Импульсные источники питания большой мощности с микропроцессорным управлением

Евгений Владимиров, Владимир Ланцов (Санкт-Петербург)

В статье рассмотрены основные проблемы и особенности, возникающие при проектировании современных импульсных источников вторичного электропитания (ИВЭ) большой мощности. Сформулированы требования к системе управления мощными импульсными ИВЭ, которые должны быть учтены в алгоритме управления такими источниками. Приведён обзор публикаций, посвящённых вопросам управления импульсными источниками питания, в том числе с микропроцессорным управлением. Описана обобщённая структурная схема мощного импульсного ИВЭ (AC/DC-преобразователя) с микропроцессорным управлением. Рассмотрены особенности алгоритма управления и требования к микропроцессору (микроконтроллеру). Изложенные положения и выводы проиллюстрированы на примере схемы импульсного ИВЭ мощностью 1200 Вт.

На современном этапе развития импульсных (преобразовательных) источников вторичного электропитания (далее – ИВЭ), или Switching Mode Power Supplies (сокращенно SMPS), может быть условно принята следующая их классификация. По величине выходной мощности источники можно разделить на: маломощные источники (от 1 до 50 Вт), источники средней мощности (от 50 до 400...500 Вт), источники большой мощности (от 500 Вт до 5...10 кВт) и источники питания сверхбольшой мощности (более 10 кВт) [1].

Особенности функционирования и методы проектирования ИВЭ малой и средней мощности достаточно подробно описаны в отечественной и зарубежной литературе. В то же время мощные импульсные источники отражены в публикациях существенно меньше. Ещё реже приводятся особенности и методы проектирования мощных импульсных ИВЭ с микропроцессорным (МП) управлением. Такое положение побудило авторов восполнить имеющийся пробел. В статье описываются импульсные источники питания класса AC/DC, т.е. с питанием от сети переменного тока. Отметим, что мощные источники бесперебойного питания (ИБП) также имеют встроенные системы МП-управления; однако основное назначение таких интеллектуальных систем – это обеспечение управления в специальных режимах работы, свойственных только ИБП [2].

Проблемы и особенности импульсных источников вторичного электропитания большой мощности

Рассмотрим некоторые проблемы и особенности функционирования современных мощных импульсных источников:

- повышенная частота преобразования (коммутации силовых ключей) $f_{пр}$ = 50(80)...250 кГц. При этом активный корректор коэффициента мощности (ККМ, PFC), обязательный для мощных источников при их питании от однофазной сети переменного тока, ~220В/~230В, 50/60Гц, может иметь другую частоту: $f_{пр} \le f_{ккм} \ge f_{пр}$. Повышенное значение $f_{пр}$ позволяет в несколько раз уменьшить массогабаритные показатели мощных импульсных ИВЭ. В ряде применений оказывается возможным одновременно уменьшить и стоимость ИВЭ по сравнению с ещё широко применяемыми тиристорными источниками большой мощности;
- основные методы управления силовыми ключами:
  – широтно-импульсная модуляция (ШИМ),
  – частотно-импульсная модуляция (ЧИМ) в AC/DC с квазирезонансным преобразованием.

Следует указать на невозможность достаточно существенной подгрузки выхода (3...5% от номинального тока нагрузки и более) при использовании ШИМ с жёстким циклом переключения из-за большой выходной мощности и снижения КПД (η);

- безаварийное включение и выключение ИВЭ как в штатных, так и в нештатных (аварийных) режимах работы. Подчеркнём, что возникающие в этих режимах сверхбольшие токи и напряжения приводят к уменьшению ресурса устройств и компонентов и могут вызвать преждевременный отказ;
- широкое использование современных силовых ключей – мощных высоковольтных (500...1200 В) транзисторов: полевых транзисторов с изолированным затвором (МОП или MOSFET) и биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT), быстродействующих (fast) и сверхбыстродействующих (ultrafast) [1]. В частности, МОП-транзистор типа IPW60R045CS (фирма-изготовитель Infineon) имеет следующие параметры: напряжение (U_{DSS}) – не менее 600 В, ток стока (I_D) – до 60 А, максимальная рассеиваемая мощность (P_D) – 430 Вт. При этом сопротивление открытого канала ($R_{DS\ on}$) – не более 0,045 Ом; имеется встроенный антипараллельный диод. Что касается IGBT, то в настоящее время эти приборы выполняются по новым технологиям (NPT, WARP, TRENCH и др.), что позволяет снизить напряжение насыщения коллектор-эмиттер ($U_{CE\ sat}$) и повысить быстродействие. Рабочий диапазон частот IGBT существенно расширен: 50 кГц для IGBT типа APT25GT120BRDQ2 (Advance Power Technology – APT), обеспечивающего 1200 В/54 А. Для IGBT типа IRG4PC40W (IR) максимальная час-

тота переключения составляет 150 кГц с возможностью обеспечить 600 В/40 А [1];
- необходимое быстродействие и надёжность работы всего комплекса устройств для защиты силовых элементов самого источника и внешнего потребителя;
- необходимость эффективного отвода значительного количества тепла от источников. В настоящее время КПД импульсных ИВЭ с питанием от однофазного напряжения ~220 В, 50 Гц не превышает 84...86% [1]. Соответственно КПД импульсных ИВЭ в случае питания ИВЭ от трёхфазного напряжения (3 × ~220 В, 50 Гц) – более высокий (до 90...92%);
- проблемы электромагнитной совместимости (ЭМС) как на внешних зажимах источников, так и во внутренних устройствах управления. Для обеспечения необходимого уровня ЭМС на сетевом входе требуется выполнить требования существующих стандартов [3]. Дополнительно отметим, что мощные импульсные ИВЭ, как правило, имеют один мощный выход.

Основные функции, выполняемые системой управления мощных импульсных ИВЭ

В работе [4] перечислены основные функции системы управления транзисторных преобразователей, выполняемые в общем случае. Конкретизируем и дополним их применительно к современным мощным ИВЭ:
- устойчивая стабилизация выходного напряжения, тока (иногда мощности) в заданных пределах изменения входного напряжения. Для мощных импульсных ИВЭ, в зависимости от условий эксплуатации, обычно задаются следующие пределы: ~187...242 В, ±15% (~187...253 В), ±20% (~176...264 В). Гораздо реже выдвигается требование обеспечения так называемого «универсального» входа, т.е. способности сохранять работоспособность при изменении питающего напряжения в диапазоне ~85 (90)...264 В. Заметим, что в случае использования ККМ при универсальном входе основное значение для стабилизации напряжения имеет работа ККМ, а основной преобразователь работает в «комфортном» режиме. При питающей трёхфазной сети, когда ККМ не используется, универсальность питания должен обеспечивать сам преобразователь. Особенности режимов работы источника, его устройств и компонентов приведены в работах [4, 5];
- генерация повышенной частоты преобразования (коммутации силовых ключей) $f_{пр}$ = 80...250 кГц (ранее частота преобразования составляла 20...50кГц);
- формирование закона (метода) управления силовыми ключами: ШИМ или ЧИМ;
- плавное включение (пуск) и выключение ИВЭ в штатных и в некоторых нештатных режимах работы (например, несанкционированное выключение питающей сети);
- организация выполнения всего комплекса защитных мер при возникновении различных аварийных ситуаций вне источника (у потребителя) и внутри самого источника:
  – защита от токовых перегрузок на выходе источника, а также ККМ (если он есть в составе ИВЭ),
  – защита от коротких замыканий (к.з.) на выходе источника. Ввиду большой мощности источника, как правило, защита осуществляется с устойчивым запиранием силовых ключей; кроме того, при этом должен быть выдан сигнал на отключение источника от питающей сети входным пускателем,
  – защита потребителя от перенапряжений на выходе источника,
  – тепловая защита от перегрева основных силовых компонентов: силовых ключей (транзисторов), силового трансформатора и источника в целом,
  – защита от недопустимой мгновенной мощности на силовых ключах (в некоторых случаях);
- защита от:
  – недопустимого изменения входного напряжения переменного тока. Напомним, что стандартное время удержания выходного напряжения (holding time) составляет 20 мс (если не оговорено иное) и обеспечивается в основном большой ёмкостью конденсатора сетевого выпрямителя (или выходного конденсатора ККМ),
  – теплового перегрева силовых компонентов и источника в целом,
  – «небольшой» (+15...35%) токовой перегрузки (% перегрузки и время срабатывания защиты согласуются с заказчиком),
  – «небольшого» (+5...15%) перенапряжения на выходе источника (% перенапряжения и время срабатывания защиты согласуются с заказчиком); быстродействующие виды защит (быстродействие – доли/единицы микросекунд),
  – превышения входного тока ККМ,
  – превышения тока силовых транзисторов в преобразователе напряжения (ПН или DC/DC); например, для некоторых биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT) или интегрированных модулей на их основе допускается 10-кратная токовая перегрузка в течение не более 10 мкс; при этом через 5 мкс напряжение на его затворе должно быть снижено вдвое,
  – превышения мгновенной мощности силовых ключей (в зависимости от выполнения схемотехники преобразователя). Заметим, что система управления ИВЭ должна выполнять защитные функции с необходимым быстродействием и надёжностью. По времени срабатывания схемы защиты разделяются на «медленные» (десятки и сотни миллисекунд) и «быстрые»;
- выравнивание выходных токов источников при параллельной работе для получения большей мощности;
- формирование вида требуемой выходной характеристики или обеспечение требуемой зависимости максимальной выходной мощности от уровня напряжения в сети [4] – по специфике работы или по требованию заказчика;
- возможность дистанционного управления (интерфейс с системой управления верхнего уровня);
- запись и индикация некоторых режимов и параметров работы. Например, иногда требуется запись состояния сети питания (мониторинг среднего значения, а также скачков и провалов напряжения) в целях диагностики и профилактики возможных отказов и т.д. Запись состояния сети осуществляется циклически во время функционирования источника (например, каждые 8, 12 или 24 ч).

