

УДК621.31

М.А. Авербух, Н.А. Жуков, Д.И. Прокопишин

## РАЗРАБОТКА АППАРАТНОЙ ЧАСТИ АКТИВНОГО ФИЛЬТРОКОМПЕНСИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА

Белгородский государственный технологический университет  
им. В.Г. Шухова

Активный фильтр гармоник используется для компенсации несинусоидальности кривых токов и напряжений, коррекции коэффициента мощности и симметрировании потребляемого тока. Существующие фильтры, выпускаемые промышленностью, имеют «закрытую» архитектуру, что не позволяет применять собственные алгоритмы управления и производить в полной мере исследования электрических процессов, протекающих в элементах фильтра. В связи с этим, возникает необходимость разработки активного фильтра с «открытой архитектурой». Авторы предлагают структурную схему четырехплечевой инвертора, позволяющую в дальнейшем анализировать возможные способы подключения нейтрального провода. Проведено сравнения различных типов силовых полупроводниковых ключей, в результате которого было установлено, что для данных задач наиболее подходящим полупроводниковыми приборами являются IGBT или MOSFET. Представлены достоинства и недостатки двух типов драйверов управления затворами силовых транзисторов: бутстрепные и с гальванически развязанными источниками питания. С точки зрения максимальной гибкости управления, выбирается второй тип драйверов. На основании выбранной топологии схемы и типа драйвера была разработана принципиальная схема и печатная плата инвертора. Получены осциллограммы выходного напряжения одного плеча инвертора, на которых были зафиксированы выбросы напряжения, с максимальным амплитудным значением равным 40 В при напряжении на шине постоянного тока 15 В. Для устранения выбросов перенапряжения предлагается использовать снаббер С-типа.

**Ключевые слова:** выбросы напряжения, драйвер IGBT, лабораторный активный фильтр гармоник, снаббер, четырехплечевой инвертор напряжения.

### 1. Введение

Активный фильтр гармоник (АФГ) – устройство для компенсации несинусоидальности и несимметрии кривых токов и напряжений, коррекции коэффициента мощности. Существуют различные способы определения компенсирующего сигнала [1-3], однако применение того или иного алгоритма для конкретной ситуации требует экспериментального подтверждения. Современные АФГ, производимые такими фирмами как Schneider Electric, Danfos, как правило, имеют «закрытую» архитектуру и

не позволяют вносить изменения в существующие алгоритмы управления. Соответственно, возникает необходимость в разработке АФГ с «открытой» архитектурой. С этой целью разработан лабораторный образец АФГ с возможностью изменения алгоритма управления, наблюдения и оценки протекающих в нем электрических процессов. В данной статье приводится алгоритм разработки четырехплечевого инвертора для лабораторного АФГ.

## II. Разработка четырехполюсного инвертора

Для разработки четырехплечевого инвертора для лабораторного АФГ необходимо решить ряд задач:

- выбрать схему включения силовых полупроводниковых ключей (СПК)
- выбрать тип СПК;
- выбрать микросхемы управления СПК;
- разработать принципиальную схему и печатную плату инвертора.

### 1. Выбор схемы включения силовых полупроводниковых ключей.

Существуют четыре типа АФГ: последовательного включения с емкостным или индуктивным накопителем и параллельного с емкостным или индуктивным накопителем, однако большее распространение получили параллельные активные фильтры с емкостными накопителями [4]. На рис. 1 представлена структурная схема параллельного четырехплечевого лабораторного АФГ. В данной схеме предусмотрена возможность выбора способа подключения нейтрального провода сети к АФГ: через каскад СПК7 ÷ СПК8, через среднюю точку емкостного накопителя С1-С2 [5-7].

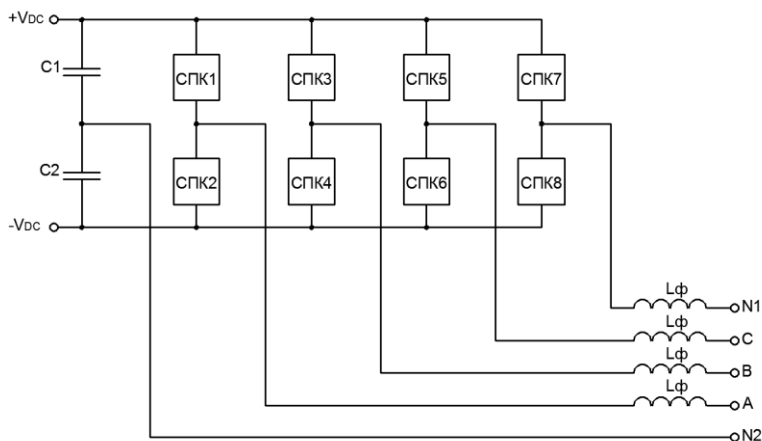


Рис. 1. Структурная схема инвертора лабораторного активного фильтра гармоник

## *2. Выбор типа силовых полупроводниковых ключей.*

Работа инвертора АФГ базируется на полностью управляемых силовых ключах. Современная промышленность выпускает управляемые ключи трех типов:

- биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT);
- полевые транзисторы (MOSFET);
- полностью управляемые тиристоры (GTO, GTC).

