

Элементы классификации автономных инверторов

и свойства согласованного инвертора с резонансной коммутацией. Часть 2

...Кривое не может сделаться прямым, и чего нет, того нельзя считать.
Екклесиаст

— Нет... Ну что ж... Ну пусть человек работает, раз ему интересно... Я только говорю, что необъясненного ничего нет... А вообще-то даже остроумно...

— А вот все-таки у меня есть вопрос, — продолжал Хлебовводов. — Как же это она все-таки отвечает?

Я обалдело воззрился на него. Роман и Витька мрачно веселились. Эдик пришел в себя и теперь, жестко прищурившись, разглядывал Тройку.

А. Стругацкий, Б. Стругацкий

Считая совершенно очевидной важность правильно разработанной в области (инверторной преобразовательной) техники терминологии, в настоящей статье (мы) делаем попытку наметить решения этой задачи [1].

Евгений Силкин, к. т. н.

elsi-mail@ya.ru

В диссертации [2] исследуется так называемый «преобразователь комбинированной структуры». Это устройство ранее было запатентовано под названием «инвертор» в [3] (рис. 1, полезная модель Украины). Запатентован также и способ его управления (регулирования) [4]. В качестве прототипа в патенте [3] использована схема (нулевого, рис. 2) инвертора тока с квазирезонансной коммутацией [5] (классический вариант нулевого последовательно-параллельного инвертора тока с двумя дросселя-

ми фильтра на электронных лампах был предложен еще в 1960 г. С. Г. Гуревичем, А. М. Бороком, А. С. Васильевым, А. Е. Слухоцким в авторском свидетельстве СССР [6], упоминается в книге [7] и впервые анализировался при работе на активную и активно-индуктивную нагрузку в статьях [8, 9] А. Е. Слухоцким и В. Я. Пушкиным). Отличие «преобразователя комбинированной структуры» (рис. 3), предлагаемого в работе [2] (рис. 2.8-а в оригинале), от схемы прототипа [5] состоит во включении последовательно с дросселями (которые уже не выполняют по этой причине, при принятом способе управления, функцию дросселей фильтра) дополнительных транзисторов V_1, V_3 со встречно-параллельными диодами D_1, D_3 (т. е. добавлении коллекторной группы с образованием, фактически, схемы однофазного моста на транзисторах с встречно-параллельными диодами), а также двух встречных отсекающих (силовых) диодов D_5, D_6 , соединяющих, соответственно, эмиттеры транзисторов коллекторной группы V_1, V_3 с эмиттерами транзисторов эмиттерной группы V_2, V_4 , и удалении из схемы коммутирующего (демпферного) дросселя (диагональ переменного тока устройства). В патентах же [3, 4] и в структурной схеме преобразователя из [2] (рис. 2.7 в тексте диссертации) указанный коммутирующий дроссель в нагрузоч-

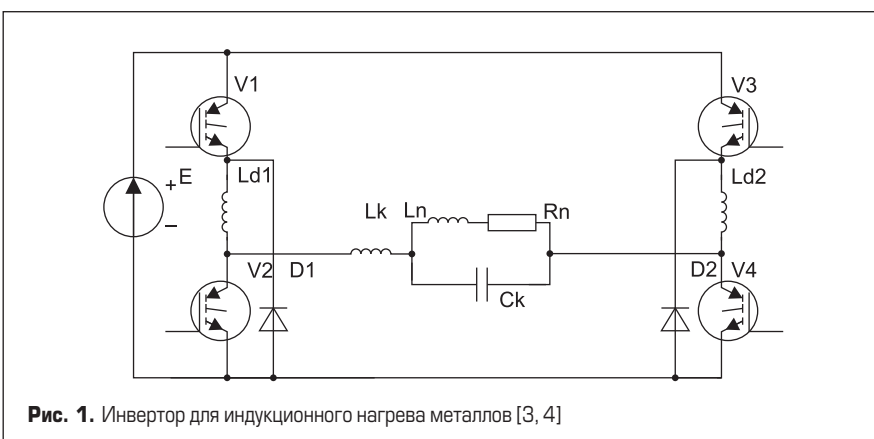


Рис. 1. Инвертор для индукционного нагрева металлов [3, 4]

ной диагонали (переменного тока) образованного однофазного моста сохраняется, но отсутствует, в отличие от принципиальной схемы «преобразователя комбинированной структуры» [2] и, соответственно, от схемы прототипа [5], встречно-параллельное шунтирование транзисторов диодами (такое шунтирование, следует отметить, почти всегда [10] сегодня имеет место в серийных вентилях или модулях). Транзисторы коллекторной группы совместно с соответствующими дросселями и отсекающими диодами образуют два так называемых ИП (импульсный преобразователь, по определению авторов). Способ регулирования [4] заключается в изменении интервала проводящего состояния транзисторов (ИП) коллекторной группы (управлении с «регулируемым углом опережения [2] относительно перехода выходного напряжения через нулевое значение»). При этом [2, 4] соответствующие транзисторы эмиттерной группы («ключи», по введенной в источнике терминологии) выключают (коммутируют) с изменяемой (от 0 до $\pi-\gamma$) задержкой относительно моментов коммутации транзисторов коллекторной группы (из работающей на выбранном полупериоде диагонали вентильного моста) и с «небольшим фиксированным углом опережения» (γ) относительно очередного момента «перехода выходного напряжения через нулевое значение». То есть в принятом способе управления устанавливается интервал (?) паузы (dead time) между моментами выключения работающих (на заданных полупериодах) вентилях и последующего включения вентилях смежных плеч (эквивалентного) однофазного моста (а именно, «во избежание сквозных токов вводят паузу между переключениями транзисторов силовой стойки, так называемое мертвое время... t_d », как говорит автор [2] в одной из сопутствующих публикаций по теме диссертации). Включение же транзисторов и эмиттерной (т. е. «ключей», по обозначению авторов) и коллекторной групп (ИП), формирующих полуволны тока прямой и обратной полярности (диагоналей), производится всегда одновременно — в момент равенства нулю напряжения на (параллельном) нагрузочном контуре [2, 4]. Для предельного режима интервалы проводящего состояния транзисторов эмиттерной и коллекторной групп (очевидно из вышеизложенного) одинаковы.

В «преобразователе комбинированной структуры» [2–4] при регулировании реализуется «управляемая» или «инвариантная» коммутация (иначе — коммутация «по управляющему электроду») транзисторов коллекторной группы (т. е. ИП). И для уменьшения коммутационных потерь в вентилях коллекторной группы, работающих при таком управлении в более критичных режимах, рекомендуется устанавливать для них защитные (формирующие траекторию выключения транзисторов ИП) LCD-цепи (рис. 4). С защитными LCD-цепями («преобразователь комбинированной структуры» по [2] приобретает «законченный» вид (рис. 2.8-б в оригинале).

В [2] автор пишет, что «объектом исследования (в его диссертации) являются высокочастотные (ВЧ) полупроводниковые преобразователи комбинированной структуры для электротехнологических установок индукционного нагрева (УИН), а предметом исследования — электромагнитные процессы и энергетические характеристики высокочастотных транзисторных преобразователей комбинированной структуры с накопительной индуктивностью (?), а также определение оптимальных режимов коммутации и параметров их снабберных цепей»¹.

Разработаны [2]: способ «одновременной мягкой коммутации токов и напряжений ключей инверторных структур с параллельной емкостной компенсацией и формированием прерывных токов (?) в накопительных индуктивностях ИП, что позволяет уменьшить массу полупроводниковых преобразователей, коммутационные потери в силовых ключах и повысить частоту коммутации или КПД (коэффициент полезного действия), система управления ВЧ преобразователем комбинированной структуры адаптивная к изменению параметров нагрузки, а также — концепция построения полупроводниковых преобразователей для ВЧ индукционных установок, которая основана на применении ИП как функциональных элементов инверторных структур (?) с параллельной емкостной компенсацией индуктивности нагрузки для реализации преобразователей комбинированной структуры с одновременной мягкой коммутацией силовых ключей». Способ управления полупроводниковым «преобразователем комбинированной структу-

