

УДК 621.314

DOI 10.46960/2658-6754_2022_1_61

ОСОБЕННОСТИ ТОПОЛОГИИ ИНВЕРТОРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ NEON™ И СПОСОБОВ ИХ УПРАВЛЕНИЯ

О.М. Гладышев

АО «Электро Интел»

Нижний Новгород, Россия

ORCID: 0000-0002-9427-5747 e-mail: gladishevoleg@mail.ru

Е.И. Медведев

АО «Электро Интел»

Нижний Новгород, Россия

ORCID: 0000-0002-4674-3681 e-mail: yrcys@mail.ru

И.М. Трофимов

АО «Электро Интел»

Нижний Новгород, Россия

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Нижний Новгород, Россия

ORCID: 0000-0003-1988-3790 e-mail: a_van_ia@mail.ru

В.И. Гребенщиков

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Нижний Новгород, Россия

ORCID: 0000-0002-4010-3886 e-mail: grebenshchikov.viktor@mail.ru

А.С. Загляднов

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Нижний Новгород, Россия

ORCID: 0000-0001-9476-6696 e-mail: zaglaz.97@yandex.ru

Изложены алгоритмы управления и собственные схемотехнические решения, обеспечивающие переключение силовых транзисторов без коммутационных потерь на базе квазирезонансного полумостового инвертора и безопасной траекторией переключения. Основной отличительной чертой такого инвертора является квазирезонансный метод коммутации силовых ключей: открывание транзисторов происходит при нулевом токе и нулевом напряжении ($ZCZVS$), а закрывание при нулевом напряжении (ZVS). Приведены особенности топологии инверторных преобразователей для разных способов управления инвертором – частотного и фазового. Построены диаграммы токов и напряжений полумостового квазирезонансного инвер-

тора в режимах холостого хода и активной нагрузки для частотного способа управления. Приведены варианты построения инверторных преобразователей большой мощности, применяемые в серийной продукции АО «Электро Интел», изложены их преимущества с точки зрения конструкции.

Ключевые слова: дуговая сварка, инверторный источник питания, коммутационные потери, особенности схемотехники, резонансный полумостовой инвертор, формирование траектории переключения силовых ключей.

Для цитирования: Гладышев, О.М. Особенности топологии инверторных преобразователей NEON™ и способов их управления / О.М. Гладышев, Е.И. Медведев, И.М. Трофимов, В.И. Гребенщиков, А.С. Загляднов // Интеллектуальная Электротехника. 2022. № 1. С. 61-76. DOI: 10.46960/2658-6754_2022_1_61

FEATURES OF NEON® INVERTER TOPOLOGY AND CONTROL METHODS

O.M. Gladyshev

Electro Intel JSC

Nizhny Novgorod, Russia

ORCID: 0000-0002-9427-5747 e-mail: gladishevoleg@mail.ru

E.I. Medvedev

Electro Intel JSC

Nizhny Novgorod, Russia

ORCID: 0000-0002-4674-3681 e-mail: ypcyc@mail.ru

I.M. Trofimov

Electro Intel JSC

Nizhny Novgorod, Russia

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

Nizhny Novgorod, Russia

ORCID: 0000-0003-1988-3790 e-mail: a_van_ia@mail.ru

V.I. Grebenshchikov

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

Nizhny Novgorod, Russia

ORCID: 0000-0002-4010-3886 e-mail: grebenshchikov.viktor@mail.ru

A.S. Zaglyadnov

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

Nizhny Novgorod, Russia

ORCID: 0000-0001-9476-6696 e-mail: zaglaz.97@yandex.ru

Abstract. Control algorithms and proprietary circuit design solutions are described to ensure switching of power transistors without switching losses on the basis of a quasi-resonant half-bridge inverter and a safe switching trajectory. The main distinguishing feature of such an inverter is the quasi-resonant method of switching power transistors: opening occurs at zero current and zero voltage (ZCZVS) and closing at zero voltage (ZVS). The features of the topology of inverter converters for different ways of controlling the frequency and phase inverter are given. Diagrams of currents and voltages of a semi-bridge quasi-resonant inverter in idle and active load modes for a frequency control method are constructed. The variants of the construction of high-power inverter converters used in the serial products of the JSC "Electro Intel" are presented, their advantages from the point of view of design are outlined.

Keywords: arc welding, circuit design features, formation of the switching trajectory of power switches, inverter power supply, resonant half-bridge inverter, switching losses.

