

Разработка систем заряда емкостных накопителей энергии

Емкостные накопители электрической энергии используются в большинстве технических устройств. Частной, однако, не имеющей исчерпывающего решения проблемой, возникающей при разработке таких накопителей энергии, является проблема создания высоковольтных (100–200 кВ) систем заряда, которые питаются от низковольтного (например, 20 В) источника питания. В цикле, который открывает эта статья, рассматриваются вопросы разработки таких систем заряда.

Юрий Болотовский, к. т. н.

eltech@ufacom.ru

Георгий Таназлы, к. т. н.

g_thanazly@mail.ru

Евгений Вашкевич, к. т. н.
Александр Никитин

Структура системы электропитания импульсной нагрузки

Решению проблемы преобразования низковольтного постоянного напряжения в высоковольтное для заряда и разряда емкостных накопителей энергии посвящено много статей и исследований, среди которых можно выделить следующие [1, 2, 3, 4]. Но разработка устройств для заряда емкостных накопителей энергии с высокими техническими характеристиками является сложной научно-технической задачей.

В [1] рассматривается структурная схема системы электропитания импульсной нагрузки. Характеристики импульсной нагрузки и имеющейся в распоряжении разработчика системы электроснабжения, как правило, не согласованы. Поэтому возникает необходимость включения между системой электроснабжения (в рассматриваемом случае — это источник низковольтного постоянного напряжения) и нагрузкой дополнительного устройства, которое называют источником вторичного электропитания (ИВЭП). Его задачей и является согласование характеристик системы электроснабжения и нагрузки. Наиболее общая структура ИВЭП с емкостным накопителем энергии (ЕНЭ), приведенная на рис. 1, как и любое устройство преобразовательной техники, содержит энергетическую часть и систему управления (СУ). В энергетическую часть, в свою очередь, входят три функциональные части: собственно емкостный накопитель энергии, зарядное устройство (ЗУ) и разрядное устройство (РУ).

При этом функцию согласования характеристик ИВЭП с системой электроснабжения выполняют ЗУ и ЕНЭ, а функцию согласования с характеристиками импульсной нагрузки — РУ и ЕНЭ.

В рассматриваемом случае ИВЭП предназначен для питания импульсных нагрузок и построен так, что ЗУ и РУ функционируют на различных интервалах времени и слабо взаимодействуют между собой.

Влияние процессов в разрядном контуре на процессы в зарядном проявляются в изменении только одного параметра — напряжения на ЕНЭ в начале зарядного процесса. Поэтому процессы заряда и разряда ЕНЭ можно рассматривать независимо.

Система управления обрабатывает сигналы, поступающие, как правило, по четырем каналам входной информации (U_d , $U_{o.c1}$, U_c , $U_{o.c2}$) и формирует управляющие сигналы на входах двух блоков энергетической части — ЗУ и РУ. Первый из входных каналов несет информацию о входном напряжении U_d , которое может изменяться в процессе работы по различным причинам. Сигнал $U_{o.c1}$ информирует о состоянии зарядного устройства в данный момент времени. В зависимости от типа и принципиальной схемы ЗУ в качестве $U_{o.c1}$ используется один или несколько параметров, характеризующих состояние ЗУ. Сигнал U_c содержит информацию об энергии, запасенной в емкостном накопителе на данный момент времени, который используется для корректировки зарядного процесса. Система управления осуществляет анализ сигнала U_c и сравнение этого сигнала с теоретически полученной величиной. В соответствии с разностью этих величин осуществляется коррекция процесса заряда. Кроме этого, система управления обеспечивает режимы работы элементов и узлов системы, гарантирующие их надежную работу. Сигнал $U_{o.c2}$ несет информацию о состоянии нагрузки. В рассматриваемом нами случае он может быть простейшим и предназначен для блокировки ЗУ на время разряда емкостного накопителя.

На основании полученной информации СУ формирует согласованные управляющие воздействия $U_{упр1}$ и $U_{упр2}$, определяющие все параметры зарядного процесса: закон изменения зарядного тока, алгоритмы включения секций ЗУ (если они есть), время отключения ЗУ от ЕНЭ на время его разряда и т. д.

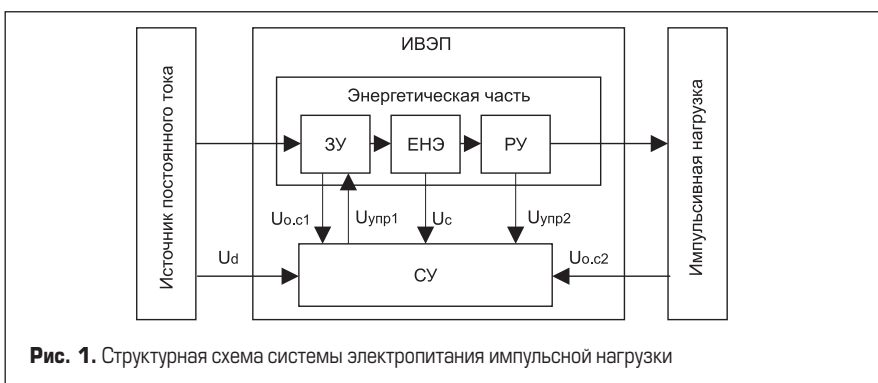


Рис. 1. Структурная схема системы электропитания импульсной нагрузки

Любая из составных частей структуры, приведенной на рис. 1, (за исключением ЕНЭ) не является обязательной для всех случаев применения ИВЭП.

Из структурной схемы (рис. 1) следует, что основным элементом системы заряда емкостных накопителей энергии является зарядное устройство.

Основные требования, предъявляемые к ЗУ, сводятся к тому, что оно должно обеспечивать более равномерное, чем это обусловлено нагрузкой, потребление энергии от источника постоянного тока. Кроме этого, ЗУ должно обеспечивать согласование напряжения системы электроснабжения с напряжением на ЕНЭ в конце интервала заряда. (В рассматриваемом случае напряжение системы энергоснабжения равно 20 В, а напряжение на ЕНЭ в конце интервала заряда равно 100–200 кВ.)

ЗУ должно обеспечивать отключение ЕНЭ от системы энергоснабжения на время его разряда и реализацию требуемых алгоритмов управления, как по энергетическим, так и по динамическим характеристикам (способность пропускать необходимое количество энергии при заданных временных ограничениях).

Так как зарядные устройства входят в класс систем силовой электроники, на них в полной мере распространяются требования, предъявляемые к таким системам: высокий КПД, малая масса, небольшой объем, высокие показатели надежности.

Сопоставительный анализ методов преобразования энергии в зарядных устройствах емкостных накопителей энергии

Анализ различных зарядных устройств [1, 2, 4, 5] емкостных накопителей энергии показывает, что основной элемент эффективных ЗУ — это звено, осуществляющее преобразование постоянного тока в переменный, то есть звено переменного тока. Различные варианты реализации этого звена и определяют методы преобразования энергии, являясь одновременно основой для классификации зарядных устройств емкостных накопителей.

