

# Источники бесперебойного питания:

## НОВЫЙ ПОДХОД К СИНТЕЗУ. Часть 3

**В первой и второй части этой статьи [1,2], был разработан оригинальный алгоритм работы интеллектуальной системы управления всеми устройствами и узлами источника бесперебойного питания (ИБП), а также рассмотрены схемы и особенности основных силовых узлов этого блока. В новой статье цикла приводятся результаты испытаний образца ИБП, подтверждающие правильность разработанного алгоритма управления и выбранной структуры силовой части блока. Отмечены проблемы в работе блока инвертора ИБП, а также предложены схемные пути их устранения. Показана целесообразность применения ИБП с выходом на постоянном токе для ряда электронно-вычислительных комплексов различного назначения.**

**Саркис Эраносян, к. т. н.**

sergera840@mail.ru

**Владимир Ланцов**

vvlantsov@list.ru

**В**о второй части статьи [2] было дано краткое пояснение работы основных силовых узлов разработанного в ЗАО «Электро-Петербург» опытного образца ИБП на мощность 1800 ВА. Среди рассмотренных устройств были следующие: блок конвертера, блок инвертора, блок аккумуляторной батареи, зарядное устройство и блок вспомогательных источников электропитания (Бл. ИВЭ), а также

система управления (СУ ИБП). Кроме перечисленных основных узлов, в блочно-структурной схеме ИБП (рис. 1 в [1]) применяются полностью управляемые силовые электронные ключи:

- статический силовой ключ (ССК), который используется для реализации режима работы bypass и позволяет экономить энергопотребление в ночное и вечернее время [2];
- ключ аккумуляторной батареи (КАБ), который во включенном состоянии обеспечивает питание блока инвертора (ИН DC/AC) от аккумуляторной батареи (АБ), а в выключенном производит дозарядку АБ в процессе работы ИБП при наличии входного сетевого напряжения.

Рассмотрим некоторые схемные особенности работы этих ключей.

### Силовые электронные ключи

Упрощенные электрические схемы силовых ключей представлены на рис. 1.

На рис. 1а показана схема ССК. Как видно на рисунке, силовым модулем транзистора VT1 совместно с силовым модулем выпрямительного моста VD5 образует ключ переменного тока.

Входное сетевое напряжение поступает от колодки X1.1 (Вх. F) через одну обмотку помехозащитного дросселя L1 на вход (4) VD5, с выхода (3) которого через первичную обмотку трансформатора тока ТТ1 и другую обмотку L1 поступает на выходную колодку X2.1 (Вых. F).

Модуль схемы управления (УМ ССК) состоит из трех узлов: А1 — формирователя сигналов управления (УМ упр.) для транзистора VT1, А2 — формирователя сигнала дистанционного управления (ФС ДУ), А3 — схемы защиты от перегрузки по току (Защ. Ипер.). Причем, для отпирания силового транзистора VT1 после прихода от системы управления ИБП сигнала включения (ДУ СК) запускается узел А1, который формирует от источника питания (+5 В)

