

УСТРОЙСТВО ЗАРЯДА АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ АСИММЕТРИЧНЫМ ТОКОМ

© 2022 г. **И. С. Шемолин^{а,*}, И. В. Калашников^а,
В. М. Рулевский^а, А. В. Осипов^а**

^а *Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
Россия, 634050, Томск, просп. Ленина, 40*

**e-mail: ilya.shemolin@mail.ru*

Поступила в редакцию 13.09.2021 г.

После доработки 26.10.2021 г.

Принята к публикации 28.10.2021 г.

Описано зарядное устройство низковольтных свинцово-кислотных аккумуляторных батарей асимметричным током. Примененная топология двойного активного моста позволила обеспечить двунаправленный режим работы, необходимый для формирования восстановительных зарядно-разрядных циклов, образованных асимметричными двуполярными импульсами зарядного тока с уровнями -7 и $+20$ А различной длительности с частотой 10 Гц. Разработанный согласующий трансформатор выполнен на магнитопроводе ELP 38 с силовоточной одновитковой обмоткой из медной шины.

DOI: 10.31857/S0032816222020070

Свинцово-кислотные аккумуляторы являются наиболее распространенными накопителями электрической энергии, при этом их эксплуатационные характеристики, такие как емкость, количество циклов заряда–разряда и т.д., ухудшаются с течением времени. Это связано с происходящими в батареях электрохимическими процессами, которые приводят к образованию сернокислого свинца на пластинах аккумулятора [1]. Уменьшение объема сульфатации и частичное восстановление емкости аккумуляторов может осуществляться восстановительными зарядно-разрядными циклами, формируемыми чередующимися с низкой частотой интервалами заряда и разряда аккумулятора, в результате чего образуется асимметричный зарядный ток [2–4]. Такой режим заряда позволяет существенно продлить эксплуатационный срок батареи, повысить ее надежность. Целью работы является разработка зарядного устройства для заряда свинцово-кислотных аккумуляторных батарей асимметричным током.

Разработанное зарядное устройство состоит из трех основных узлов: корректора коэффициента мощности на микросхеме UCC28180 [5], преобразующего однофазную сеть переменного тока 220 В/50 Гц в напряжение 400 В постоянного тока; двойного активного моста и системы управления на микроконтроллере STM32 (рис. 1).

Силовая часть зарядного устройства построена на двунаправленной топологии двойного актив-

ного моста DAB (Dual Active Bridge). Данная топология состоит из высоковольтного инвертора на транзисторах T_1 – T_4 и низковольтного активного выпрямителя на транзисторах T_5 – T_8 , связанных между собой дросселем переменного тока L . Для согласования напряжений аккумуляторной батареи и шины постоянного тока в схему включен высокочастотный трансформатор Tr .

Эффективное формирование асимметричного двуполярного тока аккумулятора требует именно двунаправленного преобразователя, имеющего интервал рекуперации с отрицательным (разрядным) током (рис. 2а). В этой связи необходим активный выпрямитель, и топология DAB является фактически безальтернативным решением построения силовой части. Классическим способом регулирования выходного тока в таких преобразователях является фазовое регулирование [6–8], основанное на фазовом сдвиге напряжений инвертора и выпрямителя на угол α . Зависимость выходного тока от угла относительно его максимального значения описывается выражением

$$I_{AB}^* = \frac{I_{AB}}{I_{AB\max}} = \alpha(1 - |\alpha|). \quad (1)$$

Характеристика (рис. 2б) показывает, что преобразователь имеет широкий диапазон изменения угла α при регулировании зарядного тока аккумулятора, при этом зарядный ток фактически не зависит от напряжения U_{AB} .