For citation: O.M. Gladyshev, E.I. Medvedev, I.M. Trofimov, V.I. Grebenshchikov and A.S. Zaglyadnov, "Features of NEON® inverter topology and control methods", *Smart Electrical Engineering*, no. 1, pp. 61-76, 2022.
DOI: 10.46960/2658-6754_2022_1_61

I. Введение

Развитие электродуговой сварки неразрывно связано с российскими учеными и исследователями: открытие В.В. Петровым электрической дуги в 1802 г., открытие практического ее применения для электросварки Н.Н. Бенардосом в 1882 г. и создание на основе их работ Н.Г. Славяновым первой полуавтоматической сварки положили начало эре электродуговой сварки. Многие ученые во всех странах мира работали и продолжают работать над совершенствованием электродуговой сварки. Е.О. Патон сформулировал основные положения и требования по технологическим основам электродуговой сварки, которые определяют совокупность электрических, временных и иных требований, предъявляемых к источникам питания электрической дуги. Источник должен надежно и устойчиво работать во всех режимах нагрузки от холостого хода до короткого замыкания и иметь при этом необходимую статическую и динамическую вольтамперную характеристику. Появление инверторных источников существенно расширило область применения электродуговой сварки и изменило требования к их электрическим, временным, энергетическим и массогабаритным характеристикам. Сварочные инверторы должны не только обеспечивать надежное, бесперебойное, устойчивое питание дуги, но, помимо всего, иметь малый вес и экономно расходовать электрическую энергию [1, 2].

Задачу создания простых, надежных инверторных источников питания сварочной дуги, отвечающих всей совокупности требований, и их серийный выпуск более 17 лет успешно решает предприятие АО «Электро

Интел», выпускающее преобразователи под торговой маркой «NEON». Организация специализируется на разработке и производстве инверторных источников питания для сварки, гальваники и других технологических процессов, а также разрабатывает и производит устройства специального назначения. АО «Электро Интел» является научно-производственным предприятием «полного цикла» – все работы от проектирования до реализации продукции выполняются собственными силами компании. Продукция реализуется через дилерскую сеть, состоящую из почти 100 представителей, расположенных по всей стране от Калининграда до Хабаровска [3].

Выход на рынок сварочного оборудования предприятием АО «Электро Интел» стал возможен благодаря разработке конструкторским отделом собственных принципиальных схем инверторов и их простых конструктивных воплощений. Эти схемные решения, отличающиеся от общеизвестных традиционно применяемых, дают предприятию гораздо больше возможностей для маневра по цене, радиодеталям, применяемым материалам и комплектующим. Кроме того, позволяют создавать конкурентоспособное оборудование и уверенно чувствовать себя на рынке при жестко меняющихся внешних условиях, таких как: санкции, изменяющийся курс доллара, исчезновение одних радиодеталей и появление других, последствия пандемии с локдаунами по всему миру и разрывом цепочек поставщиков.

II. Описание топологии инверторных преобразователей

Основу схемных решений инверторных преобразователей, производства АО «Электро Интел», составляет квазирезонансный метод коммутации силовых ключей, с адаптивной динамической высокоскоростной системой управления ими. Квазирезонансным метод называется из-за того, что резонансные явления используются в работе инвертора только во время переходного процесса переключения транзисторов и диодов, а в остальное время инвертор работает классически [4]. Такой метод позволяет на практике осуществить переключение транзисторов и диодов инвертора без коммутационных потерь за счет резонанса, а именно: открывание транзисторов осуществляется при нулевом напряжении на них и нулевом токе, а закрывание (выключение) транзисторов при нулевом напряжении. Диоды в таком инверторе открываются при нулевом напряжении, а закрываются при нулевом токе. Как следствие, в инверторе, работающем по такому методу, на силовых ключах во время переходного процесса, нет моментов времени при которых одновременно на них присутствует напряжение и при этом течет ток. В ключах выполняется главное условие: если на ключе есть напряжение, значит, нет тока и наоборот, если есть ток, значит, нет напряжения. Во время переходного процесса работает только резонансный колебательный контур,

который перехватывает ток из открытых ключей и создает временную задержку появления напряжения на них. Рассмотрим подробно работу такого метода на примере полумостового инвертора, использующего резонансный колебательный контур для формирования безопасной траектории переключения силовых ключей [1].