Рассмотрим возможные методы преобразования энергии в зарядных устройствах емкостных накопителей в соответствии со структурной схемой, приведенной на рис. 2, где на уровне «Преобразование энергии» приведены два класса устройств: с механическим преобразованием энергии и с электрическим преобразованием энергии. На уровне «Получение переменного напряжения» для класса устройств с механическим преобразованием энергии выделены машинные генераторы, а для класса устройств с электрическим преобразованием энергии — прерыватели и инверторы.

Поскольку получение высоких напряжений непосредственно на выходе, как машинных генераторов, так и прерывателей и инверторов, затруднено, на структурной схеме приведены методы повышения переменного напряжения, которые осуществляются с помощью резонансных контуров, трансформаторов и диодно-ем-

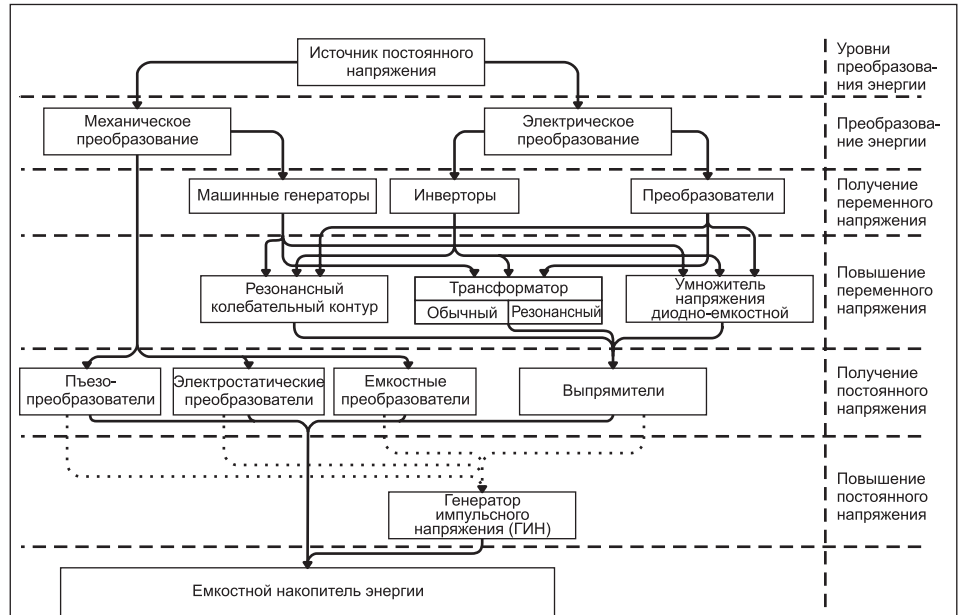


Рис. 2. Структурная схема методов преобразования энергии в ЗУ ЕНЭ

костных умножителей напряжения. Все перечисленные методы повышения переменного напряжения для передачи энергии емкостному накопителю требуют применения выпрямителей. В случае, если величина полученного после выпрямителя напряжения недостаточна, в блок-схеме на уровне «Повышение постоянного напряжения» применяется генератор импульсного напряжения (ГИН). Обособлены на блок-схеме методы получения высокопостоянного напряжения с помощью пьезопреобразователей и электростатических преобразователей, поскольку при использовании этих методов этапы «Получение переменного напряжения», «Повышение переменного напряжения», «Получение постоянного напряжения» не нужны.

В ряде случаев для увеличения коэффициента усиления зарядного устройства по напряжению возможно каскадное включение неко-

торых элементов рассматриваемой структурной схемы.

Анализ различных путей от источника постоянного напряжения к емкостному накопителю по структурной схеме (рис. 2) приводит к перечислению возможных методов преобразования энергии в зарядных устройствах емкостных накопителей.

Сопоставительный анализ различных методов преобразования энергии, а также схем зарядных устройств можно проводить по следующим критериям:

- коэффициент усиления по напряжению;
- время заряда емкостного накопителя;
- коэффициент полезного действия;
- масса;
- габариты;
- надежность;
- помехозащищенность;
- управляемость;

Таблица 1. Экспертные оценки методов преобразования энергии

Критерии	Методы преобразования энергии и их оценки			
	Механическое преобразование		Электрическое преобразование	
	Пьезо-, электростатические, емкостные преобразователи	Машинные генераторы	Инверторы	Прерыватели
Коэффициент усиления по напряжению	0	-	+	-
Время заряда емкостного накопителя	-	-	+	+
Коэффициент полезного действия	-	-	+	+
Масса	-	-	+	+
Габариты	-	-	+	+
Надежность	0	-	+	+
Помехозащищенность	+	+	-	-
Управляемость	-	+	+	+
Устойчивость к излучению	-	+	-	-
Промежуточные уровни преобразования энергии	+	-	-	-
Сопряжение с промежуточными уровнями преобразования энергии	+	+	+	-

- устойчивость к излучению;
- промежуточные уровни преобразования энергии;
- сопряжение с промежуточными уровнями преобразования энергии.

На данном этапе рассмотрения не представляется возможным определить численные значения приведенных критериев, поскольку речь идет о классах технических устройств, и отдельные устройства внутри каждого класса при оценке их по приведенным критериям, во-первых, могут существенно отличаться друг от друга, и, во-вторых, численные значения перечисленных критериев для конкретных устройств в полном объеме, как правило, не установлены. Их определение для каждого устройства представляет самостоятельную задачу.

Следует также отметить, что вопрос о независимости приведенных критериев или о степени и характере их зависимости необходимо решать в каждом конкретном случае.

Поэтому проведем рассмотрение возможных методов преобразования энергии в зарядных устройствах методом экспертных оценок с использованием трехбалльной шкалы: «+» — преимущество, «-» — недостаток, «0» — не определено.

В таблице 1 приведены экспертные оценки основных методов преобразования энергии, представленные на структурной схеме (рис. 2).

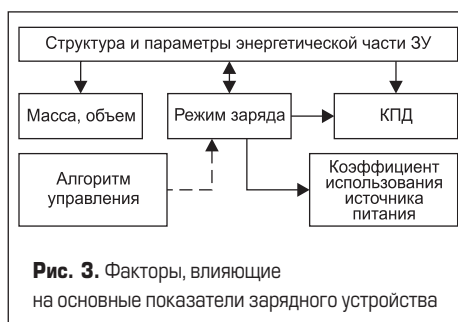
Как отдельный класс рассматриваются пьезоэлектрические, электростатические и емкостные преобразователи энергии [6]. К основным их достоинствам относится высокая помехозащищенность и отсутствие или минимальное количество уровней промежуточного преобразования энергии. К недостаткам следует отнести наличие уровней преобразования электрической энергии в механическую и обратное преобразование, что снижает оценки по таким критериям, как время заряда емкостного накопителя, КПД, масса, габариты, управляемость.

