

АКТИВНЫЙ ФИЛЬТР ДЛЯ ЗАРЯДНО-ВЫПРЯМИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

А.В. Удовиченко, М.В. Балагуров

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия

Предлагается активный фильтр (АФ) для системы электропитания на базе зарядно-выпрямительного устройства моноблочного типа ЗВУ НРТ 160.220. Компенсатором гармонических составляющих здесь служит полумостовая схема однофазного инвертора напряжения. Преобразователь является источником гармонической составляющей, противоположной по фазе тем гармоникам, которые присутствуют в выходном сигнале выпрямителя ЗВУ. АФ подключается последовательно в выходную цепь выпрямителя через согласующий трансформатор с малым числом витков обмоток. В работе предлагается методика по разработке активного фильтра с системой управления. Приведен расчет аналоговых фильтров нижних частот и высших частот (Бесселя 2-го порядка). Был произведен анализ работы ЗВУ с фильтром и без, при разных значениях выходного напряжения выпрямителя. Приведены эпюры токов и напряжений в основных точках схемы АФ, полученные в ходе моделирования.

Ключевые слова: активный фильтр, заряд аккумуляторной батареи, аналоговый фильтр.

Введение

На сегодняшний день применение аккумуляторных батарей большой емкости затрагивает все больше областей, непосредственно связанных с социальными сферами. Сюда можно отнести системы электроснабжения городского транспорта, системы бесперебойного питания муниципальных учреждений, банков данных, системы электроснабжения для аэрокосмической промышленности. Если в электробусах это источник движущей силы, то в больницах и серверных станциях в случае экстренной ситуации наличие источника питания с аккумуляторными батареями позволяет сохранить данные и даже спасти жизни. Один из главных плюсов аккумуляторов – многократное использование, что невозможно без устройств заряда. Но срок службы любой аккумуляторной батареи, особенно литий-ионной, являющейся одной из лидеров в плане емкости, зависит от того, каким током заряжается батарея.

Так в [1–3] предлагались импульсные повышающий, понижающий и повышающе-понижающий регуляторы напряжения, обеспечивающие низкий уровень пульсаций тока и самое главное – отсутствие низкочастотных пульсационных составляющих: 100 Гц, 300 Гц. Было доказано, что наличие таких пульсаций в разы уменьшает ресурс батареи [4].

Избежать подобного можно несколькими способами, как предлагалось в работе [1–3], использовать в качестве источника преобразователь, который не будет иметь на выходе низкочастотных гармонических составляющих, и наконец – установка LC фильтров. Убрать низкочастотные пуль-

сационные составляющие можно, используя многопульсные схемы выпрямителей [5]. В отличие от однофазного выпрямителя, построенного по мостовой схеме (частота пульсаций выпрямленного тока равна 100 Гц), и двухполупериодной схемы трехфазного тока (частота пульсаций выпрямленного тока равна 300 Гц) в двенадцати-пульсной схеме выпрямителя частота пульсации будет еще в два раза выше – 600 Гц. Но применение в системах электропитания таких схем требует большее количество силовых полупроводниковых ключей и наличие нескольких низкочастотных силовых трансформаторов с разным подключением вторичных обмоток, что скажется на надежности и стоимости устройства. Если идет речь о системах большой мощности, то установка реактивных элементов в качестве фильтров низких частот заметно увеличит массогабаритные показатели. Так, например, сглаживающий дроссель, рассчитанный на постоянный ток 300 А с индуктивностью 170 мкГн, будет весить 56 кг при размерах 306×230×235 мм. Тогда как преобразователь на тот же ток будет менее 10 кг с размерами 155×280×215 [6]. Таким образом, наличие дросселя в том числе и в импульсном преобразователе увеличивает габариты системы электроснабжения в 2 раза, а массу устройства в 5 раз. Соответственно в системе электропитания большой мощности – сотни и тысячи киловатт – массогабаритные показатели силового дросселя будут весьма значительны, поскольку токи через него могут достигать сотни ампер, а сечение провода, соответственно, от 50 мм² и больше. При этом число витков намотки в зависимости от конструктива может составлять несколько десятков.

Был предложен альтернативный вариант LC фильтру – силовой активный фильтр [7]. Это еще один преобразователь, который является источником пульсационной составляющей, но противоположной по фазе, присутствующей в выходном сигнале выпрямителя. Он подключается к выходной цепи выпрямителя через согласующий трансформатор с малым числом витков вторичной обмотки, от 1, что улучшает его массу и габариты по сравнению с дросселем [8–18]. В качестве преобразователя используется однофазный инвертор по типу H -мост.

В нашей работе предлагается активный фильтр (АФ) для системы электропитания на базе зарядно-выпрямительного устройства моноблочного типа ЗВУ НРТ 160.220, где в качестве компенсатора будет полумостовая схема однофазного инвертора напряжения. По сравнению с импульсными преобразователями на транзисторах ЗВУ на базе тиристорного выпрямителя будет обладать большей перегрузочной способностью.

Статья имеет три основных раздела, первый из которых посвящен структуре активного фильтра зарядно-выпрямительного устройства, во втором разделе рассматривается методика расчета аналоговых фильтров системы управления АФ, в третьем разделе приведены результаты моделирования с учетом реальных параметров и элементов в программном пакете *PSIM*.

1. Активный фильтр зарядно-выпрямительного устройства

На рис. 1 показана схема зарядно-выпрямительного устройства с активным фильтром.

Для выделения требуемого компенсационного сигнала потребовалось разработать систему управ-

ления полумостовым однофазным инвертором напряжения. Регулирование ключами осуществлялось за счет широтно-импульсной модуляции (ШИМ), где в качестве опорного сигнала использовался пилообразный сигнал частотой 33 кГц, что кратно частоте пульсации (300 Гц). Модулирующим сигналом послужила пульсационная составляющая, выделенная с помощью фильтра Бесселя 2-го порядка и фильтра нижних частот (ФНЧ) (рис. 2).