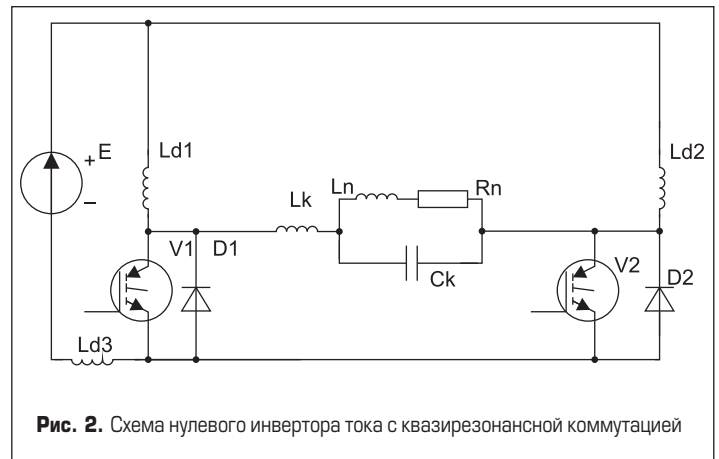


Рис. 2. Схема нулевого инвертора тока с квазирезонансной коммутацией

ры» основан [2] «на принципе самовозбуждения путем реализации положительной обратной связи (?) по напряжению, синхронизации моментов перехода выходного напряжения через ноль и регулировании коэффициентами заполнения управляющих импульсов... новое схемотехническое решение с предложенным алгоритмом управления позволяет увеличить выходную частоту транзисторных источников питания в УИН... результаты математического и имитационного моделирования подтверждены экспериментальными исследованиями». К «практически значимым полученным результатам» работы отнесены, в том числе, «новое схемотехническое решение с предложенным алгоритмом управления (позволяет увеличить выходную частоту транзисторных источников питания в УИН) и экспериментальный образец полупроводникового преобразователя комбинированной структуры с цифровой системой управления (может служить прототипом при разработке промышленных установок индукционной термообработки металлов нового поколения)».

Основное содержание диссертации «представлено в 17 публикациях, среди которых: 2 статьи в научных изданиях,

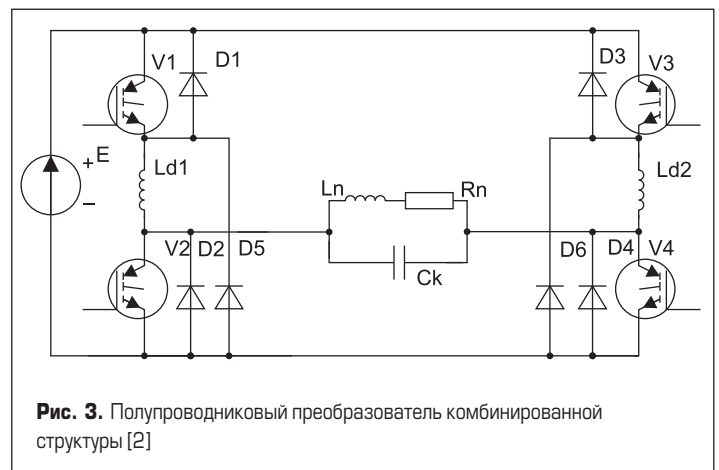


Рис. 3. Полупроводниковый преобразователь комбинированной структуры [2]

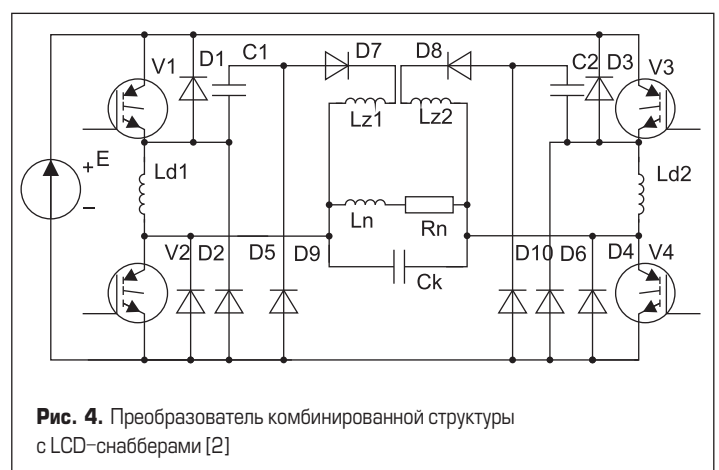


Рис. 4. Преобразователь комбинированной структуры с LCD-снабберами [2]

¹ Здесь и далее в цитируемых текстах сохранены орфография и пунктуация авторов работ. — Прим. ред.

входящих в перечень ведущих рецензируемых изданий ВАК РФ; 6 работ опубликовано в изданиях, которые индексируются в базе РИНЦ, 2 работы — в базе Scopus, 1 работа — в базе DOAJ, 1 работа — в базе IEEE Xplore; 2 патента Украины на полезную модель» [2].

Все (доступные) публикации из перечисленных в предыдущем абзаце, отметим, в основном подготовлены (даже) в соавторстве с представителями (соавторами) из нескольких организаций. И во всех указанных работах (и в диссертации [2], в том числе) заявляется, в частности, что «базовыми схемами для УИН принято считать резонансные инверторы, среди которых можно выделить резонансные инверторы напряжения (РИН) и резонансный инвертор тока (РИТ), соответственно с последовательной и параллельной емкостной компенсацией (?) индуктивности нагрузки». Смысл сообщаемого далее заключается в том, что РИНЫ (их, вероятно, много) и РИТ (он, скорее всего, один) имеют как преимущества, так и недостатки, а дальнейшее развитие, «на основе анализа рассмотренных способов построения высокочастотных резонансных инверторов», источников питания для УИН «может быть достигнуто путем синтеза новой структуры на базе наиболее перспективных схем — инвертора тока и импульсного преобразователя» (то есть, по вариантам терминологии авторов, — «преобразователя комбинированной структуры» или «резонансного инвертора с комбинированной структурой, с управлением по принципу самовозбуждения с синхронизацией по выходному напряжению и автоматической подстройкой фазы (?) управляющих импульсов», и регулированием «по принципу времяимпульсной модуляции с синхронизацией (?) выходным напряжением инвертора», вспомним также и «принцип самовозбуждения путем реализации положительной обратной связи по напряжению», цитируемый нами выше). На стр. 53 в [2] также записано: «для управления (преобразователем комбинированной структуры) предлагается использовать принцип самовозбуждения с синхронизацией по выходному напряжению и автоподстройкой (?) частоты». Принцип самовозбуждения основан, говорится там же далее, на том, что по выходному сигналу датчика напряжения отслеживается (?) изменение собственной частоты нагрузочного контура, связанное с изменением параметров индукционной нагрузки в ходе технологического процесса, и непрерывно подстраивается (?) частота работы инвертора, при этом частота работы инвертора полностью определяется собственной частотой нагрузочного контура.

Здесь уместно сделать небольшое отступление и определить, что «исторически» понимается (и что, вероятно, подразумевал, или должен был подразумевать автор [2]) под «самовозбуждением» полупроводниковых инверторов «большой» мощности для электротехнологических установок (ЭТУ) вообще и УИН в частности. Вначале приведем необходимую справку. Термины «управление» и «регулирование» применительно к инверторам (электротехническим устройствам) имеют смысл (и их различают, так сложилось в течение, минимум, последних 50 лет), соответственно, как операции (процесс) формирования, распределения (или «расстановки») и подачи управляющих сигналов на вентили силовой части (управление инвертором), и как «управление режимом» устройства и/или технологическим процессом (суть — «регулирование», варьирование нагрузки, стабилизация, поддержание параметра или параметров, программное изменение и прочее). В ГОСТ 24346-80 под «самовозбуждением» определяют «возбуждение колебаний (вибрации) системы поступлением энергии от неколебательного источника, которое регулируется движением самой системы», а в ГОСТ 21558-2000 (правда, этот стандарт относится к турбогенераторам, гидрогенераторам, синхронным компенсаторам, но это в данном контексте не принципиально) записано, что «система самовозбуждения — это система возбуждения, возбудитель которой обеспечивает всю энергию возбуждения за счет использования энергии самой возбуждаемой синхронной машины или энергии сети (что здесь то же самое), на которую работает эта машина». В общих технических условиях на транзисторные ультразвуковые генераторы (ГОСТ 16165-80) толкования термина «самовозбуждение» нет, но есть несколько упоминаний о «генераторах с независимым возбуждением: они должны иметь плавную регулировку частоты и контролируемые ее нестабильность и коэффициент паразитной амплитудной модуляции выходного напряжения» (следовательно, предполагается, что существуют и транзисторные генераторы с зависимым возбуждением или само-