Несколько большее количество преимуществ по сравнению с только что рассмотренными методами преобразования энергии в зарядных устройствах имеет метод, основанный на применении машинных генераторов, которые (с использованием промежуточных уровней преобразования энергии) могут обеспечить помехозащищенность и относительно высокую устойчивость к излучению. Предпочтительным среди рассматриваемых методов преобразования энергии в зарядных устройствах, в соответствии с проводимой экспертной оценкой, является метод, основанный на применении автономных инверторов, основные недостатки которого ограничиваются низкой помехозащищенностью и устойчивостью к излучению, а также необходимостью применения промежуточных уровней преобразования энергии — для получения требуемого коэффициента усиления по напряжению.

Метод преобразования энергии, основанный на применении прерывателей, проигрывает инверторному методу в КПД и эффективности сопряжения с устройствами промежуточных уровней преобразования энергии.

Требования, предъявляемые к зарядным устройствам емкостных накопителей энергии

В [1] рассматривается структурная схема, определяющая факторы, влияющие на основные показатели зарядного устройства (рис. 3). В этой структурной схеме устанавливаются взаимосвязи между такими показателями зарядного устройства, как КПД, коэффициент использования источника питания, масса, объем и структура, и параметрами энергетической части ЗУ, алгоритмами управления и режимом заряда ЕНЭ.



Режимы работы различных элементов ЗУ определяются прежде всего совокупностью временных зависимостей токов в силовых цепях ЗУ, то есть режимом заряда. Однако режим заряда — не единственный фактор, влияющий на показатели ЗУ, сам он зависит от ряда других первичных факторов.

Первую группу первичных факторов, влияющих на показатели ЗУ, представляют собой внутренние параметры и схема энергетической части ЗУ (рис. 3). В ЗУ с неуправляемым зарядным процессом показатели определяются только факторами этой группы, причем влияют они на показатели как непосредственно (в выражения для различных показателей входят внутренние параметры: величины индуктивностей, емкостей и т. д.), так и косвенно, определяя временные зависимости токов, напряжений в различных цепях ЗУ. Изменение временных зависимостей токов приводит к изменению различных функционалов этих зависимостей (действующих, максимальных, средних значений), которые определяют все основные показатели ЗУ.

В ЗУ с управляемым зарядным процессом на показатели действует и вторая группа первичных факторов, определяемая алгоритмом управления зарядным процессом. Воздействие этих факторов определяется только влиянием их на зарядный режим (рис. 3). Наиболее распространенными алгоритмами управления зарядным процессом принято считать [1, 3] следующие алгоритмы:

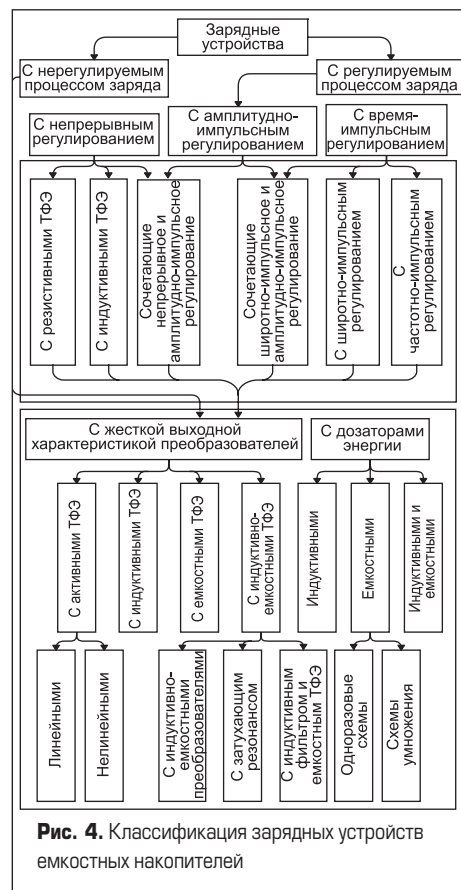
- с постоянным зарядным током;
- с постоянной потребляемой от источника мощностью;
- с минимальным временем заряда;
- с максимальным КПД.

Массо-габаритные параметры ЗУ в решающей степени зависят от схемы и внутренних параметров его энергетической части, поэтому исследовать влияние зарядного режима на эти показатели можно только для определенного, не слишком широкого класса ЗУ.

На уровне получения переменного напряжения (рис. 2) по результатам экспертной оценки в соответствии с примененными критериями предпочтительным является применение инверторов. Известно, что инверторы представляют собой обширную группу устройств силовой электроники, обеспечивающих преобразование постоянного напряжения в переменное и обладающих широким спектром функциональных характеристик.

Зарядное устройство, как правило, кроме автономного инвертора, включает в себя такие функциональные блоки, как токоограничивающие элементы и дозаторы энергии. На первом уровне выбора схемы влиянием этих блоков можно пренебречь. Исходя из этого, сформулируем требования к схемам автономных инверторов, предназначенных для работы в зарядных устройствах ЕНЭ:

- обеспечение устойчивой работы схемы инвертора в диапазоне изменения параметров нагрузки от короткого замыкания (разряженная накопительная емкость) до холостого хода (полностью заряженная накопительная емкость);
- максимально возможная и регулируемая раскочка напряжения в инверторе;
- максимально возможная (для заданных типов вентилях) мощность, снимаемая с одного конструктивного модуля;
- коэффициент полезного действия;
- помехоустойчивость;
- возможность работы без реактивных коммутирующих элементов;
- дозирование энергии силовой схемой;
- перегрузочная способность;
- возможность реализации различных траекторий заряда ЕНЭ;
- надежность.



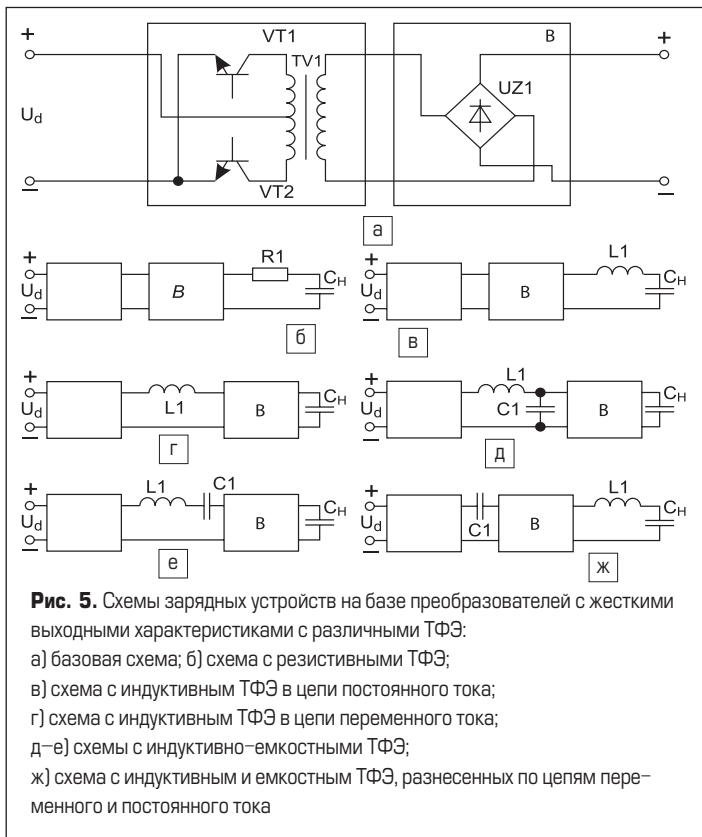


Рис. 5. Схемы зарядных устройств на базе преобразователей с жесткими выходными характеристиками с различными ТФЭ: а) базовая схема; б) схема с резистивными ТФЭ; в) схема с индуктивным ТФЭ в цепи постоянного тока; г) схема с индуктивным ТФЭ в цепи переменного тока; д-е) схемы с индуктивно-емкостными ТФЭ; ж) схема с индуктивным и емкостным ТФЭ, разнесенных по цепям переменного и постоянного тока