На рис. 1 приведена упрощенная схема квазирезонансного полумостового инвертора с формированием безопасной траектории переключения силовых элементов: $VT1$ – верхний ключ полумоста; $VT2$ – нижний ключ полумоста; $VD1$ – обратный диод верхнего ключа; $VD2$ – обратный диод нижнего ключа; $C1$ и $C2$ – резонансные емкости формирующие траекторию переключения силовых ключей; $L1$ – резонансная индуктивность она же индуктивность рассеивания; $L2$ – индуктивность намагничивания силового трансформатора; C_p – эквивалентная резонансная емкость; $C3$ и $C4$ – емкостной делитель полумоста; $R1$ – нагрузка.

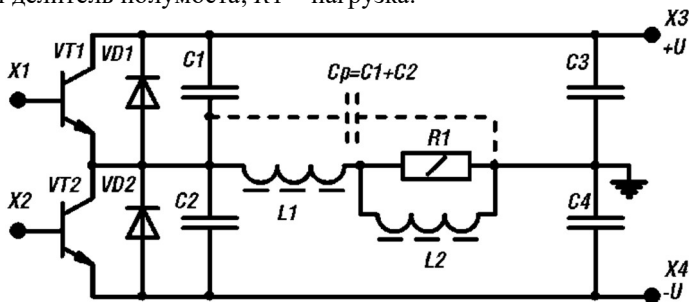


Рис. 1. Квазирезонансный полумостовой инвертор

Fig. 1 Quasi-resonant half-bridge inverter

На рис. 2 приведены диаграммы, поясняющие принцип работы полумостового квазирезонансного инвертора в режиме холостого хода, а на рис. 3 в режиме активной нагрузки. На диаграммах изображено:

$U_{\text{ВЫХ}}$ – выходное напряжение в средней точке соединения верхнего и нижнего ключей; $I_{\text{ВЫХ}}$ – выходной ток инвертора; I_{VT1} – ток через транзистор верхнего ключа; I_{VT2} – ток через транзистор нижнего ключа; I_{VD1} – ток через обратный диод верхнего ключа; I_{VD2} – ток через обратный диод нижнего ключа; $I_{C1,C2}$ – суммарный ток через формирующие емкости; $T1$ – момент времени открывания обратного диода верхнего ключа; $T2$ – момент времени закрывания обратного диода верхнего ключа и открывания транзистора верхнего ключа; $T3$ – момент времени закрывания верхнего ключа и перераспределения тока из ключа в формирующую емкость; $T4$ – момент времени открывания обратного диода нижнего ключа; $T5$ – момент времени

закрывания обратного диода нижнего ключа и открывания транзистора нижнего ключа; T_6 – момент времени закрывания нижнего ключа и перераспределения тока из ключа в формирующую емкость.

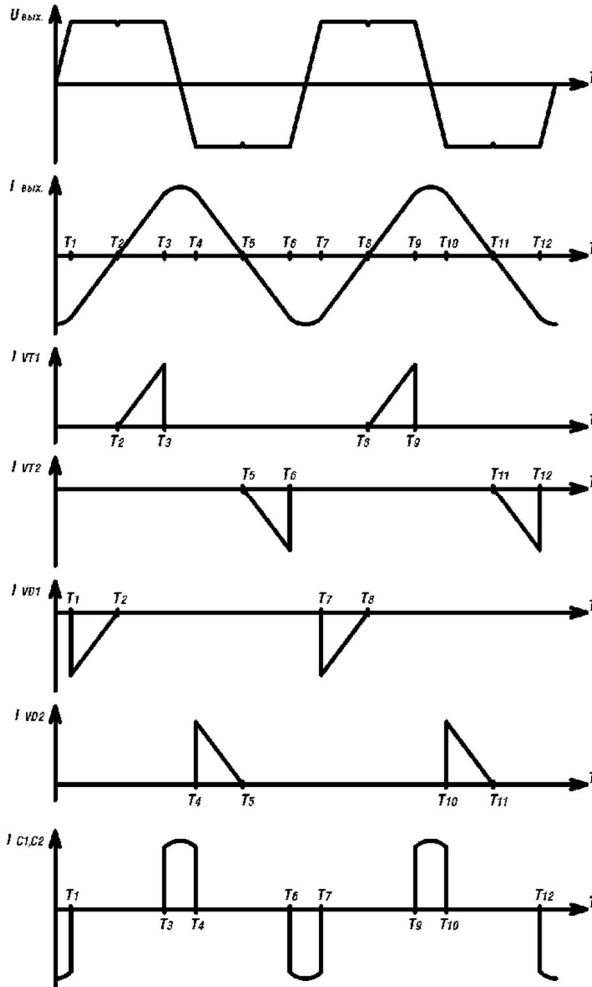


Рис. 2. Диаграммы работы квазирезонансного полумостового инвертора в режиме холостого хода

