

# Структура и алгоритмы

## функционирования системы управления ИБП серии ДПК

**В статье рассмотрены вопросы построения и алгоритмы функционирования системы управления ИБП серии ДПК на базе микроконтроллера MC68HC908MR32**

**Валерий Климов, к. т. н.  
Владимир Зуенко**

**И**сточник бесперебойного питания (ИБП) предназначен для надежной защиты электрооборудования пользователя от любых неполадок в сети, включая искажение или пропадание напряжения сети, а также для подавления высоковольтных импульсов и высокочастотных помех, поступающих из сети. Источник бесперебойного питания с двойным преобразованием энергии обладает наиболее совершенной технологией по обеспечению качественной электроэнергии без перерывов в питании нагрузки при переходе с сетевого режима (питание нагрузки энергией сети) на автономный режим (питание нагрузки энергией аккумуляторной батареи), и наоборот. Обеспечивая синусоидальную форму выходного напряжения, такие ИБП используются для ответственных потребителей электроэнергии, предъявляющих повышенные требования к качеству электропитания.

Разнообразие топологии и структурное построение ИБП рассмотрены в ряде работ [1, 2, 3]. Одним из примеров современных ИБП малой мощности (1–3 кВА) являются ИБП серии ДПК [4]. В состав силовой цепи ИБП входят блок реле, зарядное устройство (ЗУ), корректор коэффициента мощности (ККМ), преобразователь постоянного напряжения (ППН) и инвертор. Рассмотрим структуру и алгоритмы функционирования системы управления ИБП с использованием микроконтроллера MC68HC908MR32 [5].

### Режимы работы ИБП

В зависимости от состояния сети и величины нагрузки ИБП может работать в различных режимах: сетевом, автономном, байпас и других.

**Сетевой режим** — режим питания нагрузки энергией сети.

При наличии сетевого напряжения в пределах допустимого отклонения и нагрузки, не превышающей максимально допустимую, ИБП работает в сетевом режиме. При этом режиме осуществляется:

- фильтрация импульсных и высокочастотных сетевых помех;
- преобразование энергии переменного тока сети в энергию постоянного тока с помощью выпрямителя и схемы коррекции коэффициента мощности;
- преобразование с помощью инвертора энергии постоянного тока в энергию переменного тока со стабильными параметрами;

- подзарядка АБ с помощью зарядного устройства. При перегрузке более 110% через определенное время ИБП переходит в режим байпас (БП). При снятии перегрузки ИБП автоматически возвращается в нормальный сетевой режим с двойным преобразованием энергии.

**Автономный режим** — режим питания нагрузки энергией аккумуляторной батареи.

При отклонении параметров сетевого напряжения за допустимые пределы или при полном пропадании сети ИБП мгновенно переходит на автономный режим питания нагрузки энергией аккумуляторной батареи (АБ) через повышающий преобразователь DC/DC (ППН) и инвертор. При остаточной емкости АБ менее 20% ИБП автоматически перестанет работать для исключения недопустимого разряда АБ. При восстановлении напряжения сети ИБП автоматически перейдет в сетевой режим.