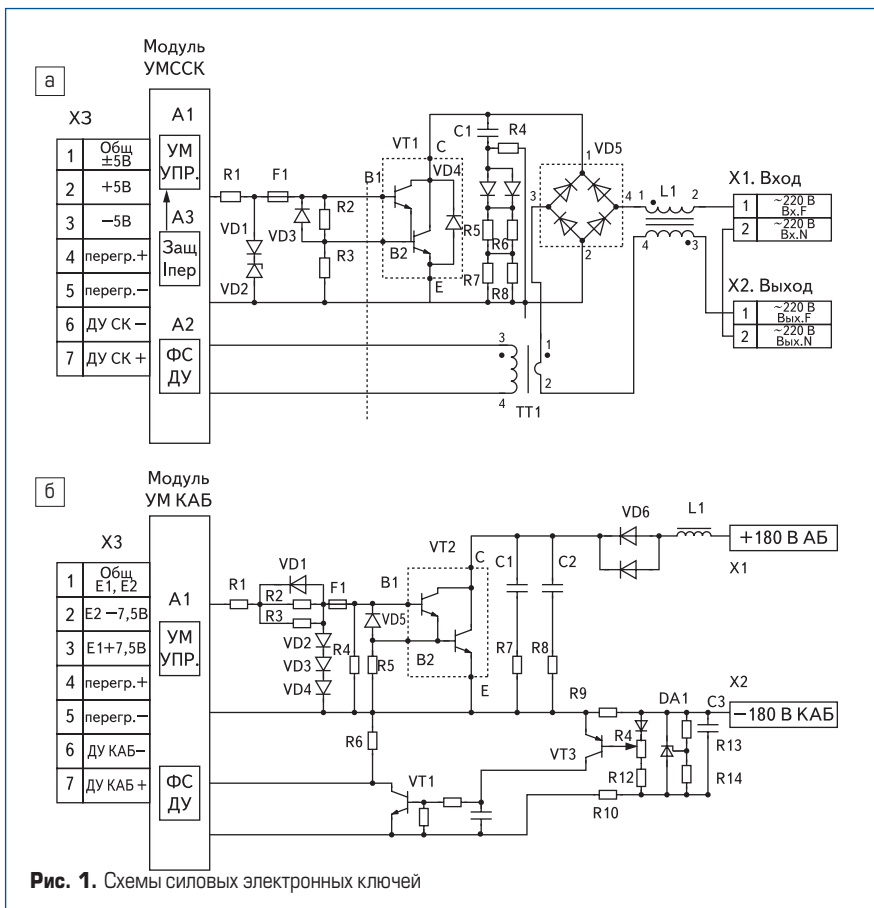


Рис. 1. Схемы силовых электронных ключей

отпирющий положительный сигнал на вход управления (В1-Е) транзистора. Для выключения ССК после снятия сигнала «ДУ СК» на входе управления «В1-Е» формируется импульс 50–70 мкс отрицательной полярности от источника питания –5 В. Подчеркнем, что в штатном режиме (bypass) ССК включается (отключается) только в интервалах времени перехода сетевого напряжения через нулевое значение. Сигнал токовой перегрузки ключа поступает от вторичной обмотки трансформатора ТТ1 на узел А3, с выхода которого идет сигнал на узел А1, в результате чего происходит запуск схемы запираания VT1 аналогично режиму выключения при снятии сигнала «ДУ СК». Кроме того, одновременно с этим на схему управления СУ ИБП идет сигнал отмены «ДУ СК». Также на разъем Х3 модуля управления УМ ССК приходят сигналы: от ИВЭ ±5 В, а по шине обмена данных с СУ ИБП — сигналы «Перегр.» и «ДУ СК».

На рис. 16 показана схема электронного ключа КАБ. Как видно на рисунке, силовой модуль транзистора VT2 совместно с силовой диодной сборкой VD6, выполняющей функцию развязки от выходного напряжения конвертора ( $E_0$ ) (см. рис. 1 [1]), образуют ключ постоянного тока.

Когда возникает необходимость питания блока инвертора от аккумуляторной батареи, напряжение от АБ поступает от колодки Х1 (+180 В АБ) через обмотку защитного дросселя L1 на положительный вход VD6, с катодного выхода которого через выводы «К-Е» транзистора VT2 и датчик тока R9 поступает на выходную колодку Х2 (–180 В КАБ).

Модуль схемы управления (УМ КАБ) состоит из двух узлов: А1 — формирователя сигналов управления (УМ упр.) для транзистора VT2, А2 — формирователя сигнала дистанционного управления (ФС ДУ). Для отпирания силового транзистора VT2 после прихода от системы управления ИБП сигнала включения (ДУ КАБ) запускается узел А1, который формирует от источника питания +7,5 В отпирющий положительный сигнал на вход управления «В1-Е» транзистора. Для выключения КАБ после снятия сигнала «ДУ СК» на входе управления «В1-Е» транзистора VT2 формируется импульс 50–70 мкс отрицательной полярности от источника питания –7,5 В. Схема защиты от перегрузки по току электронного ключа построена на транзисторах VT1 и VT3. Причем пороговый элемент, образованный микросхемой DA1, через делитель напряжения R11, R12 сравнивается с напряжением на датчике тока (R9) и поступает на базу транзистора VT3. Когда ток через КАБ достигает заданной величины перегрузки, открывается транзистор VT3 и, соответственно, транзистор VT1, с выхода которого идет сигнал на узел А1, в результате чего происходит запуск схемы запираания VT2 аналогично режиму выключения при снятии сигнала «ДУ КАБ».