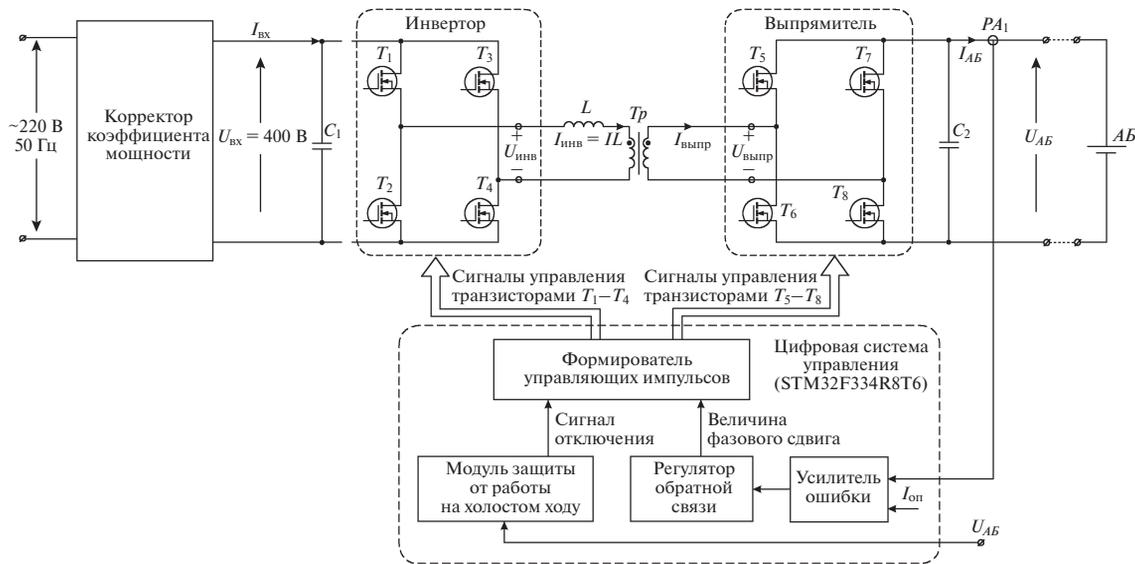


Рис. 1. Схема зарядного устройства пульсирующего тока. T_1 – T_4 – STPS57N65M5, T_5 – T_8 – CSD1953KCS; L – 100 мкГн, сердечник RM14, феррит N87, зазор $g = 1.9$ мм, $w = 25$ витков/ 0.66 мм², провод ЛЭЛО 0.1×84 ; T_p – сердечник EILP 38/8/25, феррит N87, $w_1 = 8$ витков/ 0.66 мм², провод ЛЭШО 0.1×84 , $w_2 = 1$ виток/ 2 мм², медная шина; C_1 – K73-17, 630 В, 4.7 мкФ, C_2 – K73-17, 63 В, 2.2 мкФ; PA_1 – датчик тока ACS711ELCTR-25AB-T; AB – аккумуляторная батарея.

При формировании асимметричного тока на такте управления задается положительный угол α_1 , определяющий ток зарядного интервала аккумуляторной батареи (рис. 2в), и отрицательный угол α_2 , определяющий ток разрядного интервала. Изменением соотношения длительностей указанных интервалов можно регулировать среднее значение зарядного тока, сохраняя неизменными уровни асимметричного тока. При этом, во избежание возникновения аварийного режима, ампер-секундная площадь импульса заряда должна превышать площадь разрядного. Учитывая низкую частоту следования импульсов асимметричного тока 10 Гц, смена угла регулирования происходит итерационно в течение 20 периодов работы зарядного устройства.

Система управления зарядного устройства построена на базе контроллера STM32F334R8T6. Управляющее воздействие формируется в виде сдвинутых по фазе последовательностей управляющих импульсов транзисторов инвертора и выпрямителя. Формирователь управляющих импульсов вычисляет требуемые углы управления в зависимости от заданных значений тока зарядного и разрядного интервалов. Ввиду неидеальности элементов преобразователя, рассчитанный по выражению (1) угол регулирования не обеспечивает требуемую точность стабилизации зарядного тока, поэтому в устройстве реализуется коррекция угла управления регулятором обратной связи. Коррекция происходит по сигналу усилителя ошибки, который сравнивает опорный сигнал с

оцифрованным сигналом датчика тока PA_1 , нормированным относительно напряжения питания микроконтроллера 3.3 В. Измерение проводится датчиком тока на эффекте Холла ACS711ELCTR-25AB-T. Среднее значение зарядного тока задается программно и определяется длительностями зарядного и разрядного интервалов.