**Режим байпас (БП)** — режим питания нагрузки напрямую от сети.

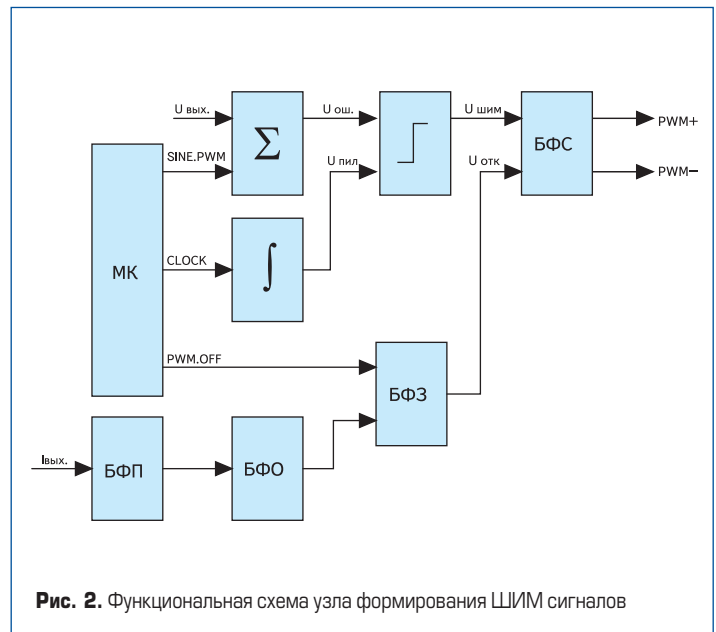
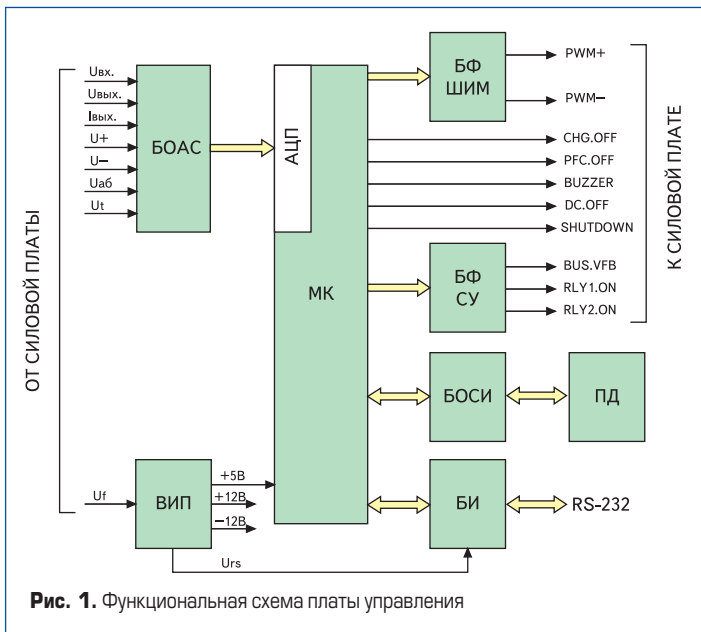
Если при сетевом режиме происходит перегрузка или перегрев ИБП, а также если один из узлов ИБП выходит из строя, то нагрузка автоматически переключается с выхода инвертора напрямую к сети. При снятии причин перехода в БП (перегрузки или перегрева) ИБП автоматически возвращается в нормальный сетевой режим с двойным преобразованием энергии.

**Режим заряда батареи** возникает при наличии сетевого напряжения и включенном ИБП. Зарядное устройство будет обеспечивать заряд батареи независимо от того, включен ли инвертор или присутствует режим БП.

**Режим автоматического перезапуска ИБП** возникает при восстановлении сетевого напряжения, если до того ИБП работал в автономном режиме и был автоматически отключен внутренним сигналом во избежание недопустимого разряда батареи. После появления входного напряжения ИБП автоматически включится и перейдет на сетевой режим.

**Режим холодного старта** обеспечивает включение ИБП для работы в автономном режиме при отсутствии сетевого напряжения путем прямого включения инвертора.

Указанные режимы работы ИБП возникают при соответствующих сигналах управления от микроконтроллера платы управления.



**Описание платы управления ИБП**

Плата управления обеспечивает необходимый алгоритм работы силовой платы ИБП, тестирование состояния узлов и мониторинг работы ИБП, выполняя три основные функции:

- контроль и регулирование;
- защиту;
- сигнализацию.

По функциональному назначению можно выделить следующие узлы и цепи в составе платы управления (рис. 1):

- микроконтроллер (МК);
- цепи измерения аналоговых сигналов (напряжение и частота сети, напряжение и частота инвертора, ток нагрузки, напряжения шины постоянного тока, напряжение АБ, температура ИБП);
- блок формирования сигналов управления силовыми транзисторами инвертора (БФ ШИМ);
- цепи формирования сигналов управления и обратной связи ППН и ККМ (БФСУ);
- цепи индикации и обработки нажатия кнопок управления платы дисплея (ПД);
- блок интерфейса RS-232 (БИ);
- вспомогательный источник питания цепей платы управления и МК (ВИП).