Также на разъем Х3 модуля управления УМ КАБ приходят сигналы: от ИВЭ ±7,5 В, а по шине обмена данных с СУ ИБП — сигналы «Перегр.» и «ДУ КАБ».

Отметим, что при практической реализации схем электронных ключей ССК и КАБ исполь-

зовались следующие компоненты силовой электроники.

В качестве транзисторов VT1 (ССК), VT2 (КАБ) применены мощные транзисторные силовые модули АООТ «ИСКРА» 600 В, 35 А (аналог модуля фирмы STMicroelectronics ESM4045DV).

В качестве диодного моста VD5(ССК) применен силовой мост МД6-50-8, а диодная сборка VD4 (ССК) представляет собой два диода в одном корпусе (разработка СКТБ ЭС «Электроника» с параметрами  $U_{обр.} = 800$  В,  $I_{max} = 25$  А,  $t_{восст.} < 100$  нс в корпусе КТ-43 (ТО-218)).

В качестве диодной сборки VD6 (КАБ) была применена КД637ВС — пара диодов Шоттки с общим катодом ( $U_{обр.} = 200$  В,  $I_{max} = 2 \times 25$  А,  $I_{max.имп.} = 2 \times 50$  А,  $t_{восст.} < 80$  нс в корпусе ТО-218).

В качестве микросхемы DA1 (КАБ) была использована микросхема КР142ЕН19.

Теперь перейдем к результатам экспериментальных исследований режимов работы блоков и устройств ИБП, которые проводились с целью соответствия выходных параметров требованиям технического задания.

Для выполнения этой работы была составлена программа и методика испытаний силовых блоков в различных режимах работы системы бесперебойного питания с измерением важнейших параметров и режимов как самих силовых устройств, так и основных выходных параметров разработанного ИБП. Поскольку эти испытания включают в себя различные сочетания изменения входных параметров, а также вариации выходных нагрузок, то был подробно описан алгоритм процедуры проведения испытаний в виде программного продукта, с помощью которого оператор задавал командами с компьютера режимы управления в процессорном модуле СУ ИБП. При этом каждый пункт программы испытаний содержал конкретный перечень команд управления и набор измеряемых параметров. Например, задаются входные и выходные параметры:

- напряжение сети 175, 220, 264 В;
  - мощность нагрузки 500, 1000, 1500, 1750, 2000 Вт;
  - проверка работы ИБП в режимах обратной связи: только по цепи конвертора, по цепи конвертора и по цепи регулирования глубины модуляции (ШИМ) в инверторе, только глубиной модуляции (ШИМ) в инверторе (имитация режимов работы в различных состояниях аккумуляторной батареи).
- Во всех этих режимах испытаний производилось измерение многих параметров, с помощью которых можно было оценить уровень загрузки основных силовых электронных компонентов, например, транзисторов и диодов, а также накопительных конденсаторов, в частности, по величине допустимой временной составляющей.

Схема стенда испытаний силовых блоков ИБП представлена на рис. 2.

Как видно на рисунке, стенд включает в себя:

- устройство изменения напряжения (УИН);
- блок сетевого выпрямителя и фильтра (СВ AC/DC);
- блок конвертора (КОН DC/DC);
- блок инвертора (ИН DC/AC);
- пульт электронной коммутации нагрузки (ПЭКН);
- узел элементов нагрузки ( $R_n, C_n$ );
- блок «Система управления ИБП» (СУ);
- компьютер задания режимов испытаний.

Приведем перечень и обозначения основных параметров, измеряемых в процессе испытаний:

- входное напряжение сети, поступающее на блок СВ —  $\sim U_c$ ;
- напряжение, поступающее на вход конвертора —  $E_{вх}$ ;
- переменная составляющая входного напряжения конвертора —  $E_{вх}^-$ ;
- напряжение на выходе конвертора —  $E_o$ ;
- ток потребления инвертором —  $I_i$ ;
- ток потребления конвертором от блока СВ —  $I_{вх}$ ;