Обзор устройств управления современных мощных импульсных ИВЭ

Аналоговые системы управления. В настоящее время управление мощными импульсными ИВЭ (ККМ, ПН) все-таки в большей степени осуществля-

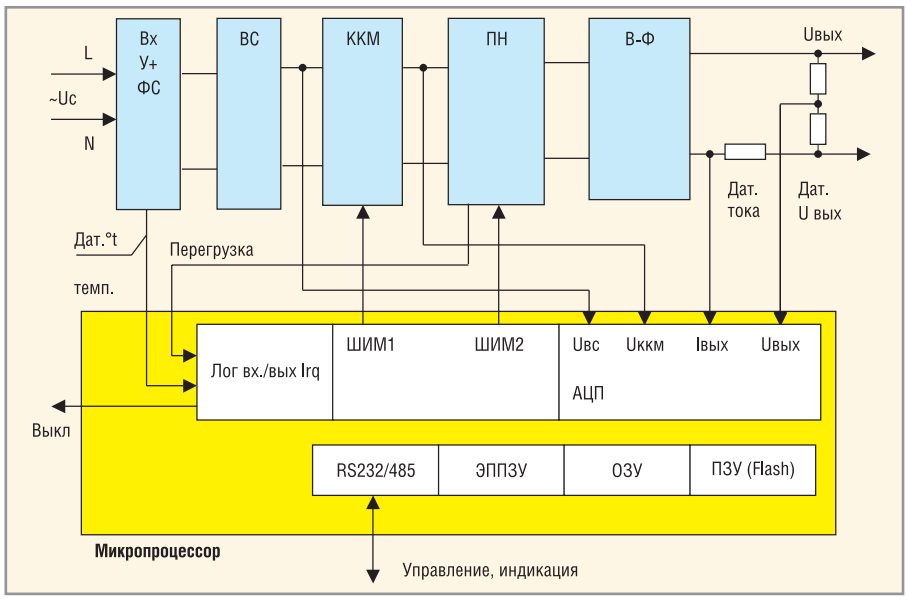


Рис. 1. Упрощённая структурная схема ИВЭ с микропроцессорным управлением

ются системами на основе аналоговых компонентов: микросхем ШИМ-, ЧИМ- и ККМ-контроллеров, операционных усилителей (ОУ), управляемых источников опорного напряжения (ИОН), компараторов, таймеров и др. Внешний интерфейс обеспечивается АЦП и ЦАП. Для повышения уровня интеграции некоторые из аналоговых микросхем выбираются многоканальными. Кратко охарактеризуем некоторые из используемых микросхем.

В числе аналоговых микросхем контроллеров нельзя не упомянуть такие ШИМ-контроллеры, как: однотактные – TDA8380 (Philips), TDA46XX (Infineon /Siemens); UC3842...UC3845 (Unitrode, сейчас в составе корпорации Texas Instruments, TI); двухтактные – TL494 (TI), UC3875, UC3879, новый ШИМ-контроллер с фазовым сдвигом UC3895 (Unitrode), SG3524 (Silicon General, SG) и др. Эти хорошо отработанные микросхемы управления импульсными ИВЭ, получившие широкое признание в мире, легли в основу многих других микросхем, в том числе отечественных КР1033ЕУ(10-16), КР1114ЕУ4 и т.п. [5].

В 1990-х появились специальные микросхемы ККМ-контроллеров типа ML4812, ML4819 (Micro Linear), MC33261, MC33262 (Motorola), UC3855 (Unitrode), а также универсального контроллера TDA16888 (Infineon/Siemens). В России были разработаны ИС ККМ-контроллеров, например, типа (КР)1033ЕУ4/6/8. Для непосредственного управления высоковольтными (500...1200 В) силовыми транзисторами (MOSFET и IGBT) были созданы новые микросхемы с умощнённым выходом – драйверы MOSFET и IGBT (IR): низкопотенциальный – IR2121, высокопотенциальные – IR2117, IR2118...R2125; двухканальный (независимые нижний и верхний каналы) – IR2113, полумостовые – IR2104, IR2105 и др. [1].

Следует отметить, что задача управления мощными ИВЭ стала упрощаться с появлением нового класса мощных полупроводниковых приборов – интеллектуальных (интегрированных) силовых модулей – Integrated Power Modules (IPM). В корпусе IPM могут быть реализованы несколько силовых транзисторов, антипараллельные диоды, выпрямительные (сетевые) мосты, датчик температуры и другие компоненты. В середине 1980-х появились интеллектуальные мощные интегральные микросхемы (Smart power), – сочетание на одном кристалле силовых элементов вместе с логическими и аналоговыми микросхемами. Например, ИС типа DG568/569 (Siliconics) содержала матрицу, состоящую из 500 ячеек КМОП-вентилей, а также восемь мощных MOSFET на 200 В. Прибор типа OM9015FS (Omnirel) может служить примером максимального функционального приближения к IPM. Он представляет собой комбинацию мощных полупроводниковых приборов в миниатюрных и герметичных толстоплёночных модулях со схемами управления.

В принципе ИС типа Smart power образовывали практически законченную схему источника питания, без моточных элементов. К сожалению, возлагавшиеся в то время на широкое применение этих ИС в импульсных источниках питания (преобразователях AC/DC, DC/DC) и в других устройствах силовой электроники большие надежды не оправдались. Фактически всё ограничилось выпуском сравнительно небольшой номенклатуры специальных устройств. Приборы Smart power несколько обогнали своё время, но их разработка и практика применения заложили основу дальнейшего развития интегрированных компонентов, в том числе IPM [1, 6, 10].

При всех достоинствах аналоговой системы управления – простоте восприятия разработчиками импульсных ИВЭ, возможности замены отдельных компонентов при выходе из строя, сравнительно небольшой стоимости, – она имеет и определённые недостатки. Прежде всего, такая система содержит большое количество компонентов, что снижает надёжность, повышает трудоёмкость в настройке и т.д. И, наконец, такое положение не стыкуется с современной тенденцией к переходу на цифровую элементную базу, т.е. к широкому внедрению компьютерной техники и программирования во всех видах электроники.

Цифровое управление, в принципе, может быть реализовано в двух вариантах [4]:

- комбинированная (смешанная) система управления;
- цифровая система управления.