возбуждением). Википедия устанавливает (почему-то со ссылками на зарубежные источники и зарубежных авторов — Vacco C., Erickson R.W.), что «инверторы с самовозбуждением (автогенераторы) относятся к числу простейших устройств преобразования энергии постоянного тока, относительная простота технических решений при достаточно высокой энергетической эффективности привела к их широкому применению в маломощных источниках питания, в системах промышленной автоматики и генерировании сигналов прямоугольной формы, особенно в тех приложениях, где отсутствует необходимость в управлении процессом передачи энергии». В этих инверторах, записано далее, используется положительная обратная связь, обеспечивающая их работу в режиме устойчивых автоколебаний, а переключение транзисторов осуществляется за счет насыщения материала магнитопровода трансформатора, и такие инверторы применяются при частотах не более 10 кГц и выходной мощности до 10 Вт. При существенных перегрузках и коротких замыканиях в нагрузке, согласно Википедии, в любом из инверторов с самовозбуждением происходит срыв автоколебаний (все транзисторы переходят в закрытое состояние). А в Студопедии были опубликованы современные лекции кафедры «Радиоэлектроника» ДГТУ (Ростов-на-Дону, лекция № 5, автор — Н. В. Руденко), в которых приводится классификация инверторов в «зависимости от способа управления или коммутации переключающими устройствами». Согласно упомянутым лекциям, «различают два основных класса инверторов: инверторы с самовозбуждением или автономные инверторы (?) и инверторы с независимым возбуждением (ведомые сетью)». Далее в этих лекциях, со ссылкой на ГОСТ 23414-84 и в «доказательство», приводятся и определения для каждого класса: автономный инвертор — это полупроводниковый инвертор, в котором коммутация полупроводниковых приборов осуществляется под действием напряжения, обусловленного элементами, входящими в состав полупроводникового инвертора; ведомый инвертор — это полупроводниковый инвертор, в котором коммутация полупроводниковых приборов осуществляется под действием напряжения, обусловленного внешними по отношению к полупроводниковому инвертору источниками электрической энергии (т. о., вопрос о самовозбуждении и независимом возбуждении инверторов, знаках обратных связей, автоподстройке частоты, автоматических подстройках фазы управляющих импульсов, как следует из вышеизложенного, является, без преувеличения, важным). В [11] же говорится, что инверторы могут быть самовозбуждаемыми, если колебательный режим возникает сам по себе, а также — с независимым возбуждением, если в схеме используется отдельный маломощный источник колебаний для управления силовым инвертором. Самовозбуждаемые инверторы [11] часто требуют отдельных устройств, обеспечивающих пуск (т. е. не совсем «сам по себе» и не во всех случаях, следовательно, «возникает колебательный режим»). А в [12] указывается: «по способу возбуждения тиристорные инверторы ЭТУ делятся (аналогично [11]) на два типа — инверторы с независимым возбуждением и инверторы с зависимым возбуждением или самовозбуждением, при независимом возбуждении управление осуществляется в общем случае от импульсов управляемого задающего генератора (преобразователя напряжения в частоту), а формирование моментов включения тиристоров при самовозбуждении (инвертора) производится времязадающими или фазосдвигающими устройствами, синхронизируемыми выходным напряжением или током инвертора». Независимое возбуждение может применяться [12] во всех без исключения типах инверторов, и в большинстве случаев замкнутые системы независимого возбуждения инерционны, что при скачкообразном изменении параметров нагрузки может приводить к опрокидыванию инвертора (речь идет об устройствах на SCR). То обстоятельство, отмечается далее в [12], что угол опережения (в инверторах тока на SCR) определяется устройством самовозбуждения в каждом полупериоде выходного напряжения, придает инверторам с режимом самовозбуждения близкую к предельной динамической устойчивости.

Последнее же и есть, фактически, суть того, что понимается под автономным (мощным полупроводниковым) инвертором с самовозбуждением (зависимым возбуждением): сигналы управления по [12] «определяются» (и, соответственно, формируются) устройством самовозбуждения (устройством — цепью управления, вспомогательной цепью преобразо-

вателя, согласно ГОСТ 18311-80), только и именно синхронизируемым (мгновенным) выходным напряжением или током инвертора, в каждом полупериоде (или, в общем случае, в каждом периоде) выходного напряжения, то есть за один такт (или за два такта), и поэтому с «предельным» быстродействием (безынерционно). В сущности, для данного случая название «самовозбуждение» является неправильным (лучше бы использовать определение «зависимое возбуждение» и разнести эти два понятия), но вошедшим в употребление термином. Дело в том, что много ранее этот термин (самовозбуждение) был уже применен к «автогенераторным» устройствам. Что же касается «инерционности» инверторов с замкнутыми системами регулирования (различаемо управление и регулирование), то регулируемые инверторы с «зависимым возбуждением», в общем случае, должны быть более инерционными, чем с «независимым возбуждением» (самыми инерционными являются системы с автогенераторами). Синхронизация при зависимом возбуждении, уточним, может осуществляться не только выходным напряжением или током инвертора, но и любым другим сигналом или комбинацией сигналов (в любой цепи силовой схемы инвертора и нагрузки, если это обосновано или необходимо), а «синхронизирующий сигнал» (комбинация сигналов) «преобразуется» цепью управления не только по амплитуде и «фазе», или, точнее, временному сдвигу (классическое представление, хотя, как определить фазу сложного сигнала и, тем более, комбинации, и даже, в этом случае, амплитуду сигнала или комбинации для цели управления?), но и по форме, и длительности, или ширине (в сигналы или импульсы управления инвертором). Конечно, как в любой области, для силовой электроники имеет место определенная специфика в применяемой терминологии. Самовозбуждение, например, в технике звукоусиления — эффект проявления паразитной положительной обратной связи усилителя, канала передачи сигнала. Согласно «теории автоматического управления», инверторные (энергетические) устройства — это, по сути дела (можно определить в общем), замкнутые (разомкнутые) нелинейные импульсные, реже — релейные (дискретно-непрерывные) системы автоматического регулирования с переменными параметрами.

Упомянем в этой связи еще один принцип: релейно-импульсное управление и, соответственно, релейно-импульсную модуляцию (РИМ), своего рода гибрид [13–17] зависимого и независимого возбуждения применительно к инверторам (при «релейно-импульсном управлении момент одного переключения импульсного элемента определяется состоянием, как в релейной системе, момент другого — временем, как в системах с импульсной модуляцией», согласно «теории автоматического управления» — это классифицируется, как «цифровая» система). РИМ (в инверторных устройствах) может быть [15–17] не только односторонней, но и двухсторонней, однократной и многократной, и всегда только двухполярной (релейное управление — управление, при котором управляющие воздействия представляются в виде дискретных непрерывных воздействий. Сб. рекомендуемых терминов. Вып. 107. Теория управления. АН СССР, Комитет научно-технической терминологии, 1984.). В теории «автоматического управления» под РИМ понимают также модуляцию, при которой получаются последовательности импульсов постоянной амплитуды (высоты) с фиксированным периодом дискретности и длительности с полярностью, зависящей от полярности входного сигнала в моменты съема указанных импульсов. Известны (кроме того): амплитудно-импульсная модуляция (АИМ); широтно-импульсная (ШИМ, или PWM); временная импульсная (ВИМ и, соответственно, фазоимпульсная ФИМ), частотно-импульсная (ЧИМ); число-импульсная (ИЧМ). Моменты включения вентилей при РИМ в инверторе тока, например, и выключения в инверторе напряжения с квазирезонансной коммутацией [15] синхронизируются с опорным временным сигналом, а моменты выключения в инверторе тока и включения в инверторе напряжения определяются векторами состояния (\mathbf{p}) и управления (\mathbf{u} , при регулировании выходного параметра U_2). К элементам вектора состояния p относят напряжение или ток вентилей, напряжение вентилей противофазной группы или ток встречного диода, напряжение или ток нагрузочной цепи. Вводом дополнительного временного интервала (w), являющегося функцией вектора управления \mathbf{u} (аналогично односторонней однократной ШИМ), осуществляют регулирование выходного параметра U_2 , в частности в инверторе напряжения:

$$U_2(s, w) = E(1-T^{-1}\{2[s(\mathbf{p})+w(\mathbf{u})] - E^{-1}\{\int e(t)^2 dt\}^{1/2}\})^{1/2}; r \gg T/kC, s[\mathbf{p}] \ll T,$$

где: E — напряжение питания инвертора; $e(t)$ — мгновенное значение выходного параметра в интервале коммутации ($s[\mathbf{p}]$); k — размерная постоянная; C — емкость фильтра; r — эквивалентное сопротивление нагрузки; T — установленный период выходного параметра.