На вход фильтров Бесселя и ФНЧ1 поступал сигнал с выхода выпрямителя «ДН». Поскольку на выходе выпрямителя сигнал состоит из постоянной и переменной составляющей, требовалось отфильтровать постоянную составляющую и оставить только переменную, которая послужит модулирующим сигналом системы управления полумостового инвертора напряжения. Фильтр Бесселя в данной работе выделял рабочий переменный сигнал, тогда как ФНЧ2 был необходим для масштабирования сигнала под требования цифровой системы управления. На выходе ФНЧ1 был получен уровень постоянного сигнала наряду с осуществлением функции автоподстройки. Поскольку требовалось получить модулирующий сигнал, не превышающий 1 В в размахе, то выходной сигнал с ФНЧ2 делился на уровень сигнала с выхода ФНЧ1, тем самым учитывался перепад уровня выходного напряжения с выпрямителя ЗВУ.

В связи с тем, что при мгновенном включении активного фильтра с ЗВУ, или при изменении выходного напряжения ЗВУ происходит рост тока на первичной стороне трансформатора Т2. Было решено в цепь первичной стороны трансформатора установить датчик тока, отслеживающий его бросок. Ограничение при этом было фиксировано на $\pm 1,5$ А (после дросселя LC фильтра) (рис. 3).