В первом случае, как показано [5, 8], «медленные» задачи управления решаются цифровыми средствами (микроконтроллер). «Быстрые» задачи, требующие реализации ШИМ-управления, работающего на частотах 100...250 кГц, и некоторых видов защит от перегрузок, – аналоговыми средствами. Во втором случае цифровая система (микроконтроллер) управляет всеми функциями (и медленными, и быстрыми) импульсного ИВЭ (ККМ, DC/DC).

На рисунке 1 приведена упрощённая структурная схема ИВЭ с микропроцессорным управлением. Сетевое напряжение (220 В или в расширенном диапазоне) поступает на входное устройство ВхУ с сетевым фильтром ФС. Далее следует сетевой выпрямитель ВС, формирующий входное напряжение для активного корректора коэффициента мощности ККМ, преобразователь напряжения ПН и выпрямитель с фильтром В-Ф. Микропроцессор содержит порт аналоговых входов – многоканальный АЦП, выходные ШИМ-порты, порты логических входов/выходов,

коммуникационные порты для управления и индикации.

Кратко рассмотрим функции портов. Многоканальный АЦП (как правило, дельта-сигма-АЦП с многоканальным коммутатором на входе) принимает сигналы выходного напряжения сетевого выпрямителя $U_{вс}$, выходного напряжения корректора коэффициента мощности $U_{ккм}$, а также сигналы датчиков выходного тока и напряжения $I_{вых}$ и $U_{вых}$. Следует отметить, что все сигналы, подаваемые на АЦП, должны быть предварительно нормализованы, т.е. с помощью делителя напряжения или нормирующего усилителя приведены к рабочему диапазону входного напряжения АЦП (±10, ±5, ±2,5 В и др.). Кроме того, между узлами ИВЭ и входами АЦП желательна гальваническая развязка. Устройства нормализации и гальванической развязки на схеме не показаны. Порты ШИМ формируют соответствующий сигнал управления преобразователями ККМ и ПН. Эти сигналы определяются уставкой напряжения, поступающей, например, через коммуникационный порт, и законом регулирования, который задаёт вид обратной связи между $U_{ккм}$ и ШИМ1, а также $U_{вых}$ и ШИМ2.

Порт логических входов предназначен для приёма аварийных и статусных сигналов. На рисунке 1 в качестве примера показаны сигналы перегрева от датчика температуры и сигнал перегрузки, которые могут подаваться на входы прерываний Irq и посредством ШИМ-портов выключать ИВЭ. На практике число статусных и аварийных сигналов может быть гораздо больше.

Определённые проблемы возникают в ИВЭ с микропроцессорами при наличии двух каналов управления – локального, с передней панели, и удалённого («автоматического»), через коммуникационный порт. В качестве примера такого ИВЭ можно привести источник GEN 300-5 серии GENESYS [7] фирмы Lambda. Этот источник с выходной мощностью 1500 ВА имеет насыщенные органами управления переднюю и заднюю панели, а в среде управления – набор регистров состояния, ошибок (аварий) и запросов, доступных устройству внешнего управления, подключаемому через коммуникационный порт.

Регистр состояния содержит биты режима работы (стабилизация напряжения/тока), биты наличия/отсутствия ошибки (аварии), автозапуска, защиты и автономного режима. Регистр ошибок содержит биты: сбой электропитания, перегрев, срабатывание защиты, выключенное состояние переключателя на задней панели, отключение выхода (с передней панели) и резервные. Регистры предназначены только для чтения пользователем состояния ИВЭ через коммуникационный порт. На каждый запрос формируется ответ – квитанция SRQ. Предусмотрено распознавание ошибочной команды и сообщение об ошибке исполнения.

Рассмотрим функции памяти микропроцессора применительно к ИВЭ (см. рис. 1). ПЗУ выполняет функцию хранения исполняемой программы. В современных микропроцессорах флэш-ПЗУ разделено на два или несколько отдельных блоков. При этом один из блоков может использоваться для хранения уставок параметров. В противном случае для хранения уставок используется блок ЭППЗУ. Благодаря наличию такого блока в ИВЭ с микропроцессором могут сохраняться значения параметров при последнем выключении источника.

Блок ОЗУ используется при исполнении программ управления ИВЭ, при вспомогательных вычислениях и пр. Примером таких вычислений может служить ограничение выходной мощности. Необходимость вычислений возникает в случае, если максимальная выходная мощность ИВЭ $P_{max} < I_{max} \times U_{max}$, где I_{max} и U_{max} соответственно предельные значения тока и напряжения ИВЭ. Вычисление реального значения выходной мощности ИВЭ для сравнения с Pmax производится по данным, полученным от датчиков выходного напряжения и тока посредством АЦП. Другой пример использования вычислительных возможностей – упомянутое выше уравнивание токов параллельно включенных ИВЭ.

Описание схемы импульсного источника питания мощностью 1200 Вт (27 В/45 А) с управлением от микроконтроллера C8051F120

На рисунке 2 приведена практическая схема импульсного источника питания мощностью 1200 Вт (27 В/45 А) с управлением от микроконтроллера типа C8051F120. В основе схемы лежит импульсный ИВЭ той же мощности [1]. В доработанную схему этого источника была встроена система микропроцессорного управления. Обобщённая структурная схема источника с МП-управлением была рассмотрена выше (см. рис. 1). Со схемой МП-управления сопряжены схемы СУ1, СУ2 непосредственного управления силовыми ключами (VT1 – VT3), датчики напряжений ($Д_{Ui}$), токов($Д_{Ii}$), температуры (ДТ°). Также изображены масштабирующие усилители (У1, У2) с узлами гальванической развязки (УГР1, УГР2), необходимые из-за различия потенциалов на передающей и приёмной сторонах: высокопотенциальное (U_O) и низкопотенциальное ($U_{вых}$) напряжения. Рассмотрим подробнее состав приведённой схемы источника питания, взаимодействие его основных устройств и узлов, а также электрические параметры основных компонентов [1].

Однофазное напряжение переменного тока (~220 В, 50 Гц) поступает на входное устройство (А1), в которое включены:

- мощный терморезистор (термистор) с отрицательным температурным коэффициентом типа B57364S109M фирмы Epcos (начальное сопротивление R0 = 1 Ом ± 20%, максимальный ток 16 А), включенный последовательно для ограничения пусковых токов;
- быстродействующий варистор типа B72214S271K101 фирмы Epcos (~275 $В_{эфф.}$/430 $В_{=}$ (1 мА), максимальная энергия E_{max} = 71 Дж, максимальный ток 4500 $А_{имп.}$) включен параллельно для ограничения импульсных перенапряжений 2...4 кВ;
- сетевой фильтр вида CxLCxCy типа FN2070-10/06 фирмы Schaffner (L = 2 × 4,5 мГн, C_x = 1 мкФ, C_y = 2 × × 4,7 нФ), осуществляющий подавление электромагнитных помех со стороны сети и от самого ИВЭ;
- выпрямительный мост типа 26MB60A (IR) с обратным напряжением U_{RRM} = 600 В на выпрямленный ток I_0 = 25 А, на выходе которого образуется пульсирующее напряжение частотой 100 Гц и амплитудой 300 В (в номинальном режиме).

Конденсатор С1, включенный на выходе выпрямителя типа К73-50-500В-1,5 мкФ (4 шт. параллельно), предназначен для облегчения пуска ККМ, а также для уменьшения симметричной кондуктивной помехи.