Блок-схема узла формирования ШИМ-сигналов управления силовыми транзисторами инвертора приведена на рис. 2.

Опорная модифицированная синусоида, синхронизированная по частоте и фазе с сетевым напряжением (SINE PWM), формируется МК и поступает на сумматор — усилитель ошибки. На другой вход сумматора поступает сигнал обратной связи, пропорциональный выходному напряжению инвертора ( $U_{\text{вых}}$ ). Сигнал ошибки ( $U_{\text{ош}}$ ) поступает на один вход компаратора, на второй вход которого подается пилообразное напряжение с интегратора ( $U_{\text{пил}}$ ). Вход интегратора тактируется синхриимпульсами с частотой, равной частоте коммутации транзисторов инвертора 19,2 кГц (CLOCK). Сформированный ШИМ-сигнал ( $U_{\text{шим}}$ ) поступает на блок формирования комплементарной пары сигналов

ШИМ (БФС) для управления поочередно верхним (положительным PWM+) и нижним (отрицательным PWM-) транзисторными плечами инвертора. На второй вход этого блока поступает сигнал запрета формирования ШИМ-сигналов ( $U_{\text{отк}}$ ) при наличии аварии ИБП или перегрузки инвертора. Цепь формирования сигнала запрета содержит блок формирования сигнала о превышении выходного тока (БФП), блок формирования сигнала отключения инвертора по перегрузке (БФО) и блок формирования сигнала запрета работы инвертора (БФЗ). На блок формирования сигнала запрета поступает также сигнал на отключение инвертора при неисправности в ИБП (PWM.OFF), формируемый МК.

На АЦП-входы МК поступают следующие аналоговые сигналы (рис. 3).

1. Положительное и отрицательное напряжения шины постоянного тока (+BUS.V, -BUS.V).
2. Напряжение батареи (BAT.V).
3. Напряжение сети электропитания (LINE.V).
4. Выходной ток инвертора (LOAD.C).
5. Температура силовых транзисторов инвертора (TEMP).
6. Выходное напряжение инвертора (INV.V).

На входы счетчиков МК поступают сигналы об изменении полярности напряжения питающей сети (LINE.ZERO) и напряжения инвертора (INV.ZERO), сформированные операционными усилителями (ОУ) цепей измерения. Путем подсчета количества импульсов в секунду определяется частота сети и инвертора, а также производится автоподстройка частоты и фазы инвертора к частоте и фазе напряжения питающей сети.

На цифровые входы МК поступают следующие сигналы (рис. 3):

1. Сигнал корректности подключения проводников фазы и нейтрали питающей электросети (L/N).
2. Сигнал выключения инвертора с платы дисплея (кнопка «Выкл») SW.OFF; сигнал включения инвертора с платы дисплея (кнопка «Вкл») SW.ON.

МК формирует следующие сигналы управления (рис. 3):

1. Вкл/выкл ЗУ (CHG.OFF).
2. Вкл/выкл ППН (DC.OFF).
3. Вкл/выкл ККМ (PFC.OFF).
4. Сигнал управления входным реле (RLY1.ON).
5. Сигнал отключения вторичного источника электропитания (для отключения ИБП в автономном режиме работы) SHUTDOWN.
6. ШИМ-сигнал, преобразуемый интегратором на ОУ в аналоговый сигнал обратной связи для схемы управления шиной постоянного тока (ППН и ККМ) BUS.VFB.
7. Сигнал управления выходным реле (RLY2.ON).
8. Сигнал включения зуммера (BUZ.ON).
9. Сигнал запрета работы инвертора (PWM.OFF).