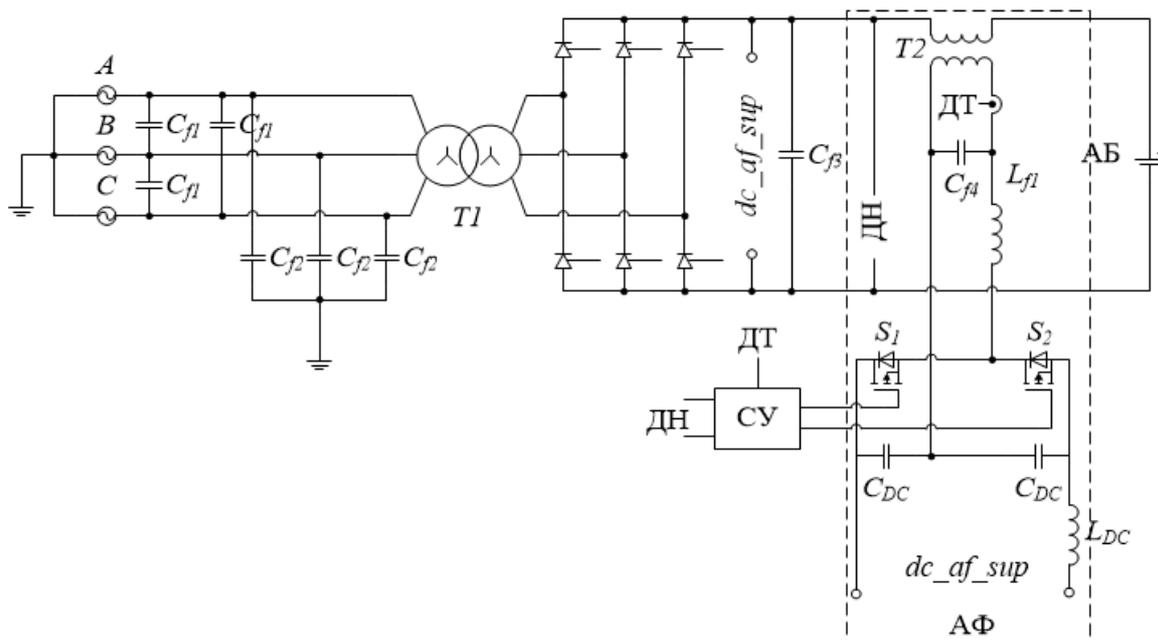


Рис. 1. Схема зарядно-выпрямительного устройства с активным фильтром

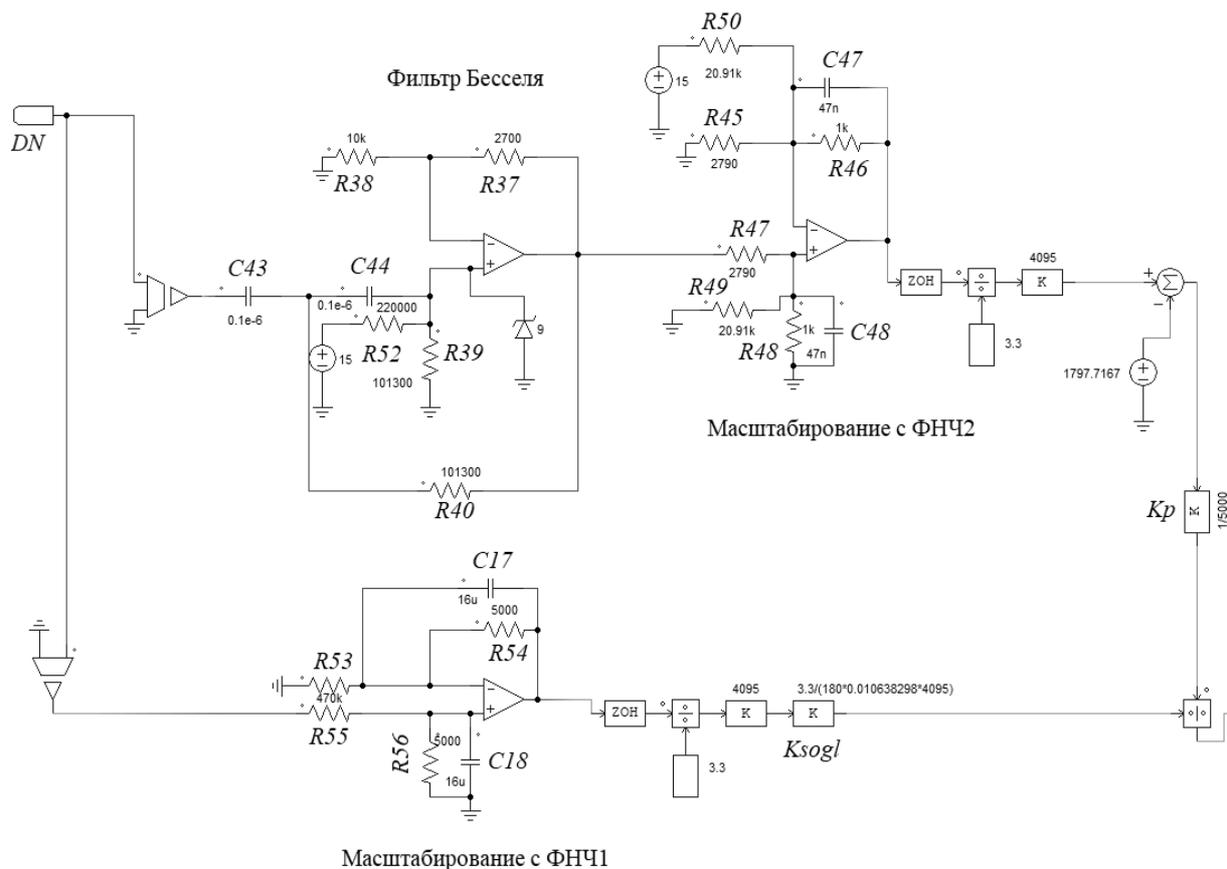


Рис. 2. Схема выделения пульсационной составляющей

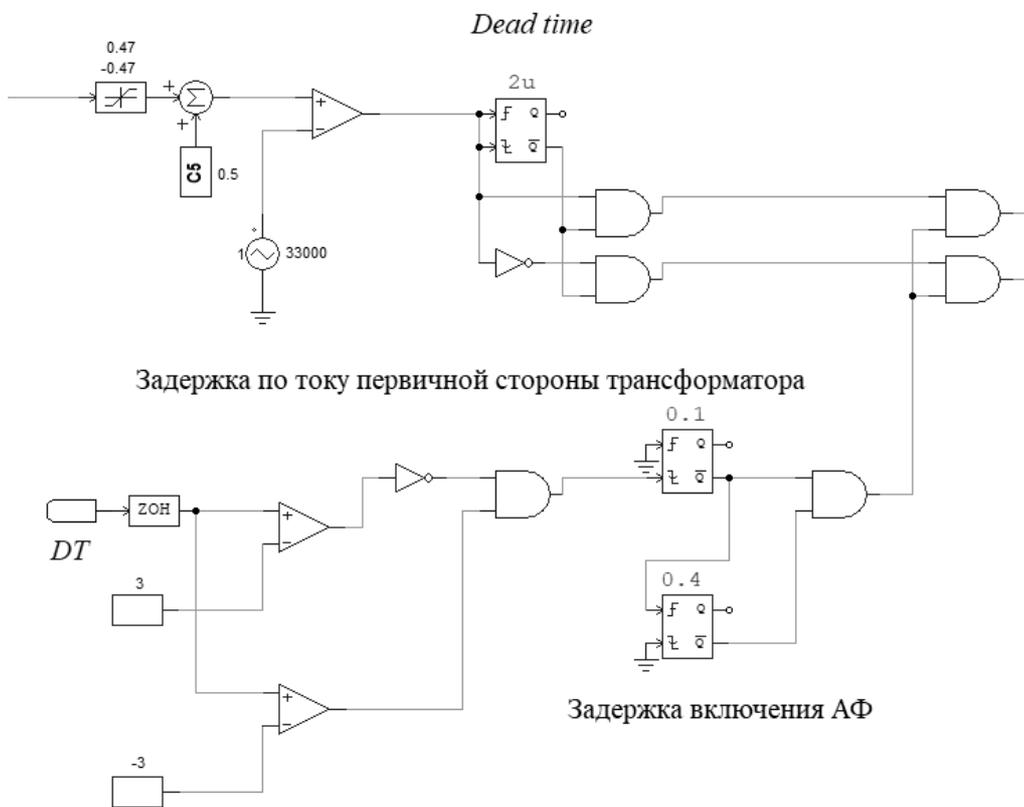


Рис. 3. Схема защиты АФ

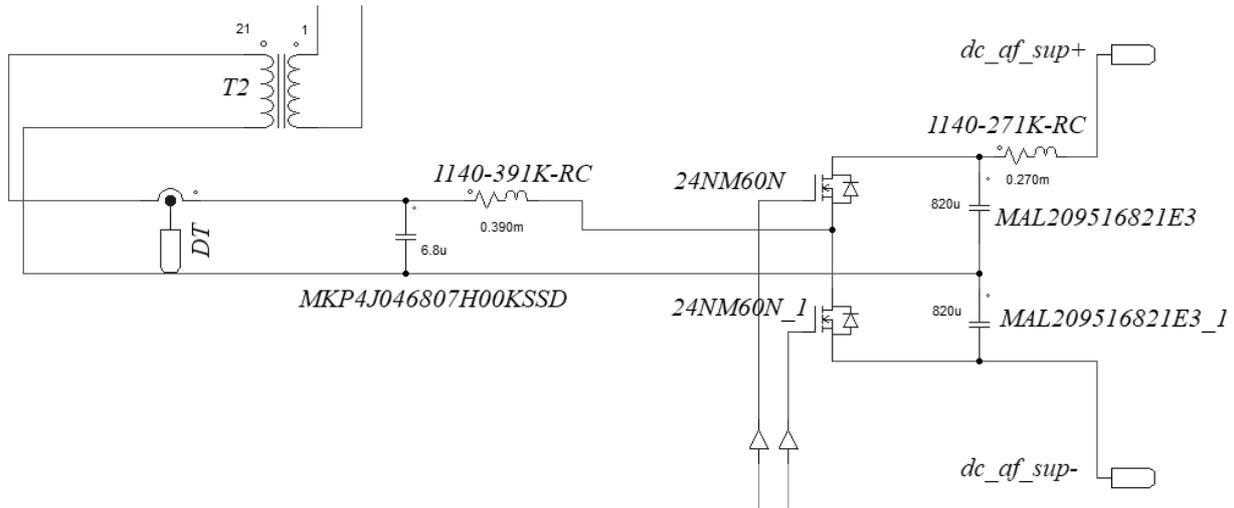


Рис. 4. Силовая часть активного фильтра

Данное решение реализовано в блоке «Задержка по току первичной стороны трансформатора». При этом длительность задержки составляет 0,1 с. Кроме того, в блоке «Задержка включения АФ» реализовано запаздывание включения АФ на 0,4 с. Что обеспечивает заряд конденсаторов АФ, тогда как транзисторы в этот момент выключены из-за запрета на выдачу управляющих импульсов. В цепи *Dead time* обеспечивается задержка выдачи импульсов управления транзисторов, 2 мкс, предотвращающая от одновременного включения обоих ключей полумостового инвертора.

Силовая часть состоит из полумостового инвертора напряжения и согласующего трансформатора T2 (рис. 4).

Стоит отметить, что при разработке АФ обсуждался вопрос, касающийся питания инвертора. Рассматривалось несколько решений, в том числе вариант, предложенный в [19], где в качестве DC источника устанавливался дополнительно диодный мост, подключенный к входу ЗВУ. Было решено запитать инвертор с выхода выпрямителя ЗВУ *dc_af_sup*. Но в таком случае при регулировании напряжения выпрямителя ЗВУ изменялось бы и напряжение питания инвертора, что могло негативно сказаться на величине компенсационного сигнала. Таким образом, потребовалась система слежения за величиной напряжения питания инвертора, о которой будет сказано в разделе 2.

2. Расчет схемы активного фильтра

Как уже было сказано в предыдущем разделе, большое внимание было уделено разработке системы управления инвертором. В работе [19] предлагается двухконтурная замкнутая система управления, где происходит слежение как за входным напряжением АФ (с пульсацией), так и за выходным напряжением с согласующего трансформатора (без пульсации). Принцип работы схож с тем,

