

## ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ КОРРЕКТИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ УСКОРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ НА БАЗЕ ЦИФРОВОГО СИГНАЛЬНОГО ПРОЦЕССОРА

В последнее десятилетие в мире электроники наблюдается бурное развитие в области цифровой обработки сигналов. Множество зарубежных фирм выпускают специализированные сигнальные процессоры, предназначенные для обработки аналоговых сигналов. Данная продукция стала вполне доступной на российском рынке. Используется в основном для промышленных разработок, не требующих прецизионности (привода электродвигателей и т. д.). Однако возможности современных сигнальных процессоров позволяют применять их в ускорительной технике, для создания специализированных источников питания с цифровым регулированием в режиме «реального времени» ([http://pdeis.at.tut.by/rt\\_ru.htm](http://pdeis.at.tut.by/rt_ru.htm)).

*Ключевые слова:* источник тока; стабилизация тока; мостовой инвертор; усилитель мощности; цифровое управление; импульсный источник; сигнальный процессор; цифровое регулирование; источник электропитания; широтно-импульсная модуляция (ШИМ); пропорционально-интегрально-дифференциальное (ПИД) регулирование.

### Введение

В Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера (ИЯФ) на протяжении многих лет ведутся разработки источников питания магнитных элементов ускорительной техники. Для питания слаботочных магнитов разработаны усилители мощности (УМ), обеспечивающие максимальный выходной ток от 3 до 25 А. Современный ускорительный комплекс насчитывает около сотни таких источников питания. Используемые в настоящее время усилители мощности выполнены в виде импульсных преобразователей постоянного напряжения: регулирование выходного тока производится широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) выходного напряжения мостового инвертора [1]. Необходимую точность преобразования обеспечивает петля обратной связи, выполненная на аналоговых элементах. Аналоговое управление обеспечивает непрерывность регулирования тока в нагрузке, что позволяет получить высокую точность преобразования в статическом режиме работы. Связь усилителей мощности с

управляющим компьютером на ускорительном комплексе осуществляется при помощи внешних блоков ЦАП и АЦП [2].

Однако существует множество задач, где необходимо обеспечить сложную динамику регулирования, требующую реализации специальных алгоритмов управления, которые аналоговое регулирование реализовать не позволяет. Для реализации подобных алгоритмов в качестве регулирующего звена можно использовать цифровой сигнальный процессор (ЦСП).

Применение ЦСП в цепи обратной связи усилителя мощности позволяет:

- осуществить связь с управляющим персональным компьютером посредством CAN (Controller Area Network) или Ethernet интерфейсов, без привлечения дополнительных внешних блоков;
- реализовать универсальность в выборе алгоритма регулирования тока наиболее оптимальным способом для конкретной физической задачи, так как наличие ЦСП позволяет программным способом вносить изменения в алгоритм управления;

- выполнить автоматическое тестирование нагрузки для обнаружения неисправностей, а также для вычисления динамических констант регулирования для широкого диапазона нагрузок.

В данной работе описывается источник питания, где в режиме «реального времени» ЦСП регулирует выходной ток.

#### Описание источника питания на базе ЦСП

На больших ускорительных установках существует множество разновидностей слаботочных магнитных элементов с индуктивностями обмоток от сотен микрогенри до единиц генри. Большой разброс параметров нагрузок заставляет вводить коррекцию динамических параметров в источниках питания. Наличие ЦСП позволяет производить процесс коррекции программно. Для этого при включении источника в ЦСП запускается подпрограмма вычисления параметров нагрузки. Процессор открывает одну диагональ транзисторного моста, и с помощью АЦП измеряет изменение тока нагрузки. Далее по форме переходного процесса процессор вычисляет характерное время нагрузки и динамические константы регулирования. Автоматическая адаптация блока под кон-

кретную нагрузку позволяет изготавливать источники питания одинаковыми, что облегчает процесс их эксплуатации.

Кроме стационарных задач, когда задание источнику питания не меняется на протяжении всего эксперимента, в ускорительной технике существуют периодические, где динамика тока повторяется с частотой порядка десятков герц (например, синхротрон). При этом ток в нагрузке должен меняться по заданному закону от компьютера. Для этого планируется реализовать в источнике питания специальный алгоритм, позволяющий перед началом работы загрузить в оперативную память ЦСП таблицу изменения тока, а далее по стартовому сигналу изменять ток нагрузки без использования ресурсов управляющего компьютера.

Поскольку одним из наиболее распространенных в ИЯФ источников питания корректирующих элементов магнитной системы ускорителей является усилитель мощности УМ-6, то в качестве первого шага было решено разработать его аналог с цифровым регулированием выходного тока.

Требования, предъявляемые к УМ-6:

- выходной ток регулируется в диапазоне от  $-6$  до  $6$  А;
- погрешность преобразования не хуже  $0,1$  %;
- напряжение на нагрузке до  $100$  В.

Действие разработанного усилителя мощности (рис. 1) основано на широтно-импульсной модуляции выходного напряжения мостового инвертора.