В [11] речь, безусловно, идет об автогенераторных (самовозбуждаемые инверторы) или автоколебательных устройствах (в упомянутых выше стандартах также). Примером мощных автогенераторных устройств (инверторов) могут служить ламповые генераторы (сведения Википедии относительно выходной мощности не совсем точны) для электротермии [18] (в них есть и положительная обратная связь, и контроль фаз сигналов обратной связи, а также выполняются необходимые и достаточные «условия», или балансы фаз и амплитуд). В [18] можно прочесть: «в промышленных ламповых генераторах напряжение на сетке формируется либо специальным задающим генератором синусоидальных колебаний (как это обычно и делается во всех радиопередающих устройствах), либо передачей части напряжения на колебательной системе (это наиболее часто встречающийся вариант в промышленных ламповых генераторах), и в том и в другом случаях переменное напряжение является синусоидальным, если нагрузочный контур изменяет параметры (что характерно для всех промышленных схем), предпочтительнее применять те схемы, при которых частота напряжения на сетке меняется бы с изменением собственной частоты контура нагрузки, т. е. с изменением его параметров, это достигается использованием явления самовозбуждения, при котором часть напряжения на контуре (и) подается соответствующим образом на сетку, известно, что если имеется цепь переменного тока с каким-либо усилительным элементом и часть напряжения выхода подается на вход, то в данной системе при соблюдении определенных условий могут возникать периодически повторяющиеся колебания (явление самовозбуждения), чтобы произошло самовозбуждение, надо выполнить правило фаз (мгновенное напряжение на сетке лампы u_G устанавливается в противофазе к напряжению на аноде u_A) и сделать коэффициент обратной связи (β , отношение напряжения на сетке U_G или на выходе звена обратной связи U_B к напряжению на нагрузочном контуре U_K , $U_G = U_B$, $\beta = U_G/U_K = U_B/U_K$) больше какого-то минимума, последнее условие называется часто условием амплитуд». Полупроводниковые (транзисторные) автогенераторные устройства (малой мощности) — это, в частности, простейшие электронные балласты люминесцентных ламп. Попытки создания тиристорных (мощных полупроводниковых) автогенераторных схем инверторов прекратились еще на начальном этапе развития этой техники — в 60-х годах прошлого века (автору статьи известен, например, инвертор указанного типа на тиристоре, названный в литературе [19] релаксационным LC-автогенератором).

Мощные полупроводниковые инверторы состоят из (выраженной) силовой цепи (части) и различных вспомогательных (слаботочных) цепей (ГОСТ 18311-80), в том числе — цепи (системы) управления. Системы управления — регулирования инверторов с зависимым (самовозбуждением) и независимым возбуждением сегодня могут иметь одинаковое количество входов/выходов и аналогичного назначения, одинаковое «обратные» связи, конструктивное исполнение, габариты и вес и выполняться на одинаковой (или подобной) элементной базе, но принципиально отличаться при этом качеством функционирования.

Автоподстройка же частоты применяется в системах с независимым возбуждением (например, в [20] рассматривается так называемый «фритаймовый» метод автоматической подстройки частоты, в качестве задающего генератора используется мультивибратор, регулируемый напряжением U_p (косвенно интегрируемым) по результату оценки разницы частот резонанса f_p магнитостриктора и импульсов f_y задающего генератора (ЗГ) системы в интервале «фритайма»:

$$U_p = U_{*1} \cdot [K_3\{f_p - f_y\} / \{K_1 + K_2\}f_p],$$

где U_{*1} — уровень логической единицы, $K_1 - K_3$ — коэффициенты подсчета соответствующих счетчиков интервалов, кратных нескольким целым значениям периодов T_p , T_y и их разницы). Целью для промышленных систем с инверторами является обеспечение приемлемых энергетических показателей. Автоподстройка частоты (еще раз уточним,

термин применим, согласно установившейся терминологии, только к инверторным системам с независимым возбуждением) обеспечивается использованием генераторов, управляемых напряжением (ГУН), устройств фазовой (ФАПЧ или PLL) и импульсной фазовой (импульсно-фазовой) автоматической подстройки частоты (ИФАПЧ), «Формирователей импульсов с автоподстройкой частоты» (ФИАПЧ, называемый в сокращении [21] почему-то фактически аналогично, все это системы с 3Г) и других приемов. В [20], в том числе, говорится, что методы «можно разбить на три группы — амплитудные, фазовые и частотные». Авторами [20] упоминаются также различные многочисленные «производные методы» автоподстройки частоты инверторов с независимым возбуждением и «неэлектрические» методы за счет «прямого измерения качественных показателей технологического процесса». Интересно, что в книге [20] одноключевой (согласованный) инвертор с закрытым входом и инвертор с удвоением частоты (и встречно-параллельными диодами) однозначно отнесены к классу резонансных инверторов.

В системах с самовозбуждением (или зависимым возбуждением) «подстройка» частоты — явление само собой разумеющееся, не требующее каких-либо дополнительных пояснений и уточнений (вспомним требования ГОСТ 16165-80 о необходимости плавной регулировки выходной частоты и контролировании ее неустойчивости в транзисторных ультравысоковольтных генераторах с независимым возбуждением).

Зависимое возбуждение вначале было использовано в однофазных тиристорных (SCR) инверторах тока [22, 23] для ЭТУ. Отметим, что в исходных источниках [22, 23] о «самовозбуждении» не сказано (параллельным «инвертором целесообразно управлять с применением безинерционной частотнонезависимой фазосдвигающей цепи, когда импульсы управления подаются в заданном фазовом положении по отношению к выходному напряжению») ровным счетом ничего, хотя авторам это понятие было хорошо известно и использовалось ими в работах по другим темам. Термин же, применительно к случаю, употребляется в [12] только спустя десять лет, да и то с определенной «оговоркой» — упоминанием первым определения «зависимое возбуждение». Классический вариант «частотнонезависимой фазосдвигающей цепи» для параллельного инвертора тока на SCR [12, 24] обеспечивает стабилизацию так называемого «угла опережения» b :

$$b = \pi T^{-1}(T - cT) = \pi(1 - c); c < 1,$$

где T — межкоммутационный интервал, c — число, не превышающее единицу. Угол опережения, формируемый фазосдвигающей цепью, не зависит от выходной частоты инвертора (обеспечивается инвариантность угла опережения относительно частоты в требуемом широком диапазоне ее изменения), определяемой, в свою очередь, параметрами нагрузочного параллельного колебательного контура. Благодаря частотно-независимому фазосдвигающему устройству «инвертор тока приобретает новое качество — жесткую внешнюю характеристику» [12]. Выходное напряжение U рассматриваемого инвертора тока при этом выражается известной формулой [25]:

$$U = kE/\cos[\pi(1 - c)],$$

где k — схемный коэффициент, E — напряжение питания. Как вариант, может стабилизироваться время выключения инвертора. Фазосдвигающие устройства могут быть одноканальными и многоканальными, аналоговыми и цифровыми. Примеры системы с микроконтроллером рассматриваются в [25], а устройства «прямого» цифрового управления — в [26]. Именно применение зависимого возбуждения позволило ТЭЗ им. М. И. Калинина (Таллин) в 70–80-х годах выпустить самую массовую серию тиристорных преобразователей частоты для ЭТУ на основе параллельного (SCR) инвертора тока. Дальнейшее развитие метод зависимого возбуждения для инверторов тока получил в патенте W. McMurray, US 3,882,370 (GE, Control of power converters having a parallel-resonant commutation circuit), 1975 г. Согласно этому патенту, очередные импульсы управления на тиристоры подаются в момент равенства нулю некоторого «управляющего сигнала» e_{CON} , являющегося комбинацией ряда величин, полученной из системы обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих силовую схему в межкоммутационных интервалах:

$$e_{CON} = u_C - (t_0 C^{-1} \{1 + CL^2 t_0^{-2}\}^{1/2}) (i_C - 2Si_D) = 0,$$

где: t_0 — время выключения тиристора; C — компенсирующая емкость; L — коммутационная индуктивность; u_C — мгновенное значение напряжения на нагрузке (равно напряжению на компенсирующей емкости); i_C — мгновенное значение тока компенсирующей емкости; Si_D — мгновенное значение тока нагрузки (на входе нагрузочного параллельного контура первого вида); S — переключающая функция, принимающая значения «1» и «-1» при положительном и отрицательном напряжении на нагрузке соответственно. В отечественной практике подобные методы управления инверторами тока называются «способами управления по вычисляемому прогнозу» [27, 28]. Во всех способах «вычисляемого прогноза» контролируются мгновенные значения сразу нескольких величин в силовой схеме. В частности, аналогично способу W. McMurray, по [27] так называемое «условное прогнозируемое расхождение» u_R определяется выражением:

$$u_R = t_0 C_K^{-1} (i_C - 2i_H - 2L_K L_H^{-1} i_H) + [u_H^2 - 4L_K C_K^{-1} i_H (-i_C + i_H + L_K L_H^{-1} i_H)]^{1/2} = 0,$$