Наибольшая энергетическая эффективность преобразования достигается при настройке максимального зарядного тока на угол управления $\alpha_1 \rightarrow \pi/2$, в устройстве принято $\alpha_1 = 0.4\pi$. Это позволяет получить минимальные интервалы рекуперации в выпрямителе и минимальное действующее значение его тока. В рассматриваемом случае на частоте 200 кГц моделированием получены значения коэффициента трансформации $K_{tr} = 8$ и индуктивности дросселя $L = 100$ мкГн, обеспечивающие данный угол.

В данном режиме работы преобразователя реализуется ZVS (zero voltage switch – включение в нуле напряжения) транзисторов инвертора, что важно при его высоком напряжении, равном 400 В. Однако необходимо учитывать существенные значения выключаемого тока, на интервале заряда достигающие 4.5 А, что требует выбирать транзисторы с незначительными емкостями сток–исток C_{ds} . Для инвертора выбраны MOSFET-транзисторы – STP57N65M5 с выходной емкостью $C_{ds} = 115$ пФ. Критерии выбора транзисторов выпрямителя иные. Учитывая большой выходной ток, их выбор основан на обеспечении минимальных статических потерь. В зарядном устрой-

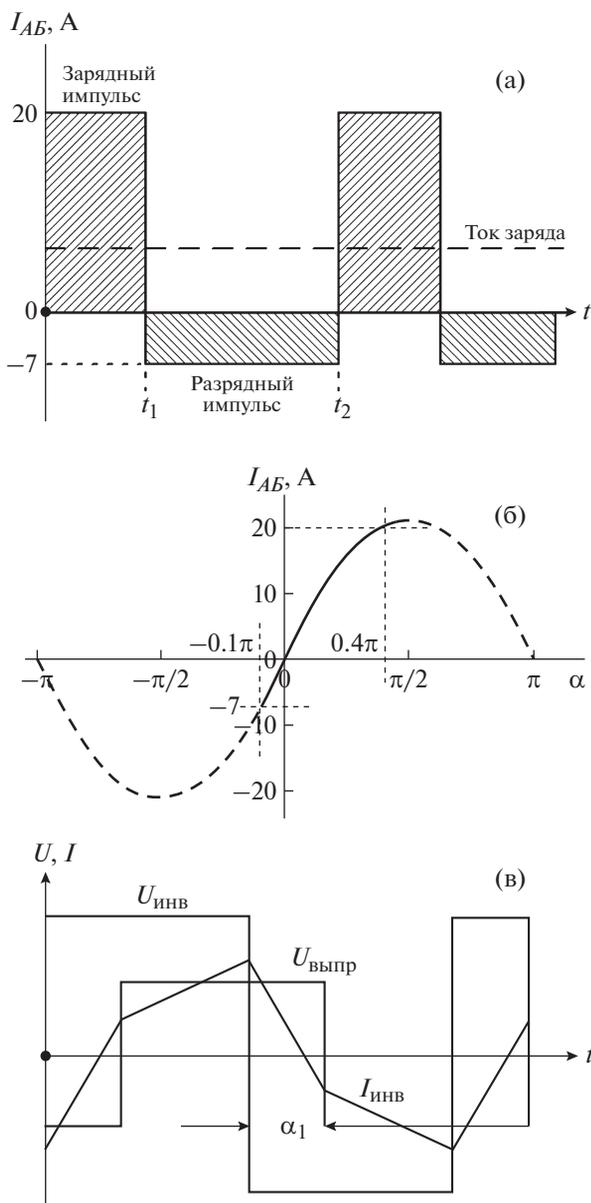


Рис. 2. Характеристики зарядного устройства: **а** – восстановительный зарядно-разрядный цикл; **б** – регулировочная характеристика; **в** – диаграммы при формировании максимального зарядного тока аккумуляторной батареи.

стве выбраны транзисторы CSD1953KCS с малым сопротивлением открытого канала $R_{ds} = 2.6 \text{ мОм}$.