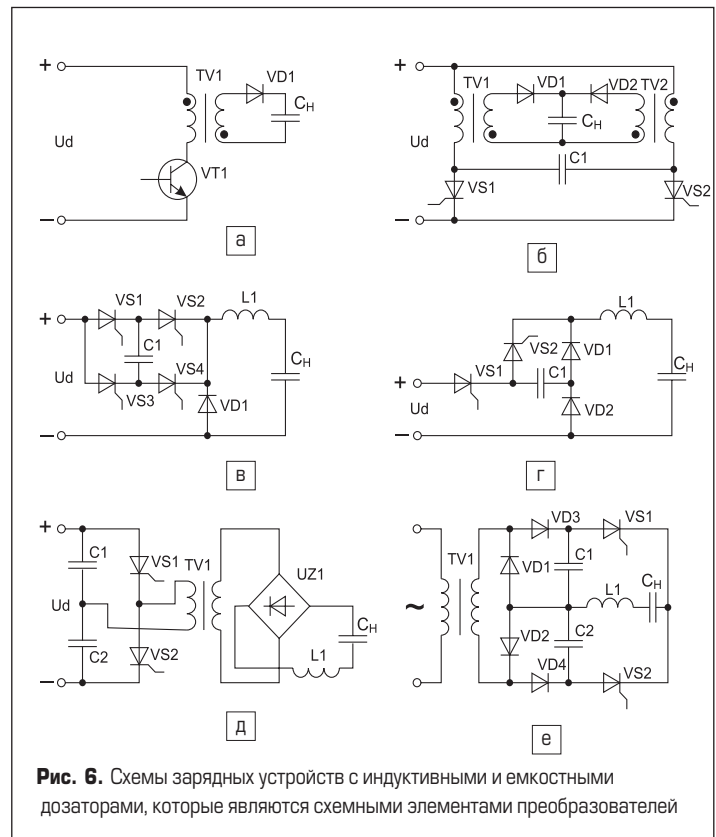


Рис. 6. Схемы зарядных устройств с индуктивными и емкостными дозаторами, которые являются схемными элементами преобразователей

Классификация зарядных устройств и их схемные решения

Классификация зарядных устройств сходна с классификацией базовых преобразователей переменного или постоянного напряжения в постоянное, имеющих кроме всего прочего элементы, присущие зарядным устройствам. Эти элементы, способы регулирования тока в ЗУ, основные типы базовых преобразователей и возможные их сочетания классифицируются структурной схемой [1], которая применяется в зависимости от параметров ЕНЭ и источников питания (рис. 4). Выбирая за основу данную классификацию, рассмотрим представленные виды ЗУ с учетом требований технического задания.

Простыми являются нерегулируемые преобразователи, к которым относятся неуправляемые выпрямители и инверторы с неизменным алгоритмом работы на ЕНЭ. Наиболее распространены среди них преобразователи с жесткой выходной характеристикой. Для использования преобразователей с жесткой выходной характеристикой в качестве ЗУ их необходимо дополнить токоформирующими элементами (ТФЭ), которые ограничивают ток в различных цепях ЗУ в зависимости от требований.

Наиболее простым и универсальным ТФЭ может быть резистор, который включается последовательно в зарядную цепь ЕНЭ, однако использование резистивного ТФЭ связано с большими потерями энергии, поэтому его использование ограничено маломощными ЗУ (рис. 5б).

Лучшими показателями обладают ТФЭ на реактивных элементах: индуктивностях, емкостях или их сочетаниях (рис. 5в-ж). Но, в отличие от резистивных ТФЭ, они применяются, как правило, в цепях переменного тока.

Наилучших показателей можно достичь в схемах с затухающим резонансом.

Другой класс базовых преобразователей представляют устройства, где ЕНЭ — составная часть ЗУ. Величина энергии, передаваемая в ЕНЭ, определяется, то есть дозируется, параметрами схемных элементов преобразователя (рис. 6а-е), поэтому они называются преобразователями с дозаторами энергии. Это энергия коммутирующих элементов, которая передается в нагрузку преобразователей, с вынужденной или естественной коммутацией. Сюда же относится схема ЗУ с умножителями напряжения (рис. 7а-в), в которых емкости умножителя являются дозаторами.

Однако данный класс преобразователей ЗУ не позволяет обеспечить коэффициент усиления по напряжению (K_u) $K_u > 10^2$. Необходимость заряда ЕНЭ до напряжения, значительно превышающего напряжение источников питания ($K_u = 10^3 \dots 10^4$), предопределяет, как правило, использование трансформаторов, которые наиболее эффективно используются в ЗУ с регулируемым процессом заряда. К данному классу ЗУ принадлежат тиристорные регуляторы переменного напряжения (рис. 8), а также полупроводниковые инверторы с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) выходного напряжения. К ним также относятся амплитудно-импульсные регуляторы (АИР), они реализуются в виде регулирующих транзисторов или подмагничиваемых дросселей и трансформаторов (рис. 9), которые могут входить в состав ЗУ на базе инверторов с жесткой выходной характеристикой.

