как можно меньшим, по крайней мере, много меньше, чем внутреннее сопротивление источника, другими словами, двухполюсник должен быть в режиме короткого замыкания; согласование по мощности — обеспечивает получение в нагрузке (что эквивалентно отбору от источника) максимально возможной мощности», «...в цепях постоянного тока сопротивление нагрузки должно быть равно внутреннему сопротивлению источника, в цепях переменного тока (в общем случае) импеданс нагрузки должен быть комплексно сопряженным внутреннему импедансу источника». Там же находим: «иногда к источнику электропитания искусственно добавляют внешнее балластное сопротивление, соединенное последовательно с нагрузкой (оно суммируется с внутренним сопротивлением источника) для того, чтобы понизить получаемое от него напряжение либо ограничить величину тока, отдаваемого в нагрузку», «...чтобы не расходовать энергию впустую и не решать проблему охлаждения дополнительного сопротивления, в системах переменного тока используют реактивные гасящие импедансы, на основе гасящего конденсатора может быть построен конденсаторный блок питания», «...индуктивный балласт широко применяется для ограничения тока в цепи газоразрядных люминесцентных ламп».

В «инверторе с демпферным конденсатором» ( $C_D$ ), изображенном на рис. 2 (а также рассмотренном в [13], рис. 4), конденсатор  $C_D$  в диагонали переменного тока вентильного моста выполняет функцию именно «реактивного гасящего импеданса» (или «гасящего конденсатора», согласно Википедии). При этом в [13] отмечается, что параметры элементов этого инвертора выбираются из условия:  $(\omega C_D)^{-1} \rightarrow R_H$ , где  $\omega$  — угловая частота,  $R_H$  — сопротивление нагрузки. В инверторе имеет место «конденсаторная коммутация» вентилей  $V_1$ – $V_4$  (capacited commutation, capacitor commutation, IEV) за счет экспоненциального (или «естественного») спада тока в нагрузочной цепи до нулевого значения (точнее, до уровня тока удержания при использовании тиристоров). Выходное напряжение  $u_H(t)$  и выходной ток  $i_H(t)$  на интервалах проводимости вентилей (мгновенные значения) диагоналей моста  $V_1, V_4$  и  $V_2, V_3$ , соответственно, выражаются зависимостями:

$$u_H(t) = 2E \exp[\omega t (\omega C_D R_H)^{-1}], u_H(\omega t) = -u_H(\omega t + \pi);$$

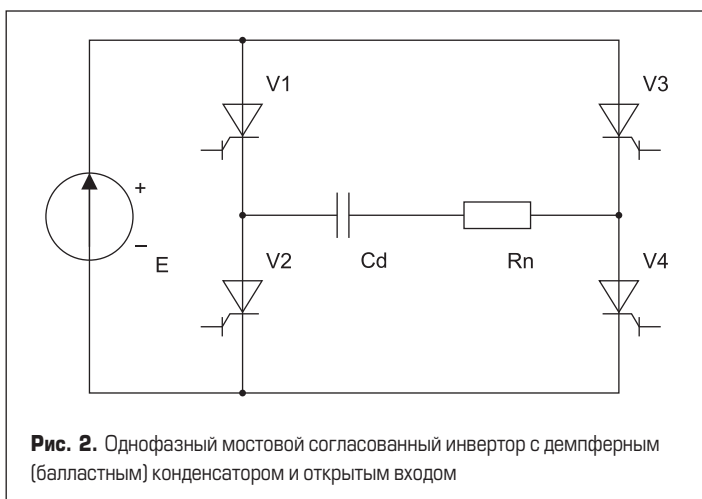


Рис. 2. Однофазный мостовой согласованный инвертор с демпферным (балластным) конденсатором и открытым входом

$$i_H(t) = u_H(t) / R_H$$

Диаграммы токов и напряжений для инвертора с демпферным конденсатором приводятся в [13] (имеет место симметрия кривых относительно оси времени  $t$ ). Выходные напряжение  $u_H(t)$  и ток  $i_H(t)$  кроме основной гармоники, естественно, включают и высшие гармонические составляющие:

$$u_H(t) = 4E\pi^{-1} \sum^n \{ (\omega R_H C_D)^{-1} \cos[(2n+1)\omega t] + (2n+1) \sin[(2n+1)\omega t] \} / [(\omega R_H C_D)^{-2} + (2n+1)^2], n = 0, 1, 2, \dots, \infty;$$

$$i_H(t) = 4E(\pi R_H)^{-1} \sum^n \{ (\omega \tau)^{-1} \cos[(2n+1)\omega t] + (2n+1) \sin[(2n+1)\omega t] \} / [(\omega \tau)^{-2} + (2n+1)^2], n = 0, 1, 2, \dots, \infty, \tau = R_H C_D,$$