Разработка согласующего трансформатора с большим выходным током имеет свои особенности. Такие трансформаторы выполняются на разрезных магнитопроводах с многослойной вторичной обмоткой (рис. 3). В этом случае конструкция позволяет получить лучшее заполнение окна магнитопровода и уменьшает последствия поверхностного эффекта. В данном устройстве применен магнитопровод ELP 38/8/25, вторич-

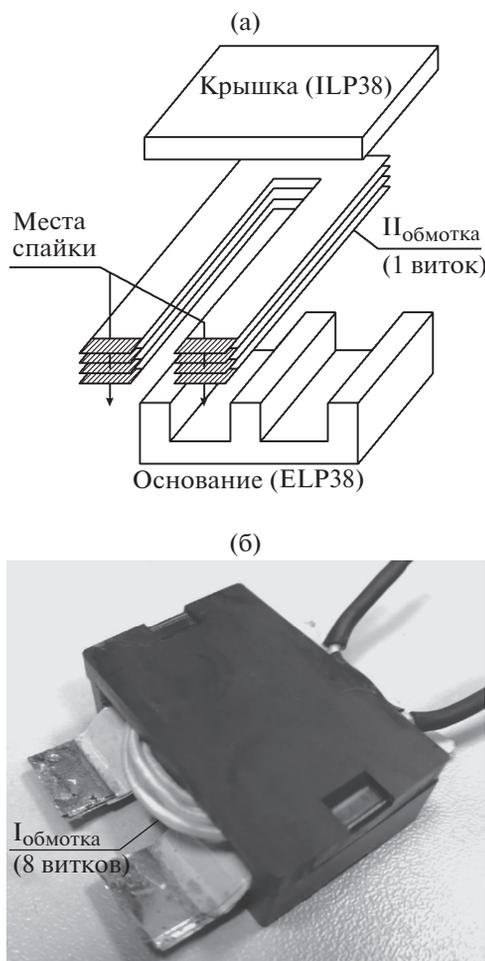


Рис. 3. Трансформатор преобразователя номинальной мощностью 250 ВА: **а** – схема трансформатора с вторичной обмоткой из медной шины; **б** – внешний вид трансформатора; обмотка инвертора – провод ЛЭШО 84×0.1 , обмотка выпрямителя – четырехслойная изолированная медная шина толщиной 0.1 мм.

ная обмотка реализована из 4 слоев медной фольги толщиной 0.1 мм с изоляцией класса В из полиэстеровой пленки. Первичная обмотка выполнена многожильным проводом литцендрат – ЛЭЛО, общим сечением 0.66 мм^2 .

Дроссель преобразователя индуктивностью $L = 100 \text{ мкГн}$ располагается в цепи первичной обмотки трансформатора, поэтому имеет небольшое значение тока 5 А, которое позволяет выполнить обмотку проводом ЛЭЛО 84×0.1 . В дросселе используется магнитопровод RM14 с зазором $g = 1.9 \text{ мм}$ (феррит N87). Введение зазора необходимо для обеспечения амплитуды индукции сердечника 0.1 Тл, ограничивающей потери в магнитопроводе на уровне 4.2 Вт.

Результаты испытаний в режиме заряда аккумулятора AGM26-12 асимметричным током показаны на рис. 4а. Максимальное значение тока