**Структура микропрограммы МК**

При включении питания микропрограмма производит первичную проверку узлов ИБП и инициализирует внутренние блоки МК для выполнения заданных функций, после чего переходит к выполнению процедур (подпрограмм) в главном цикле программы.

Вызов процедур, таких как измерение параметров на аналоговых входах АЦП, формирование сигналов обратной связи шины постоянного тока, ШИМ-сигналов управления силовыми транзисторами инвертора, требующих запуска через точно определенные про-

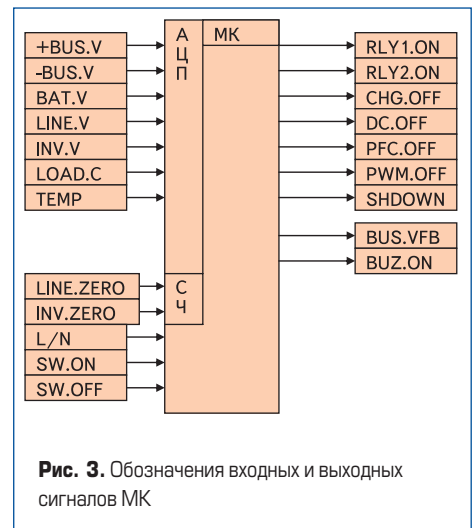


Рис. 3. Обозначения входных и выходных сигналов МК

межутки времени, производится при помощи внутренних аппаратных прерываний, генерируемых встроенными таймерами МК. Обработка прерываний имеет наивысший приоритет по отношению к главному циклу программы.

Подпрограммы обмена данными по RS-232 и индикации имеют наименьший приоритет и выполняются в последнюю очередь. Остальные подпрограммы вызываются по мере необходимости и выполняются в главном рабочем цикле микропрограммы.

Рассмотрим алгоритмы контрольных операций, выполняемых МК.

### Измерение действующих величин напряжения и тока

Определение действующих значений напряжений инвертора и сети, а также тока нагрузки производится путем серии измерений их мгновенных (амплитудных) значений: для напряжения — 64 раза за период, тока — 128 раз за период, с последующим вычислением среднеквадратических значений:

$$U = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N u_n^2}{N}},$$

$$I = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{2N} i_n^2}{2N}},$$

$$N = \frac{T}{\Delta t} = \frac{20 \text{ мс}}{0,3125 \text{ мс}} = 64,$$

где  $N$  — число дискрет (выборок) измерения электрических величин за период основной частоты напряжения инвертора или сети;  $n$  — текущий номер дискреты.

### Автоподстройка частоты и фазы напряжения инвертора к напряжению сети

При нахождении частоты сетевого напряжения в диапазоне  $F_{\text{НОМ}} \pm 4$  Гц МК обеспечивает синфазную работу инвертора и сети. Соответствие частоты и фазы напряжения необходимо при переходе из автономного режима инвертора в сетевой, а также при переводе питания нагрузки с байпас на инвертор и обратно.

Автоподстройка частоты и фазы напряжения инвертора производится по результатам измерения частоты и фазы напряжений инвертора и сети по окончании каждого периода выходного напряжения инвертора. За один период частота инвертора может быть увеличена или уменьшена на 0,01 Гц, что составляет максимальную скорость изменения частоты 0,5 Гц/с.

### Проверка качества входного напряжения

1. Проверка на пониженное напряжение осуществляется каждые 4 мс на основе анализа суммы 16 последних измерений (1/4 периода) мгновенного значения сетевого напряжения за его период. Производится для

оперативного реагирования на недопустимое снижение напряжения и служит основанием для переключения с сетевого режима работы ИБП в автономный режим.