который предложен в нашей работе, также выделяется пульсационная составляющая, которая в качестве модулирующего сигнала сравнивается с высокочастотным сигналом. В нашей работе нет слежения за выходным напряжением, но добавлен контур обратной связи по току. Избежать возникновения ошибки в выходном сигнале удалось за счет последовательной установки ФВЧ (фильтр высших частот Бесселя 2-го порядка) и ФНЧ (см. рис. 2). Поскольку наличие только фильтра высших частот вносило положительный фазовый сдвиг в результирующий модулирующий сигнал, что усиливало ошибку между компенсирующим сигналом АФ и выходным напряжением выпрямителя. При установке ФНЧ последовательно с ФВЧ фазовый сдвиг значительно уменьшается, и ошибка в контуре выходного сигнала АФ становится минимальной (рис. 5).

Расчет фильтров (ФНЧ, ФВЧ) свелся к нахождению номинальных значений RC-элементов, входящих в состав фильтра на операционных усилителях:

$$R_{40}C = \frac{f_n}{2\pi f_c}, \quad (1)$$

где f_n – нормирующая частота, равная для фильтра Бесселя 2-го порядка 1,274 Гц; f_c – частота среза, которой мы сами задаемся, в нашем случае это 20 Гц [20].

$$R_{37} = R_{38}(1 - K), \quad (2)$$

где K – коэффициент усиления.

$$U_{\text{вых_фвч}} = U_{\text{см}} \left(\frac{R_{39}}{R_{39} + R_{52}} \right) \left(1 + \frac{R_{37}}{R_{38}} \right), \quad (3)$$

где $U_{\text{см}}$ – напряжение смещения вверх.

$$U_{\text{вых_фнч2}} = U_{\text{вых_фвч}} \frac{R_{46}}{R_{47}}, \quad (4)$$

где $U_{\text{вых_фнч2}}$ – выход фильтра нижних частот, масштабированный сигнал ФВЧ.

$$U_{\text{вых_фнч2}} = -E_{\text{см}} \frac{R_{46}}{R_{50}}, \quad (5)$$

где $E_{\text{см}}$ – напряжение смещения вниз.