где: t_0 — время выключения тиристора; C_K — компенсирующая емкость; L_K — коммутационная индуктивность; L_H — индуктивность нагрузки; i_C — мгновенное значение тока компенсирующей емкости; i_H — ток нагрузки; u_H — напряжение нагрузки. В [28] управляющий сигнал формируется в соответствии с зависимостью:

$$u_R = q t_0 C_K^{-1} (i_C - 2i_H) + u_H = 0,$$

где q — табличная «константа» (var). Следует еще раз подчеркнуть, что рассмотренные выше методы управления разрабатывались для автономных инверторов тока на обычных (SCR) тиристорах и что для таких инверторов, вообще говоря, ни один из них не позволяет обеспечить абсолютной устойчивости к срывам инвертирования при достаточно быстром изменении параметров нагрузки. Решение указанной проблемы может лежать в плоскости только либо существенного улучшения динамических свойств тиристорных (SCR), либо применения в инверторах тока полностью управляемых (двуоперационных) вентилей. Кроме того, в автономных инверторах тока на SCR самостоятельной задачей является текущее обеспечение достаточного схемного времени для выключения тиристорных (часто даже в ущерб энергетическим показателям), в то время как для инверторов тока на двуоперационных вентилях указанная проблема «не имеет значения». Для резонансных же (согласованных) инверторов на однооперационных (SCR) тиристорах проблема устойчивости к срывам инвертирования является менее критичной, поэтому зависимое возбуждение в таких инверторах долгое время не применялось (преимущества способа «не столь и не сразу» очевидны), и развитие шло в иных направлениях (экстремальное управление, автоподстройка частоты). Автором настоящей статьи «самовозбуждение» для мощного (сварочного, резонансного с встречно-параллельными диодами) инвертора на обычных (SCR) тиристорах было использовано в середине 90-х годов [29, 30]. Способ (зависимого) управления резонансным (согласованным) инвертором [29] и варианты его последующего развития [31, 32] легли в основу многочисленных патентов и разработок других авторов, а также применены в серийной продукции ряда фирм. В широко используемых в системах автоматического управления ЭТУ согласованных инверторов со встречно-параллельными диодами (схемы W. McMurray, Кошечеева Л. Г., Кацнельсона С. М. и др.), например, применение способа управления с зависимым возбуждением позволяет обеспечить повышенную коммутационную (и, в определенном смысле, — «абсолютную») устойчивость и надежность работы инвертора в расчетных режимах, в том числе и на обычных однооперационных (SCR) тиристорах, предотвращение и даже ликвидацию срывов инвертирования. Для исключения протекания сквозного тока необходимо осуществлять контроль состояния вентильных ячеек и подавать очередные импульсы управления в моменты времени, обеспечивающие безопасную коммутацию либо восстановление режима инвертирования при срыве коммутации. Одновременно при применении зависимого возбуждения обеспечивается функционирование преобразователей с высокими энергетическими характеристиками.

Таким образом, следует различать инверторы с зависимым возбуждением и автогенераторные устройства (в которых реализуется клас-

сический принцип самовозбуждения), системы с самовозбуждением и автоподстройкой частоты. Смешивать эти понятия (не говорим даже о не относящихся к делу фазах, знаках обратных связей и прочих терминах) в едином контексте вводимых определений означает буквально — запутывать и не уважать время читателя.

Работа [21], которая цитируется в [2], не содержит сведений об «адаптивном алгоритме самовозбуждения транзисторного инвертора напряжения» и «самовозбуждении», как таковом, вообще (несмотря на название). Кроме того, резонансный (согласованный последовательный) инвертор в ней классифицируется как «инвертор напряжения». Только спустя два года (с момента написания статьи [21]) один из ее авторов, уже в своей диссертации, «предлагает новую структуру индукционного нагревательного комплекса с инвертором напряжения (?) и согласующим управлением на основе самовозбуждения, лишенным этих недостатков и ограничений» (имеется в виду ограничение длины высокочастотного кабеля, соединяющего инвертор с нагревательным устройством (?), и, далее в тексте, «предельно достижимой частоты работы и КПД»). Критикуя систему с ФИАПЧ, автор упоминает в диссертации «принцип самовозбуждения (им, как записано, предлагаемый), который может обеспечить генерацию импульсов управления с оптимальным фазовым сдвигом между выходным током и напряжением транзисторного (того же) инвертора напряжения (?) на каждом периоде».

Есть ли в [2] зависимое возбуждение (или самовозбуждение) «преобразователя комбинированной структуры»? Скорее всего — да, есть. Однако «новый предложенный алгоритм (способ) управления» нельзя признать ни новым, ни удачным. Неудачным «предложенный» алгоритм является по целому ряду причин. Во-первых, неясно вообще, для чего в способе (при данной схеме инвертора, рис. 3) устанавливается интервал *dead time*. Во-вторых, выключение вентиля эмиттерной группы с «небольшим фиксированным углом опережения» означает необходимость применения (инвариантное управление) «прогноза» в каком-либо виде, что кардинально усложнит способ, и, отметим, приведенной в работе [2] (и других сопутствующих работах по теме) структуры системы управления не реализуется. И, в-третьих, оставлять транзистор (эмиттерной) группы во включенном состоянии или «под импульсом управления», когда ток через него «прекратился», нельзя. Это приводит к разбалансировке вентильного моста и ничем не ограниченным колебательным процессам на паразитных элементах схемы (что подтверждают осциллограммы напряжений и токов экспериментального образца преобразователя, рис. 5.7–5.12 в оригинале). Автор напрасно «убрал» из диагонали переменного тока своего «преобразователя комбинированной структуры» демпферную (коммутирующую) индуктивность. И, кроме того, что будет, если транзистор эмиттерной группы, по любой причине, останется включенным после перехода напряжения на нагрузочном контуре через ноль (в «новом способе управления», вернее, его реализации, это более чем вероятно)? Заявление автора диссертации [2], что «осциллограммы, полученные в процессе эксперимента, достаточно точно повторяют электромагнитные процессы, полученные при моделировании в среде OrCAD, погрешность измерений не превысила 5%, результаты математического и имитационного моделирования подтверждены экспериментальными исследованиями», не соответствует действительности (все как раз наоборот). Заметим, что макет «преобразователя комбинированной структуры» выполнен на пониженное напряжение сети (38 В) и ничтожную мощность, и вряд ли, в силу вышеперечисленных причин, он «может служить прототипом при разработке промышленных установок индукционной термообработки металлов нового поколения». К вопросу «прототипа» мы еще вернемся при обсуждении отзывов на данную диссертационную работу.

В работе [2] нет «адаптивной системы управления» и «временнй импульсной модуляции» («время-импульсной» на другой странице текста оригинала). Временная импульсная модуляция, или ВИМ (если автор [2] имел в виду этот вид модуляции), заключается в смещении или девиации во времени (на интервале дискретности, причем фиксированном) выходных импульсов (импульсного элемента) неизменной длительности пропорционально значениям входного сигнала (в дискретные моменты времени). При ВИМ изменяется временное положение импульсов (на интервале дискретности) относительно некоторых характерных

или тактовых точек (взятых на этом же интервале). Различают две разновидности ВИМ, а именно — фазоимпульсную (ФИМ) и частотно-импульсную (ЧИМ) (какую использовал автор?). Для ФИМ положение импульсов относительно тактовых точек изменяется пропорционально амплитуде модулирующего сигнала. ЧИМ характеризуется другим законом изменения временного положения импульсов (изменяется частота импульсной последовательности в соответствии с характером изменения модулирующего сигнала, вследствие чего импульсы также сдвигаются относительно тактовых точек). Если же «временнй импульсная модуляция» — это что-то другое (записано иначе, новелла), то внятное объяснение указанного термина (как, в том числе, и определений, применительно к вопросу и инверторной технике, — согласованное управление на основе плотно-импульсной модуляции — ПИМ, кодово-импульсная модуляция, а также низкочастотная импульсная модуляция, широтно-частотный способ управления, частотно-широтный способ регулирования) в диссертации [2] отсутствует.

А вот далее подтвердим уже упомянутый тезис. Так как в «преобразователе комбинированной структуры» из [2–4] дроссели находятся «внутри» схемы моста, ток через них (при используемом способе управления–регулирования) может иметь только прерывистый («прерывные токи», по терминологии автора [2]) характер, поэтому и параметры элементов схемы иные, по сравнению с [5], индуктивность дросселей L_D имеет «малую величину» ($L_D \rightarrow \pi^2 C_K^{-1} f^2/4$, где C_K — величина компенсирующей емкости, f — собственная частота нагрузочного контура), и функцию дросселей фильтра, как отмечено выше, они не выполняют.