Fig. 2 Diagrams of operation a quasi-resonant half-bridge inverter in idle mode

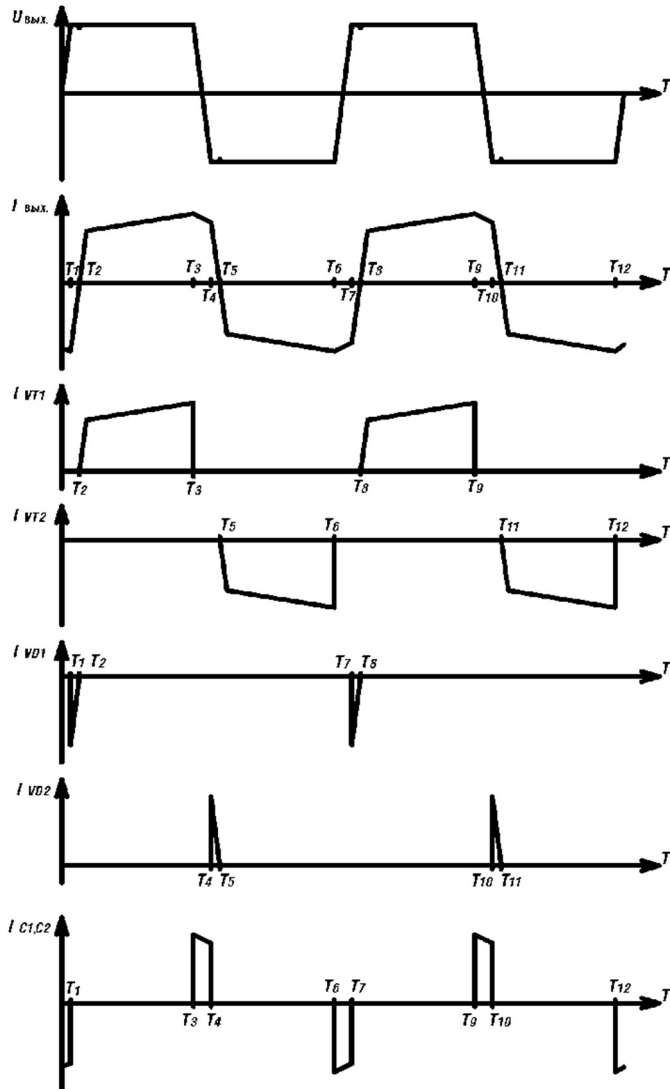


Рис. 3 Диаграммы работы квазирезонансного полумостового инвертора в режиме активной нагрузки

Fig. 3 Diagrams of operation a quasi-resonant half-bridge inverter in active load mode

За счет резонансного процесса энергия, накопленная в конденсаторе, формирующем траекторию переключения, не рассеивается в виде тепла, как в *RCD* снабере, а перераспределяется в колебательном контуре инвертора в виде реактивной энергии. Емкости $C1$ и $C2$, формирующие траекторию, являются резонансной емкостью колебательного контура, а индуктивности рассеивания $L1$ и намагничивания $L2$ являются его эквивалентной резонансной индуктивностью. Поскольку энергия динамических потерь при переключении пропорциональна квадрату напряжения на силовом транзисторе и квадрату тока, протекающему по нему, то без специальных мер по формированию траектории в ключах может выделяться мощность до нескольких киловатт.

Предприятие АО «Электро Интел», реализовав вышеуказанный метод, смогло создать относительно дешевую серию сварочных аппаратов для ручной дуговой сварки с квазирезонансными полумостовыми инверторами, использующими частотный способ регулирования с формированием безопасной траектории переключения транзисторов. Основной особенностью такого инвертора является квазирезонансный метод коммутации силовых ключей: открывание транзисторов происходит при нулевом токе и нулевом напряжении (*ZCZVS*), а закрывание при нулевом напряжении (*ZVS*) [5]. Это стало возможным за счет простой схемной реализации высокоскоростного пропорционального токового управления и контроля насыщенного состояния силовых транзисторов, что позволило исключить из процесса выключения транзисторов такой важный параметр, как время рассеивания неосновных носителей. В результате инвертор может работать в частотном диапазоне до нескольких сотен килогерц без коммутационных потерь. Это, в свою очередь, позволило соединять параллельно силовые транзисторы без проблем с выравниванием и существенно сократить статические потери для увеличения рабочих токов инвертора [6].

