

ность заданного угла управления при отклонении частоты напряжения от номинального значения. Однако использование трехканального ЦФСУ увеличивает значение относительного отклонения среднего выпрямленного напряжения по сравнению с ЦФСУ-прототипом. Вид выходных характеристик определяется структурой системы управления и силовой части полупроводникового преобразователя.

Литература

1. Mindykowski J. Voltage and frequency deviations in exemplary ship's network – research for ship owner / J. Mindykowski, M. Szveda, T. Tarasiuk // EPQU Magazine. – 2008. – Vol. 1(2). – P. 61–67.
2. Fuchs E. Power Quality in Power Systems and Electrical Machines / E. Fuchs, M.A.S. Masoum. – Second edition. – Academic Press, 2015. – 1140 p. DOI: 10.1016/B978-0-12-800782-2.09989-9
3. Сугаков В.Г. Обоснование реализации фазосмещающего устройства с коррекцией кода в зависимости от частоты напряжения / В.Г. Сугаков, Н.С. Варламов, Ю.С. Малышев // Вестник Гос. ун-та морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. – 2017. – № 4(44). – С. 829–837. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-829-837
4. Пат. 2612055 Российская Федерация, МПК G01R 25/00. Цифровое фазосмещающее устройство / В.Г. Суга-

ков, О.С. Хватов, Н.С. Варламов; заяв. и патентообл. ФГБОУВО «Волжский гос. ун-т водного транспорта». – № 2015155112; Заявл. 22.12.2015. Оpubл. 02.03.2017. Бюл. № 7.

5. Пат. 2 686 881 Российская Федерация, МПК G01R 25/00. Трехканальное цифровое фазосмещающее устройство / В.Г. Сугаков, О.С. Хватов, Н.С. Варламов; заяв. и патентообл. ФГБОУВО «Волжский гос. ун-т водного транспорта». – № 2018110495. Заявл. 23.03.2018. Оpubл. 06.05.

Сугаков Валерий Геннадьевич

Д-р техн. наук, профессор каф. электротехники и электрооборудования объектов водного транспорта (ЭиЭОВТ) Волжского гос. ун-та водного транспорта (ВГУВТ)
Эл. почта: elektrikasp@mail.ru

Варламов Никита Сергеевич

Аспирант каф. ЭиЭОВТ ВГУВТ
Эл. почта: varlamov_nikita@mail.ru

Малышев Юрий Сергеевич

Канд. техн. наук, доцент каф. ЭиЭОВТ ВГУВТ
Эл. почта: elektrikasp@mail.ru

УДК 621.311.62

В.О. Оскирко, А.П. Павлов, А.С. Семенов, А.Н. Захаров

Гибридный источник электропитания для дуальной магнетронной распылительной системы

Представлено описание гибридной системы электропитания DU HIPIMS+MFMS+BIAS, обеспечивающей комбинированные режимы работы дуальной магнетронной распылительной системы. В комбинированном режиме работы одновременно обеспечивается среднечастотное импульсное магнетронное распыление и сильноточное импульсное распыление. Последнее характеризуется следующими свойствами: высокой плотностью мощности разряда; высокой степенью ионизации распыленного материала и высоким уровнем ионного воздействия на растущее покрытие. В работе представлено описание общей структурной схемы гибридной системы и устройства формирователя выходных биполярных импульсов. Рассмотрен вопрос обеспечения согласованной работы, а также изложены основные принципы, с помощью которых обеспечивается переход из среднечастотного режима распыления в сильноточный.

Ключевые слова: HIPIMS, MFMS, магнетронное распыление, источник питания.

Магнетронное распыление импульсами высокой мощности, или сильноточное импульсное магнетронное распыление (high-power impulse magnetron sputtering – HIPIMS), является технологией высокоионизированного физического осаждения покрытий из паровой фазы (i-PVD), разработанной на основе технологии магнетронного распыления на постоянном токе (Direct current magnetron sputtering – DCMS) [1]. Питание разряда в HIPIMS осуществляется импульсами высокой скважности (≥ 10), что позволяет обеспечивать высокую импульсную плотность мощности разряда, избегая перегрева магнетронной распылительной системы (MPC). Импульсная мощность разряда возрастает пропорционально скважности импульсов, если средняя мощность раз-

ряда поддерживается постоянной. Мгновенные значения мощности могут достигать МВт, а плотность мощности на поверхности мишени магнетрона – нескольких кВт/см². Высокая плотность мощности вызывает интенсивное распыление материала и его ионизацию. Степень ионизации распыленного вещества может достигать 90% [1–3], а концентрация плазмы – 10^{13} см⁻³ [4]. Высококонцентрированные потоки ионов из плазмы воздействуют на растущее покрытие, позволяя получать пленки с уникальными структурными, электрическими и оптическими свойствами [5, 6].