2. Проверка на чрезмерно высокое мгновенное значение напряжения осуществляется 64 раза за период сетевого напряжения. При обнаружении мгновенного (амплитудного) значения более 420 В (что соответствует прогнозируемому действующему значению  $300 \pm 5$  В) в течение 4 последовательных измерений производится перевод ИБП в автономный режим для защиты цепей ККМ от опасно высокого значения напряжения.
3. Проверка действующего значения входного напряжения на разрешенный диапазон работы в режиме БП осуществляется 1 раз за период. Допустимые значения напряжения могут быть установлены потребителем в зависимости от характера подключенной нагрузки. Заводская установка соответствует  $\pm 15\%$ .
4. Проверка действующего значения входного напряжения на разрешенный диапазон работы в сетевом режиме производится 1 раз за период. Входное напряжение сравнивается с таблицей константных значений, отражающих зависимость минимального и максимального допустимого напряжения от величины текущей нагрузки:
  - при нагрузке менее 50%: 118–300 В;
  - при нагрузке более 50%, но менее 75%: 140–300 В;
  - при нагрузке более 75%: 160–300 В.
5. Проверка частоты входного напряжения нахождение в установленном диапазоне рабочих частот (46–54 Гц) осуществляется с интервалом 16 мс. При выходе частоты входного напряжения за данный диапазон ИБП переключается на автономный режим работы.

### Проверка напряжения шины постоянного тока

Эта проверка проводится каждые 16 мс. Если напряжение на положительной или отрицательной шинах превышает максимально допустимое значение (440 В), то через определенное время, но не более чем через 4 с, произойдет отключение ККМ в сетевом режиме или ППН в автономном режиме. Проверка предназначена для защиты электролитических конденсаторов шины постоянного тока (максимальное паспортное напряжение 450 В).

### Проверка напряжения АБ

Расчет текущего значения напряжения АБ производится каждые 32 мс путем вычисления среднего арифметического от суммы из 100 измерений напряжения, произведенных в интервале между вызовами подпрограммы.

$$U_{\text{АБ}} = \frac{\sum_{n=1}^{100} u_n}{100}.$$

Далее рассчитанное напряжение АБ проходит следующие проверки.

1. Проверка на чрезмерный заряд АБ производится в сетевом режиме работы. При напряжении ячейки АБ выше 2,4 В отключается зарядное устройство и ИБП переходит в автономный режим работы. Индикаторы платы дисплея сигнализируют об аварийной ситуации.
2. Проверка на низкий уровень заряда АБ производится в автономном режиме работы. Напряжение АБ сравнивается со значением из таблицы, зависящим от текущей величины нагрузки ИБП (в интервале значений напряжения на ячейку от 1,92 до 1,78 В). При падении напряжения АБ ниже указанного значения ИБП оповещает потребителя о низком уровне заряда и предстоящем отключении нагрузки — индикатор АБ начинает мигать, интервал между звуковыми сигналами уменьшается в 2 раза.
3. Проверка АБ для защиты от глубокого разряда производится в автономном режиме работы. Напряжение АБ сравнивается со значением из таблицы, зависящим от текущей величины нагрузки ИБП (в интервале значений напряжения на ячейку от 1,87 до 1,68 В). При падении напряжения АБ ниже данного значения ИБП немедленно отключается.

### Проверка условий перехода с автономного на сетевой режим

Проверка осуществляется каждые 32 мс. Безусловный переход разрешен при выполнении следующих условий:

- значение частоты сети внутри допуска отклонения частот;
- значение напряжения сети в поле рабочего диапазона;
- наличие синхронизации частот сети и выходного напряжения;
- отсутствие чрезмерного заряда АБ.

### Проверка температурного режима

Данная проверка предназначена для защиты силовых транзисторов инвертора от выхода из строя по причине перегрева, осуществляется по показаниям датчика температуры 2 раза в секунду. При превышении  $+90$  °С инвертор выключается и ИБП переходит в режим БП.

### Защита от перегрузки

В системе управления ИБП реализованы два способа защиты от перегрузки.