Задание от компьютера (1) посредством последовательного интерфейса связи поступает на цифровой сигнальный процессор (2), а ЦСП управляет мостовым инвертором (3). Усилитель мощности (выделен на рис. 1 пунктирной линией) охвачен петлей обратной связи по току и напряжению. Статический петлевой коэффициент усиления по току составляет  $10^3$ . Для подавления сетевых пульсаций буферного источника питания вводится дополнительная обратная связь по напряжению.

Мостовой инвертор (рис. 2) выполнен на современных полевых транзисторах с индуцированным каналом. Преобразование, как и в УМ-6, происходит на частоте  $40$  кГц. Коммутация транзисторов мостового инвертора осуществляется двумя драйверами полумоста (1). Ток в нагрузке измеряется двумя бесконтактными датчиками тока (2).

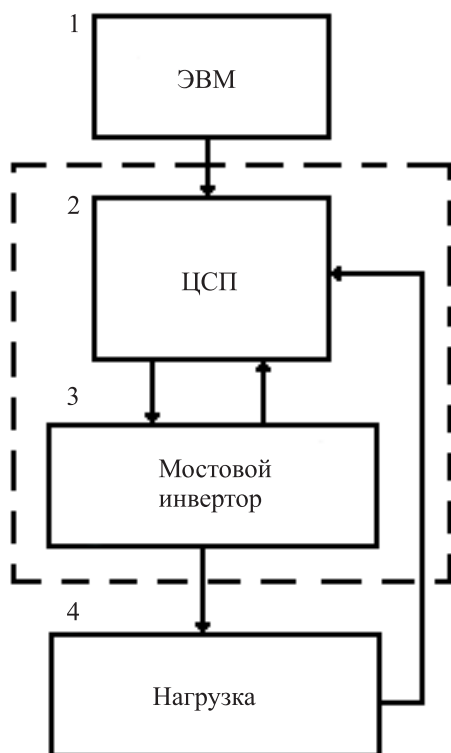


Рис. 1. Структурная схема усилителя на базе ЦСП

Измеренное значение подается на схему защиты (4) и на АЦП процессора (5). Так как АЦП выполнен на одном кристалле с ядром процессора, в измерениях присутствуют шумовые ВЧ-гармоники. От этих гармоник можно избавиться, применив фильтр низких частот. В данном случае использован цифровой фильтр экспоненциального скользящего среднего, который является БИХ-фильтром первого порядка.

Исходя из заданного и измеренного значений тока, арифметико-логическое устройство (6) процессора вычисляет ошибку, и, используя алгоритм пропорционально-интегрального регулирования, формирует сигналы управления драйверами. Связь усилителя с персональным компьютером (8) осуществляется посредством встроенного в ЦСП модуля последовательного интерфейса связи (7).

В усилителе реализована аппаратная и программная защита. Аппаратная защита выполнена следующим образом. Сигнал с датчиков тока поступает на компараторы, и, если значение тока в нагрузке становится меньше  $-6$  А или превышает значение  $6$  А, схема защиты выставляет сигнал запрета работы драйверов. Аналогичным образом устроена программная защита с тем отличием, что сравнение производится на программном уровне.

Точность установки тока в нагрузке определяется точностью измерения сигнала с датчика тока. Ток в нагрузке и величина напряжения на выходе датчика (а следовательно, и на входе АЦП) связаны следующим соотношением, данным в документации на датчик:

$$U_{mes} = \frac{I_H + 7,5}{5} = U_{ADC}. \quad (1)$$

Числовое значение, записываемое АЦП в регистр результата, определяется соотношением

$$Res = \frac{4095 \cdot U_{ADC}}{3}. \quad (2)$$

Из (1) и (2) получим соотношение

$$I_H = \frac{Res}{273} - 7,5,$$

связывающее величину тока в нагрузке и значение  $Res$ , которое АЦП записывает в регистр результата при измерении тока.

Далее значение  $Res$  используется для задания величины выходного тока. Так как используемый процессор обладает целочисленной арифметикой, то минимальной величиной изменения задания является единица. Получим соотношение, из которого видно, что при изменении задания на единицу ток изменится на величину

$$\Delta I_H = \frac{\Delta Res}{273} = \frac{1}{273} \text{ А} = 3,663 \text{ мА}.$$

ну  $3,66$  мА:

Это минимальное приращение тока, которое можно задавать в данной системе регулирования.