IGBT транзисторы рассчитаны на применение в схемах, где напряжение коллектор-эмиттер составляет от 250 до 6500 В, а частота коммутации – до 20 кГц. Достоинством MOSFET транзисторов является малое время переключения и, как следствие, низкие динамические потери. Данные приборы, однако, как правило, используются в низковольтных схемах, где напряжение сток – исток не превышает 400 В, хотя в настоящее время выпускают MOSFET с напряжением сток – исток до 2500 В. Полностью управляемые тиристоры используют в основном в мощных преобразователях с напряжением от 1000 В, и такие полупроводниковые приборы имеют большую стоимость. Поскольку областью применения лабораторного АФГ являются трехфазные сети 0,4 кВ, в качестве силовых полупроводниковых ключей могут быть применены IGBT или MOSFET транзисторы.

## *3. Выбор микросхемы управления силовыми полупроводниковыми ключами.*

Микросхема управления СПК необходима для усиления сигнала управления по мощности и для осуществления корректного открытия и закрытия СПК. Данные микросхемы называются драйверами. В мостовых схемах СПК делятся на группы и включаются последовательно, образуя так называемое «плечо» моста. Для управления СПК соединённых в «плечо» используют два типа драйверов:

- 1) с бутстрепным методом управления [8];
- 2) с гальванически развязанными источниками питания.

Достоинством первого типа драйверов является простота схемы управления СПК, а основным недостатком – зависимость величины бутстрепной емкости от частоты переключения СПК. Кроме того, накладываются ограничения на минимальную длительность времени работы нижнего ключа в «плече» – она должна быть достаточной, чтобы за это время успел зарядиться бутстрепный конденсатор. Драйверы второго типа этих недостатков лишены, однако, для управления верхними транзисторами в «плече» им необходимы гальванически развязанные источники питания. Поскольку инвертор находится в составе лабораторного АФГ, необходимо обеспечить максимальную гибкость управления. С учетом этих факторов выбраны драйверы второго типа марки А3120.

#### 4. Разработка принципиальной схемы

На рис. 2 представлена принципиальная схема одного плеча инвертора.