И, наконец, поговорим о самой схеме предложенного в [2] преобразователя. Если в «преобразователе комбинированной структуры» (рассмотрим вначале рис. 3) «накопительные дроссели» L_{D1} , L_{D2} перенести в цепи транзисторов (V_2 , V_4) эмиттерной группы, в принципе, ничего не изменится. При используемых элементах и алгоритме управления–регулирования [2] работа «нового» инвертора будет осуществляться аналогичным образом (полностью сохранятся или, точнее, обеспечивается как работоспособность, так и все параметры не только элементов, но и режимов функционирования). Более того, «накопительные» дроссели L_{D1} , L_{D2} при таком включении будут еще и ограничивать (отмеченные нами ранее) колебательные процессы на паразитных элементах схемы (включая индуктивности ошиновки), то есть «качество технического решения» будет, в определенном смысле, выше. Теперь разделим каждый из дросселей L_{D1} , L_{D2} на две части и установим только части дросселей в цепях транзисторов (V_2 , V_4) эмиттерной группы (вторые части дросселей оставим, естественно, на месте). Аналогично предыдущему варианту, также ничего не изменится (имеем, фактически, ту же самую схему мостового инвертора, с теми же режимами работы). Однако в этом решении, кроме ограничения паразитных колебательных процессов, появляется дополнительная возможность — снизить, на самом деле, весогабаритные показатели устройства и улучшить энергетические характеристики за счет, например, магнитных связей частей дросселей, установленных в соответствующих диагоналях переменного тока моста (чего никак нельзя сделать в исходной схеме «преобразователя комбинированной структуры»). В следующем варианте «модификации» просто перенесем (рис. 5)

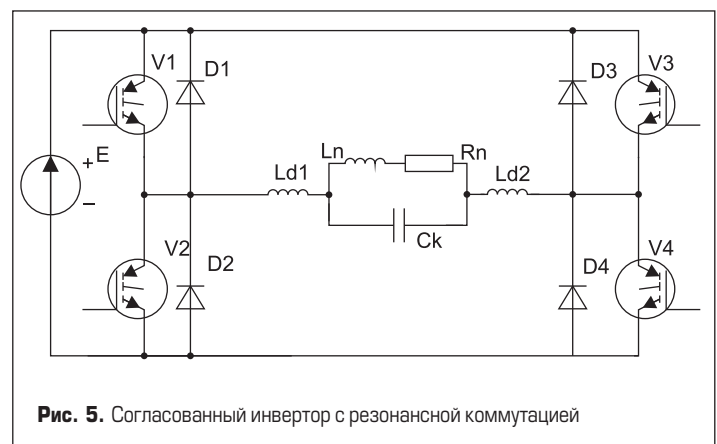


Рис. 5. Согласованный инвертор с резонансной коммутацией

дроссели L_{D1} , L_{D2} в цепь переменного тока моста [34]. Теперь дроссели L_{D1} , L_{D2} могут быть выполнены не только магнитосвязанными, но и иметь более предпочтительное исполнение — «на переменный ток» (число дросселей может быть сведено и к одному); индуктивность ошиновки становится «рабочим (а не паразитным) элементом» схемы, а отсекающие (D_5 , D_6 , рис. 3) диоды (силовые полупроводниковые элементы так называемых ИП, рассчитанные на рабочий ток устройства) становятся вообще не нужными и исключаются из силовой части. Для схемы инвертора, изображенной на рис. 5, также без ограничений применим (но лучше не применять) рекламируемый способ управления—регулирования, что и для «преобразователя комбинированной структуры» из [2]; возможно использование элементов одинаковых номиналов и реализация при этом абсолютно «идентичных» режимов функционирования (пример приведен на рис. 6). Фактически же во всех трех (последних) приведенных в абзаце схемотехнических решениях никаких ИП (т. е. импульсных преобразователей) в структуре устройств нет (как, впрочем, нет их и в исходной схеме «преобразователя комбинированной структуры» из [2], рис. 3), а сами схемы представляют собой лишь (что очевидно, более качественные, во всяком случае, работоспособные) варианты одного и того же (согласованного или резонансного) однофазного мостового инвертора. Действительно, в части 1 настоящей статьи [33] приведена цитата из классического источника, разъясняющая, что в резонансном инверторе коммутирующие дроссели, «входящие в состав резонансного контура», могут включаться «в цепь питания, в анодные (или катодные, что одно и то же) цепи тиристоров или последовательно с нагрузкой» (и от этого, конечно, принцип работы не изменяется).

На стр. 53 в [2] записано, что автором «в результате структурного синтеза объединены положительные свойства инвертора тока и инвертора напряжения». Следует отметить, что «преобразователь комбинированной структуры» из [2] соединяет в себе преимущества (объединяет положительные свойства) инвертора тока и напряжения ровно настолько, насколько любой резонансный инвертор соединяет в себе такие «преимущества» (так как, повторюсь,

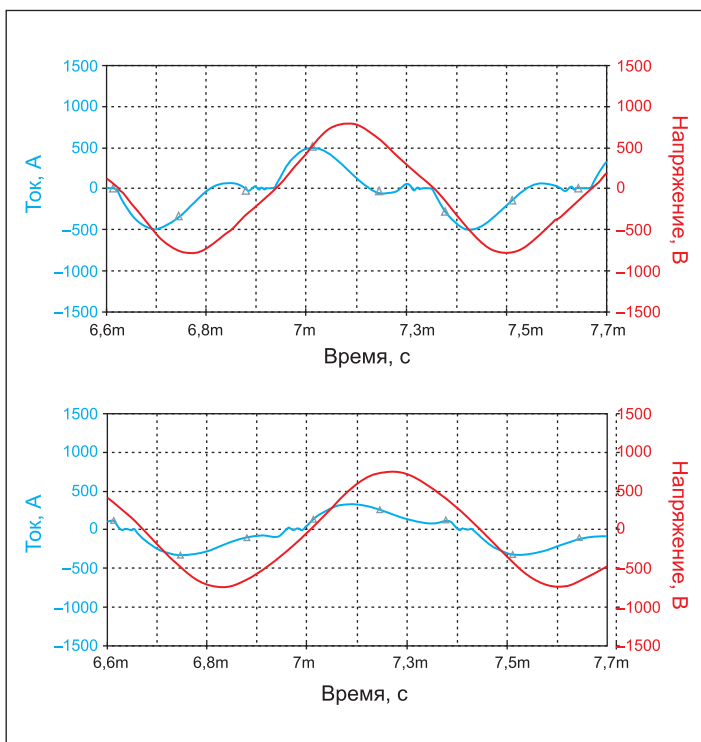


Рис. 6. а) Осциллограммы выходного тока и напряжения согласованного инвертора с резонансной коммутацией ($E = 530$ В; выходная мощность $P \approx 90$ кВт и частота $f = 1,44$ кГц; добротность нагрузки $Q \approx 2,3$; отношение $(L_{D1} + L_{D2})/L_H = 0,32$); б) осциллограммы выходного тока и напряжения согласованного инвертора с резонансной коммутацией ($E = 530$ В; выходная мощность $P \approx 90$ кВт и частота $f = 1,35$ кГц; добротность нагрузки $Q \approx 2,3$; отношение $(L_{D1} + L_{D2})/L_H = 0,67$)

это и есть резонансный, или, точнее, согласованный, инвертор). В патенте [34], в частности, однофазный мостовой инвертор с закрытым входом на транзисторах (аналог устройства, изображенного на рис. 5, только с одним демпферным или коммутирующим дросселем, и, соответственно, вариант «преобразователя комбинированной структуры», изображенного на рис. 3, неудачной «модификацией» которого последний и является) назван автономным согласованным (с резонансной коммутацией) инвертором.

В схему «преобразователя комбинированной структуры» (рис. 4) включены «LCD-снабберы» (элементы C_1 , L_{Z1} , D_7 , D_9 и C_2 , L_{Z2} , D_8 , D_{10}). По определению, снабберы — это вспомогательные (защитные) цепи, только формирующие траектории переключения силовых вентилях (в данном случае — транзисторов коллекторной группы V_1 , V_3 , из табл. 5.2 оригинала идентифицировать выбранные автором параметры элементов «LCD-снабберов» экспериментального образца преобразователя не представляется возможным). Однако установленная мощность указанных цепей рассматриваемого (конкретного) преобразователя достаточно высока (элементы снабберов в предлагаемом варианте явно рассчитаны на сравнимые токи с основными элементами силовой части, изменяется даже форма тока основных силовых вентилях V_1 – V_4 , и существенно ухудшается гармонический состав выходного тока, увеличиваются амплитуды тока основных вентилях, и заметно снижается коэффициент мощности всего устройства, что видно из приведенных в диссертации и сопутствующих статьях многочисленных осциллограмм). Кроме того, в работе «LCD-снабберов» никак не используются (?) индуктивности демпферных дросселей L_{D1} , L_{D2} . В целом же, нельзя согласиться с тезисами автора [2] (и соответствующими выводами в отдельных отзывах на диссертацию), что в работе была достигнута цель упрощения схемы преобразователя, «минимизации» количества вентилях, более эффективного использования вентилях по току, уменьшения массо-габаритных показателей, повышения КПД и «улучшения» коэффициента использования вентилях по мощности (скорее наоборот, все предельно и необоснованно усложнено и даже существенно «ухудшено», и непонятно, с чем автором и рецензентами производятся сравнения). А коммутационные потери вентилях коллекторной группы V_1 , V_3 (при используемых защитных цепях) лишь перераспределяются в дополнительные потери на их включение, а также в возрастающие динамические и статические потери всех вентилях моста и элементов снабберов. Фактически схема преобразователя (точнее, инвертора), приведенная на рис. 4, — пример того, как не надо реализовывать технические решения в рассматриваемой области промышленной электроники (это же относится и к инвертору на рис. 3). Во всех трех новых «модификациях» согласованного инвертора (включая схему рис. 5), заметим, также возможно установить абсолютно идентичные «LCD-снабберы». При этом положительным эффектом будет то, что демпферные дроссели (L_{D1} , L_{D2}) в «модифицированных» схемах могут быть включены в цепи заряда емкостей (C_1 , C_2) защитных цепей (аналогичных приведенным на рис. 4), что снизит требования к снабберным дросселям (L_{Z1} , L_{Z2}) и величине их индуктивности.