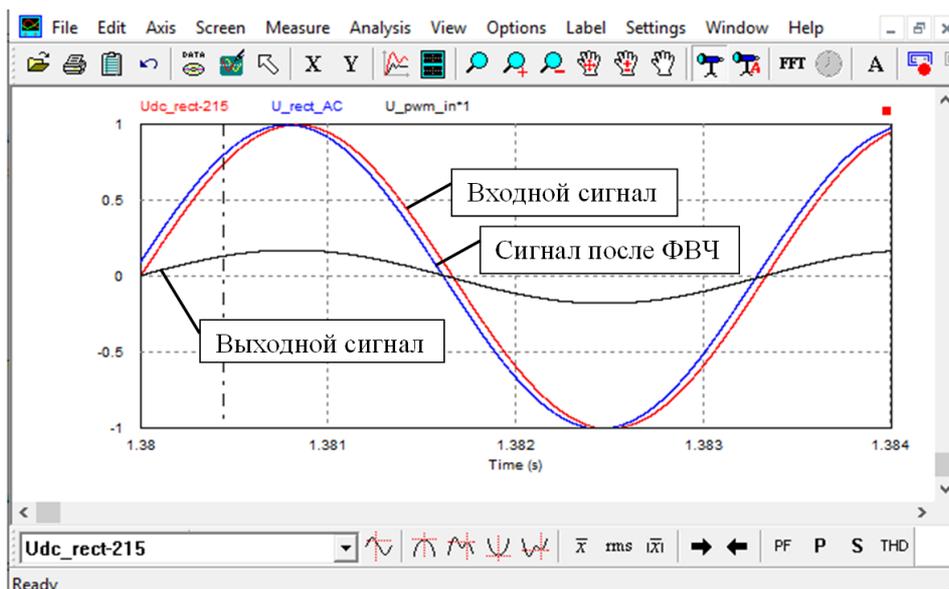


Рис. 5. Коррекция фазового сдвига

Расчет ФНЧ1 представлен ниже:

– определение номиналов резистора и конденсатора под выбранную частоту среза, 2 Гц в нашем случае

$$RC = \frac{1}{2\pi f_c} \quad (6)$$

– определение номиналов резистора и конденсатора под требуемый коэффициент усиления, выбранный исходя из расчета, что U_{in} – входное напряжение, равное максимуму по техническому заданию (270 В), а U_{out_op} – выходное напряжение ОУ (≈ 3 В)

$$R_{53} = \frac{R_{54}}{K} \quad (7)$$

Кроме того, в системе есть адаптивный коэффициент, реагирующий на изменение напряжения питания АФ (от 180 В по ТЗ)

$$K_{sogl} = \frac{3,3}{180 \cdot K_{ФНЧ1} \cdot 4095} \quad (8)$$

При расчете силовой схемы были получены параметры трансформатора, LC элементов, а также выбраны транзисторы (табл. 1).

3. Результаты моделирования

В ходе эксперимента было проведено несколько тестов при параметрах элементов, указанных в табл. 1:

- $U_{вх} = 253$ В, $U_{вых} = 187$ В, $M = 4,89$, $R_{нагр} = 1,113$ Ом, включение фильтра, с дросселем в звене DC, сброс-наброс напряжения сети 253 В – 126,5 В – 253 В;
- $U_{вх} = 253$ В, $U_{вых} = 187$ В, $M = 4,89$, $R_{нагр} = 1,113$ Ом, включение фильтра, два конденсатора

Таблица 1

Требования к АФ	
Трансформатор Т2	
Диапазон выходного напряжения, В	72,1...135
Диапазон амплитуды пульсации, В	3,2...5,9
Ток вторичной обмотки согласующего трансформатора, А	168
Частота пульсации, Гц	300
Мощность, Вт	188,5
КПД трансформатора, %	98
Инвертор	
Транзисторы S_1, S_2	24NM60N
Ток транзистора, А	3,696
Максимальное прикладываемое к транзистору напряжение, В	270
Индуктивность дросселя на AC стороне, L_{f1} , мкГн	390
Ёмкость конденсатора на AC стороне, C_{f4} , мкФ	6,8
Индуктивность дросселя на DC стороне, L_{dc} , мкГн	270
Ёмкость конденсатора на DC стороне, C_{DC} , мкФ	820

сатора в параллель в звене DC, сброс-наброс напряжения сети 253 В–126,5 В–253 В;

- $U_{вх} = 253$ В, $U_{вых} = 187$ В, $M = 4,89$, $R_{нагр} = 1,113$ Ом, включение фильтра, без дросселя в звене DC, сброс-наброс напряжения сети 253 В–126,5 В–253 В;

- $U_{вх} = 253$ В, $U_{вых} = 187$ В, $M = 4,89$, $R_{нагр} = 1,113$ Ом, включение фильтра, два конденсатора в параллель и без дросселя в звене DC, сброс-наброс напряжения сети 126,5 В–253 В–126,5 В;

- $U_{вх} = 253$ В, $U_{вых} = 187$ В, $M = 4,89$, $R_{нагр} = 1,113$ Ом, АФ не работает, транзисторы закрыты;

- $U_{вх} = 253$ В, $U_{вых} = 187$ В, $M = 4,89$, $R_{нагр} = 1,113$ Ом, переходной процесс;

- $U_{вх} = 187$ В, $U_{вых} = 270$ В, $M = 9,76$, $R_{нагр} = 1,715$ Ом, максимальное напряжение ЗВУ;

- работа на противоЭДС;

- $U_{вх} = 253$ В, $U_{вых} = 187$ В, $M = 4,89$, $R_{нагр} = 1,113$ Ом, без фильтрового конденсатора по выходу ЗВУ, пульсация 3,188 В, $K_{п} = 0,233$ %.

На рис. 6 приведены осциллограммы работы АФ в разных точках схемы в момент включения активного фильтра, полученные в среде PSIM. При максимальном выходном напряжении ЗВУ уровень пульсации при включенном АФ остается минимальным (рис. 7).

В табл. 2 приведены результаты моделирования, а также уровень коэффициента пульсации ($K_{п}$). $K_{пU(без АФ)}$ – коэффициент пульсаций выходного напряжения ЗВУ в случае отсутствия АФ.

Наличие АФ в зарядно-выпрямительном устройстве позволило до 6 раз уменьшить пульсации напряжения, что также позволило уменьшить количество фильтровых конденсаторов на выходе выпрямителя ЗВУ с 6 штук на 6800 мкФ каждый до 3 штук [21, 22].