где  $\tau$  — постоянная времени RC-цепи.

Таким образом, «однофазный мостовой инвертор с демпферным конденсатором и открытым входом» (рис. 2) совершенно логично (и правильно) отнести к классу «согласованных инверторов», так как «согласование по мощности» — это то, под чем обычно и понимается «согласование» (как таковое) любого активного двухполюсника с нагрузкой.

Справедливо, вероятно, также (с определенными упрощениями) было бы считать, исходя из характеризующих соотношений импедансов инвертора и нагрузки, что инвертор напряжения — это инвертор «согласованный по напряжению», а инвертор тока — инвертор «согласованный по току». Однако последнее все-таки «правильно» (в большинстве практических случаев) именно для... «переходных отклонений» (а понятия «инвертор напряжения» и «инвертор тока» являются давно известными и общепринятыми в терминологии по преобразовательной технике в РФ и за рубежом).

Что же касается «резонансных инверторов», то указанные устройства являются «классически» согласованными (по мощности, иначе — по импедансам). Действительно, если вернуться, например, к схеме «одноключевого инвертора с закрытым входом и резонансной коммутацией» (рис. 3), приведенной также в [13] и называемой в [14] инвертором тока (и «ячейковым инвертором»), а в [15] — «полирезонансным инвертором тока», то в ней на интервале проводимости вентильной ячейки ( $V_1, V_2$ ) цепь источника постоянного тока  $E$  (совместно с дросселем фильтра  $L_D$ ) оказывается замкнутой, а эквивалентный последовательный колебательный контур коммутации и «дозирования» энергии включает разделительный конденсатор  $C_0$  (элемент, который относится к инвертору и его кажущемуся внутреннему импедансу  $Z_H$ ), индуктивность  $L_H$  и активное сопротивление  $R_H$  нагрузки (кажущийся импеданс  $Z_H$  нагрузки на выходной частоте  $\omega$  инвертора равен:

$$Z_H = \{(\omega L_H)^2 + R_H^2\}^{1/2} \approx \omega L_H; \omega L_H \gg R_H.$$

Это устройство «идеально сглаженный (постоянный) ток» не инвертирует, а действующие значения тока в контуре коммутации и амплитуды тока через вентильную ячейку ( $V_1, V_2$ ) зависят от текущего режима работы и могут многократно превышать соответствующие величины для тока дросселя фильтра  $L_D$ . Одноключевой инвертор с закрытым входом и резонансной коммутацией предназначен для

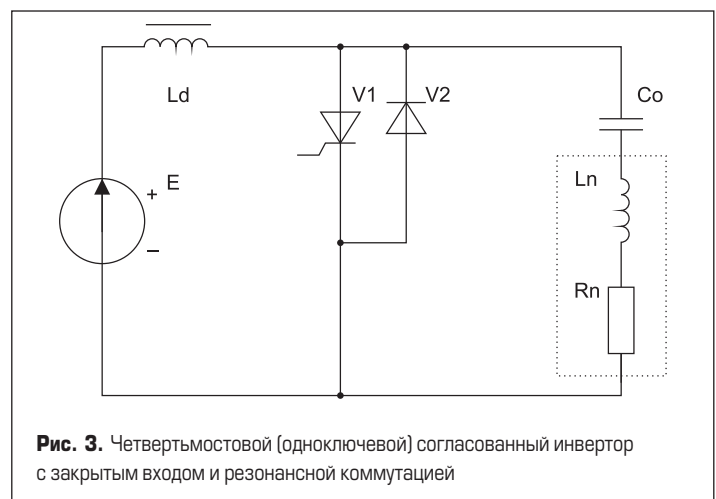


Рис. 3. Четвертьмостовой (одноключевой) согласованный инвертор с закрытым входом и резонансной коммутацией