На диссертацию [2] дано девять отзывов. Все отзывы положительные. Существенных (или «принципиальных»), «снижающих научную и практическую ценность и значимость» работы «замечаний» (?) нет. В отзывах, в частности, говорится, что реализация предложенной соискателем концепции (?) построения транзисторных преобразователей позволяет увеличить выходную частоту или глубину регулирования выходных параметров, улучшить массо-габаритные показатели; научные положения и результаты обоснованы в полной мере, и их достоверность не вызывает сомнений; разработана комбинированная структура, которая основана на применении импульсных преобразователей, как функциональных элементов инверторных структур с параллельной емкостной компенсацией индуктивности нагрузки; разработан способ управления преобразователем комбинированной структуры, основанный на принципе самовозбуждения путем реализации положительной обратной связи по напряжению. В работе содержится ряд новых, оригинальных и перспективных схемных решений для

практической (?) реализации, представлено законченное решение актуальной задачи создания полупроводниковых преобразователей комбинированной структуры различного назначения. Ценность имеют: предложенный автором алгоритм управления и представленная на высоком научном уровне разработка новой концепции построения транзисторных преобразователей с уменьшенным количеством силовых элементов (?), а также нового эффективного метода коммутации (?) ключей. Важным теоретическим результатом диссертации следует считать разработку методики анализа энергоэффективности полупроводниковых преобразователей в зависимости от их режимов работы, а также частоты коммутации; научную и практическую значимость представляют собой разработанные соискателем теоретические основы (?) и методики анализа энергетической эффективности полупроводникового преобразователя с учетом потерь в основных элементах схемы. Существенным достоинством диссертации является полнота проведенных исследований. Предложенные решения позволяют существенно снизить потери в силовых элементах, и на базе современных транзисторных модулей реализовать преобразователи с улучшенными массогабаритными показателями (?), расширить частотный диапазон их работы, а также повысить коэффициент использования вентилей по мощности (?). Тематика исследования актуальна, поскольку посвящена разработке метода одновременной мягкой коммутации токов и напряжений силовых ключей, усовершенствованию концепции построения полупроводниковых преобразователей (?) и способов их управления с целью повышения частоты, КПД, улучшения регулировочных характеристик и снижения установленной мощности. Научную новизну представляет комплекс исследований автора, служащих основой для достижения основной цели диссертационной работы — разработки новой концепции построения энергоэффективных преобразователей комбинированной структуры, объединившей положительные свойства инвертора напряжения и инвертора тока, которая основывается на использовании импульсных преобразователей как функциональных элементов в структуре (?), а также метода одновременной мягкой коммутации силовых ключей (?) преобразователя. Схемная реализация нового полупроводникового преобразователя комбинированной структуры представляет собой мостовую схему инвертора (?), в которой две силовые стойки состоят из импульсных преобразователей и последовательно включенных транзисторных ключей (?). Для обеспечения режима мягкой коммутации в моменты выключения транзисторов импульсных преобразователей данной структуры применены LCD-снабберы (параллельный колебательный контур подключается в диагональ моста). Диссертационная работа выполнена на современном уровне научных изысканий (результаты математического и имитационного моделирования подтверждены экспериментальными исследованиями, кроме того, достоверность основных научных положений и выводов, которые сформулированы в работе, подтверждается апробацией (?) в виде докладов на шести международных конференциях). Предложенный преобразователь комбинированной структуры с мягкой коммутацией ключей обеспечивает регулирование выходной мощности при высоких значениях КПД с лучшими динамическими характеристиками за счет исключения входного реактора, кроме того, за счет уменьшения количества вентилей в схеме (?), более эффективного использования вентилей по току и обеспечения режима мягкой коммутации достигается повышение коэффициента использования вентилей по мощности и уменьшение массогабаритных показателей. Материалы диссертационного исследования могут применяться в высших учебных заведениях при чтении лекций для студентов электротехнических специальностей, в конструкторских отделах предприятий при проектировании и модернизации преобразователей с улучшенными энергетическими, массогабаритными характеристиками устройства. В работе содержится решение задач, имеющих существенное значение для отрасли силовой электроники, а именно: разработка концепции построения полупроводниковых преобразователей комбинированной структуры, обеспечивающей уменьшение установленной мощности (?), и способа управления, повышающего устойчивость системы при

изменении параметров нагрузки и обеспечивающего режим одно-временной мягкой коммутации силовых ключей. Полученные соискателем результаты достоверны, выводы и заключения обоснованы, изложение материала грамотное. Достоверность, обоснованность основных научных положений и выводов в работе подтверждается проведенным сравнительным анализом теоретических и экспериментальных исследований, который показал хорошее совпадение (?) результатов. В диссертации сформулированы конкретные предложения по совершенствованию схемотехнического решения преобразователей. Практическая ценность результатов заключается в том, что применение разработанных схемных решений, способов управлений и методик анализа позволяет сократить время и вероятность ошибок проектирования преобразователя на этапе определения его топологии, улучшить энергетические, массо-габаритные характеристики устройства, а также сократить расходы на его производство. Научная новизна заключается в разработке новой концепции построения полупроводниковых преобразователей с уменьшенными коммутационными потерями, основанной на применении импульсных преобразователей в качестве функциональных элементов инверторов напряжения (?) для реализации мягкой коммутации силовых ключей по току и по напряжению. В диссертации разработан и обоснован способ управления преобразователем комбинированной структуры, обеспечивающий оптимальную коммутацию силовых ключей и устойчивую работу преобразователя в различных динамических режимах; проведенные экспериментальные исследования подтвердили возможность создания высокочастотного преобразователя комбинированной структуры малых габаритов с уменьшенными коммутационными потерями в силовых ключах. Сильной стороной работы можно считать весомое прикладное значение полученных соискателем научных результатов. Предложена новая концепция построения полупроводниковых преобразователей, разработан метод одновременной мягкой коммутации токов и напряжений ключей инверторных структур с параллельной емкостной компенсацией и формированием прерывистых токов в накопительных индуктивных элементах импульсных преобразователей, позволяющий уменьшить коммутационные потери. Разработан новый способ управления, который основан на принципе самовозбуждения путем реализации положительной обратной связи по напряжению, синхронизации моментов перехода выходного напряжения через ноль и регулировании коэффициентами заполнения (?) управляющих импульсов. При этом к замечаниям по работе в отзывах отнесено, в том числе, следующее: отсутствует информация о сравнительном анализе разработанного и существующих преобразователей для индукционного нагрева; не приводится экономического обоснования предложенного решения; неясно, для каких типов индукторов возможно применение разработанной автором комбинированной структуры; не рассматриваются вопросы расчета параметров системы управления преобразователем комбинированной структуры для обеспечения требуемого качества управления; непонятно, вследствие каких причин происходит уменьшение выходной мощности и КПД устройства при увеличении (?) выходной частоты. Экспериментальные результаты предлагается дополнить результатами исследований энергетических характеристик предложенного преобразователя; рекомендуется также дополнить работу и классификацией преобразователей для определенных диапазонов частот и более четко определить построение силовой части; требуется внести ясность в вопрос ограниченности проведенных исследований (?) мощностью 50 кВт; предлагается раскрыть перспективы (?) предложенной концепции построения полупроводниковых преобразователей комбинированной структуры; указывается на необходимость приведения в работе количественных показателей улучшения технико-экономических характеристик предложенного преобразователя по сравнению с известными аналогами.