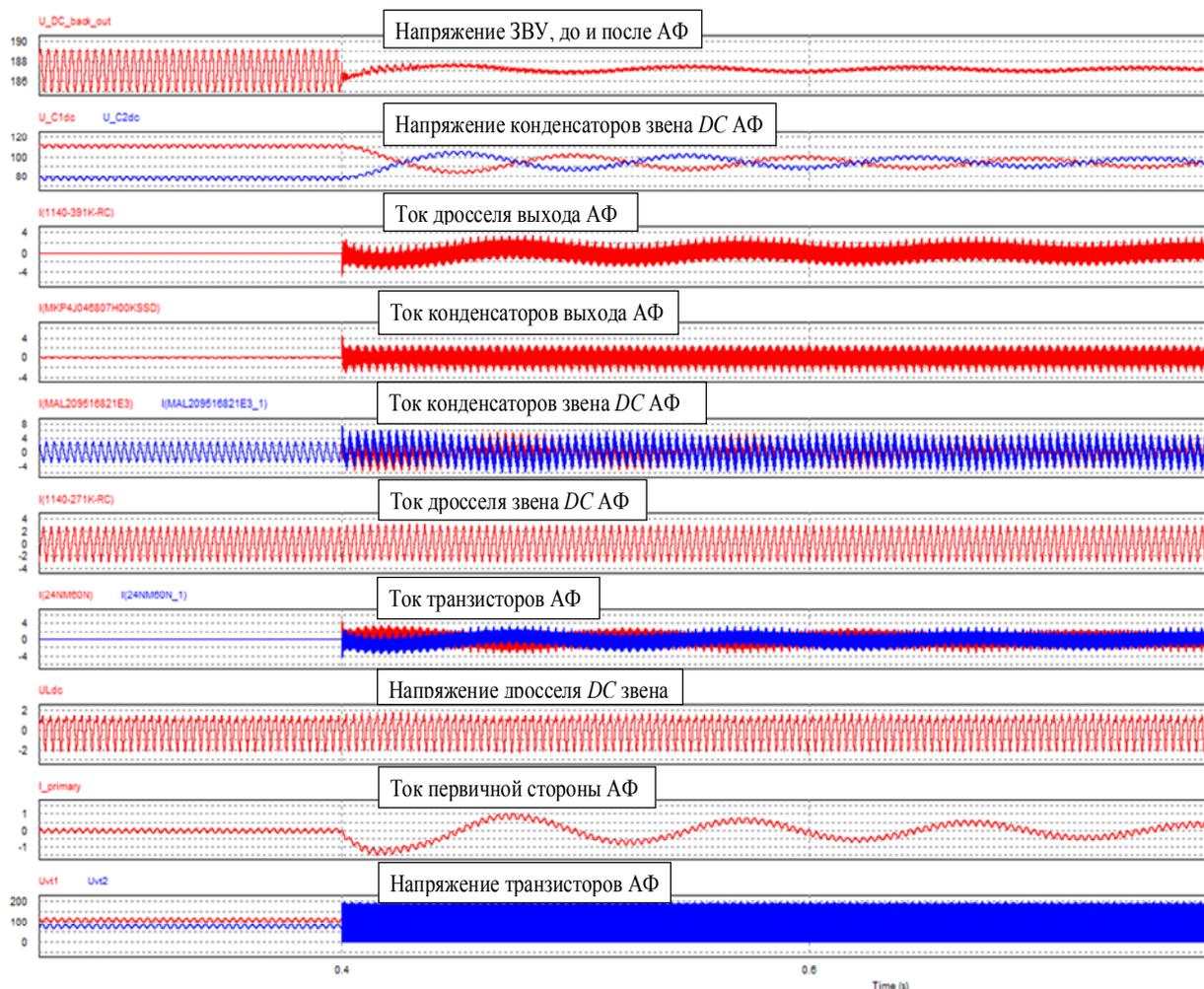


Рис. 6. Осциллограммы при $U_{вх} = 253$ В, $U_{вых} = 187$ В, $M = 4,89$, $R_{нагр} = 1,113$ Ом, переходной процесс