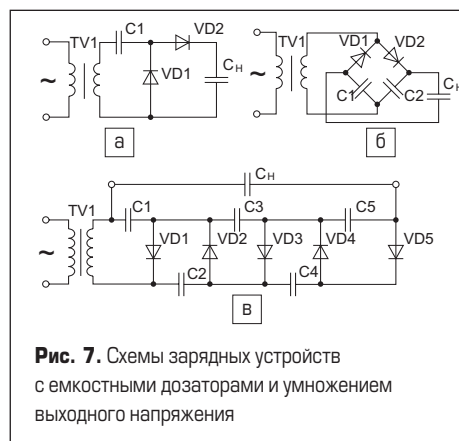


Рис. 7. Схемы зарядных устройств с емкостными дозаторами и умножением выходного напряжения

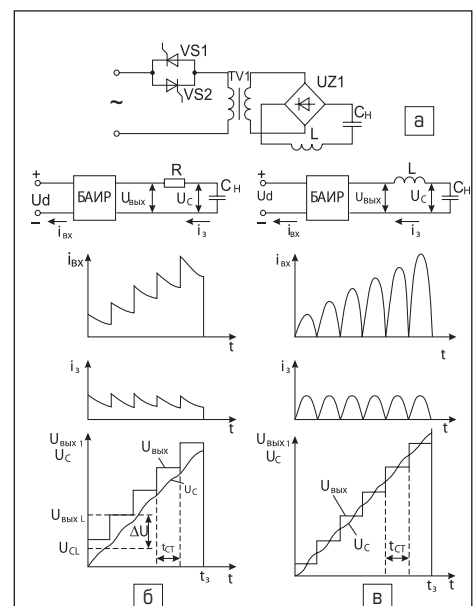


Рис. 8. Схемы и временные диаграммы для зарядных устройств с импульсным регулированием зарядного процесса: а) при импульсно-фазовом регулировании; б) при амплитудно-фазовом регулировании и резистивном токоформировании; в) при амплитудно-импульсном регулировании и индуктивном токоформировании

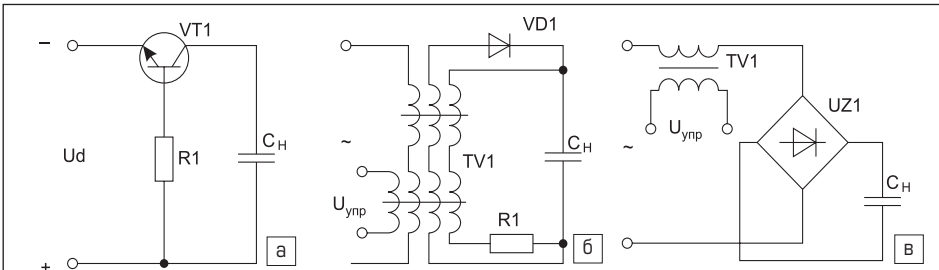


Рис. 9. Схемы зарядных устройств с непрерывным регулированием зарядного процесса

Это инверторы с жесткой выходной характеристикой, но питающиеся от источника с регулируемым выходным напряжением.

Класс регулируемых ЗУ достаточно широк, в него входят и ЗУ с группой инверторов, выходные выпрямители которых включены последовательно, а алгоритм работы построен так, что по мере заряда ЕНЭ к первому инвертору поочередно подключаются и остальные, а суммарное напряжение на выходе увеличивается ступенчато [7]. Регулирующий элемент стабилизирует ток в пределах одной ступени, что уменьшает потери в регулирующем элементе или ТФЭ и повышает общий КПД ЗУ.

Следует выделить ЗУ с фазовым регулированием, когда два источника переменного напряжения с одной частотой инвертируются, работающих на одну нагрузку, в течение времени заряда ЕНЭ меняют фазу выходного напряжения относительно друг друга от противофазной до синфазной по заданному алгоритму (рис. 10–11).

Другой принцип заложен в регулируемых ШИМ-инверторах, когда группа из n инверторов работает с фазовым сдвигом π/n . В этом случае реализуется два принципа регулирования: непрерывного и амплитудно-импульсно-

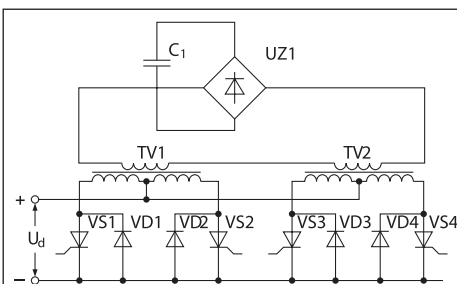


Рис. 10. Регулирование мощности на нагрузке двояственным однофазным инвертором

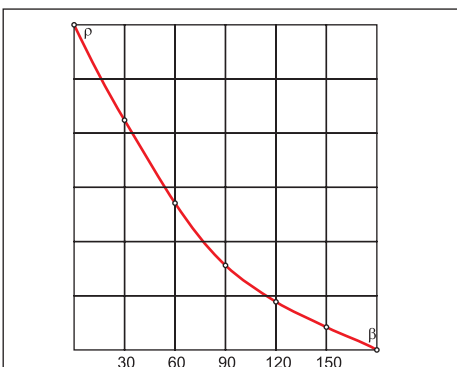


Рис. 11. Зависимость выходной мощности инвертора от угла регулирования β

го регулирования, когда на выходе n последовательно включенных выпрямителей ток в начальный момент регулируется длительностью импульсов, затем по мере увеличения длительности их амплитуда сначала удваивается, а при длительности $t = \pi/2$ амплитуда возрастает в n раз [8] (рис. 12–13).

Перечисленные способы регулирования процесса заряда ЕНЭ чаще всего используются комплексно, то есть в сочетании тех или иных способов. Это позволяет использовать преимущества каждого из способов и уменьшить присущие им недостатки.

Как мы уже упоминали, значительное повышение выходного напряжения достигается применением выходных трансформаторов. В соответствии с представленной структурной схемой классификации ЗУ процесс заряда может регулироваться как на первичной, так и на вторичной стороне трансформатора. К тому же применение трансформаторов позволяет суммировать выходные напряжения нескольких источников переменного напряжения.

В статье [9] приведен сравнительный анализ ЗУ различных типов. Результаты анализа сведены в таблицу 2. В ней представлены характеристики ЗУ по массо-габаритным параметрам, коэффициенту полезного действия и коэффициенту использования источника $K_{\text{и}}$.

Обобщая результаты анализа, можно сделать вывод: наилучшими показателями по исследуемым параметрам обладает ЗУ на основе преобразователя с выходным трансформатором.

Ограничения по массо-габаритным показателям ЗУ вынуждают разработчиков применять в составе ЗУ полупроводниковые преобразователи, которые, как видно по данным