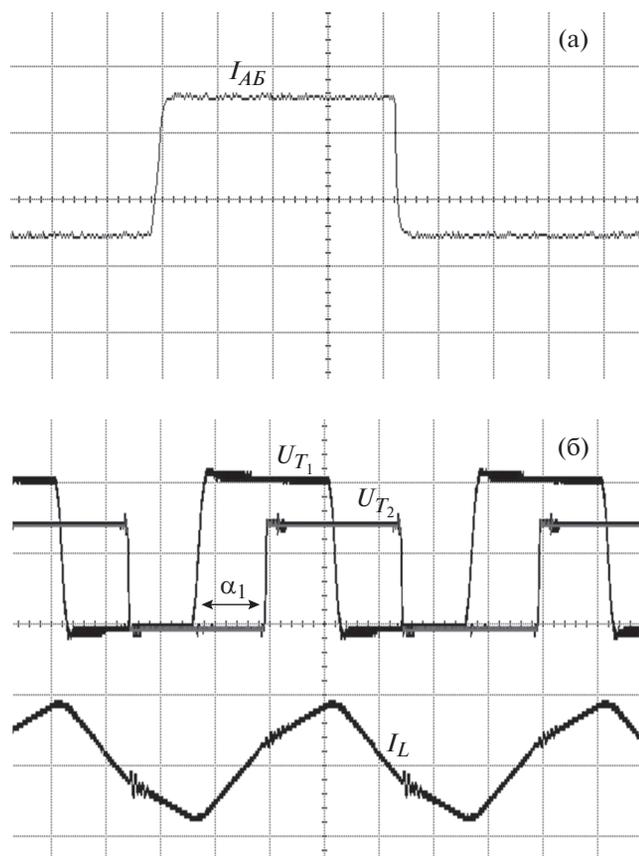


Рис. 4. Осциллограммы параметров зарядного устройства: **а** – асимметричного зарядного тока аккумуляторной батареи I_{AB} (12.5 А/деление), **б** – на интервале заряда: ток дросселя I_L (5 А/деление), напряжения на транзисторе инвертора T_1 (200 В/деление) и транзисторе выпрямителя T_2 (10 В/деление).

заряда составляет 19.2 А, тока разряда –7 А, длительности интервалов заряда 40 мс и разряда 60 мс, средний ток заряда аккумулятора 3.5 А.

Работа преобразователя на интервале заряда при $U_{вх} = 391$ В и $U_{AB} = 13.4$ В проиллюстрирована осциллограммами тока дросселя I_L , напряжений на транзисторе инвертора U_{T_1} и выпрямителя U_{T_2} (рис. 4б). При угле регулирования $\alpha_1 = 0.4\pi$ зарядный ток составил 19.2 А. Видно, что интервал рекуперации энергии в выпрямителе минимален, что минимизирует статические потери. Экспериментальные результаты (рис. 4б) количественно и качественно соответствуют моделированию (рис. 2в).

Таким образом, представленное устройство позволяет задавать низкочастотные восстанови-

тельные зарядно-разрядные циклы, что реализует процесс десульфатации пластин и восстановления характеристик свинцово-кислотных аккумуляторных батарей.

Граничный режим работы устройства при равенстве ампер-секундных площадей зарядного и разрядного интервалов позволяет формировать контрольно-тренировочные циклы без передачи энергии, т.е. делает возможным восстановление характеристик полностью заряженной аккумуляторной батареи.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 20-38-90183.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tar B., Fayed A. // 2016 IEEE 59th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS). 2016. P. 1. <https://doi.org/10.1109/MWSCAS.2016.7870048>
2. Дувинг В.Г., Казаринов И.А., Бурашников М.М. // Электрохимическая энергетика. 2012. Т. 12. № 1. С. 21.
3. Каменев Ю.Б., Чуңц Н.И., Леонов В.Н., Штомпель Г.А. // Электрохимическая энергетика. 2011. Т. 11. № 1. С. 33.
4. Бутаков А.П., Ставицкий А.В. // Сборник материалов LI Международной студенческой научно-практической конференции “Актуальные вопросы науки и хозяйства: новые вызовы и решения”. Тюмень, 17 марта 2017. Тюмень: Государственный аграрный университет Северного Зауралья, 2017. С. 24.
5. Сайт компании Texas Instruments Incorporated. UCC28180 Programmable Frequency, Continuous Conduction Mode (CCM), Boost Power Factor Correction (PFC) Controller. <https://www.ti.com/lit/gpn/ucc28180.pdf>
6. Carvalho L.L., Costa P.S., Roggia L., Schuch L. // 2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference – Latin America (ISGT Latin America). 2019. P. 1. <https://doi.org/10.1109/ISGT-LA.2019.8895300>
7. Krismer F., Kolar J.W. // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2012. V. 59. № 7. P. 2745. <https://doi.org/10.1109/TIE.2011.2112312>
8. Friedemann R.A., Krismer F., Kolar J.W. // 2012 Twenty-Seventh Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). 2012. P. 509. <https://doi.org/10.1109/APEC.2012.6165868>