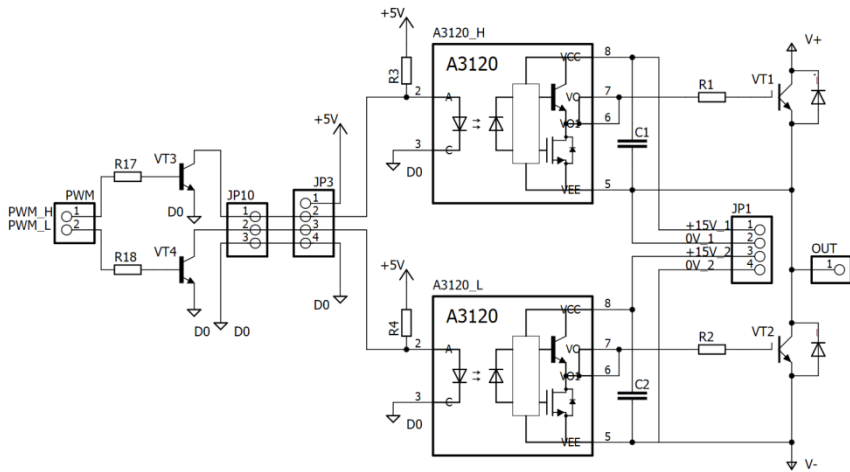


Рис. 2. Принципиальная схема одного плеча инвертора активного фильтра

Схема управления IGBT построена на базе микросхемы оптодрайвера A3120 (A3120\_H – управляет затвором транзистора VT1, A3120\_L – управляет затвором транзистора VT2). Питание оптодрайвера осуществляется от гальванически развязанных источников питания (+15V\_1 – 0V\_1 и +15V\_2 – 0V\_2). Сигналы управления от микроконтроллера PWM\_H (сигнал для транзистора VT1) и PWM\_L (сигнал для транзистора VT2) усиливаются транзисторами VT3 и VT4, включенными по схеме с общим эмиттером. Усиление сигнала необходимо для корректного включения светодиодов в микросхемах A3120. Кроме усиления, такая схема позволяет повысить помехозащищенность канала передачи, преобразуя исходный сигнал по напряжению в «токовую петлю». При этом важно, чтобы транзисторы VT3 и VT4 и резисторы R17 и R18 находились как можно ближе к микроконтроллеру, а расстояние от коллекторов транзисторов до микросхемы A3120 может составлять около метра. Сопротивление резисторов R3 и R4 принимается равным 270 Ом [9]. Минимальное значение затворного резистора для рассматриваемой схемы рассчитывается по формуле [9]:

$$R_g > \frac{V_{CC} - V_{EE} - V_{OL}}{I_{\max.out}} + 1, \quad (1)$$

где  $V_{CC}$  – напряжение питания драйвера (для рассматриваемой схемы оно составляет 15 В);  $V_{EE}$  – напряжение между контактом  $V_{EE}$  (пятый контакт) драйвера и эмиттером транзистора (для рассматриваемой схемы оно составляет 0 В);  $V_{OL}$  – потенциал на выходе драйвера при выключенном светодиоде драйвера. Данный параметр зависит от выходного тока драйвера и принимается равным 2 В, при токе 2,5 А;  $I_{\max.out}$  – максимальный выходной ток драйвера (для рассматриваемого драйвера он составляет 2,5 А).

Минимальное значение затворных резисторов составляет 5,2 Ом, но в данной схеме сопротивление резисторов R1 и R2 принимаются равными 10 Ом.

На основании разработанной схемы была создана печатная плата, внешний вид которой представлен на рис. 3. Особенностью данной платы является то, что силовые транзисторы не впаяются в плату, а устанавливаются в винтовые клеммники. Такой подход позволяет быстро сменить транзистор в случае выхода его из строя.

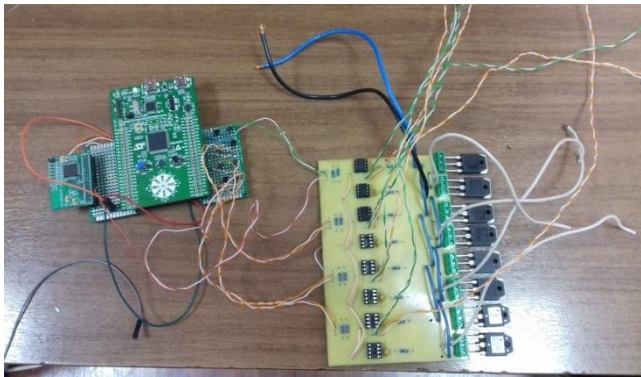


Рис. 3. Внешний вид печатной платы инвертора лабораторного АФГ

### III. Результаты работы инвертора в режиме холостого хода

Результаты работы схемы представлены на рис. 4 и 5, где изображены осциллограммы выходного напряжения плеча инвертора относительно минуса шины звена постоянного тока (напряжение между точками OUT и V- на рис. 2). В качестве источника постоянного напряжения использовался лабораторный блок питания, установленный на напряжение 15 В. В «пле-

че» инвертора использовались транзисторы IGBT марки FGA25N120. Измерение напряжения производилось осциллографом DSO5202P, основные технические характеристики транзисторов и осциллографа приведены в табл. 1.

Таблица 1.  
Основные технические характеристики IGBT FGA25N120 и осциллографа

Параметр IGBT	Значение
Напряжение коллектор – эмиттер, $V_{CES}$	1200 В
Ток коллектора $I_C$ , при 25° С	50 А
Задержка включения, $t_{d(on)}$	50 нс
Время нарастания, $t_r$	60 нс
Задержка выключения, $t_{d(off)}$	190 нс
Время спада, $t_f$	100 нс
Параметр DSO5202P	Значение
Аналоговая полоса пропускания	100 МГц
Входной импеданс	1 МОм
Частота дискретизации	0,5 ГГц в 2-х канальном режиме
Входная чувствительность	от 2 мВ/деление до 5 В/деление
Вертикальное разрешение	8 бит

На рис. 4 представлена осциллограмма выходного напряжения одного плеча инвертора, из которой следует, что выходное напряжение представляется прямоугольными импульсами.