Существенным недостатком данного метода является снижение скорости осаждения по сравнению с традиционными режимами магнетронного распы-

ления на постоянном (DCMS) и среднечастотном токе (Mid frequency magnetron sputtering – MFMS). Снижение скорости напыления зависит от типа распыляемого материала, конструкции MPC, электрических параметров разряда и может составить несколько десятков процентов [7]. Основной причиной является возврат ионизированного распыленного материала на мишень под действием электрического поля. Снижение скорости напыления покрытий является платой за высокую степень ионизации распыленного материала.

Для решения задачи формирования высококачественных покрытий с высокой скоростью используется несколько подходов. Один из них заключается в применении комбинированного импульсного электропитания MPC, которое объединяет в себе DC/MFMS и HIPIMS [8, 9].

В данной работе представлено описание гибридной системы электропитания DU HIPIMS + MFMS + BIAS, разработанной компанией «Прикладная электроника» и Институтом сильноточной электроники СО РАН. Ключевой особенностью данного устройства является возможность работы с дуальными магнетронными распылительными системами (ДМРС). В статье рассмотрены устройство и принцип действия системы электропитания, представлены её основные выходные параметры.

Гибридные системы магнетронного распыления HIPIMS+DCMS/MFMS

Для начала рассмотрим различные типы гибридных систем HIPIMS+MFMS, которые применяются в настоящее время. На рис. 1 представлено три варианта таких систем. Основные отличия между вариантами заключаются в способе подключения источника питания и форме выходных импульсов.

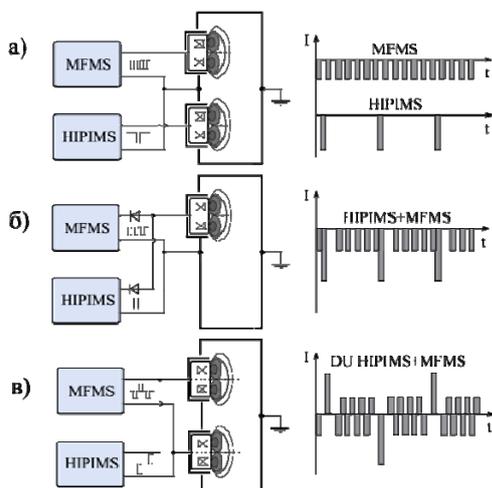


Рис. 1. Гибридные системы импульсного магнетронного распыления HIPIMS+MFDC

В первом варианте схемы магнетроны запитаны от двух независимых источников, работающих в режиме HIPIMS и MFMS. На мишени MPC подаются отрицательные импульсы напряжения, в результате чего они выполняют функцию катодов в разрядной системе. В качестве анода обычно используются

внутренние стенки вакуумной камеры, к которой подключены положительные выходы источников. Данный способ является наиболее простым в реализации, поскольку не требует специальных мер для согласования работы источников.

Во втором варианте в схеме, показанной на рис. 1, б, используется всего один магнетрон, а комбинированный режим распыления обеспечивается путем параллельного соединения выходов источников питания. Для работы в HIPIMS-режимах, как правило, применяется более высокое импульсное напряжение по сравнению с MFMS. Разное напряжение на выходе источников может привести к возникновению паразитных токов, протекающих из одного блока в другой. Чтобы предотвратить их возникновение, используются разделительные диоды, показанные на схеме.

В схеме третьего варианта, представленной на рис. 1, в, магнетроны работают в дуальной конфигурации – ДМРС. Питание ДМРС осуществляется биполярными импульсами напряжения. Мишень каждого магнетрона поочередно выполняют функцию анода и катода в разрядной системе в зависимости от полярности прикладываемого напряжения. Выходы источников электропитания изолированы от камеры. Такое решение позволяет решить проблему «потери анода», возникающей при запылении стенок камеры диэлектрической пленкой. Благодаря высокой стабильности продолжительных процессов дуальные системы часто используются в промышленности для нанесения непроводящих покрытий. Необходимость применения биполярных импульсов напряжения усложняет задачу согласования источников питания. Поскольку на выходе источников протекает биполярный ток, использование разделительных диодов, как в схеме на рис. 1, б, невозможно. Важной задачей, решаемой в процессе создания гибридной системы электропитания, являлось согласование работы источников питания, работающих в биполярном режиме, исключающее их взаимное влияние. **Структурная схема**