Корректор коэффициента мощности является повышающим (до

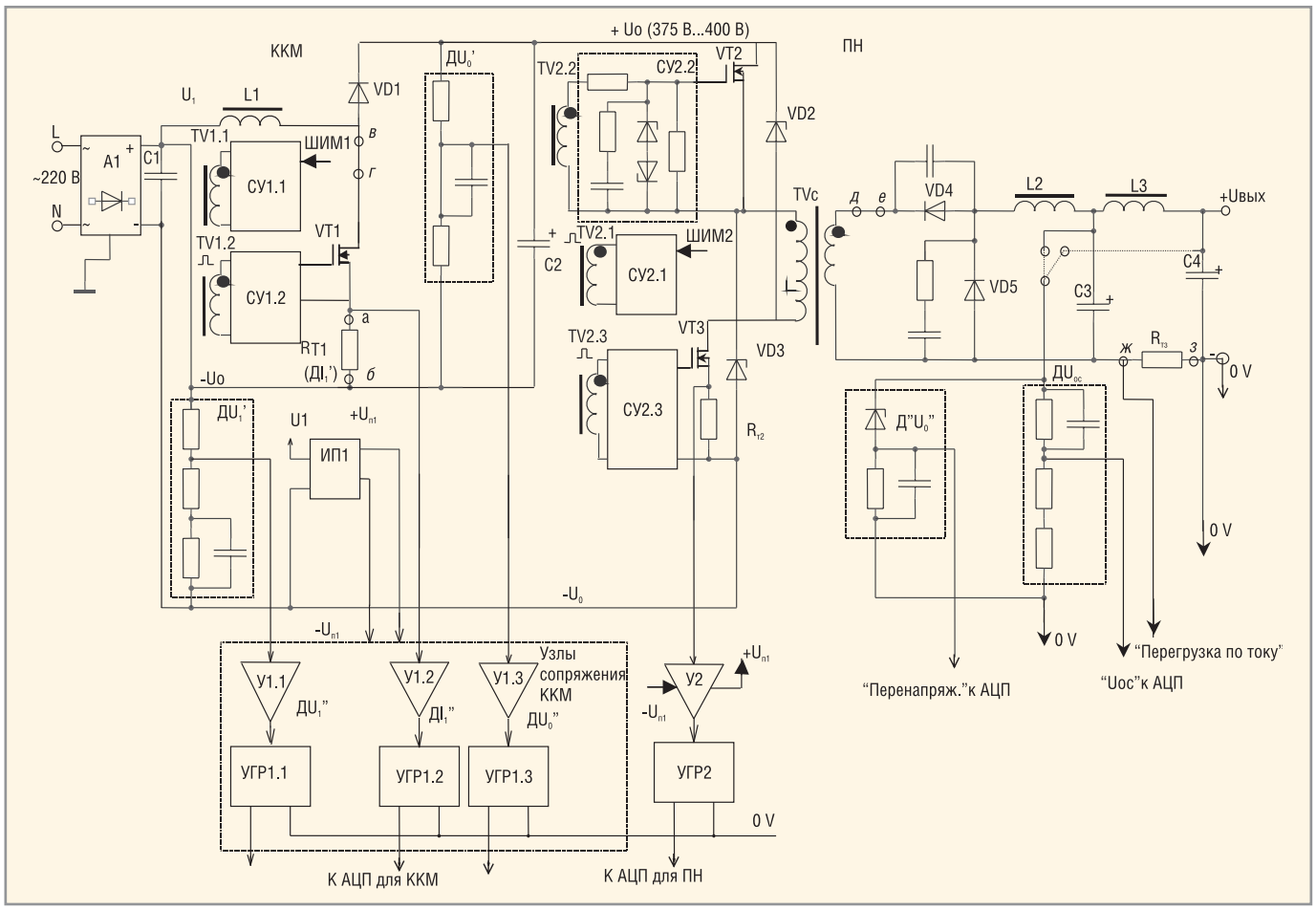


Рис. 2. Схема импульсного источника питания мощностью 1200 Вт (27 В/45 А) с управлением от микроконтроллера типа C8051F120

напряжения U_o = 375...400 В) импульсным стабилизатором выпрямленного сетевого напряжения и работает на частоте 200 кГц, обеспечивая практически синусоидальную форму потребления тока из сети (стандарты по ЭМС – EN61000-3-2; IEC 6100-3-2 и ГОСТ Р 51317.3-2-99). Основные элементы ККМ:

- силовой ключ VT1 типа IXFN48N50Q (Ixys): U_{DSS} = 500 В, I_D = 48 А, P_D = 500 Вт, $R_{DS\ on}$ = 0,1 Ом; время нарастания t_r = 22 нс, время спада t_f = 10 нс; время восстановления встроенного антипараллельного диода t_{rr} = 250 нс;
- быстродействующий бустерный диод Шоттки (SiC) VD1 типа CSD10060A (Cree): U_{RRM} = 600 В, прямой ток I_F(AV) =10 А, падение напряжения U_{FM} = 1,8 В, время восстановления обратного сопротивления (t_{rr}) – десятки наносекунд;
- накопительный дроссель L1 с индуктивностью 360 мкГн: сердечник из Mo-пермаллоя МП140 К44х28х10,3, число витков W = 55 (провод ∅1,5 мм);
- выходной буферный конденсатор C2 типа EXR (Hitano): 100 мкФ, 450 В; количество параллельно включенных конденсаторов зависит от требуемого времени удержания выходного напряжения;
- схема (СУ1.2) управления ключом VT1 реализована на основе управляющего трансформатора TV1 (вторичная обмотка TV1.2) и аналогична схеме управления СУ2.2 транзистором VT2 в основном преобразователе.

На первичную обмотку (TV1.1) трансформатора TV1 поступают импульсы от схемы (узла) управления СУ1.1. Этот узел представляет собой однотактный импульсный усилитель мощности на транзисторах или микросхеме драйвера, которые управляются от микроконтроллера (выход ШИМ1 – ККМ) импульсами с частотой 100 кГц с коэффициентом заполнения $K_з \approx 0{,}05...0{,}85$.

Типовыми датчиками для ККМ, позволяющими осуществлять режимы управления, стабилизации и защиты от перегрузок в аварийных режимах, являются:

- датчик $Д_{U1'}$ входного выпрямленного напряжения U1 – резистивный делитель U1;
- датчик тока $Д_{I1}$ – резистор RT1 в цепи истока VT1; резистор может быть заменен на трансформатор тока в цепи стока VT1 (тогда не потребуется блок УГР1.2);
- датчик $Д_{Uo'}$ выходного выпрямленного напряжения U_o – резистивный делитель.

Через устройства сопряжения – масштабирующие усилители У1.1, У1.2, У1.3, на выходе которых включены узлы гальванической развязки УГР1.1, УГР1.2, УГР1.3, – указанные датчики подключены к входам многоканального АЦП1 в микроконтроллере. В качестве масштабирующих усилителей может быть использован многоканальный ОУ, каналы которого охвачены параллельной отрицательной обратной связью (ООС) с необходимыми коэффициентами передачи. Узлы гальванической развязки удобнее всего выполнять на аналоговых оптронах, при этом последние должны иметь стабильный коэффициент передачи по току.

Рассмотрено [9] построение аналоговых оптронов на базе микросхемы HCNR200/201 фирмы Avago Technologes (см. рис. 3). Некоторые характеристики микросхемы HCNR200: нелинейность – не более 0,01%; температурный коэффициент усиления –

65 ppm/°C; полоса усиления 0...1 МГц, напряжение гальванической изоляции до 5000 В. Внутри оптрона находятся излучающий диод LED и два фотодиода PD1, PD2. Выходной ток фотодиодов прямо пропорционален излучающему потоку LED. Собственно, оптрон в малогабаритном корпусе для монтажа на поверхность обрамляется усилителем на транзисторах или микросхемах, функция которого – обеспечить необходимый уровень и высокую линейность передачи сигнала. Если же температурный диапазон эксплуатации широкий (например, 0...70°C), то можно использовать разделительные трансформаторы. В этом случае на выходе масштабирующих усилителей У1i включаются модуляторы, а на «низкой» стороне – демодуляторы.

Питание узлов сопряжения производится от вспомогательного источника питания ИП1 с выходным напряжением $+U_{п1}$ (например, 5 В), при этом минус питания соединён с отрицательной шиной $-U_O$.