Возрастающие требования к эргономике и появление новых свойств и функций у сварочных аппаратов конкурентов подвигли конструкторов компании к применению микроконтроллеров в сервисных системах собственных сварочных аппаратов. При этом система управления инвертором осталась аналоговой, расширились ее функции, но, как и прежде, она надежно обеспечивает слежение за мгновенными, амплитудными значениями тока через ключи, их фазой момента перехода через ноль, формируя безупречную траекторию переключения. Стоит отметить, что в инверторах «*NEON*» не используются стандартные драйверы управления, поскольку они не могут обеспечить безупречную работу при таком алгоритме управления. Встроенные в них функции создают временные задержки в прохождении сигналов, мешая синхронизации работы реактивных элементов с ключами.

Сравним топологию преобразователей АО «Электро Интел» с отечественными и зарубежными аналогами. В настоящее время источники питания для сварки реализуются с использованием следующих типовых подходов: асимметричный или «косой» полумост (однотактный прямоходовый мостовой конвертер); полный мост с ШИМ; полумост с ШИМ; резонансные инверторы и квазирезонансные инверторы [7]. Топология инверторов отечественных и зарубежных производителей приведена в табл. 1. Здесь представлены преобразователи для ручной дуговой сварки штучным электродом диаметром 3-4 мм как наиболее массовый класс сварочных аппаратов, нашедших применение как в быту, так и на промышленных предприятиях.

Таблица 1.
Топология источников питания для сварки

Table 1.
Topology of power sources for welding

Модель инвертора	Производитель	Сварочный ток, А	Силовая часть
Maxstar 151	Miller Electric	150	Мост
Maxstar 141	Miller Electric	140	Мост
Invertec V130S	Lincoln Electric	130	Однотактный прямоходовый мост
MinArc 140	ESAB	140	Однотактный прямоходовый мост
ThermalArc P Wee 160s	Thermadyne	160	Полумост
ThermalArc Pro – Lite 250s	Thermadyne	250	Сдвоенный полумост
ВД 160 ИУ2	ООО «Линкор»	160	Полумост
ВД 315 ИУ2	ООО «Линкор»	315	Мост с «мягкой» коммутацией
Induri VRD10	Welding industries of Australia	125	Мост
ВД 203 NEON	АО «Электро Интел»	200	Полумост с «мягкой» коммутацией

Исходя из данных табл. 1, можно сделать вывод, что большинство производителей предпочитают отработанные схемотехнические и конструктивные решения, упрощают систему управления, используя ШИМ управление сварочным инвертором с жесткой коммутацией, порой в ущерб

КПД устройства, особенно в устройствах нижнего и среднего ценового сегмента. Близким по методу коммутации к преобразователям марки «NEON» является оборудование фирмы «Линкор», кроме того, по схожей технологии управления выполнены некоторые из профессиональных инверторов импортного производства «Kemppi» и «Fronius». Такое оборудование редко встречается в России ввиду их высокой стоимости, в частности из-за дополнительных схемных решений по организации. Применение таких технологий управления положительно сказывается на ресурсе силовых ключей, поэтому их развитие оправдывает цену устройства.

Задачи создания инверторных сварочных аппаратов для полуавтоматической и аргодуговой сварки на постоянном и переменном токе, а также источников питания для технологических процессов диктуют поиск новых схемных решений. Дополнительно конструкторами АО «Электро Интел» решались задачи расширения глубины регулирования выходного тока; управления динамическими характеристиками инвертора; регулирования скоростей нарастания и спада выходного тока. Поставленные задачи были достигнуты после создания спаренного полумостового квазирезонансного инвертора с фазовым управлением и суммирующим выходным трансформатором. Упрощенная принципиальная схема приведена на рис. 4.