На рис. 2 представлена структурная схема разработанной гибридной системы электропитания DU HIPIMS+MFMS+BIAS (далее – ГСП). ГСП вместе с ДМРС входит в состав экспериментальной вакуумной установки для напыления диэлектрических покрытий. ГСП включает в себя два блока питания, формирующих среднечастотные импульсы (БСИ 1 и БСИ 2); два блока, формирующих импульсы высокой мощности (БИВМ 1 и 2), а также блок подачи потенциала смещения на подложку (БСП). Каждый блок формирует на выходе униполярные импульсы. Положительные выходы блоков соединены между собой, а отрицательные подключены к мишеням ДМРС. В этом случае обеспечивается формирование биполярных импульсов на выходе ГСП.

Амплитуды импульсов отрицательной и положительной полярности регулируются независимо. Это позволяет контролировать мощность, посту-

пающую на каждый магнетрон, и соответственно, скорость распыления каждой мишени.

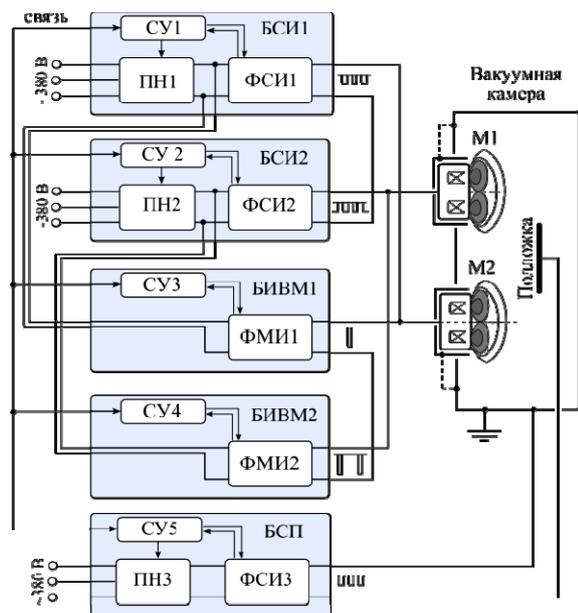


Рис. 2. Структурная схема гибридной системы электропитания DU HIPIMS + MFMS + BIAS

В состав БСИ 1,2 входят формирователи среднечастотных импульсов (ФСИ 1,2), преобразователи напряжения (ПН 1,2) и системы управления (СУ 1,2). ПН преобразуют переменное сетевое трехфазное напряжение в постоянное, регулируют его величину, а также обеспечивают гальваническую развязку. ФСИ 1,2 обеспечивают формирование выходных униполярных среднечастотных импульсов с заданной длительностью и частотой.

В составе БИВМ 1,2 отсутствуют ПН. Формирователи импульсов высокой мощности (ФМИ 1,2) питаются от ПН, которые входят в среднечастотные блоки БСИ 1,2. Блоки ФСИ и ФМИ, подключенные к одной мишени, питаются от общего ПН, поэтому их импульсы напряжения имеют одинаковую амплитуду. Для управления работой каждого блока используется система управления (СУ), которая обеспечивает обмен данными, необходимыми для согласованной работы блоков ГСП.

Схема формирователя выходных импульсов

Рассмотрим более подробно устройство и принцип действия формирователей выходных импульсов. На рис. 3 приведена схема ФСИ 1,2 и ФМИ 1,2. В состав каждого формирователя входят накопительная емкость С1–С4, транзисторный полумост Т1–Т2, Т7–Т8, диодный полумост Д1–Д2, Д7–Д8 и дроссель Др1–4. Формирователи имеют одинаковую топологию, но при этом используемые в них компоненты отличаются. В ФСИ используются ключи на транзисторах MOSFET, способные работать в среднечастотном диапазоне (20–50 кГц) при относительно невысоких импульсных значениях тока (не более 40 А). В ФМИ применяются IGBT-транзисторы, предназначенные для работы на пониженной частоте (20–5000 Гц) и высоких импульсных значениях тока (до 200 А).