Преобразователь напряжения (ПН или DC/DC) – однотактный, прямоходовый (по схеме так называемого «косого» моста), работающий на частоте 200 кГц. В «высоковольтном» (U_O = = 375...400 В) инверторе силовые МОП-ключи VT2, VT3 типа IXFN48N50Q (Ixys) работают синхронно. К их выводам сток-исток прикладывается меньшее напряжение, чем в силовом ключе ККМ. Диоды VD2 и VD3 типа 8EWF06S (IR), рекуперирующие энергию намагничивания силового трансформатора Тр.с на вход преобразователя (выход ККМ), имеют следующие параметры: U_{RRM} = 600 В, I_F (AV) = 8 А, время обратного восстановления t_{rr} = 60 нс. Силовой высокочастотный трансформатор Тр.с выполнен на ферритовом сердечнике ПК30х16 2500НМС1 с индукцией перемагничивания ΔB = 0,064 Тл при параметрах обмоток: число витков первичной обмотки W1= 66 (сопротивление R_{w1} = 0,089 Ом) и вторичной W2 = 12 (R_{w2} = 0,0036 Ом). Выходной мощный (27 В/45 А) ВЧ- выпрямитель (диоды VD4, VD5) выполнен на сильноточных сдвоенных диодах Шоттки типа 83CNQ100A (IR): U_{RRM} = 100 В, I_F (AV) = 80 А, U_{FM} = 0,67 В, имеющих наименьшее падение напряжения, которое уменьшается при нагреве.

Для ещё большего уменьшения потерь мощности на этих диодах (т.е. для повышения КПД источника) в каждом плече выпрямителя (VT4 и VT5) два диода включены параллельно. Для подавления коммутационных выбросов (импульсных перенапряжений, «пичков», «иголок») параллельно диодам включены демпфирующие RC-цепи. Сглаживающий фильтр имеет два звена. Основное звено L2C3 имеет следующие параметры: индуктивность дросселя L2 95 мкГн (две обмотки по 190 мкГн параллельно); конденсаторное звено C3 состоит из электролитического (накопительного) конденсатора EXR (Hitano) ёмкостью 470 мкФ, 63 В и двух высокочастотных конденсаторов К53-37-32В- 15 мкФ, включенных параллельно. Добавим, что дроссель выполнен на кольцевом сердечнике К44х28х10,3 из Мо-пермаллоя типа МП250; индукция перемагничивания ΔB = 0,03Тл, число витков w = 29 (провод 2 × ∅2,02 мм, R_w = 0,004 Ом).

Более высокочастотное звено L3C4 предназначено для дополнительного сглаживания пульсаций на частоте преобразования и лучшего подавления коммутационных выбросов. Второе звено, как правило, имеет значительно меньший (в 10 раз) коэффициент подавления ВЧ-пульсаций и помех, а также лучшие частотные свойства входящих в него компонентов. Полюсы частотных характеристик звеньев выходного фильтра существенно раздвинуты, и это позволяет облегчить коррекцию АЧХ преобразователя для обеспечения его устойчивой работы.

Управление работой преобразователя осуществляется следующим образом. На первичную обмотку (TV2.1) управляющего трансформатора TV1 поступают импульсы от схемы управления СУ2.1. Этот узел (как и в ККМ) представляет собой однотактный импульсный усилитель мощности, управляемый микроконтроллером (выход ШИМ2 – ПН). Частота преобразования составляет 200 кГц; поскольку преобразователь однотактный, прямоходовый, максимальный коэффициент заполнения импульсов $K_{з\,max} \le 0{,}48$ (пауза используется для размагничивания сердечника силового трансформатора Тр.с через рекуперирующие диоды VD2, VD3). С вторичных обмоток трансформатора TV2.2, TV2.3 управляющие прямоугольные импульсы синхронно поступают на схемы СУ2.2 и СУ2.3 для непосредственного управления МОП-ключами VT2 и VT3. В схеме СУ2.2 раскрыто её внутреннее устройство: последовательный резистор в цепи затвора силового МОП-транзистора; резистор, параллельный цепи затвор-исток (для пассивного запирания); защитные стабилитроны; RC-цепочка для подавления выбросов напряжения, обусловленных паразитными параметрами обмотки.

Для защиты от перегрузок в аварийных режимах предусмотрены следующие датчики:

- датчик тока $Д_{I2}$ – резистор RT2 в цепи истока VT3; резистор RT2 может быть заменен на трансформаторы тока в цепях стока VT2 и VT3 (тогда не потребуется УГР1.2 и необходимо после детектирования объединить выходы схем перегрузки или к.з. по схеме ИЛИ);
- датчик $Д_T$ (VT2, VT3) – датчик защиты от перегрева транзисторов VT2, VT3. Сигналы с датчиков соответственно через устройства сопряже-

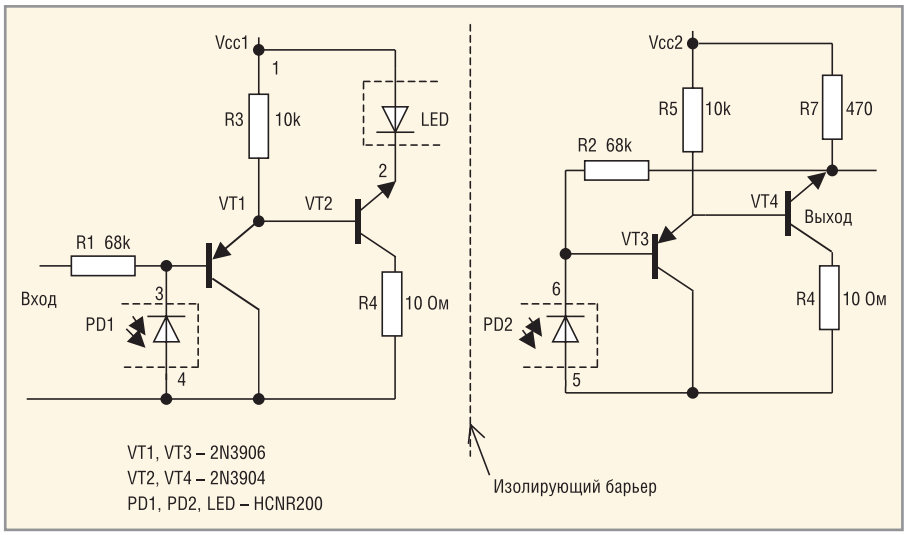


Рис. 3. Схема оптоэлектронной развязки в ИВЭ

ния (аналогично ККМ) поступают на входы многоканального АЦП в микроконтроллере (АЦП2-ПН). Отметим, что пороги срабатывания защиты и время задержки срабатывания устанавливаются программным способом. Ранее отмечалось, что при коротком замыкании на выходе время задержки срабатывания должно быть минимальным и обратно пропорциональным мощности источника питания. Питание микроконтроллера и узлов сопряжения производится от отдельного вспомогательного источника питания ИП2 с выходным напряжением $+U_{п2}$ (например, 5 В), при этом минус питания соединён с отрицательной шиной (0V – корпус).

Рассмотрим организацию режима ООС по напряжению, т.е. режима стабилизации выходного напряжения импульсного ИВЭ в целом. Напряжение ООС снимается с датчика $Д_{Uoc}$ (резистивного делителя), который может подключаться непосредственно к выходу ИВЭ после второго звена сглаживающего фильтра L3C4. В этом случае обеспечивается хорошая стабильность и при изменении сетевого напряжения, и при изменении тока нагрузки, однако затрудняется реализация устойчивости преобразователя. Если же датчик $Д_{Uoc}$ подключить к выходу первого звена фильтра L2C3, то возрастёт нестабильность по току из-за падения напряжения на сопротивлении дросселя L3 и датчика тока $Д_{I2}$ (RT3). Для ослаблениия этого нежелательного эффекта сопротивление дросселя L3 стараются сделать как можно меньше, а резистивный датчик тока заменяют на трансформаторный (на схеме не показан).

Непосредственная защита выхода источника в целом от перегрузок производится благодаря следующим датчикам:

- датчик тока $Д_{I3}$ – резистор RT3 в цепи отрицательной выходной шины (рядом с выводом 0V); резистор RT3 может быть заменен на трансформатор тока;
- датчик перенапряжений Д" > $U_{вых}$", для простоты показанный состоящим из смещающего (опорного) стабилитрона и резистора, с которого снимается сигнал перенапряжения; реально вместо стабилитрона применяется регулируемый источник опорного напряжения, например TL431;
- $Д_T$ (VD4, VD5) – датчик защиты от перегрева диодов Шоттки VD4, VD5 (в ряде случаев).