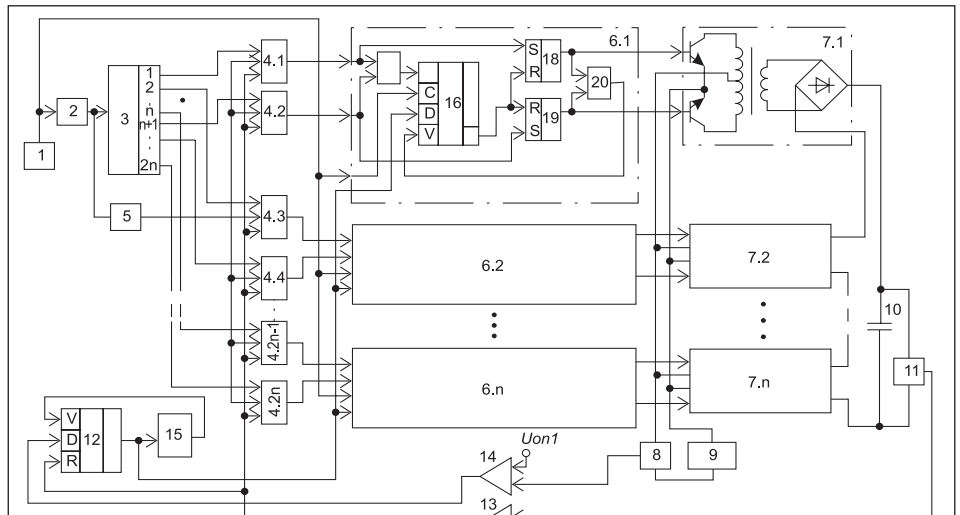


Рис. 12. Схема каскадного ЗУ с ШИМ-регулированием входного тока

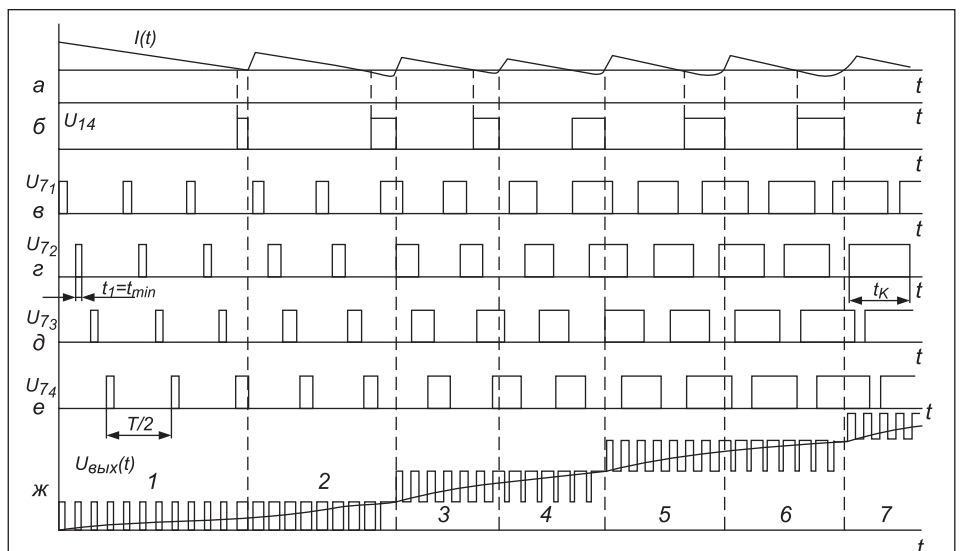


Рис. 13. Алгоритм изменения выходного напряжения в зависимости от изменения длительности выходных импульсов

Таблица 2. Сравнение различных способов воздействия на зарядный режим ЗУ

Устройство	Способ воздействия	M, r	η	Ku
Базовый преобразователь	Транзисторный преобразователь постоянного напряжения в постоянное	2000	0,935	1,0
Нерегулируемые ЗУ	С резистивным ТФЭ	10 200	0,365	0,57
	С индуктивным ТФЭ	30 500	0,84	0,64
Регулируемые ЗУ при зарядке постоянным зарядным током	Непрерывное регулирование	16 600	0,48	1,0
	Время-импульсное регулирование	7300	0,891	0,5
	Амплитудно-импульсное регулирование с резистивным ТФЭ	5350	0,893	0,5
	Сочетание АИР и ВИР (при 15 ступенях)	2940	0,902	0,5
	Сочетание АИР и НР (при 15 ступенях)	3310	0,856	0,5
Регулируемые ЗУ с ИР и НР в различных режимах	Режим неизменной потребляемой мощности	4550	0,844	1,0
	Компромиссный режим	3570	0,854	0,84

таблицы, снижают массо-габаритные показатели, увеличивают КПД и коэффициент использования источника. Изучение работ в этой области доказывает: применение преобразователей повышенной частоты позволяет не только снизить массо-габаритные показатели ЗУ, но и с высокой точностью управлять процессом заряда [10, 11].

Сравнительный анализ функциональных узлов зарядных устройств. Выбор схем для углубленного анализа

При всем многообразии схем полупроводниковых преобразователей ограничения, заложенные в техническом задании, требуют от разработчиков при анализе достоинств и недостатков каждой из схем преобразователей перенести ее на новую элементную базу и материалы и спроектировать преобразователь, максимально удовлетворяющий установленным условиям. Принимая во внимание все вышесказанное, перейдем к рассмотрению конкретных схемных решений.

Однотактные и двухтактные инверторы

Рассмотрим схему инвертора на тиристоре. Этот тип инверторов нашел широкое применение в качестве источника питания в технологических устройствах плавки и термообработки металлов промышленных предприятий в силу своей простоты и надежности при значительном диапазоне мощностей. Его работа описана во многих публикациях, и одной из последних является [12]. Заменяв обратный вентиль управляемым ключом и подключив выходной трансформатор через дозирующую емкость, в определенном диапазоне частот можно добиться значительного увеличения напряжения на первичной обмотке выходного трансформатора за счет резонансных явлений в коммутирующем контуре (рис. 14). Мощность преобразователя определяется установленной мощностью коммутирующих элементов и вентиля. Заданный алгоритм заряда ЕНЭ выдерживается с помощью изменения частоты управляющих импульсов и выбора коммутирующих элементов. Однако при низких значениях напряжения питания возникают значительные потери в тиристоре при инвертировании больших мощностей. Кроме того, для работы данной схемы требуется входной

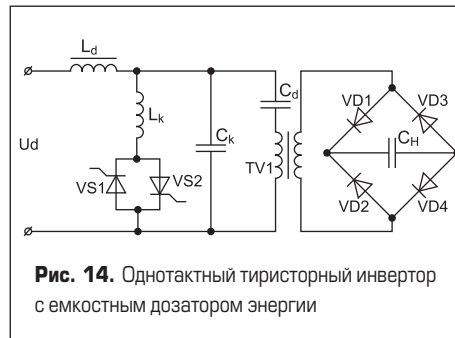


Рис. 14. Однотактный тиристорный инвертор с емкостным дозатором энергии

дроссель со значительными массо-габаритными показателями.

Исключить входной дроссель можно, заменив тиристор полностью управляемым ключом [6]. Эта схема сохраняет все преимущества тиристорного инвертора и, кроме того, позволяет значительно повысить частоту инвертирования, что приводит к снижению веса коммутирующей емкости и трансформатора, а регулирование тока заряда осуществляется схемой управления инвертора.

Модификации схемы (рис. 15), где улучшается КПД, приведены в [13, 14].