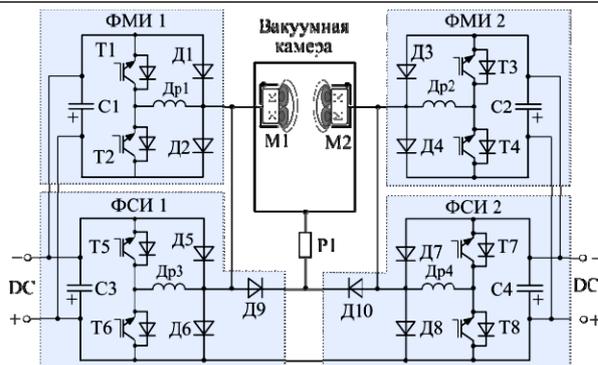


Рис. 3. Схема формирователей выходных биполярных импульсов DU HIPIMS + MFMS

Дроссели в ФСИ и ФМИ используются для ограничения скорости роста выходного тока. Дроссели Др1-2, в ФМИ 1,2, имеют небольшую индуктивность – 10 мкГн. Для достижения высоких импульсных значений тока формирователь должен обладать низким внутренним сопротивлением и обеспечивать высокую скорость роста тока. Дроссели Др3, Др4, входящие в состав ФСИ 1,2, обладают большей индуктивностью (50 мкГн), что позволяет ограничивать амплитуду выбросов тока в случае возникновения электрических дуг.

Транзисторы Т5–Т8 в ФСИ1 и ФСИ2 образуют мостовую схему, способную формировать на выходе биполярный сигнал. На рис. 4 представлены эпюры, поясняющие принцип действия схемы формирования выходных импульсов. Транзистор Т5 работает синхронно с Т8, а Т6 включается одновременно с Т7. Подобным образом транзисторы Т1–Т4 в ФМИ1 и ФМИ2 совместно образуют мост для формирования биполярных импульсов, но уже высокой мощности.

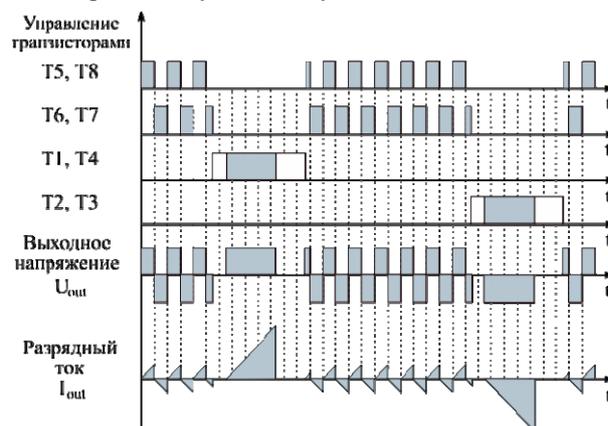


Рис. 4. Эпюры импульсов управления транзисторами

Параллельное соединение накопительных конденсаторов в ФСИ и ФМИ позволяет упростить схему. Переход в сильноточный режим магнетронного распыления при постоянной величине напряжения осуществляется путем увеличения длительности импульсов. При использовании прямоугольных импульсов напряжения импульсы разрядного тока в ДМРС имеют практически треугольную форму (рис. 5). Плавное увеличение тока в течение длительности импульса обусловлено процессами, про-

текающими в разрядной системе. Постепенное увеличение концентрации плазмы в разрядном промежутке сопровождается повышением его проводимости. Через определенное время разряд переходит в установившееся состояние, и рост тока прекращается. Изменение протяженности импульса в пределах длительности переходного процесса позволяет регулировать амплитуду импульсов разрядного тока. Длительность импульсов ФСИ 1,2 изменяется в диапазоне 9–24 мкс, тогда как в ФМИ 1,2 длительность импульсов может достигать 250 мкс. В упрощенном виде эпюра на рис. 5 показывает, как изменяется амплитуда импульса тока при увеличении длительности импульса и обеспечивается переход в сильноточный режим.

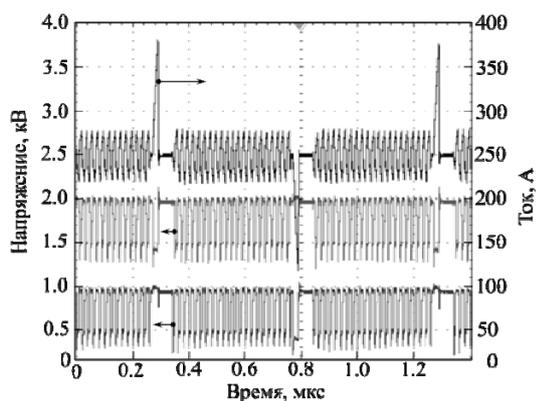


Рис. 5. Осциллограммы импульсов тока и напряжения на выходе ГСП в комбинированном режиме дуального магнетронного распыления