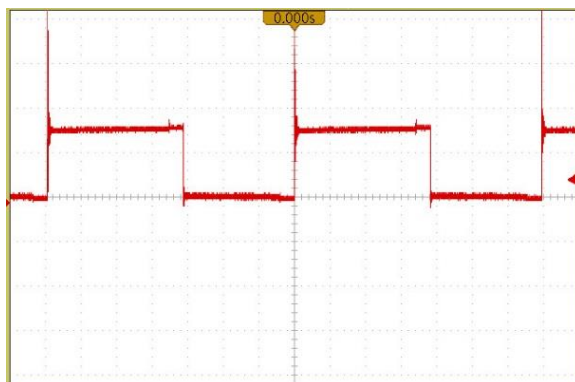


Рис. 4. Осциллограмма выходного напряжения одного плеча инвертора: вертикальная развертка – 10 В/клетку, горизонтальная – 20 мкс/клетку.

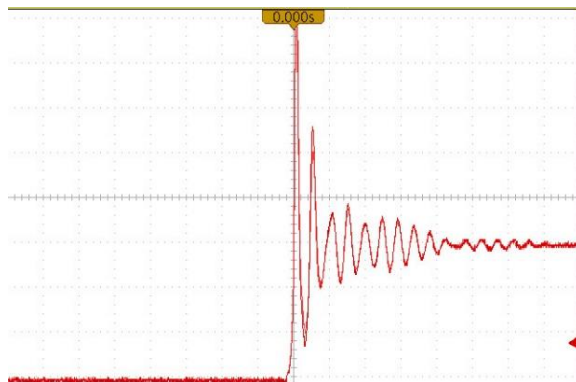


Рис. 5. Укрупненная осциллограмма восходящего фронта выходного напряжения одного плеча инвертора: вертикальная развертка – 5 В/клетку, горизонтальная – 400 нс/клетку, смещения луча осциллографа – 20 В.

Выброс и колебания напряжения, приведённые на рис. 5, обусловлены монтажными индуктивностями и ёмкостями схемы и самих элементов. В данном примере максимум выброса почти в 2,5 раза превышает напряжение в звене постоянного тока. Такие выбросы могут вывести из строя IGBT. Есть несколько способов уменьшения уровня выбросов: первый это увеличения номинала затворного резистора, что приведёт к увеличению времени включения транзистора и тепловым потерям на переключении; второй – использование снабберных цепей, например, С-типа [10].

#### IV. Выводы

Разработана схема инвертора лабораторного АФГ, проведены измерения выходного напряжения одного плеча инвертора при частоте импульсного сигнала, равной 7,2 кГц и напряжении звена постоянного тока 15 В. Установлено наличие выбросов напряжения при включении верхнего транзистора в плече инвертора, при этом максимальное значение выброса превышает напряжение звена постоянного тока почти в 2,5 раза. Этот недостаток данной схемы можно устранить установкой снабберной цепи. В дальнейшем на базе разработанной схемы можно производить исследование электрических явлений, протекающих в элементах АФГ, отладку новых систем управления АФГ, а также исследовать вопросы появления резонансов в системах электроснабжения при подключении АФГ.

© Авербух М.А., 2019

© Жуков Н.А., 2019

© Прокопишин Д.И., 2019

## Библиографический список

- [1] Akagi, E.H. Watanabe and M. Aredes, Instantaneous power theory and applications to power conditioning. N.J.: Wiley-IEEE Press, 2007.
- [2] Akagi H. Active harmonic filters // Proceedings of the IEEE. 2006. № 93 (12). P. 2128–2141.
- [3] Paul J., R.D. Prakash, Raglend J. Design and simulation of phase locked loop controller based three phase unified power quality conditioner for nonlinear and voltage sensitive loads // International Journal of Applied Engineering Research, Dindigul. 2010. № 1 (2). P. 234-243.
- [4] Розанов Ю.К. Силовая электроника. М.: Издательский дом МЭИ, 2009. – 632 с.
- [5] Lam C.S., Choi W.-H., Wong M.C., Yingduo H. Adaptive DC-link voltage-controlled hybrid active power filters for reactive power compensation // IEEE Transactions on Power Electronics. 2012. № 27 (4). P. 1758-1772.
- [6] Choi W.-H., Lam C.S., Wong M.C. and Yingduo H. Analysis of DC-link voltage controls in three-phase four-wire hybrid active power filters // IEEE Transactions on Power Electronics. 2013. № 28 (5). P. 2180-2191.
- [7] Montero M.I.M., Cadaval E.R., Gonzalez F.B. Comparison of control strategies for shunt active power filters in three-phase four-wire systems // IEEE Transactions on Power Electronics. 2007. № 22(1). P. 229-236.
- [8] Никитин А. Современные высоковольтные драйверы MOSFET- и IGBT-транзисторов // Новости электроники. 2010. № 6. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.compel.ru/lib/ne/2010/6/10-sovremennyye-vyisokovoltnyie-drayveryi-mosfet-i-igbt-tranzistorov> (дата обращения 05.03.2019).
- [9] HCPL-3120 Datasheet // Electronic Components Datasheet Search [Электронный ресурс]. URL: <https://www.alldatasheet.net/datasheet-pdf/pdf/64629/HP/HCPL-3120.html> (дата обращения 09.02.2019).
- [10] Колпаков А., Ламп Й. Проблемы проектирования IGBT – инверторов: перенапряжения и снабберы // Компоненты и технологии. 2008. № 5 (82). С. 98-103.