Реализация цифровой части ИВЭ

Для реализации цифровой части комбинированной системы управления пригодны любые 8- или 16-разрядные микроконтроллеры, например, серии AVR (Atmel), серии MSP (TI), PIC16-PIC18 (MicroChip) и др. Выбор микропроцессора для использования в схеме управления ИВЭ неоднозначен. Это объясняется, в первую очередь, разнообразием эквивалентных предложений. Рассмотрим перечень тех характеристик микропроцессоров, которые должны учитываться при выборе.

Во-первых, это функциональная полнота структуры. Как показано выше, микропроцессор, управляющий ИВЭ, должен иметь определённый набор функциональных узлов (см. рис. 1). Во-вторых, необходимо достаточное быстродействие микропроцессора, которое в основном (но не только) определяется его рабочей частотой. Следующим важным параметром является разрядность ШИМ, которая вместе с разрядностью встроенного АЦП определяет минимальную погрешность стабилизации, достигаемую ИВЭ с данным микропроцессором.

Частота ШИМ для ККМ и ПН в современных мощных ИВЭ должна быть порядка 50...100 кГц и выше. Разрядность ШИМ и разрядность АЦП задают погрешность цифровой стабилизации. Для получения уровня погрешности 0,1% необходим ШИМ с разрешением более 10 бит (1024 градации скважности). Разрешение АЦП, как это принято при цифровом регулировании, должно быть на один-два разряда выше, т.е. 12 бит. Особых требований к быстродействию не предъявляется, поэтому время преобразования АЦП на уровне нескольких микросекунд на канал вполне приемлемо. Ограничений по числу цифровых портов ввода и вывода практически нет. Кроме характеристик, относящихся к ИВЭ, существенны и общие соображения: доступность программного обеспечения и средств отладки, наличие подготовленных программистов и т.п.

В таблице для двух типов МП приведены некоторые характеристики, имеющие отношение к применению в ИВЭ. Это – популярный МП типа PIC16F877, примененный в [10], и i8051-совместимый МП типа C8051F120. Анализируя данные в таблице, мы видим, что PIC16F877 не обеспечивает приемлемую частоту и разрешение ШИМ, не может перепрограммироваться в схеме и менее удобен в отладке программ.

Подключение микропроцессора C8051F120 к входам/выходам ИВЭ, схема которого дана на рис. 2, показано на рисунке 4. В ИВЭ предусмотрена панель цифровой индикации и ручного управления, включающая в свой состав кнопки «+», «–», «Сброс» и цифровое табло с драйвером MAX 7221, подключаемым к последовательному порту SPI МП. Драйвер позволяет индицировать до восьми символов. На схеме условно показана индикация трёх десятичных символов. На табло могут выводиться выходное напряжение и выходной ток, уставка напряжения и уставка защиты с соответствующими идентификаторами и т.п.

Основные параметры микроконтроллеров, применяемых в схемах управления ИВЭ

№ п/п	Характеристика	Тип микропроцессора	
		PIC16F877	C8051F120
1	Тактовая частота, МГц	<20	<100
2	Максимальная частота ШИМ, кГц	15	100…200
3	Разрешение ШИМ, бит	8	9…10
4	Разрешение АЦП, бит	8 или 10	8 и 12
5	Время преобразования АЦП, мкс	14	2 и 10
6	Число каналов АЦП	8	8 × 8 бит + 8 × 12 бит
7	Объём флэш-ПЗУ программ, Кб	14	64
8	Объём ППЗУ уставок, байт	256 (ЭППЗУ)	4K (flash)
9	Порты	UART, I²C,SPI	UART(2), I²C,SPI
10	Язык программирования	MPASM, C	C
11	Порт JTAG	–	+
12	Напряжение питания, В	5	3,3

Внешнее управление осуществляется также через последовательный порт UART с драйвером MAX232 или MAX483 для организации управления по интерфейсу RS-232 или RS485 соответственно. Выходы устройств гальванической развязки УГР1.1, УГР1.2, УГР1.3, УГР2.1, выполненных, например, по уже упомянутой схеме аналогового оптрона [9], а также выходы датчиков выходного напряжения и тока соединены со входами аналогового порта AIN0.0 – AIN0.7. Питание УГР со стороны входа осуществляется, как указывалось выше, от специального служебного источника. Это же питание используется для масштабирующих усилителей У1.1, У1.2, У1.3, У2.1, назначение которых – привести сигналы к входному уровню АЦП. Для данного микропроцессора этот уровень составляет ±2,5 В. Коэффициент масштаба при выводе значения параметра на табло и в порт учитывается в программе МП.

Упрощённая блок-схема алгоритма работы микропроцессора в ИВЭ приведена на рисунке 5. Она содержит алгоритм основной программы, алгоритм подпрограммы расчёта и установки импульса ШИМ и алгоритм подпрограммы обработки прерываний (алгоритмы подпрограмм для упрощения схемы опущены). Основное тело программы по приведённому алгоритму начинается с инициализации портов и драйвера индикатора, затем устанавливается минимальная длительность импульса ШИМ. После задержки на время инициализации силовых узлов следует проверка аварий, включения ИВЭ и наличия напряжения сети, а также проверка состояния кнопок ручного управления. Перед инкрементом/декрементом уставки по кнопкам предусмотрена проверка на достижение минимальной или максимальной уставки. По кнопке «Сброс» может осуществляться вывод уставки на табло. Циклически запускается АЦП выходного сигнала и АЦП выходного напряжения ККМ, по значениям которых осуществляется регулирование изменения длительности соответствующего ШИМ. Для предотвращения «рысканья» результаты измерений АЦП по каждому каналу усредняются путём определения скользящего среднего по 32 последним значениям АЦП.

При отсутствии ручного управления происходит ожидание команды

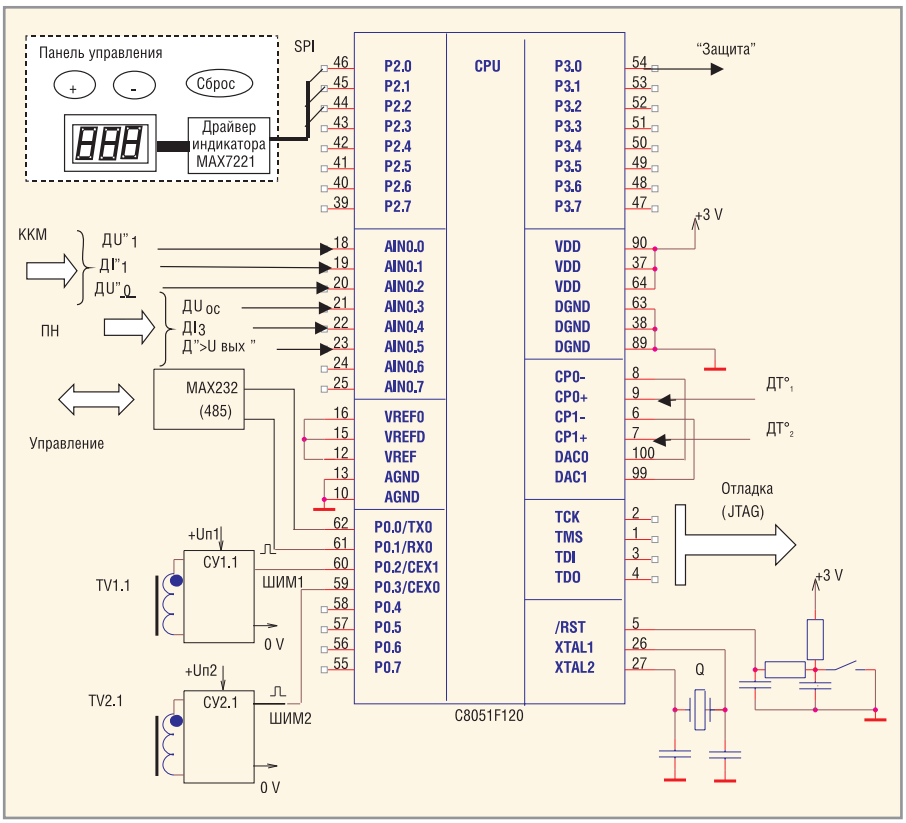


Рис. 4. Подключение микропроцессора C8051F120 к входам/выходам ИВЭ

по последовательному интерфейсу от блока внешнего управления БУ. Набор и формат команд предварительно оговорен. Программа проверяет уставку на допустимые границы и выполняет подтверждение и отработку.