При работе в комбинированном режиме HIPIMS+MFMS импульсы высокой мощности могут накладываться на среднечастотные импульсы, что может приводить к негативным последствиям. Во-первых, наложение импульсов может спровоцировать возникновение паразитных токов, циркулирующих между блоками. Во-вторых, из-за изменений условий в начальной фазе импульса высокой мощности становится сложно контролировать амплитудное значение тока. Это может привести к перегрузкам, ложным срабатываниям системы подавления дуг и колебаниям электрических параметров. Избежать наложения импульсов можно путем введения «мертвого времени» на этапе формирования импульса высокой мощности. Помимо введения «мертвого времени», система управления обеспечивает защиту источника питания от перегрузок по току и возникновения электрических дуг.

На рис. 5 представлены осциллограммы импульсов разрядного тока и напряжения, полученные в процессе эксперимента. Напряжение на мишенях измерялось относительно заземленной камеры. Измерение разрядного тока производилось в месте подключения ГСП к одной из мишеней ДМРС. Частота формирования среднечастотных импульсов в процессе эксперимента составляла 50 кГц, частота импульсов высокой мощности 1 кГц. Источник питания работал в симметричном режиме, поддерживая амплитуду положительных и отрицательных

импульсов – 700 В. Длительность среднечастотных импульсов составляла приблизительно 8 мкс, длительность импульсов высокой мощности – 20 мкс.

Как можно видеть на осциллограмме, источник питания обеспечивает комбинированный режим распыления. Из-за короткой длительности среднечастотные импульсы тока имеют низкую амплитуду – 30 А. При увеличении длительности в сильноточном режиме амплитуда импульсов возрастает до 130 А. При этом максимальная мощность разряда, наблюдаемая в конце импульса, увеличивается с 15 до 78 кВт.

На рис. 6 приведена фотография, а также перечислены основные выходные параметры ГСП. Система имеет модульную конструкцию согласно структурной схеме на рис. 2.



Рис. 6. Внешний вид и основные параметры ГСП HIPIMS+MFMS+BIAS

Параметры:

Напряжение: 100–1300 В
Средний вых. ток: до 13 А
Мощность: 20 кВт
Макс. амплитуда сильноточных импульсов: 250 А
Макс. амплитуда среднечастотных импульсов: 40 А
Диапазон регулирования частоты сильноточных импульсов: 20–5000 Гц
Диапазон регулирования частоты среднечастотных импульсов: 20–50 кГц

Выводы

В работе предложена схема гибридной системы электропитания, способной обеспечивать комбинированные режимы дуального магнетронного распыления HIPIMS+MFMS. Показано, что переход в сильноточный режим может осуществляться путем увеличения длительности импульсов. Введение «мертвого времени» на этапе формирования импульсов высокой мощности позволяет избежать наложения этих импульсов и обеспечить согласованную стабильную работу ДМРС.

Работа выполнена в рамках гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 18-42-703005.

Литература

1. Kouznetsov V., Macak K., Schneider J.M., Helmersson U., Petrov I. A novel pulsed magnetron sputter technique utilizing very high target power densities // Surf. Coat. Technol. – 1999. – No. 122. – 290 p.
2. Bugaev S.P., Koval N.N., Sochugov N.S., Zarharov A.N. Investigation of a high-current pulsed magnetron discharge initiated in the low-pressure diffuse arc plasma // Proc. XVII Intern. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. – Berkeley, USA, 1996. – P. 1074–1076.
3. Oks E., Anders A. Evolution of the plasma composition of a high power impulse magnetron sputtering system studied with a time-of-flight spectrometer // Journal of Applied Physics. – 2009. – Vol. 105, No. 9. – P. 093304.

4. Odivanova A.N., Sochugov N.S., Oskomov K.V., Podkovyrov V.G. Study of the plasma parameters in a high-current pulsed magnetron sputtering system // Plasma Physics Reports. – 2011. – Vol. 37, No. 3. – P. 239–243.

5. Bobzin K., Bagcivan N., Immich P. et al. Advances of nanocomposite coatings deposited by HIPIMS // Process. Technol. – 2008. – Vol. 209. – 165 p.

6. Sarakinos, Alami J., Konstantinidis S. High power pulsed magnetron sputtering: A review on scientific and engineering state of the art // Surface and Coatings Technology. – 2010. – Vol. 204, Iss. 11. – P. 1661–1684.