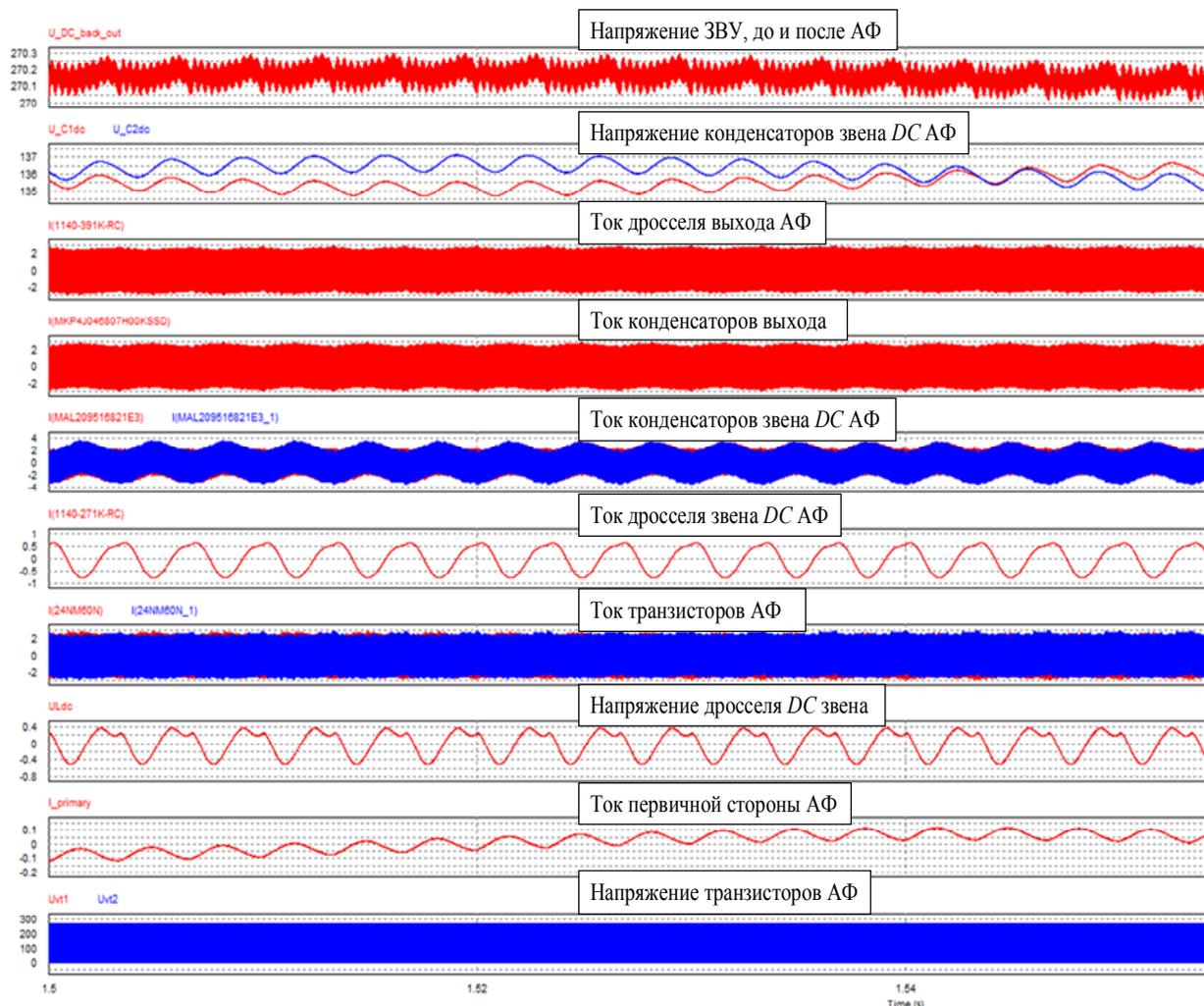


Рис. 7. Осциллограммы при $U_{вх} = 187 \text{ В}$, $U_{вых} = 270 \text{ В}$, $M = 9,76$, $R_{нагр} = 1,715 \text{ Ом}$, максимальное напряжение ЗВУ

Таблица 2

$U_{вх}$, В	253	253	220	220	220	187
$U_{вых}$, В	187	232	220	220	232	270
$U_{dc \text{ max}}$	187,348	232,299	220,424	218,941	232,313	270,269
$U_{dc \text{ min}}$	187,003	231,964	220,11	218,614	231,971	270,029
$U_{dc \text{ ср}}$	187,174	232,129	220,265	218,777	232,144	270,148
$K_{пU}$, %	0,18432	0,144316	0,142556	0,149467	0,147322	0,08884
$K_{пU} / K_{пU} (\text{без АФ})$	6,600593	6,286236	5,371182	5,215144	4,8261	2,662608

Заключение

При разработке системы электропитания на базе ЗВУ одной из главных целей являлся заряд аккумуляторной батареи током и напряжением с минимальным уровнем пульсаций в DC звене. При этом зарядное устройство должно оставаться мобильным, что подразумевает снижение его массы и габаритов. Так, было предложено отказаться от громоздких дросселей и перейти к активному фильтру на основе полумостового инвертора. По сравнению с аналогичными решениями [7, 19] в предложенном АФ используется система управления с контуром

слежения за выходным током АФ. Это позволило ограничить броски тока на первичной стороне трансформатора. К тому же коэффициент пульсаций составил менее 1 %, тогда как у аналогов это значение доходило до 2,5 %. Таким образом:

1. Требуемый уровень пульсаций не превысил 0,2 %.

2. Возможность компенсации пульсационной составляющей достигается как при малой величине выходного напряжения выпрямителя ЗВУ, так и при максимальном, равном 270 В, где пульсация составила 0,2 В.

3. Наличие всего двух транзисторов говорит о малом уровне потерь энергии на полупроводниках – 25 Вт, что позволит уменьшить габариты радиатора.

4. К недостаткам можно отнести нестандартный тип согласующего трансформатора, это скажется на стоимости всей системы электропитания.