**M.A. Averbuh, N.A. Zhukov, D.I. Prokopishin**

**DEVELOPMENT HARDWARE PART  
OF ACTIVE HARMONIC FILTER**

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov,  
Belgorod, Russia

**Abstract.** The active harmonic filter is used to compensate for the non-sinusoidal current and voltage curves, to correct the power factor, and to balance the consumption current. The existing filters produced by the industry have a "closed" architecture, which does not allow to apply their own control algorithms and to fully research the electrical processes occurring in the elements of filter. In this regard, there is a need



to develop an active filter with an «open architecture». The authors propose a block diagram of a four-wire inverter, which allows further analysis of possible ways to connect a neutral wire. The comparison of different types of power semiconductor switches was carried out, as a result of which it was found that for these tasks the most suitable semiconductor devices are IGBT or MOSFET. Advantages and disadvantages of two types of gate control drivers for power transistors are presented: bootstrap and with galvanically isolated power sources. From the point of view of the maximum flexibility of management, the second type of drivers is selected. Based on the chosen topology of the circuit and the type of driver, the circuit diagram and the printed circuit Board of the inverter were developed. The waveforms of the output voltage of one arm of the inverter were obtained, on which voltage emissions were recorded, with a maximum amplitude value equal to 40V at a voltage on the DC bus 15 V. It is proposed to use a C-type snubber to eliminate overvoltage emissions.

**Keywords:** four-wire voltage inverter, IGBT driver, laboratory active harmonic filter, snubber, voltage emissions.

### References

- [1] H. Akagi, E.H. Watanabe and M. Aredes, *Instantaneous power theory and applications to power conditioning*. N.J.: Wiley-IEEE Press, 2007.
- [2] H. Akagi, «Active harmonic filters», *Proceedings of the IEEE*, vol. 93, no. 12, pp. 2128–2141, Jan. 2006.
- [3] J Paul, R.D. Prakash and J. Raglend, «Design and simulation of phase locked loop controller based three phase unified power quality conditioner for nonlinear and voltage sensitive loads», *International journal of applied Engineering research, Dindigul*, vol. 1, no. 2, pp. 234-243, 2010.
- [4] Yu.K. Rozanov, *Silovaya ehlektronika*. Moscow: Publishing house MEI, 2009 (in Russian).
- [5] C.S. Lam, W.-H. Choi, M.C. Wong and H. Yingduo, «Adaptive DC-link voltage-controlled hybrid active power filters for reactive power compensation», *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 27, no. 4, pp. 1758-1772, Apr. 2012.
- [6] W.-H. Choi, C.S. Lam, M.C. Wong and H. Yingduo, «Analysis of DC-link voltage controls in three-phase four-wire hybrid active power filters», *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, no. 5, pp. 2180-2191, May 2013.
- [7] M.I.M. Montero, E.R. Cadaval and F.B. González, «Comparison of control strategies for shunt active power filters in three-phase four-wire systems», *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 22, no. 1, pp. 229-236, Feb. 2007.
- [8] A. Nikitin, «Sovremennyye vysokovol'tnyye drayvery MOSFET-i IGBT- tranzistorov», *Novosti ehlektroniki*, no. 6, 2010.
- [9] HCPL-3120 Datasheet // Electronic Components Datasheet Search [Online]. Available at: <https://www.alldatasheet.net/datasheet-pdf/pdf/64629/HP/HCPL-3120.html> [Accessed: Feb. 9, 2019].
- [10] A. Kolpakov and J. Lamp, «Problemy proektirovaniya IGBT-invertorov: perenapryazheniya i snobbery», *Components & Technologies*, no. 5 (82), pp. 98-103, 2008 (in Russian).