Здесь остановимся лишь (об остальном, в принципе, уже достаточно сказано выше) на моменте «ограниченности исследований» в диссертации [2] мощностью (?) в 50 кВт (автор настоящей статьи нашел информацию только об исследовании экспериментального

образца «преобразователя комбинированной структуры» или «прототипа» на сетевое напряжение 38 В и, соответственно, мощность в доли киловатта). В разработанном «прототипе» индуктор размещается в непосредственной близости от преобразователя (подключен с помощью шины непомерно большого сечения, рис. 5.3 в оригинале), при этом на стр. 36 диссертации записано, что «важным достоинством АИН (инвертора напряжения) является то, что практически отсутствует ограничение на длину кабеля (?), соединяющего инвертор с индукционной нагрузкой»...

В статье [35] типичный резонансный инвертор классифицируется как «резонансный инвертор тока». Это устройство было запатентовано (А. с. СССР № 1385210) в 1988 г. под названием «инвертор» (на самом деле запатентован был не инвертор, а преобразователь частоты с явно выраженным звеном постоянного тока на основе полностью управляемого выпрямителя и резонансного инвертора с закрытым входом). В тексте описания к А. с. № 1385210 говорится о том, что «индуктивности полубмоток (коммутирующего) дросселя, с учетом индуктивности первичной цепи (согласующего нагрузочного) трансформатора и емкости (коммутирующих) конденсаторов выбраны так, что разряд носит колебательный характер с частотой собственных колебаний, равной рабочей частоте преобразователя». То есть, очевидно, в авторском свидетельстве речь идет о резонансном инверторе. Почему в статье 2008 г. ее авторы отходят от установившейся (правильной) классификации, остается загадкой.

Литература

- Туманишвили Д. Г. Некоторые вопросы классификации в электроприводе // *Электричество*. 1939. № 4.
- Афанасьев А. М. Полупроводниковый преобразователь комбинированной структуры для установок высокочастотного индукционного нагрева: Дисс. канд. техн. наук. СГТУ им. Гагарина Ю. А. Саратов, 2016.
- П. 76674 Україна, МПК Н02 М 7/53. Інвертор для індукційного нагріву металів / О. М. Афанасьєв, Р. М. Саратовський, В. І. Ушаков // *Бюл.* 2013. № 1.
- П. 78600 Україна, МПК Н02 Н 7/00. Спосіб регулювання вихідної напруги перетворювача / Р. М. Саратовський, О. М. Афанасьєв, Т. І. Прончатова // *Бюл.* 2013. № 6.
- П. 53517 (заявка № 2005136125 от 14.11.2005) РФ, МКИ Н02 М 7/5387. Инвертор тока / Е. М. Силкин // *Б.И.* 2006. № 13.
- А. с. 132671 СССР, МКИ Н03 В 1/02. Двухтактный генератор с параллельным питанием ламп для установок высокочастотного нагрева / С. Г. Гуревич, А. М. Борок, А. С. Васильев и др. // *Б. И.* 1960. № 20.
- Васильев А. С., Слухоцкий А. Е. Ионные и электронные инверторы высокой частоты. М.: Госэнергоиздат, 1961.
- Слухоцкий А. Е., Пушкин В. Я. Анализ работы ионного преобразователя повышенной частоты с параллельной схемой анодной цепи на активную нагрузку // *Электричество*. 1965. № 2.
- Пушкин В. Я. Работа ионного инвертора с параллельной схемой анодной цепи на активно-индуктивную нагрузку // *Электричество*. 1967. № 6.
- Силкин Е. Об обратной блокирующей способности типовых структур IGBT // *Силовая электроника*. 2012. № 6.
- Бедфорд Б., Хофт Р. Теория автономных инверторов. Пер. с англ. под ред. И. В. Антика. М.: Энергия, 1969.
- Тиристорные преобразователи повышенной частоты для электротехнологических установок / Е. И. Беркович, Г. В. Ивенский, Ю. С. Иоффе и др. Л.: Энергоатомиздат, 1983.
- П. 2061292 (заявка № 925062674 от 22.09.1992) РФ, МКИ Н02 М 5/45. Способ управления преобразователем частоты / Е. М. Силкин // *Б.И.* 1996. № 15.
- Казанцев Ю. М. Релейно-импульсное управление в полупроводниковых преобразователях // *Электричество*. 1998. № 3.
- Силкин Е. М. Релейно-импульсное управление в инверторах тока и напряжения с квазирезонансной коммутацией // *Труды*
- 3 МНК, посвящ. методам и средствам управления технологическими процессами. Саранск. 25–27 октября 1999.
- Силкин Е. М., Кузьмин А. Ф. Системы управления с транзисторными преобразователями для промышленных озонаторов большой мощности // *Электротехника*. 2001. № 5.
- Силкин Е. М. Способ управления транзисторным преобразователем частоты для асинхронного двигателя // *Тез. Докл. 3 МК (АЭП-2001), посвящ. автоматизированному электроприводе*. Нижний Новгород. 12–14 сентября 2001.
- Васильев А. С. Ламповые генераторы для высокочастотного нагрева. Л.: Машиностроение, 1979.
- Нежданов И. В. Инверторы на тиристорах. Библиотека по автоматике. Вып. 152. М.: Энергия, 1965.
- Тиристорные генераторы ультразвуковой частоты / С. В. Шапиро, В. Г. Казанцев, В. В. Карташев и др. М.: Энергоатомиздат, 1986.
- Тихомиров И. С., Васильев А. С., Патанов Д. А. Адаптивный алгоритм самовозбуждения транзисторного инвертора напряжения для установок индукционного нагрева // *Журнал научных публикаций аспирантов и докторантов*. 2008. № 8.
- Е. И. Беркович, Ю. П. Григорьев, А. В. Донской и др. Особенности работы тиристорных преобразователей частоты, предназначенных для питания электротермических установок // *Электричество*. 1970. № 9.
- Смородинов В. В., Беркович Е. И. Параллельная работа тиристорных преобразователей частоты для индукционного нагрева // *Тиристорные преобразователи частоты для индукционного нагрева металлов*. Труды УАИ им. Орджоникидзе. Сб. 3. 1973. Вып. 48.
- Волгин Л. И., Матчак А. Т. Принципы построения и структуры цифровых фазосдвигающих устройств // *Электротехническая пром-ть. Сер. Преобразов. Техника*. 1977. Вып. 87(4).
- Силкин Е. М. Применение автономных инверторов тока в электротермии // *Вопросы преобразовательной техники, частотного электропривода и управления: Межвуз. науч. сб. (СГТУ им. Гагарина Ю. А.)*. Саратов, 2000.
- П. 2199813 (заявка № 200017587 от 23.03.2000) РФ, МКИ Н02 М 7/515. Способ управления инвертором тока / Е. М. Силкин // *Б.И.* 2003. № 6.
- Мустафа Г. М., Юлегин А. Н. Управление по вычисляемому прогнозу инвертором серии ТПЧ // *Электротехника*. 1988. № 8.
- Силкин Е. М. Управление по вычисляемому прогнозу параллельным инвертором тока со стабилизирующим диодом // *Тез. докл. ВНТК, посвящ. микроэлектронике в машиностроении*. Ульяновск. 14–16 ноября 1989.
- П. 2117378 (заявка № 97100755 от 17.01.1997) РФ, МКИ Н02 М 7/48. Способ управления резонансным инвертором со встречно-параллельными диодами / Е. М. Силкин // *Б.И.* 1998. № 22.
- Силкин Е. М. О самовозбуждении резонансных инверторов с встречно-параллельными диодами // *Труды 3 МНК, посвящ. методам и средствам управления технологическими процессами*. Саранск. 25–27 октября 1999.
- П. 2152683 (заявка № 99108548 от 19.04.1999) РФ, МКИ Н02 М 7/48. Способ управления резонансным инвертором со встречно-параллельными диодами / Е. М. Силкин // *Б.И.* 2000. № 19.
- П. 2341000 (заявка № 2007109391 от 14.03.2007) РФ, МКИ Н02 М 7/48. Способ управления резонансным инвертором со встречно-параллельными диодами / Е. М. Силкин // *Б.И.* 2008. № 34.
- Силкин Е. Элементы классификации автономных инверторов и свойства согласованного инвертора с резонансной коммутацией. Часть 1 // *Силовая электроника*. 2017. № 4.
- П. 61964 (заявка № 2006140102 от 13.11.2006) РФ, МКИ Н02 М 7/00. Автономный согласованный резонансный инвертор / Е. М. Силкин // *Б.И.* 2007. № 7.
- Иванов В. А., Маркевич А. И. Резонансный инвертор тока // *Труды Псковского политехнического института*. 2008. № 11.3.