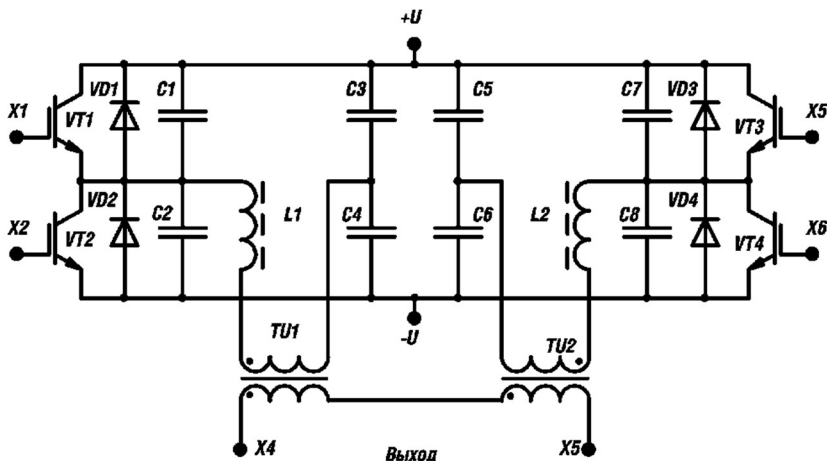


Рис. 4. Упрощенная принципиальная схема квазирезонансного фазового инвертора

Fig. 4. Simplified circuit diagram of a quasi-resonant phase inverter

Преобразователь представляет собой два квазирезонансных полумостовых инвертора, каждый работает на одной фиксированной частоте и

нагружен на свой силовой трансформатор, вторичные обмотки которого включены последовательно. Такая структура инвертора позволяет накапливать в каждом из полумостов необходимую для формирования безопасной траектории переключения реактивную энергию независимо от их фазового сдвига, что особенно актуально при питании инвертора высоким напряжением трехфазной сети, когда необходимо создавать большие времена нарастания и спада напряжения на транзисторах. Каждый из квазирезонансных полумостов имеет собственный индуктивный датчик фазы перехода тока через ноль, который одновременно является защитным датчиком мгновенных значений тока через силовые ключи. Аналоговая система управления принимает сигналы с датчиков тока и сигнал уставки от микропроцессорного сервисного устройства и вырабатывает для ведущего и ведомого полумостов сигналы управления транзисторами, сдвинутые по фазе на необходимый угол, обеспечивающий требуемые выходные параметры и сохранение квазирезонансного режима для формирования безупречной траектории переключения. В результате, как и в предыдущих разработках, транзисторы обоих полумостов фазового инвертора открываются при нулевом токе и напряжении (*ZCZVS*), а закрываются при нулевом напряжении (*ZVS*), обеспечивая мягкую коммутацию без потерь и, как следствие, высокий КПД при любых углах фазового сдвига. Такая топология схем с фазовым алгоритмом управления позволяет предприятию серийно выпускать сварочные инверторы с продолжительностью нагрузки более 60 % при 40 °С окружающей среды, при выходной мощности до 20 кВт.

На базе этого алгоритма управления можно реализовать двоянный инвертор с фазовым управлением без конденсаторов полумоста и дросселей холостого хода, но для этого необходимо предусмотреть цепи пассивного ограничения тока через транзисторы [8] либо использовать драйвер управления силовыми ключами с активным управлением силовым током. Такие решения уже опробованы, и, возможно, скоро будут внедрены серийную продукцию. Методы управления мостовым инвертором с фазовым сдвигом применяются в интегральных микросхемах управления [9, 10]. В продукции АО «Электро Интел» такое решение не применяется из-за более узкого функционала контроллера управления, чем у аналоговой системы управления.

Для изготовления источников большей выходной мощности используются два мостовых квазирезонансных инвертора, работающих от такой же фазовой системы управления, как и для полумостов, поскольку алгоритмы работы у них идентичны. Нагружаются эти квазирезонансные мостовые инверторы так же, как и полумостовые, каждый на свой силовой трансформатор, вторичные обмотки которых соединены последовательно для ал-

гебраического сложения их напряжений и, соответственно, мощностей. Инверторы, собранные по такой структуре, могут изготавливаться на любую мощность, ограниченную в этом случае лишь предельно допустимыми параметрами силовых ключей. Мостовые инверторы с квазирезонансной коммутацией описаны в [11]. Недостаток такого подхода состоит в том, что для увеличения мощности источника требуется создавать новую конструкцию, что затрудняет быстро расширять линейку выпускаемого оборудования, к тому же не всегда выгодно, несмотря на более высокую цену на профессиональное оборудование, поскольку такие источники менее массовые, чем сварочники. В линейке сварочной продукции 16 единиц, в источниках питания для технологических процессов более 50.