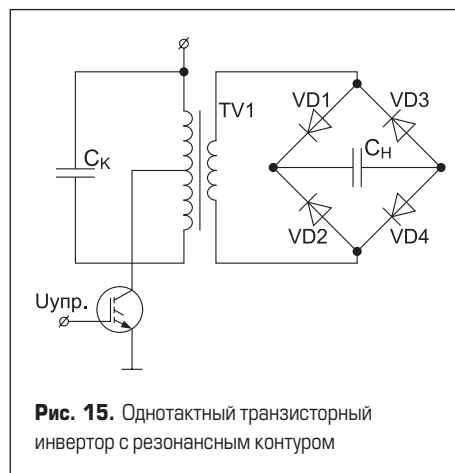


Рис. 15. Однотактный тиристорный инвертор с резонансным контуром

Двухтактный транзисторный инвертор (рис. 16), в отличие от однотактного, обладает лучшими массо-габаритными показателями выходного трансформатора, КПД и равномерной загрузкой источника питания. При низких входных напряжениях его КПД достигает величины 0,85 [1]. Преобразователи, собранные по двухтактной схеме, были успешно использованы в ЗУ модульной конструкции [1]. Выбор частоты переключения транзисторов и использование дополнительных реактивных элементов позволяет значитель-

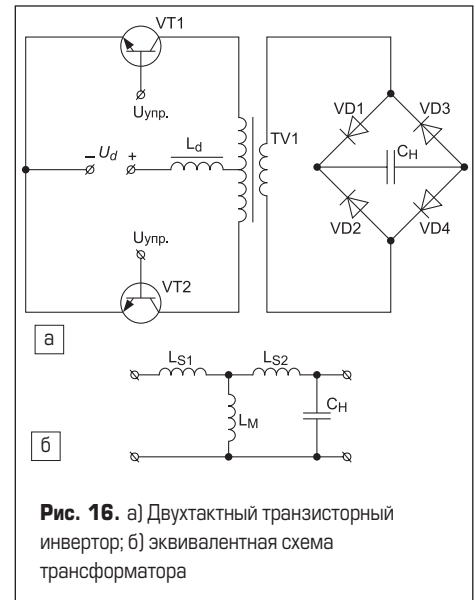


Рис. 16. а) Двухтактный транзисторный инвертор; б) эквивалентная схема трансформатора

но повысить напряжение на первичной обмотке трансформатора за счет резонансных явлений, возникающих в его контуре (рис. 16б), и компенсировать потери от паразитных емкостей, неизбежно возникающих в трансформаторах с большим коэффициентом трансформации. Анализ работы двухтактного транзисторного инвертора и его основные достоинства и недостатки приведены в публикациях [15, 16].

Мостовые и полумостовые инверторы

Мостовые транзисторные и тиристорные инверторы применяются в тех случаях, когда мощность преобразования значительна. В мостовых инверторах наиболее эффективно используется выходной трансформатор, поэтому его массо-габаритные параметры минимальны по сравнению с трансформаторами однотактных и двухтактных инверторов при тех же мощностях. Разработан мостовой тиристорный инвертор с регулируемой раскачкой выходного напряжения [17] (рис. 17).

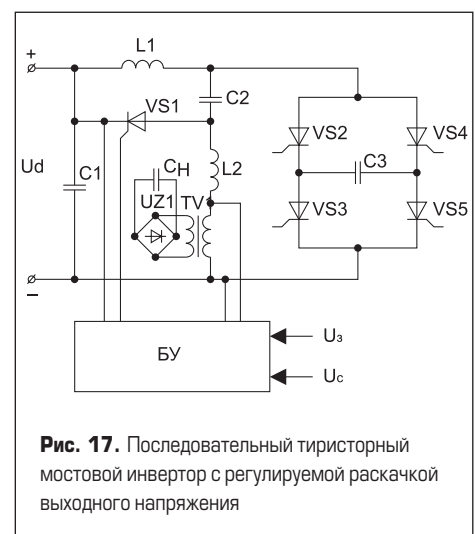


Рис. 17. Последовательный тиристорный мостовой инвертор с регулируемой раскачкой выходного напряжения

Появление нового класса ключевых приборов — IGBT-транзисторов — дало возможность создания на их базе мощных преобразователей, обладающих значительными преимуществами по сравнению с преобразователями на основе тиристоров, так как они позволяют расширить частотный диапазон преобразователей до 15–150 кГц с мощностями от 50 до 200 кВт.

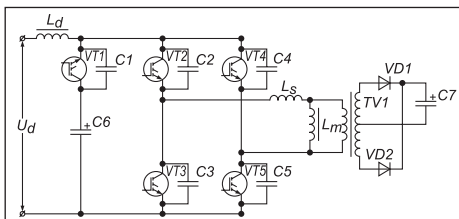


Рис. 18. Мостовой инвертор на транзисторах с раскачкой выходного напряжения с помощью паразитных индуктивностей и емкостей выходного трансформатора

На рис. 18 представлена схема транзисторного преобразователя с раскачкой выходного напряжения за счет паразитных реактивных элементов выходного трансформатора и регулируемого возврата энергии в источник.

Полумостовые инверторы так же, как и мостовые, достаточно широко используются в промышленности [12]. В них количество ключей уменьшено до двух, а 3-й и 4-й ключи заменены конденсаторами. В полумостовом инверторе напряжение на трансформаторе составляет половину напряжения питания, но, в отличие от мостового и двухтактного инверторов, разделительные емкости могут быть как дозирующими элементами, так и элементами резонансного контура, что иногда является предпочтительным при выборе данного типа инверторов. На рис. 19 представлено ЗУ на тиристорах, выполненное по полумостовой схеме с резонансным контуром и управляемым обратным вентилем, который позволяет изменять уровень раскачки резонансного контура по мере заряда накопительной емкости. Дозирующая емкость исключает режим КЗ и регулирует величину зарядного тока.

В тех случаях, когда массо-габаритные показатели играют главную роль, полумостовые инверторы выполняются на транзисторах. На рис. 20 представлена схема транзисторного преобразователя постоянного напряжения с высокочастотным резонансным инвертором [6].

Существует способ каскадного включения трансформаторов, когда для достижения высокого коэффициента трансформации $K_T \geq 10^4$

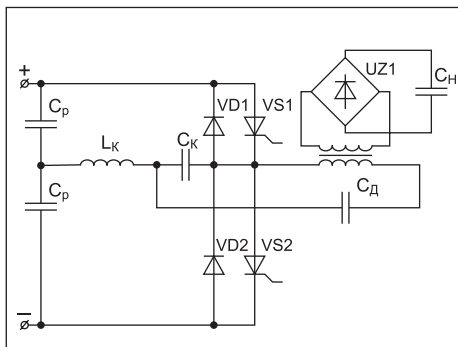


Рис. 19. Полумостовой тиристорный инвертор с дозатором энергии и резонансным контуром

первичную обмотку одного трансформатора подключают к вторичной обмотке другого. При этом суммарный коэффициент трансформации $K_{\Sigma} = K_{T1} \times K_{T2}$.

Анализ предпочтительных схем инверторов

Проведенный анализ ЗУ показал, что достижение выходного коэффициента усиления ЗУ по напряжению 10^3-10^4 можно осуществить с помощью промежуточного звена — преобразования постоянного тока низкого напряжения в переменный ток, с дальнейшим трансформированием и выпрямлением — с целью получения постоянного тока высокого напряжения.