питания индукционных нагревателей [14, 15], характеризующихся достаточно высокой добротностью  $Q = \omega L_H/R_H = 5...50$ , поэтому условие  $Z_H \approx \omega L_H$  можно считать обоснованным. Подобное допущение использовано здесь только для иллюстрации приводимого ниже текста к теме одноключевого резонансного (согласованного) инвертора. Параметры элементов одноключевого инвертора [15] выбираются из условий:

$$R_H < 2(L_H/C_0)^{1/2};$$

$$\omega \rightarrow \{(L_H C_0)^{-1} - R_H^2 (4L_H^2)^{-1}\}^{1/2}.$$

Имеет место т. н. «недодемпфирование» [11] LC-контура (коммутиации) устройства. Одноключевой инвертор с резонансной коммутацией — один из немногих преобразователей такого типа и принципа действия, который может нормально функционировать (на неполностью управляемых вентилях) не только при емкостной (наиболее часто считается единственно возможным режимом), но и при индуктивной расстройке последовательного контура коммутации. В частности, в [15] рассматривается работа одноключевого резонансного инвертора, в том числе при индуктивной расстройке контура.

Импедансы одноключевого инвертора  $Z_H$  и нагрузки  $Z_H$  можно считать, представляя собой «комплексно-сопряженные» величины (инвертор характеризуется кажущимся внутренним импедансом емкостного характера  $Z_H \rightarrow \omega C_0$ , а нагрузка — кажущимся импедансом индуктивного характера  $Z_H \rightarrow \omega L_H$ ). Кроме того, фактически выполняется и соотношение:  $Z_H \approx Z_H$  (характерный принцип «согласования по мощности», почему такие инверторы, как правило, и уступают (?) инверторам тока и напряжения по энергетическим характеристикам). Принципиально значимым является то, что оценка кажущегося внутреннего импеданса инвертора производится для схемы замещения, имеющей место на интервале проводимости основного вентиля. Одноключевой резонансный (последовательный) инвертор, очевидно, правильно было бы классифицировать как «четвертьмостовой согласованный инвертор с закрытым входом и резонансной коммутацией».

При проектировании же практических устройств с резонансными инверторами расчет параметров элементов ( $R_H$ ) ведут на т. н. «номинальный режим», при котором выходная мощность  $P_H$  инвертора максимальна:  $P_H = F_0(R_H) = \max$ . При этом для резонансных инверторов также применяют понятие «волнового сопротивления» (или «характеристического сопротивления») эквивалентного последовательного LC-контура коммутации  $\rho$ :

$$\rho = (L_K/C_K)^{1/2},$$

где  $L_K, C_K$  — соответственно индуктивность и емкость контура коммутации ( $L_H, C_0$  — для рассмотренного выше одноключевого инвертора с закрытым входом и резонансной коммутацией). В зависимости от вида схемы резонансного инвертора (и наличия в структуре встречных, отсекающих, стабилизирующих диодов) режим максимальной мощности, соответствующей «согласованной» нагрузке ( $R_H$ ), имеет место при  $R_H = (0,3...0,7)\rho$ . Заметим, что ряды мощностей  $P_H$  (в сериях) преобразовательных устройств с резонансными инверторами, в основном, соответствуют отношению (обратная пропорциональность):

$$P_{H1} \rho_1 = P_{H2} \rho_2,$$

где  $P_{H1}, P_{H2}$  — номинальные мощности любых двух вентилях преобразователей из ряда,  $\rho_1, \rho_2$  — соответственно волновые сопротивления их контуров коммутации.

Таким образом, можно сделать заключение, что «резонансные инверторы» представляют собой частный случай в классе «согласованных инверторов» — а именно, устройств, «согласованных по мощности». То есть «резонансный инвертор» — это «согласованный инвертор (обычно, но не всегда) с резонансной коммутацией».