Подпрограмма расчёта и установки импульса ШИМ работает как при ручном, так и при внешнем управлении. Она запускается при изменении уставки. Работа программы зависит от предварительной установки специального флага «разгона» – плавной установки выходного напряжения за заданное время от нескольких секунд до нескольких минут.

Защита по току может быть реализована в двух вариантах: «быстром» – через встроенный в процессор компаратор с управляемым от ЦАПа программируемым порогом (это показано на рис. 4) – либо «медленном» – программно, через анализ значения тока с выхода соответствующего канала АЦП. Исполнительным элементом защиты может быть либо внешний контактор, снимающий сетевое напряжение по сигналу выходного порта МП, либо выключение импульсов ШИМ, либо оба воздействия одновременно.

Заключение

1. Разработка современных импульсных источников вторичного электропитания (ИВЭ) большой мощности (более 500 Вт) представляет собой сложную техническую задачу, обусловленную рядом технических особенностей. К их числу относятся: повышенная частота преобразования (80...250кГц); невозможность подгрузки выхода; создание обязательных условий для безаварийного включения и выключения ИВЭ как в штатных, так и в нештатных (аварийных) режимах работы; наличие быстродействующей и надёжной защиты от всего комплекса перегрузок. К этому следует добавить необходимость эффективного отвода тепла от силовых компонентов и источника в целом, а также проблемы электромагнитной совместимости как на внешних зажимах источников, так и во внутренних устройствах управления;
2. С учётом публикаций [2, 4, 8] сформулированы требования к системе микропроцессорного управления мощными импульсными ИВЭ, которые необходимо учитывать в алгоритме управления такими источниками;
3. Приведена обобщённая структурная схема мощного импульсного ИВЭ (AC/DC-преобразователя) с МП-управлением. Рассмотрены особенности алгоритма управления с

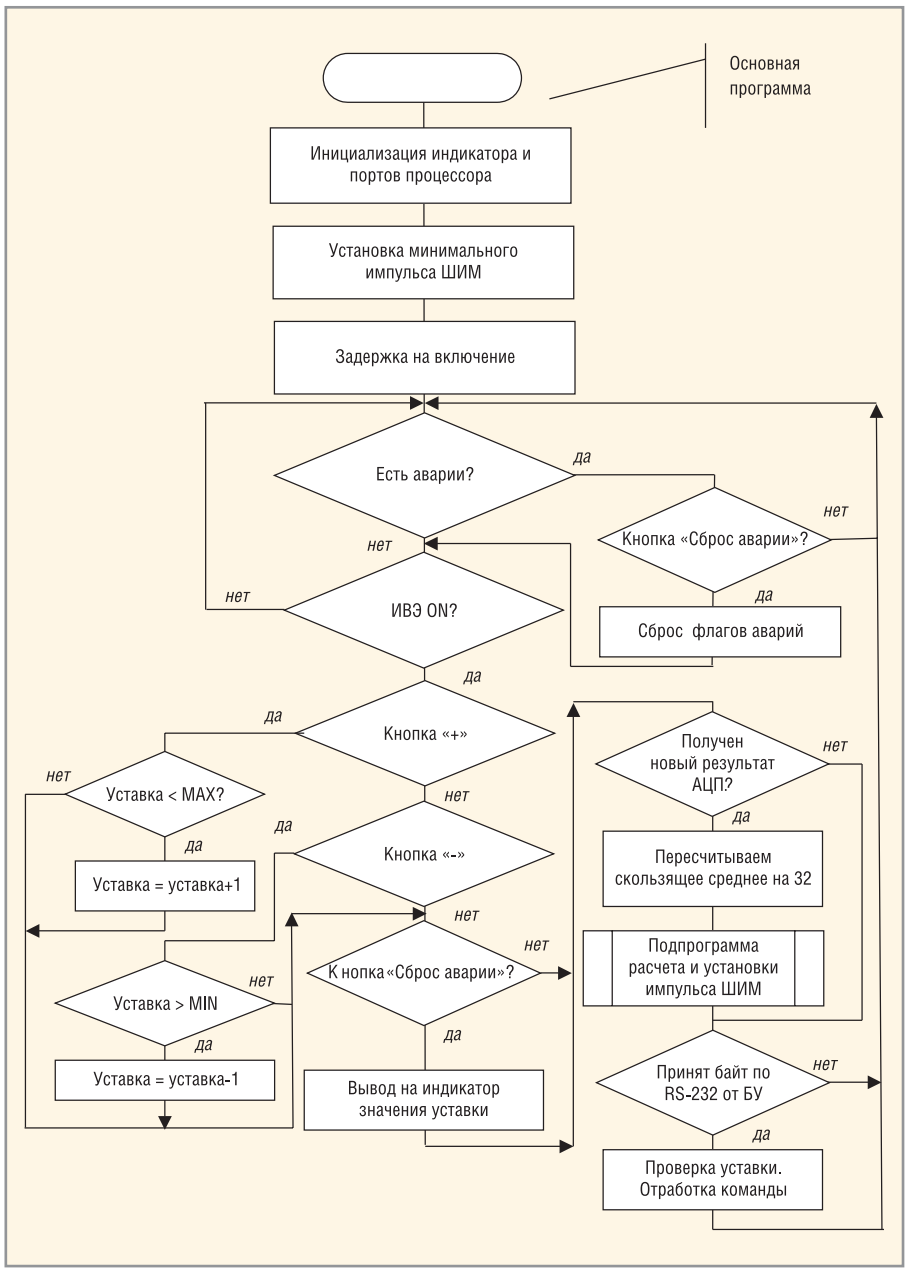


Рис. 5. Упрощённая блок-схема алгоритма работы микропроцессора в ИВЭ

микроконтроллером для мощного источника питания и требования к микроконтроллеру (с учётом п. 2): структура, максимальная тактовая частота, разрядность, функциональная полнота встроенных устройств (АЦП, ШИМ, таймеров и т. д.). На основании этого для системы МП-управления выбран конкретный микроконтроллер семейства C8051F120;

4. Приведённые положения и выводы проиллюстрированы на примере практической схемы импульсного ИВЭ мощностью 1200 Вт (27 В/45 А) с управлением от микроконтроллера C8051F120. В основе этой схемы – современный импульсный ИВЭ той же мощности [1]. В доработанную схему упомянутого источника была встроена система МП-управления. Описанный в настоящей статье импульсный ИВЭ с питанием от однофазной сети переменного тока 220 В, 50 Гц содержит в своём составе активный корректор коэффициента мощности и однотактный прямоходовый преобразователь напряжения (ПН) по схеме «косого» моста; ККМ и ПН работают на частоте 100 кГц;
5. Приведён алгоритм функционирования системы МП-управления. Его особенностями являются: два вида управления – локальное с передней панели и автоматическое через последовательный интерфейс, цифровая стабилизация выходного напряжения, цифровой контроль граничных и нештатных ситуаций, плавный «разгон» источника;
6. Авторы надеются, что настоящая статья будет полезна специалистам, занимающимся мощными импульсными ИВЭ как в части постановки задачи, так и при выработке обобщённых положений, касающихся структуры и схемной реализации. Изложенные сведения о конкретных компонентах, а также перечень публикаций, по нашему мнению, облегчат процесс проектирования подобных источников питания на современном уровне.

Авторы выражают благодарность Татьяне Евгеньевне Романовской за ценные советы при создании алгоритма микропроцессорного управления и помощь в доработке некоторых фрагментов статьи.