Другим вариантом получения источника питания большой мощности, применяемым на предприятии, является использование модульной конструкции. В основе такого исполнения лежит стандартный модуль, который содержит сетевой выпрямитель, полумостовой инвертор с фазовым управлением, силовой трансформатор, выходной выпрямитель. Подключение таких модулей параллельно на одну нагрузку позволяет наращивать выходную мощность за счет подключения дополнительных блоков. В частности, модульная конструкция применена в источниках питания для технологических процессов. Второй особенностью этого оборудования является исполнение со степенью защиты *IP54*, что позволяет работать в условиях агрессивных химических сред, высокой запыленности и влажности со стопроцентной продолжительностью нагрузки. Блоки собираются в стойку друг над другом, в зависимости от требуемой мощности устанавливается необходимое количество силовых модулей и блок управления (рис. 5), высота стойки ограничена требованиями для транспортировки, для еще большего увеличения мощности стоек может быть несколько штук. Например, ИПТ 12/12500 выполнен со следующими выходными параметрами: 12 В, 12500 А и 150 кВт, представляет собой 4 стойки высотой 1,8 м по 8 силовых модулей и одному модулю управления. Предприятие изготавливало источник питания на максимальную выходную мощность 750 кВт.

Первые источники питания для технологических процессов были выполнены со степенью защиты *IP33*, и оказалось, что на некоторых предприятиях не выполняются требования по использованию оборудования, не установлена вентиляция, или блок питания устанавливается максимально близко к гальванической ванне [12] или даже над ней, так, что брызги электролита падают на корпус, а пары засасываются вентиляторами охлаждения внутрь источника. В таких условиях оборудование выходило из строя даже до окончания гарантийного срока службы. После выхода на рынок источников со степенью защиты *IP54*, количество выходов из строя значительно снизилось, даже на предприятиях с агрессивной химической средой.



Рис. 5. Источники питания для гальванических процессов

Fig. 5. Power supplies for galvanic processes

III. Заключение

Приведена эволюция топологии инверторов, применяемых на предприятии, указаны их достоинства и возможности использования. Самым широким функционалом обладает совмещенный квазирезонансный инвертор с фазовым алгоритмом управления, в числе прочего, такая схема позволяет создавать преобразователи с диапазоном регулирования от десятых долей напряжения и тока, что применимо при проектировании источников питания с высокой точностью и низкой пульсацией выходного напряжения и тока.

Также показаны схмотехнические решения и алгоритмы управления, которые позволяют снизить динамические потери в силовых ключах. Эти решения позволяют построить инверторные преобразователи различной мощности, назначения и видов нагружения: статического, динамического, импульсного. Описаны способы построения устройств большой мощности, их особенности и варианты масштабирования, применяемые на предприятии «Электро Интел».

© Гладышев О.М., 2022

© Медведев Е.И., 2022

© Трофимов И.М., 2022

© Гребенщиков В.И., 2022

© Загляднов А.С., 2022

Поступила в редакцию 25.02.2022

Received 25.02.2022

Библиографический список

- [1] Петров С. Перспективная схемотехника сварочных инверторов // Современная электроника. 2009. № 1. С. 36-45.
- [2] Бардин А., Джаникян А., Никитин С., Романов А. Инверторное сварочное оборудование // Силовая электроника. 2008. № 17. С. 116-119.
- [3] Компания – Электро Интел // АО «Электро Интел» [Электронный ресурс]. URL: <https://ei-neon.ru/about/> (дата обращения 25.02.2022).
- [4] Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники. 3-е изд. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – 671 с.
- [5] Силкин Е.М. Применение нулевых схем инвертора тока с квазирезонансной коммутацией // Силовая электроника. 2005. № 3. С. 84-88.
- [6] Воронин П.А. Силовые полупроводниковые ключи. 2-е изд. М.: Издательский дом «Додэка – XXI», 2005. – 384 с.
- [7] Петров С. Схемотехника промышленных сварочных инверторов // Силовая электроника. 2007. № 8. С. 42-47.
- [8] Гладышев О.М., Чивенков А.И., Трофимов И.М., Вихорев Н.Н. Устройство ограничения тока силовых транзисторов в инверторе напряжения, Пат. 183603 RU, заявл. 07.06.2018, опубл. 27.09.2018. – Бюл. № 27.
- [9] Богатов А.Н., Комлев В.А. Импульсный источник питания, Пат. 104795 RU, заявл. 13.01.11; опубл. 20.05.11. – Бюл. № 14.
- [10] UCC2895. Phase-shifted full-bridge controller with enhanced control logic // Texas Instruments [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ti.com/product/UCC2895> (дата обращения 25.02.2022).
- [11] Силкин Е.М. Независимые инверторы напряжения с квазирезонансной коммутацией для высокочастотных применений // Силовая электроника. 2009. № 21. С. 56-60.
- [12] Современные выпрямители для гальваники: заменяем тиристоры на IGBT // АО «КОМПЭЛ» [Электронный ресурс]. URL: <https://www.compel.ru/lib/88475> (дата обращения 25.02.2022).