1. Защита от длительной перегрузки. Через определенное время перегрузки МК отключает инвертор (сигнал PWM.OFF), переключая питание нагрузки на цепь БП при работе в сетевом режиме либо отключая нагрузку при работе в автономном режиме:
  - через 30 с, если выходная мощность достигает 110% номинальной мощности;
  - через 200 мс, если перегрузка более 130%;
  - немедленно, если перегрузка более 150%.
2. Циклическая токовая защита при импульсной перегрузке (оценивается высокое значение тока за короткое время). Блок БФП

независимо от МК формирует сигнал запрета импульсов управления IGBT инвертора (рис. 1). Выходное реле в этом случае остается включенным на нагрузку, если не возникают продолжительная перегрузка или неисправность инвертора.

### Контроль короткого замыкания или аварии инвертора

Этот вид контроля осуществляется каждые 16 мс проверкой действующего значения выходного напряжения и тока нагрузки.

1. Если выходное напряжение снижается до 42 В в течение 4 периодов, то:
  - при значении выходного тока более 40% от номинального фиксируется КЗ на выходе, возникает сигнал PWM.OFF и инвертор выключается. Одновременно выключаются ККМ или ППН;
  - при значении тока, не превышающем 40% от номинального, отключается ККМ и инвертор, при этом нагрузка переключается на БП в момент перехода выходного напряжения через нулевое значение.
2. При повышении выходного напряжения до 264 В либо его падении до 60 В в течение 4 периодов фиксируется авария инвертора, отключается ККМ и инвертор, нагрузка переключается на БП.
3. В случае снижения выходного напряжения на 28 В от номинала 220 В в течение 8 периодов:
  - при токе нагрузки выше 190% фиксируется перегрузка, отключается инвертор, нагрузка переключается на цепь БП;

– при токе нагрузки не более 190% в течение последующих 16 периодов фиксируется авария инвертора, производится его выключение и переключение нагрузки на цепь БП или отключение нагрузки при автономной работе.

### Оценка полной и активной мощности

МК анализирует значения полной и активной составляющей потребляемой мощности, фиксируя превышения предельных значений по каждой из составляющих. Вычисления текущих значений мощностей осуществляются по следующим выражениям:

$$S = \sqrt{\frac{2}{N} \sum_{N/2}^{N} u_n^2} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{N} i_n^2},$$

$$P = \frac{1}{N} \sum_{N} (\pm i_n u_n),$$

где  $N$  — число дискрет измерения электрических величин за период основной частоты выходного напряжения инвертора;  $n$  — текущий номер дискреты.

Знак «+» в выражении для активной мощности принимается при совпадении знаков мгновенных значений тока и напряжения, а при их несовпадении принимается знак «-».

Значение  $N$  определяется частотой коммутации транзисторов ШИМ-инвертора  $F_k$ .

Период выборки может приниматься равным утроенному значению периода коммутации транзисторов:

$$T_n = \frac{3}{F_k}.$$

Так, если  $F_k = 19,2$  кГц, то выбираем период выборки  $T_n = 0,15625$  мс, что соответствует  $N = 128$  на периоде основной частоты выходного напряжения инвертора 50 Гц.

Вычисленные значения мощностей в процентах от номинальных мощностей сравниваются с табличными значениями (константами, записанными в ПЗУ МК), и при их превышении осуществляется защита инвертора от перегрузки переводом ИБП в режим БП [6].

### Литература

1. Климов В., Портнов А., Зуенко В. Топологии источников бесперебойного питания переменного тока (ИБП) // Электронные компоненты. 2003. № 7.
2. Климов В., Климова С., Портнов А. ИБП с двойным преобразованием энергии малой и средней мощности: схемотехника и технические характеристики // Электронные компоненты. 2004. № 6.
3. UPS topologies and standarts, MGE UPS Systems, MGE 0248 UK1-11/98.
4. Климов В. П. Источники бесперебойного питания серии ДПК малой мощности // Электрическое питание. 2006. № 1.
5. Data Sheet MC68HC908MR32, Motorola, w www.motorola.com.
6. Климов В., Москалев А. Коэффициент мощности и нагрузочная характеристика ШИМ-инвертора в системах бесперебойного питания // Силовая электроника. 2007. № 3.