Таким образом, к рассмотрению принимались полупроводниковые преобразователи постоянного тока, которые позволяют получить раскачку напряжения на первичной обмотке выходного трансформатора.

Для проведения сравнительного анализа были сделаны следующие ограничения:

- рабочие токи транзисторных ключей — 400 А;
- рабочие токи тиристорных ключей — 1000 А;
- рабочая частота преобразователя — 5000 Гц;
- напряжение источника питания — 20 В постоянного тока.

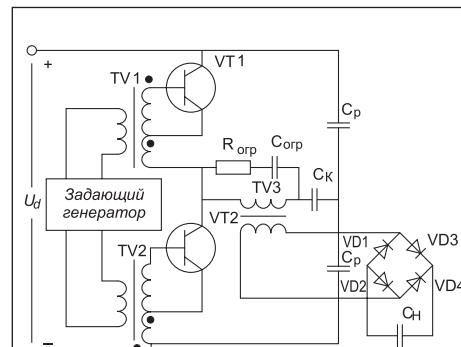


Рис. 20. Полумостовой преобразователь постоянного напряжения с высокочастотным резонансным инвертором

Анализ проводится по следующим критериям:

- единичная мощность — мощность, снимаемая с одного конструктивного модуля без параллельного включения силовых ключей;
- массо-габаритные показатели трансформатора — массо-габаритные показатели выходного трансформатора одного модуля;
- прерывистость входного тока — равномерность потребления входного тока в течение периода рабочей частоты инвертора при ограниченной величине индуктивности входного дросселя и емкости фильтра;
- потери в ключах — потери мощности, связанные с прямым падением напряжения в открытом состоянии ключа, и его коммутационные потери;
- коэффициент полезного действия;
- перегрузочная способность — способность инвертора выдерживать кратковременные перегрузки по току в аварийных режимах до срабатывания защиты;
- помехоустойчивость — способность функционирования преобразователя по заданному алгоритму в условиях помех заданного уровня;
- использование реактивных коммутирующих элементов — необходимость использования дополнительных элементов, без

Таблица 3. Оценка инверторов по некоторым критериям

Критерий оценки	Тип инвертора							
	Однотактный тиристорный	Однотактный транзисторный	Двухтактный транзисторный инвертор	Двухтактный тиристорный инвертор	Мостовой тиристорный инвертор	Мостовой транзисторный инвертор	Полумостовой тиристорный инвертор	Полумостовой транзисторный инвертор
Единичная мощность	+	-	+	++	++	+	+	-
Массо-габаритные параметры трансформатора	-	-	+	+	++	++	+	+
Прерывистость входного тока	-	-	++	++	++	++	++	++
Потери в ключах	+	+	++	++	+	+	-	-
КПД	-	-	++	++	-	-	-	-
Перегрузочная способность	++	+	+	++	++	+	++	+
Помехоустойчивость	++	++	-	+	+	-	+	-
Отсутствие реактивных коммутирующих элементов	-	+	+	-	-	+	-	+
Регулируемая раскачка	+	+	-	-	+	+	+	+
Дозирование энергии силовой схемы	++	++	+	+	+	+	++	++

которых функционирование преобразователя невозможно;

- регулируемая раскочка — возможность регулирования величины напряжения на выходном трансформаторе по заданному алгоритму;
- дозирование энергии силовой схемой — возможность поддержания заданной величины тока потребления с помощью элементов преобразователя без изменения алгоритма работы преобразователя.

Проанализировав представленные преобразователи с точки зрения определения ограничений по предлагаемым критериям, оценим каждый из этих преобразователей по трехбалльной шкале. При этом «очень хорошо» обозначим двумя плюсами; «хорошо» — одним плюсом; «удовлетворительно» — минусом.

В результате проведенного обзора схем полупроводниковых преобразователей по трехбалльной шкале составлена таблица 3.

Проведя экспертную оценку по установленным критериям, можно сделать следующие выводы.

Наиболее приемлемыми схемами преобразователей являются:

1. Двухтактный транзисторный преобразователь модульной конструкции с каскадным включением выходных обмоток и введением реактивных элементов для создания резонансного контура.
2. Мостовой тиристорный инвертор с резонансным контуром.

3. Мостовой транзисторный инвертор с резонансным контуром.

Применение однотактных и полумостовых инверторов проблематично и требует дополнительной оценки при математическом моделировании.

Литература

1. Булатов О. Г., Иванов В. С., Панфилов Д. И. Полупроводниковые зарядные устройства емкостных накопителей. М.: Радио и связь, 1986.
2. Бут Д. А., Алиевский Б. Л., Мизюрин С. Р., Васюкевич П. В. Накопители энергии. М.: Энергоатомиздат, 1991.
3. Кныш В. А. Полупроводниковые преобразователи в системах заряда накопительных конденсаторов. Л.: Энергоатомиздат, 1981.
4. Пентегов И. В. Основы теории зарядных цепей емкостных накопителей энергии. Киев: Наукова Думка, 1982.
5. Маршак И. С., Дейников А. С., Жильцов В. П. Импульсные источники света. М.: Энергия, 1978.
6. Ромаш Э. М. и др. Высокочастотные транзисторные преобразователи. М.: Радио и связь, 1988.
7. Авт. св. № 834843 (СССР). Панфилов Д. И. и др. Устройство для заряда емкостного накопителя. БИ № 20. 1981.
8. Авт. св. № 1780150 (СССР). Никитин А. В. и др. Устройство для заряда емкостного накопителя. БИ № 40. 1992.
9. Мальквичюс Р. С. Статический преобразователь для заряда конденсаторной батареи и его влияние на питающую сеть. В кн.: Электромагнитное совмещение силовых полупроводниковых преобразователей. Таллин, 1981.
10. Авт. св. № 552681 (СССР). Иванов В. С. и др. Устройство для заряда емкостного накопителя энергии от сети переменного тока. БИ № 42. 1976.
11. Патент № 2021643 (РФ). Додотченко В. В., Николаев А. Г. Система для питания импульсной нагрузки. БИ № 19. 1994.
12. Белкин А. К. и др. Тиристорные преобразователи частоты. М.: Энергоатомиздат, 2000.
13. Авт. св. № 815873 (СССР). Катасонов Н. М., Богатырев Н. Н. Устройство для зарядки накопительного конденсатора. БИ № 11. 1981.
14. Авт. св. № 855956 (СССР). Жильцов В. П., Полосин Д. П. Преобразователь напряжения для зарядки накопительного конденсатора в светосигнальном импульсном приборе. БИ № 30. 1980.
15. Авдеев В. В. и др. Функциональные устройства электропитания наземной РЭА / Под ред. В. Г. Костинова. М.: Радио и связь, 1990.
16. Алексанян А. А. и др. Мощные транзисторные устройства повышенной частоты. Л.: Энергоатомиздат, 1989.
17. Авт. св. № 985905 (СССР). Болотовский Ю. И. и др. Последовательный автономный инвертор. 1982.