Литература/References

1. Dudin A., Ellinger T., Petzoldt J. State of Charge Control of the Mixed-Type Battery Energy Storage System based on the Modular Multilevel Converter. *17th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM)*, 2016, Erlagol, pp. 395–400. DOI: 10.1109/edm.2016.7538764
2. Reithmaier S. *DC-DC High Frequency Boost Converter*, U.S. Patent 7 180 275, B2. 02, 20, 2007.
3. Brown A.E. *DC-DC Converter Operable in an Asynchronous or Synchronous or Linear Mode*, U.S. Patent 5 414 341. 05, 09, 1995.
4. BU-907: *Testing Lithium-Based Batteries*. Available at: https://batteryuniversity.com/index.php/learn/article/testing_lithium_based_batteries (accessed 10.12.2018).
5. Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники. 5-е изд. М.: Урайт, 2012. 667 с. [Zinoviev G.S. *Fundamentals of Power Electronics*. 5th ed, Moscow, Urait Publ., 2012. 667 p.]
6. SKiiP 603 GD123-3DUL V3. Available at: <https://www.semikron.com/products/product-classes/ipm.html#view/table/items/20/filters/icnom-in-a=600> (accessed 10.12.2018).
7. Агунов А.В. Сглаживающее устройство тяговых подстанций постоянного тока на основе силового активного фильтра. Известия Петербургского университета путей сообщения. 2013. Вып. № 2 (35). С. 96–100. [Agunov A.V. Smoothing Device for Traction DC Substations on the Basis of a Power Active Filter. *Proceedings of the Petersburg University of Communications*, 2013, iss. 2 (35), pp. 96–100. (in Russ.)]
8. Zhang H., Lu R., Zhu C., Zhao Y. On-line Measurement of Internal Resistance of Lithium Ion Battery for EV and Its Application Research. *International Journal of u-and e-Service, Science and Technology*, 2014, vol. 7, no. 4, pp. 301–310. DOI: 10.14257/ijunesst.2014.7.4.27
9. Hato Y., Chen C. H. Hirota T., Kamiya Y., Daisho Y., Inami S. Degradation Predictions of Lithium Iron Phosphate Battery. *EVS28 International Electric Vehicle Symposium and Exhibition*, KINTEX, Korea, May 3-6, 2015, pp. 1–7. DOI: 10.3390/wevj7010025
10. Ruddell A.J., Dutton A.G., Wenzl H., Ropeter C., Sauer D.U., Merten J., Orfanogiannis C., Twidell J.W., Vezin P. Analysis of Battery Current Microcycles in Autonomous Renewable Energy Systems. *Journal of Power Sources*, 2002, no. 112, pp. 531–546. DOI: 10.1016/s0378-7753(02)00457-3
11. *Charging LiFeP04 Batteries Summary of Manufacturer Recommendations*. Available at: <http://www.hoffmanengineering.com/Power-Management-from-Hoffman-Engineering> (accessed: 10.12.2018).
12. Park J.-H., Jeong H.-G., Lee K.-B. Output Current Ripple Reduction Algorithms for Home Energy Storage Systems. *Energies*, 2013, no. 6, pp. 5552–5569. DOI: 10.3390/en6105552
13. Kaneko G., Inoue S., Taniguchi K., Hirota T., Kamiya Y., Daisho Y., Inami S. Analysis of Degradation Mechanism of Lithium Iron Phosphate Battery. *EVS27 International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium*, Barcelona, Spain, November 17–20, 2013, pp. 1–7. DOI: 10.1109/evs.2013.6914847
14. *From 1 Hour to Just 10 Seconds: Using the Low-Frequency AC-IR Method as a Quicker and More Stable Alternative to DC-IR Testing of Lithium Ion Batteries*. Available at: <https://www.hioki.com/en/> (accessed: 10.12.2018).
15. Keil P., Jossen A. Charging Protocols for Lithium-Ion Batteries and Their Impact on Cycle Life – An Experimental Study with Different 18650 High-Power Cells, May 2016. DOI: 10.1016/j.est.2016.02.005
16. Krieger E.M., *Effects of Variability and Rate on Battery Charge Storage and Lifespan*, 2013, 138 p.
17. Ahmad A.A., Abrishamifar A., Samadi S. Low-Frequency Current Ripple Reduction in Front-End Boost Converter with Single-Phase Inverter Load. *IET Power Electron.*, 2012, pp. 1–8. DOI: 10.1049/iet-pel.2011.0470
18. Sritharan T. *Impact of Current Waveforms on Battery Behaviour*, 2012, 95 p.
19. Mirzaee H., Dutta S., Bhattacharya S. A Medium-Voltage DC (MVDC) with Series Active Injection for Shipboard Power System Applications. *2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, Atlanta, GA, 2010, pp. 2865–2870. DOI: 10.1109/ecce.2010.5618184
20. Horowitz P., Hill W. *The Art of Electronics*, 2014, 1101 p.
21. Udovichenko A. V., Rozhdenko D. A. Investigation of Three Phase Two-Zone Thyristor AC Voltage Regulator with Capacitor Divider. *16th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM 2015)*, Altai, Erlagol, 29 June – 3 July 2015, Novosibirsk, NSTU Publ., 2015, pp. 495–498. DOI: 10.1109/EDM.2015.7184592
22. Удовиченко А.В., Зиновьев Г.С. Энергосберегающие устройства плавного пуска двигателей переменного напряжения. Электротехника. 2009. № 12. С. 52–55 [Udovichenko A.V., Zinoviev G.S. Energy Saving Devices of Smooth Start-up of Engines of Alternating Voltage. *Electrical Engineering*, 2009, no. 12, pp. 52–55. (in Russ.)]

Удовиченко Алексей Вячеславович, канд. техн. наук, доцент, кафедра «Электроника и электротехника», Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск; udovichenko@corp.nstu.ru.

Балагуров Максим Владимирович, ассистент, кафедра «Электроника и электротехника», Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск; bablo0103@yandex.ru.

Поступила в редакцию 2 марта 2019 г.

DOI: 10.14529/power190107

ACTIVE FILTER FOR CHARGING RECTIFIERS USED IN POWER SUPPLIES

A.V. Udovichenko, udovichenko@corp.nstu.ru,

M.V. Balagurov, balagurov@corp.nstu.ru

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation

The paper proposes an active filter (AF) for power supply systems based on an CRD HPT 160.220 one-piece charging rectifier. Harmonic components here are compensated by a half-bridge single-phase voltage inverter circuit. The converter produces a harmonic component, which is phase-opposite to the harmonics present in the charging rectifier output signal. The AF is series-connected to the rectifier output circuit via a matching transformer with few winding turns. The paper proposes a method for designing an active filter with a control system. It presents a calculation of analog lowpass and highpass filters (second-order Bessel). The charging rectifier has been tested filtered and unfiltered at various rectifier output voltages. The paper presents current and voltage plots for the main AF circuit points as obtained by simulation.

Keywords: active filter, battery charge, analog filter.

Received 2 March 2019

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Удовиченко, А.В. Активный фильтр для зарядно-выпрямительного устройства систем электропитания / А.В. Удовиченко, М.В. Балагуров // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2019. – Т. 19, № 1. – С. 58–66. DOI: 10.14529/power190107

FOR CITATION

Udovichenko A.V., Balagurov M.V. Active Filter for Charging Rectifiers Used in Power Supplies. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2019, vol. 19, no. 1, pp. 58–66. (in Russ.) DOI: 10.14529/power190107