Подведем, используя представленный материал, а также части 1–3 этой статьи [13, 16, 17], краткий общий итог. Автономные инверторы по характеру электромагнитных процессов в их схемах разделяются

на следующие классы: инверторы напряжения, инверторы тока и согласованные инверторы. При этом критерием оценки принадлежности инвертора к соответствующему классу устройств является отношение его кажущегося внутреннего импеданса к кажущемуся импедансу нагрузки. Коммутация (операция выключения) вентиля в инверторах всегда является принудительной. Применяются следующие способы коммутации: импульсная, резонансная, конденсаторная, прямая, непрякая, каскодная, квазирезонансная, управляемая (коммутация). Коммутация — это составная часть коммутационного цикла — процесса перехода или перевода тока с одного основного вентиля в преобразователе на следующий (очередной) основной вентиль. Резонансные инверторы принадлежат к классу согласованных инверторов (частный случай). В них, как правило, реализуется резонансная коммутация вентиля. По принципу управления инверторы могут быть с независимым, зависимым возбуждением и самовозбуждением (автогенераторные устройства). Инверторы выполняются по четвертьмостовым, нулевым, полумостовым, мостовым (однофазным и многофазным) и многоячейковым схемам и могут иметь «открытый» и «закрытый» вход. К многоячейковым схемам относятся и т. н. «многоуровневые» (сложные) и «матричные» топологии инверторных устройств.

## Литература

1. Силовая электроника: краткий энциклопедический словарь терминов и определений / Под ред. Ф. И. Ковалева и М. В. Рябчицкого. М.: Издательский дом МЭИ, 2008.
2. Силовая электроника: учебник для вузов / Ю. К. Розанов, М. В. Рябчицкий, А. А. Кваснюк. 2-е изд., стереотип. М.: Издательский дом МЭИ, 2009.
3. Тиристорные генераторы ультразвуковой частоты / С. В. Шапиро, В. Г. Казанцев, В. В. Карташев и др. М.: Энергоатомиздат, 1986.
4. Шапиро С. В., Зинин Ю. М., Иванов А. В. Системы управления с тиристорными преобразователями частоты для электротехнологии. М.: Энергоатомиздат, 1989.
5. Высокочастотные транзисторные преобразователи / Э. М. Ромаш, Ю. И. Дробович, Н. Н. Юрченко и др. М.: Радио и связь, 1988.
6. Розанов Ю. К. Основы силовой электроники. М.: Энергоатомиздат, 1992.
7. Силкин Е. Применение нулевых схем инверторов тока с квазирезонансной коммутацией // Силовая электроника. 2005. № 3.
8. Силкин Е. Реализация и способы управления вентилями в инверторах тока преобразователей частоты для установок индукционного нагрева и плавки металлов // Силовая электроника. 2007. № 3.
9. Зинин Ю., Рахимова И. Мостовая схема тиристорного инвертора тока для установок индукционного нагрева металлов // Силовая электроника. 2009. № 3.
10. Медведев В. А. Расчет автономных резонансных инверторов для индукционного нагрева: учеб.-метод. пособие для вузов. Тольятти: ТГУ, 2010.
11. Корис Р., Шмидт-Вальтер Х. Справочник инженера-схемотехника. Пер. с нем. М.: Техносфера, 2006.
12. Электропитание устройств и систем телекоммуникаций: уч. пособие для вузов / В. М. Бушуев, В. А. Деминский, Л. Ф. Захаров и др. М.: Горячая линия-Телеком, 2009.
13. Силкин Е. Элементы классификации автономных инверторов и свойства согласованного инвертора с резонансной коммутацией. Часть 1// Силовая электроника. 2017. № 4.
14. Лавлесс Д. Л., Кук Р. Л., Руднев В. И. Характеристики и параметры источников питания для эффективного индукционного нагрева // Силовая электроника. 2007. № 1.
15. Зинин Ю. Схемотехническая Micro-Cap-модель полирезонансного ТПЧ в режиме второй гармоники // Силовая электроника. 2013. № 2.
16. Силкин Е. Элементы классификации автономных инверторов и свойства согласованного инвертора с резонансной коммутацией. Часть 2// Силовая электроника. 2017. № 5.
17. Силкин Е. Элементы классификации автономных инверторов и свойства согласованного инвертора с резонансной коммутацией. Часть 3// Силовая электроника. 2017. № 6.