7. Helmersson U., Lattemann M., Bohlmark J., Ehiasarian A.P., Gudmundsson J.T. Ionized physical vapor deposition (IPVD): A review of technology and applications // Thin Solid Films. – 2006. – Vol. 513, No. 1. – 6 p.

8. Bandorf R., Falkenau S., Schmidt V. Modifications of coatings by DC-Sputtering with Superimposed HPPMS // 50th SVC Annual Tech. Con. Proceedings. – 2007. – P. 477–479.

9. Bandorf R., Falkenau S., Schiffmann K., Gerdes H., Heckmann U. Properties of nichrome sputtered by HiPIMS in

unipolar and DC-Superimposed mode // 51st SVC Annual Tech. Con. Proceedings. – 2008. – P. 317–320.

Оскирко Владимир Олегович

Канд. техн. наук, науч. сотр. ЛПЭ ИСЭ СО РАН
Эл. почта: oskirkovo@gmail.com

Павлов Артем Павлович

Инженер ЛПЭ ИСЭ СО РАН
Эл. почта: APELTom@yandex.ru

Семенов Вячеслав Аркадьевич

Инженер ЛПЭ ИСЭ СО РАН
Эл. почта: semenovvjacheslav@gmail.com

Захаров Александр Николаевич

Канд. техн. наук, науч. сотр. ЛПЭ ИСЭ СО РАН
Эл. почта: zare17@yandex.ru

УДК 621.311.69

С.С. Тюнин, Д.Б. Бородин, Н.П. Винтоняк, В.Д. Семенов

Анализ возникновения паразитных колебаний в цепи силового преобразователя с активным квазирезонансным демпфером

Дан анализ работы реверсивного непосредственного преобразователя повышающего типа с активным квазирезонансным демпфером. Показано, что при выключении транзисторного ключа активного демпфера возникают высокочастотные колебания, обусловленные обратным током собственного диода. Колебания приводят к дополнительным потерям и помехоэмиссии. Предложены меры подавления помех.

Ключевые слова: демпфер, квазирезонанс, преобразователь, коммутация, анализ.

Непосредственные преобразователи постоянно напряжения широко применяются в автономных системах электропитания благодаря высоким значениям их КПД и массогабаритным показателям. Дальнейшее совершенствование автономных СЭП связано с совмещением функций различных преобразователей, например совмещением зарядных и разрядных устройств [4], и улучшением КПД применяемых преобразователей за счет синхронного выпрямления и мягкого включения силовых транзисторов. Однако при практической реализации таких преобразователей на их силовых элементах возникают сверхтоки и перенапряжения, обусловленные током обратного восстановления внутреннего диода синхронного выпрямителя и приводящие к высокочастотным колебаниям. Поэтому тема работы, посвященная анализу причин возникновения паразитных колебаний в цепях двунаправленного преобразователя и методами борьбы с ними, является актуальной.

На рис. 1 представлена функциональная схема двунаправленного преобразователя, в которой реализуется синхронное выпрямление силовыми ключами K1, K2 и их мягкое включение за счет активных квазирезонансных демпферов, подключенных параллельно указанным силовым ключам. В дальнейшем изложении этот преобразователь будем на-

зывать двунаправленным преобразователем с активными квазирезонансными демпферами (ДП с АД). Топология преобразователя схожа с топологией квазирезонансных непосредственных преобразователей, обеспечивающих переключения в нуле тока ZCS или напряжения ZVS. Сходство касается также реализации мягкой коммутации силовых ключей за счет резонансных процессов в добавленной электрической LC-цепи, которая имеет собственную резонансную частоту, значительно превышающую частоту работы преобразователя. Данное схемотехническое решение получило широкое распространения в схемах корректоров коэффициента мощности, о чем свидетельствуют статьи зарубежных и отечественных разработчиков [1–4].

На рис. 1 приняты следующие обозначения: АБ – аккумуляторная батарея; ОТ – ограничитель тока разряда АБ в режиме короткого замыкания; K1, K2 – силовые ключи ДП; Kp1, Kp2 – ключи активных демпферов для управления резонансными процессами; Cp1, Cp2, Lp1, Lp2 VD1, VD2 – конденсаторы, дроссели и диоды активных демпферов, обеспечивающих мягкое включение силовых ключей; L1, C2, Rн – соответственно дроссель, конденсатор выходного фильтра и сопротивление нагрузки; Источник напряжения E указывает на возможность реверсивного режима работы.