Литература

1. *Эраносян С.А., Ланцов В.В.* Электронные компоненты для мощных импульсных источников питания. Силовая электроника. 2006. № 2.
2. *Эраносян С.А., Ланцов В.В.* Источники бесперебойного питания: новый подход к синтезу. Силовая электроника. 2007. № 4.
3. *Ланцов В.В., Эраносян С.А.* Электромагнитная совместимость импульсных источников питания: проблемы и пути их решения. Часть 1. Силовая электроника. 2006. № 4.
4. *Мелешин В., Овчинников Д.* Применение микропроцессоров в системах управления транзисторных преобразователей напряжения. Силовая электроника. 2005. № 4.
5. *Полищук А.* Высокоэффективные источники питания высокого напряжения для радиопередающих устройств СВЧ. Силовая электроника. 2004. № 2.
6. *Ланцов В.В., Эраносян С.А.* Интегрированные компоненты – основа построения современных источников питания. Силовая электроника. 2006. № 3.
7. Программируемые низкопрофильные (1U) источники питания 750/1500 Вт Genesys. www.densei-lambda.com.
8. *Козак В.Р., Купер Э.А., Медведко А.С., Петров С.П., Веремеенко В.Ф.* Система управления источниками питания. Новосибирск: ИЯФ. http\\www.inp.nsk.su.
9. Overview of High Performance Aanalog Optocouplers. Application Note 1357. http://www.avagotech.com.
10. *Владимиров Е., Ланцов В., Лебедева О.* Высоковольтный импульсный источник питания большой мощности с управлением от микропроцессора. Современная электроника. 2007. № 6; 2008. № 1.
11. *Эраносян С., Ланцов В.* Разработка интегрированных силовых модулей и их применение в источниках вторичного электропитания. Современная электроника. 2006. № 8.

Новости мира News of the World Новости мира

Seiko разработала портативный источник энергии

Беспроводные зарядные устройства для мобильной электроники пока только находятся на стадии разработки и не готовы завоевать мировой рынок. А вот появление подобных устройств в продаже значительно облегчает жизнь рядового пользователя, ведь они делают возможным не только полный отказ от проводов, но и подзарядку встроенных аккумуляторов нескольких моделей портативной электроники, независимо от производителя, а также подзарядку одним адаптером нескольких типов аппаратов (мобильного телефона, мультимедиаплеера и пр.).

Но самое главное, что устройства для беспроводной подзарядки электронных аппаратов уже находятся на стадии изготовления рабочих прототипов, позволяющих оценить функциональность и перспективы разработок. Активно в разработку беспроводных заряжающих устройств включилась японская компания Seiko Epson, а также помогающая ей в разработках японская Murata Manufacturing. Плоды своей совместной деятельности обе компании показали на местной выставке Embedded Technology 2008.

Основными экспонатами выставки стали зарядные станции AT150 и AT25 мощностью 15,0 и 2,5 Вт соответственно. Для восстановления заряда встроенных в портативные электронные аппараты аккумуляторов, их, аппараты, необходимо просто положить сверху беспроводного адаптера. Отметим, что КПД и AT150, и AT25 составляет 70%.

Однако самое интересное ещё впереди – обе подзарядки представляют собой полностью беспроводные устройства, внутри которых располагается литий-ионный аккумулятор ёмкостью 2000 мАч. Аппараты выступают в качестве решения для промежуточного хранения энергии – посредством всё той же беспроводной технологии заряда осуществляется подзарядка встроенных батарей AT150 и AT25, которые уже затем передают накопленную энергию портативным электронным аппаратам.

Согласно представленной информации, в ближайших планах японской компании Seiko Epson уже значится серийное изготовление AT25, а вот более мощные решения AT150 будут ожидать лучших времён. Впрочем, как и ещё одна новинка – промежуточная модель с обозначением AT50 (мощностью, соответственно, 5,0 Ватт).

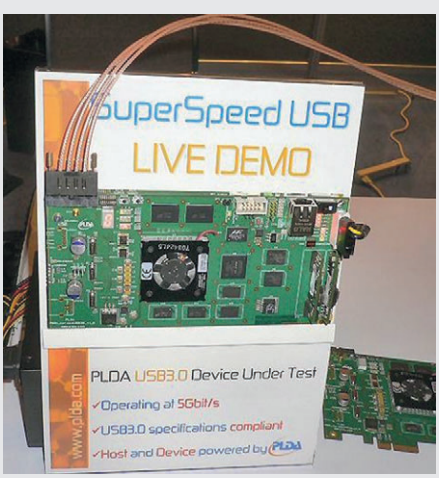
techon.nikkeibp.co.jp

Демонстрация прототипов устройств с USB 3.0

Одновременно с публикацией первой редакции спецификации USB 3.0, в Сан-Хосе (Калифорния, США) стартовала конференция SuperSpeed USB Developers Conference. В рамках этого мероприятия были рассмотрены программная и аппаратная архитектуры нового интерфейса, его достоинства по сравнению с предшественниками, кабели и коннекторы, управление питанием и другие особенности. Но самой интересной частью, пожалуй, стала демонстрация разработчиками прототипов устройств с USB 3.0.

Компания Fresco Logic разработала IP-ядра (готовые структурные блоки для микросхем) для хостов и контроллеров USB 3.0. С их использованием была спроектирована демонстрационная система на базе программируемых FPGA-микросхем Xilinx. Отметим, что на форуме Intel для разработчиков, прошедшем в Сан-Франциско в августе этого года, Fresco Logic уже демонстрировала подобную систему, которая была способна передавать данные на скорости до 350 Мб/с. Теперь же компания усовершенствовала свою разработку. Одним из ключевых новшеств стало применение коаксиального кабеля для соединения хоста и устройства.

Своё не менее интересное решение продемонстрировала и компания PLDA. Её прототип, также представляющий собой совокупность IP-ядер, реализованных на FPGA-микросхеме, был подключен к монитору. Как видно на фото ниже, скорость передачи данных составила 452 Мб/с, что ещё далеко от теоретического максимума в 600 Мб/с, но всё же очень даже неплохо на данном этапе.



Один из крупнейших разработчиков электронной автоматики, компания Synopsys, пошла ещё дальше своих коллег и продемонстрировала систему передачи несжатого Full HD-видео (1080p, 30 к/с) с помощью интерфейса USB 3.0. По заявлениям её инженеров, скорость передачи данных в этой системе превышает 450 Мб/с. Synopsys планирует добавить IP-ядра, использованные в прототипе, в свой продукт DesignWare SuperSpeed USB IP, который она начнёт поставлять заказчикам во второй половине 2009 г.

Напоследок напомним, что выход на рынок первых продуктов потребительского сегмента с USB 3.0 ожидается не ранее 2010 г.

Tech-On!

TI и Fulton работают над «беспроводным электричеством»

Североамериканская компания Texas Instruments, один из крупнейших разработчиков и производителей интегральных микросхем, и Fulton Innovation, подразделение Amway Corporation, решили объединить усилия в разработке «беспроводного электричества». Другими словами, поставили перед собой цель разработать эффективные беспроводные зарядные станции для целого спектра электронных и электрических устройств: мобильных телефонов, ноутбуков и даже более мощных аппаратов.

Базой для дальнейших исследований должна стать технология eCoupled, над которой сотрудники Fulton Innovation работают в течение уже нескольких лет. Вклад Texas Instruments будет заключаться в создании интегральных схем для конечных продуктов, позволяющих снизить такие параметры, как стоимость зарядных устройств, повысить компактность и ускорить выход готовых решений на мировой рынок. Ожидается, что первые аппараты появятся в продаже в 2009 г.

Одной из интересных особенностей будущих продуктов должна стать возможность питания сразу нескольких аппаратов одновременно, причём независимо от используемого зарядного напряжения.

Здесь же стоит упомянуть, что ранее в 2008 г. компания Fulton уже приобрела английскую компанию Splashpower, специализирующуюся на разработке «беспроводного электричества». Сумма сделки оглашена не была.

eetimes.com