References

- [1] S. Petrov, “Perspektivnaya shemotekhnika svarochnih inverterov [Promising circuit design of welding inverters]”, *Sovremennaya Elektronika [Modern Electronics]*, no. 1, pp. 36-45, 2009 (in Russian).
- [2] A. Bardin, A. Dzhanikyan, S. Nikitin and A. Romanov, “Invertornoe svarochnoe oborudovanie [Inverter welding equipment]”, *Silovaya Elektronika [Power Electronics]*, no. 17, pp. 116-119, 2008 (in Russian).
- [3] Kompaniya – Elektro Intel [About company – Electro Intel] // JSC "Electro Intel". [Online]. Available at: <https://ei-neon.ru/about/> [Accessed: Feb. 25, 2022] (in Russian).
- [4] G.S. Zinov'ev, *Osnovy silovoy elektroniki [Basis of the power electronics]*, 3rd ed. Novosibirsk: NSTU, 2004 (in Russian).

- [5] E.M. Silkin, “Primenenie nulevikh shem invertora toka s kvazirezonsanoi kommutatsiey [Application of zero circuits current inverters with quasi-resonant switching]”, *Silovaya Elektronika [Power Electronics]*, no. 3, pp. 84-88, 2005 (in Russian).
- [6] P.A. Voronin, *Silovye poluprovodnikovye kluchi [Power semiconductor keys]*, 2nd ed. Moscow: Publishing house "Dodeka - XXI", 2005 (in Russian).
- [7] S. Petrov, “Shemotekhnika promishlennih svarochnih invertorov [Circuitry of industrial welding inverters]”, *Silovaya Elektronika [Power Electronics]*, no. 8, pp. 42-47, 2007 (in Russian).
- [8] O.M. Gladyshev, A.I. Chivenkov, I.M. Trofimov, N.N. Vihorev, “Ustroistvo ogranicheniya toka silovykh tranzistorov v invertore napryazheniya [Current limiting device of power transistors in a voltage inverter]”, Patent RU 183603, Sept. 27, 2018 (in Russian).
- [9] A.N. Bogatov and V.A. Komlev, “Impul'snyy istochnik pitaniya [Pulse power supply]”, Patent RU 104795, May 20, 2011 (in Russian).
- [10] UCC2895. *Phase-shifted full-bridge controller with enhanced control logic*, Texas Instruments [Online]. Available at: <https://www.ti.com/product/UCC2895> [Accessed: Feb. 25, 2022].
- [11] *Sovremennyye vypryamiteli dlya gal'vaniki: zamenyaem tiristory na IGBT [Modern rectifiers for electroplating: replacing thyristors with IGBT]*, JSC «KOMPEL». [Online]. Available at: <https://www.compel.ru/lib/88475> [Accessed: Feb. 25, 2022] (in Russian).
- [12] E.M. Silkin, “Nezavisimyye inventory napryazheniya s kvazirezonsanoi kommutatsiey dlya vysokochastotnykh primeneniy [Independent voltage inverters with quasi-resonant switching for high-frequency applications]”, *Silovaya Elektronika [Power Electronics]*, no. 21, pp. 56-60, 2009 (in Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Гладышев Олег Маратович, главный конструктор АО «Электро Интел», г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Oleg M. Gladyshev, chief designer of the JSC “Electro Intel”, Nizhny Novgorod, Russian Federation

Медведев Евгений Иванович, технический директор АО «Электро Интел», г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Evgeniy I. Medvedev, technical director of the JSC “Electro Intel”, Nizhny Novgorod, Russian Federation

Трофимов Иван Михайлович, кандидат технических наук, ведущий конструктор АО «Электро Интел», доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Ivan M. Trofimov, Cand. Sci. (Eng.), lead designer of the JSC “Electro Intel”, associate professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation

Гребенщиков Виктор Иванович, кандидат технических наук, доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Загляднов Александр Сергеевич, аспирант Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Viktor I. Grebenschikov, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation

Alexander S. Zaglyadnov, graduate student of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation