

ОДНОФАЗНЫЙ АГРЕГАТ БЕСПЕРЕБОЙНОГО ПИТАНИЯ МОЩНОСТЬЮ 3 КВА

Кузькин В. И., Мелешкин В. Н., Попова Н. В., Попов К. А., Шипаева С. Н.
(Москва, ЗАО «ЭЛСИЭЛ»)

Изложены результаты исследований и разработки однофазного агрегата бесперебойного питания (АБП), состоящего из корректора коэффициента мощности, преобразователя постоянного напряжения и однофазного мостового инвертора, а также аккумуляторной батареи и зарядно-подзарядного преобразователя. Головной образец АБП прошёл всесторонние испытания в штатных и аварийных режимах, включая испытания на электромагнитную совместимость.

This is to represent the results of researching and creating the Uninterruptible Power Supply (UPS), consisting of power factor corrector, DC voltage converter, single-phase bridge inverter, battery and charging converter. The first sample of this UPS was under complete testing in working and emergency modes, including EMC testing.

Агрегаты бесперебойного питания (АБП) широко используются для электроснабжения ответственных потребителей (корпоративные информационные системы, средства связи и телекоммуникаций, специальное медицинское оборудование и др.), перерыв питания которых может привести к невозможным потерям информации или нарушениям технологии [1-2]. Качество обеспечиваемого ими электропитания характеризуется высокой стабильностью напряжения ($\pm 2\%$) и частоты ($\pm 0,1\%$) при малых искажениях ($< 5\%$) его формы. Указанные параметры реализуются при всевозможных сочетаниях внешних факторов (характер нагрузки, состояние питающей сети, климатические условия и т. п.). В частности, возможно подключение к АБП существенно нелинейных потребителей (кросс-фактор тока до 3:1, коэффициент мощности до 0,7), допустимы также широкодиапазонные колебания сетевого напряжения (до $\pm 25\%$) и частоты (до $\pm 20\%$).

При отсутствии напряжения в сети столь же качественное электропитание потребителей осуществляется от резервного источника, роль которого выполняют аккумуляторные батареи (как правило, герметичные и необслуживаемые). При этом переход с основного источника на резервный и обратно осуществляется без перерыва электропитания потребителей и ухудшения его качества, а время автономного электропитания составляет от 6-7 до 30 минут (в зависимости от мощности потребителей и ёмкости аккумуляторных батарей).

Среди прочих потребительских свойств современных АБП следует выделить высокую надёжность (наработка на отказ до 250 тысяч часов), возможность дистанционного управления и диагностирования, гальваническую развязку между потребителями и источниками, а также самотестирование при включении питания и «холодный» старт (в отсутствие сетевого напряжения), возможность замены батарейных блоков в «горячем» режиме (без перерывов электропитания потребителей), автоматическое тестирование и тренировку батарей и тому подобное.

Стремление разработчиков выполнить современные требования к АБП привело их к структуре, которая представлена на рис. 1.

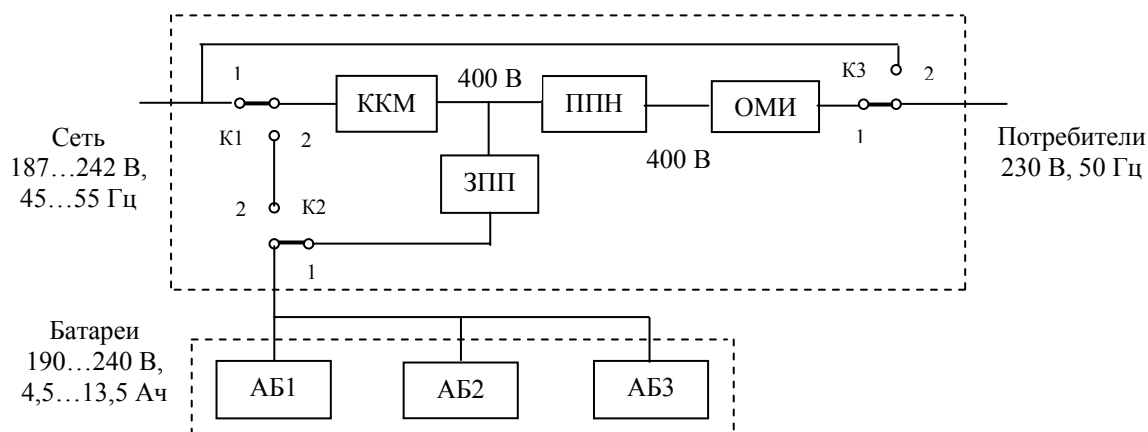


Рис. 1. Структурная схема АБП

Как видно, разработанный АБП состоит из двух блоков – системного и батарейного. Системный блок содержит в общей сложности четыре функциональных блока – корректор коэффициента мощности (ККМ), преобразователь постоянного напряжения (ППН) и однофазный мостовой инвертор (ОМИ), а также зарядно-подзарядный преобразователь (ЗПП) и коммутационную аппаратуру (К1, К2 и К3). Батареиный блок может иметь в своём составе от одной до трёх аккумуляторных батарей (АБ1 ... АБ3), соединяемых параллельно.

Перечисленными техническими средствами АБП обеспечивает три возможных режима питания нагрузки – основной, автономный и аварийный, автоматически избираемые посредством коммутационной аппаратуры. В основном режиме все коммутаторы находятся в состоянии 1, что обеспечивает выпрямление сетевого напряжения (ККМ), гальваническую развязку (ППН) и инвертирование постоянного напряжения (ОМИ) для питания потребителей, а также заряд и подзаряд аккумуляторных батарей (ЗПП). В отсутствие сетевого напряжения или при недопустимых отклонениях его параметров коммутаторы К1 и К2 переключаются в состояние 2 и АБП переходит в автономный режим питания от аккумуляторных батарей, а ККМ используется в качестве повышающего преобразователя напряжения. Если же параметры питающей сети находятся в норме, а напряжение на выходе ОМИ выходит за допустимые пределы (например, при отказе какого-либо из функциональных блоков АБП), то коммутатор К3 переходит в состояние 2 и потребители подключаются непосредственно к питающей сети (аварийный режим).

Приступая к рассмотрению функциональных блоков АБП, отметим, прежде всего, что их разработка осуществлена с учётом последних тенденций развития силовой электроники (быстродействующие транзисторы типа IGBT и MOSFET, цифровое и микропроцессорное управление) и на базе современных компьютерных технологий (математические расчёты, схемотехническое моделирование и пр.). Остановимся на особенностях схемотехнических решений, которые нашли применение при реализации названных выше блоков.

ККМ представляет собой неуправляемый мостовой выпрямитель в сочетании с обратноточным повышающим преобразователем. Он работает на частоте коммутации 65 кГц и при питании от сети реализует две функции – стабилизацию выходного напряжения на уровне 400 В (точность порядка 2%) и гармонизацию входного тока (коэффициент гармоник не более 7-8%), изменяющегося синхронно

с напряжением сети (коэффициент мощности не менее 0,97). На выходе ККМ установлены электролитические конденсаторы с эквивалентной ёмкостью 3300 мкФ, которая обеспечивает работу последующих функциональных блоков при перерывах питания ККМ продолжительностью до 20 мс, в частности, достаточной для перехода АБП из основного режима в автономный.

ППН выполнен на базе мостового инвертора и неуправляемого мостового выпрямителя со сглаживающим LC-фильтром. Он осуществляет стабилизацию выходного напряжения на уровне 400 В (точность порядка 3%) и ограничение выходного тока (на уровне 12А). На выходе ППН установлены электролитические конденсаторы с эквивалентной ёмкостью 2800 мкФ, которая обеспечивает подавление низкочастотных (100 Гц) пульсаций тока, характерных для нагрузки в виде однофазного инвертора. Гальваническая развязка в ППН обеспечивается высокочастотными трансформаторами, соединёнными параллельно-последовательно и подключёнными между упомянутыми инвертором и выпрямителем.

ППН работает на достаточно высокой частоте (порядка 60 кГц), что оказалось возможным в результате использования «мягкой» коммутации транзисторов – при близких к нулю значениях тока (включение) и напряжения (выключение). Иллюстрацией здесь могут служить показанные на рис. 2 временные диаграммы тока и напряжения на выходе инвертора ППН, полученные при компьютерном моделировании его номинального режима.

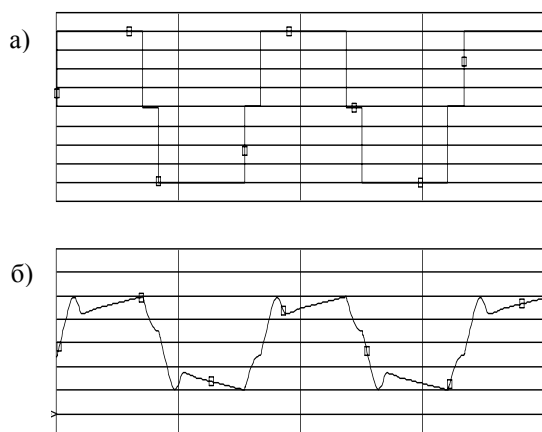


Рис. 2. Напряжение (а) и ток (б) первичной обмотки трансформатора (10 мкс/дел., 500 В/дел., 20 А/дел)

Как видно, относительная ширина импульсов напряжения близка к единице (пауза составляет около 1 мкс при полупериоде более 8 мкс). В кривой тока можно выделить две составляющие – прямоугольную (приведенный ток нагрузки порядка 6 А) и треугольную (ток намагничивания с пиковым значением около 4 А). Особенностью кривой тока является кратковременный импульс на переднем фронте (длительность 2 мкс, амплитуда 10 А), посредством которого в высокочастотных конденсаторах (на выходе выпрямителя ППН) осуществляется запас энергии, которая используется для питания его нагрузки при выключении транзисторов.

ОМИ формирует на выходе гармоническое напряжение, обеспечивая стабилизацию его действующего значения на уровне 230 В (статическая точность порядка 2 %) и ограничение мгновенного значения выходного тока (максимум 50 А). Он также выполнен на базе мостового инвертора, но в сочетании с симметричным LC-фильтром нижних частот (характеристическое сопротивление 8 Ом, резонансная частота 4 кГц), эффективно подавляющим пульсации напряжения на частоте широтно-импульсной модуляции (40 кГц). Особенность избранного алгоритма управления ОМИ состоит в том, что на каждом из четырёх временных интервалов (продолжительностью по 5 мс), с частотой модуляции коммутируется лишь одно плечо инвертора. При этом в другом плече один из транзисторов постоянно открыт, а второй – закрыт. Такой алгоритм обеспечивает существенное

снижение суммарных тепловых потерь и равномерное распределение их между транзисторами.

ЗПП представляет собой обратноходовой понижающий преобразователь, работающий на частоте 100 кГц. Он рассчитан на использование необслуживаемых аккумуляторных батарей (напряжение 220 В, ёмкость 4,5 Ач) и реализует два из трёх характерных режимов их эксплуатации – зарядку с ограничением тока на уровне 1 А и подзаряд со стабилизацией напряжения на уровне 242 В. Иллюстрацией работы ЗПП в режиме зарядки батареи (ток 1 А, напряжение 220 В) могут служить временные диаграммы тока дросселя и напряжения на диоде, полученные при компьютерном моделировании и показанные на рис. 3.

Как видно, напряжение на диоде имеет прямоугольную форму, причём высота импульса соответствует напряжению (400 В) на выходе ККМ, а его ширина составляет 5,5 мкс. При этом ток в сглаживающем дросселе, индуктивность которого равна примерно 35 мГн, имеет размах пульсаций около 30 мА, что составляет всего лишь 3% от его постоянной составляющей (1 А).

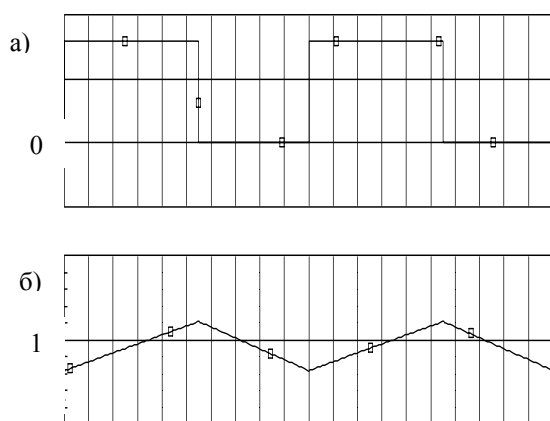


Рис. 3. Напряжение на диоде (а) и ток дросселя (б) ЗПП в режиме зарядки батареи (4 мкс/дел., 250 В/дел., 50 мА/дел.)

Особенностью разработанного АБП является также своеобразное построение систем управления его функциональными блоками. В частности, ККМ управляется специализированным ШИМ-контроллером, а управление ППН, выполненное с использованием программируемой логики, интегрировано в силовую печатную плату. Система управления, разработанная на базе микропроцессора, формирует управляющие импульсы для силовых ключей ОМИ и ЗПП, а также осуществляет контроль входных и выходных напряжений во всех функциональных блоках.

Результаты схемотехнической проработки функциональных блоков АБП послужили исходными данными для разработки конструкторской документации и последующего изготовления опытных образцов.

Конструктивно системный и батарейный блоки АБП оформлены в металлических корпусах (класс защиты IP32), устанавливаемых один на другом. Их внешний вид показан на рис. 4.

Как видно, на передней стороне системного блока размещены элементы индикации (на мнемосхеме) и информационный разъём (вверху), входной автоматический выключатель, розетка для подключения потребителей, сетевой шнур питания, болт заземления и разъём с кабелем для подключения батарейного блока. Каждый из батарейных блоков снабжён автоматическим выключателем и двумя силовыми разъёмами, расположенными спереди, предназначенными для параллельного соединения аккумуляторных батарей и подключения их к системному блоку.



Рис. 4. Внешний вид АБП

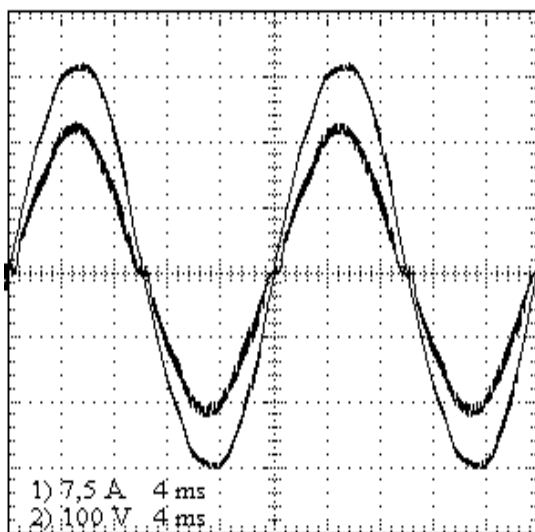


Рис. 5. Ток и напряжение на входе АБП в установившемся номинальном режиме

Размеры системного блока составляют 300 мм (ширина), 400 мм (высота) и 470 мм (глубина), а его масса не превышает 30 кг. Батарейный блок, предназначенный для установки одной аккумуляторной батареи, имеет такие же ширину и глубину, но отличается высотой (120 мм) и массой (до 40 кг).

Экспериментальные исследования головного образца АБП в целом подтвердили достоверность избранных схемотехнических решений и алгоритмов функционирования. Остановимся на некоторых из полученных результатов.

На рис. 5 показаны осциллограммы напряжения и тока на входе АБП, соответствующие установившемуся режиму при номинальной нагрузке. Как и следовало ожидать, ток изменяется во времени практически по гармоническому закону и синхронно с напряжением. Так как амплитуды напряжения и тока составляют соответственно 315 В и 17 А, то входная мощность при этом получается равной 2680 Вт.

Анализ частотных спектров приведенных кривых подтверждает, что их искажения весьма незначительны: коэффициенты гармоник входных напряжения и тока равны соответственно 2,5% и 7,2%.

Подобным же образом в установившихся режимах были исследованы напряжение и ток на выходе АБП, причём как при линейной, так и при нелинейной нагрузке. В последнем случае нагрузкой (2100 Вт) служил диодный мост, к выходу которого были подключены реостат (45 Ом) и конденсатор (2200 мкФ), соединённые параллельно. Выходной ток при этом имел существенно искажённую форму – при длительности импульса порядка 3 мс (в пределах полупериода основной гармоники) его максимальное значение достигало 40 А (коэффициент гармоник порядка 120%). Тем не менее искажения выходного напряжения оказались весьма незначительными (коэффициент гармоник около 4,5%).

Динамические свойства АБП были исследованы в переходных процессах, связанных с коммутацией различного вида нагрузок. Подключение линейной нагрузки (реостат с сопротивлением 25 Ом) сопровождается переходным процессом, в которых можно выделить две фазы – быструю и медленную. Быстрая фаза характеризуется электромагнитными процессами в силовых цепях инвертора (главным образом, в элементах выходного LC-фильтра) и проявляется импульсным искажением формы выходного напряжения – уменьшение мгновенного значения примерно на 50 – 70 В восстанавливается в течение 1 мс. Медленная фаза, напротив, обусловлена инерционностью системы управления (преимущественно, в блоке ОМИ) и связана со стабилизацией действующего значения напряжения (10%-ное отклонение обрабатывается в течение 20-30 мс).

Иначе протекают электромагнитные процессы в АБП при отключении нагрузки. Подтверждением тому могут служить осциллограммы тока и напряжения на выходе АБП, полученные при коммутации упомянутой выше нелинейной нагрузки и приведенные на рис. 6.

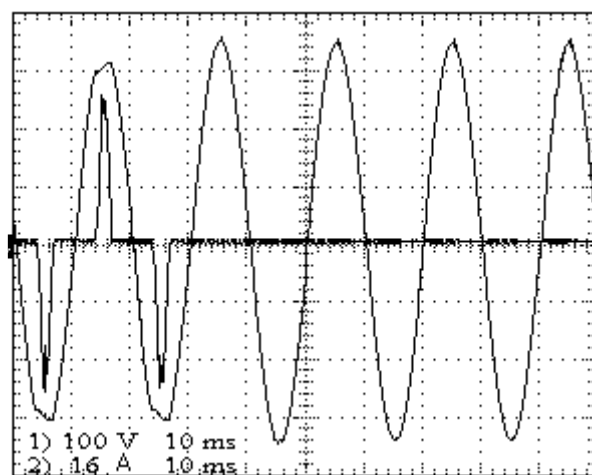


Рис. 6. Выходные напряжение и ток АБП при отключении нелинейной нагрузки

Как видно, под нагрузкой амплитуда выходного напряжения составляет примерно 310 В. При отключении нагрузки амплитуда в течение 10 мс возрастает до 340 В, увеличиваясь почти на 10%, а восстановление номинального значения (325 В) происходит через 150 – 180 мс.

В ходе испытаний образца АБП был исследован также аварийный процесс, обусловленный отказом одного из его функциональных блоков. С этой целью в номинальном режиме прерывалась подача импульсов от системы управления

ОМИ на его транзисторы. В результате напряжение на нагрузке практически скачком уменьшалось до нуля, а затем примерно через 10 мс восстанавливалось на уровне, соответствующем напряжению сети.

Электромагнитная совместимость с питающей сетью и потребителями обеспечивается в АБП помехоподавляющими фильтрами, установленными на входе и на выходе. Эти фильтры разработаны в ЗАО «ЭЛСИЭЛ» с учётом зарубежного опыта – в качестве аналога использован двухзвенный радиочастотный фильтр фирмы EPCOS. Эффективность разработки проверена испытаниями опытного образца АБП с оценкой создаваемых им кондуктивных помех (в сеть и в нагрузку), а также пространственного излучения (по вертикальной и горизонтальной составляющим).

Измерения кондуктивных помех, создаваемых на выходе АБП контролировались двумя способами – по квазипиковым (QP) и усреднённым (AV) значениям. Сравнение полученных результатов с требованиями ГОСТ Р50745-99 показывает, что во всём диапазоне частот (от 0,15 до 30 МГц) кондуктивные помехи имеют допустимый уровень во всех диапазонах контролируемых частот. Аналогичный результат получен и при измерении пространственного излучения АБП. В

контролируемом диапазоне частот (от 30 до 1000 МГц) вертикальная составляющая напряжённости поля зафиксирована на приемлемом уровне (от 30 до 45 дБ).

Следует отметить, что конструктивно АБП выполнен в сейсмостойком исполнении и рассчитан на работу при воздействиях до 9 баллов по шкале Рихтера (на отметке 42 м). Кроме того, работоспособность АБП обеспечивается при температурах окружающего воздуха до +50°C без применения внутренних и внешних вентиляторов.

Итоги проведенных испытаний, отчасти изложенные выше, позволяют заключить о соответствии разработанного АБП исходным техническим требованиям. Аналогичный вывод сделан и межведомственной приёмочной комиссией, которая ознакомилась с головным образцом АБП и протоколами его испытаний, а также с сопутствующей конструкторской и эксплуатационной документацией. В настоящее время освоено серийное производство этих изделий.

Список литературы

1. Статические агрегаты бесперебойного питания / Г.Г. Адамия, Е.И. Беркович, А.С. Картавых и др.; Под ред. Ф.И. Ковалёва. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 288 с.: ил.
2. Н. Pinheiro, Р.К. Jain, G. Joos, “A Comparison of UPS for Powering Hybrid Fiber/Coaxial Networks”, IEEE Trans. Power Electron., vol. 17, pp. 389 – 397, May 2002.