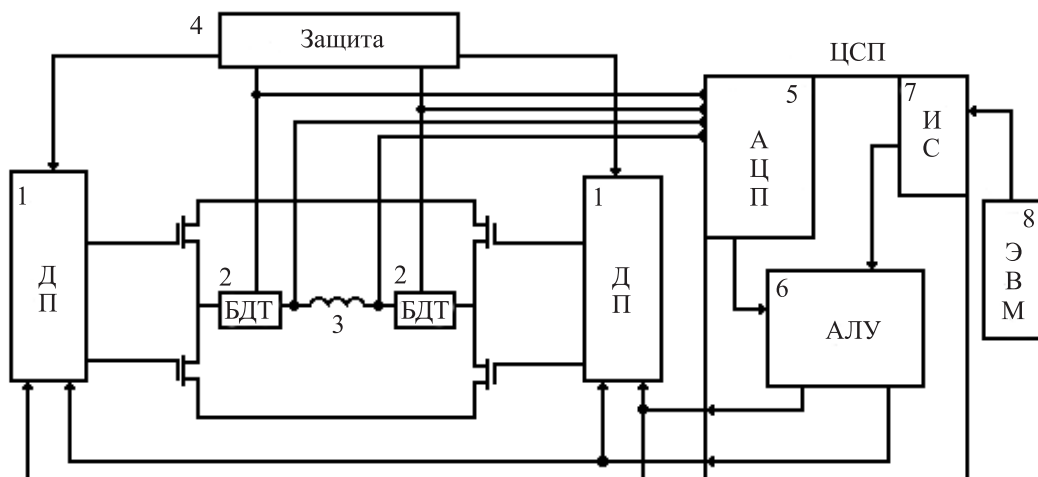


Рис. 2. Блок-схема усилителя на базе ЦСП

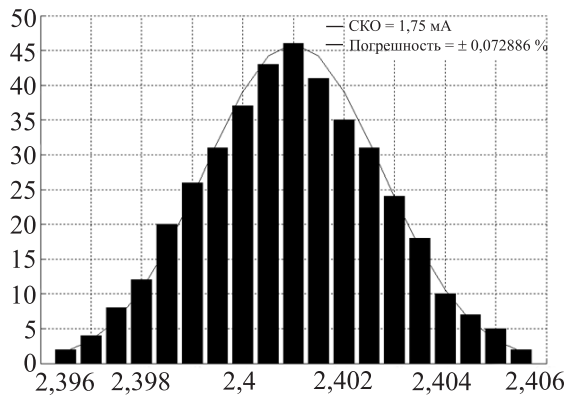


Рис. 3. Распределение тока в нагрузке

### Выбор ЦСП

Для обеспечения высокой точности при дискретном регулировании на один период ШИМ должно приходиться достаточное количество отсчетов. При увеличении числа отсчетов на каждый период дискретное регулирование будет стремиться к непрерывному.

Произведем оценку необходимой частоты работы процессора для обеспечения точности регулирования 0,1 %. Диапазон выходного тока усилителя 12 А (от –6 до 6 А). Пусть на один период ШИМ приходится  $N$  точек ( $N$  отсчетов), а  $t$  – время одного отсчета ЦСП.

Тогда при изменении ШИМ от нулевого значения до полной ширины  $Nt$  ток в нагрузке должен измениться от –6 до 6 А. При единичном изменении ШИМ приращение тока не должно превысить 6 мА, что составляет 0,1 % от половины диапазона изменения тока. Отсюда определим, что  $N$  составляет порядка 2 000. Зная, что преобразование происходит на частоте 40 кГц, определим, что для обеспечения желаемой точности преобразования процессор должен работать на частотах не менее 80 МГц.

Для усилителя выбран 16-разрядный сигнальный процессор TMS320F2810. Он обладает мощным ядром, максимальная частота работы которого составляет 150 МГц. Это позволяет получить дискретность управления током значительно меньше 6 мА.

Процессор имеет встроенный 12-разрядный 16-канальный АЦП. Такое количество каналов позволяет следить за изменением множества параметров, например: ток в на-

грузке (2 канала: один используется в цепи обратной связи, а второй – в качестве независимого измерителя для системы контроля); напряжение на нагрузке (1 канал); температура в блоке (1 канал) и др. Знание большого количества величин позволяет реализовать наиболее оптимальный алгоритм управления для конкретной задачи. Максимальная частота дискретизации АЦП составляет 37,5 МГц.

В процессор встроен контроллер последовательного интерфейса связи CAN. Предполагается использовать этот интерфейс для связи с персональным компьютером. При необходимости возможно использование любого другого последовательного интерфейса связи.

### Результаты испытания

Первый опытный образец усилителя на базе ЦСП выполнен в конструктиве ВИШ-НЯ 40. Усилитель охвачен петлей обратной связи по току через встроенный сигнальный процессор. Написана программа для данного усилителя, реализующая пропорционально-интегральное регулирование.

Тестирование проводилось на активной нагрузке. Для измерения долговременной стабильности ток в нагрузке измерялся в течение часа с помощью независимого внешнего измерительного блока (производство ИЯФ) CANADC-40 [2] с погрешностью преобразования не хуже 0,01 %. На основе данных измерений было построено распределение (рис. 3) и вычислено среднеквадратичное отклонение тока от заданной величины 1,75 мА, что составляет менее 0,1 % от установленного значения.

### Список литературы

1. Беликов О. В., Беркаев Д. Е., Козак В. Р., Медведко А. С. Усилители мощности УМ-6 и УМ-20 для питания корректоров комплекса ВЭПП-2000. Препринт ИЯФ СО РАН. 2006-44, 2006.
2. Козак В. Р. Прецизионные аналогоцифровые преобразователи // Электроника: наука, технология, бизнес. 2006. № 4. С. 35–37.