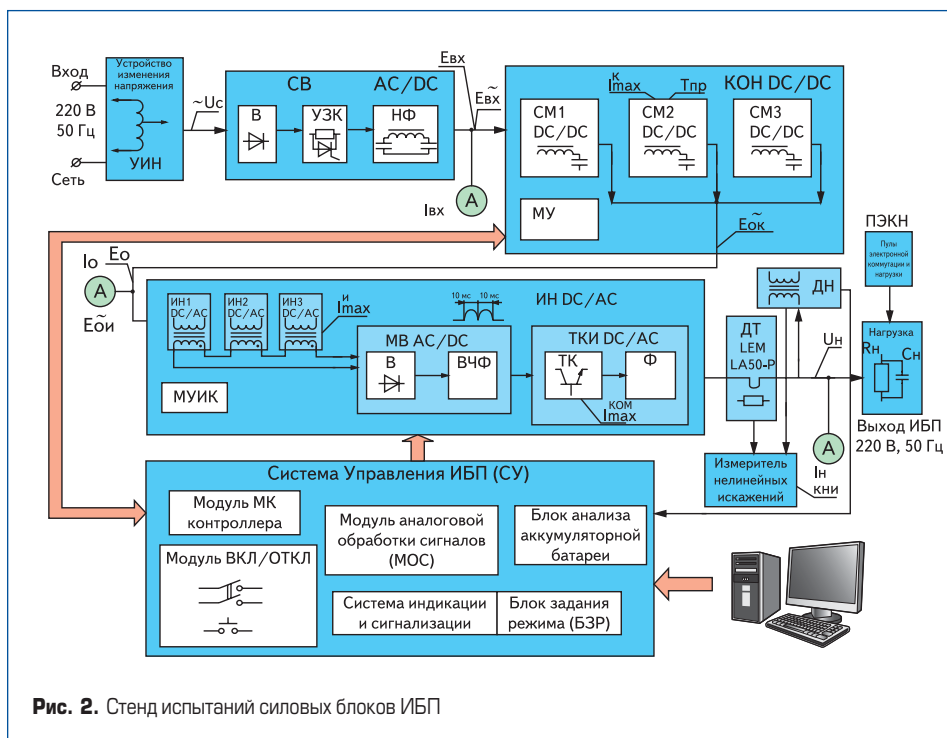


Рис. 2. Стенд испытаний силовых блоков ИБП

- выходное переменное напряжение ИБП на нагрузке —  $U_p$ ;
  - ток в нагрузке —  $I_p$ ;
  - коэффициент нелинейных искажений кривой выходного переменного напряжения ИБП — КНИ;
  - переменная составляющая выходного напряжения конвертора —  $E_o$ ;
  - максимальный импульсный ток в транзисторах конвертора —  $I_{max}^k$ ;
  - максимальный импульсный ток в транзисторах инвертора —  $I_{max}^i$ .
- Эти параметры измерялись с помощью следующих приборов:

- вольтметр универсальный В7-53;
- вольтметр универсальный В7-38;
- вольтметр Э59 кл. 0,5;
- вольтамперметр М2018 кл. 0,2;
- амперметр Д553 кл. 0,2;
- измеритель коэффициента нелинейных искажений С6-1А;
- осциллографы С1-137 и С1-55 для измерения импульсных токов и пульсаций напряжений.

Несколько слов о методике некоторых видов испытаний.

Напряжение, подаваемое на вход ИБП, изменялось с помощью УИН, представляющего собой автотрансформатор на максимальный ток 20 А компании Siemens. Для изменения сопротивления нагрузки в широких пределах от 100 до 24 Ом при работе ИБП использовано специальное устройство ПЭКН, представляющее собой электронный переключатель сопротивления нагрузки с помощью мощных симисторов, управляемых таким образом, чтобы коммутация нагрузки осуществлялась при переходе выходного напряжения ИБП через «ноль».

### Результаты испытаний ИБП

В разработанном блоке ИБП был применен новый алгоритм регулирования на основе двухконтурной обратной связи: один контур — это обратная связь по цепи конвертора (КОН), а другой — обратная связь по цепи инвертора. В связи с этим представляет интерес испытание функционирования ИБП в разных режимах обратной связи. Приведем результаты испытаний.

Согласно методике испытаний, от СУ в КОН подается сигнал стабилизации напряжения выхода ИБП  $U_n$  с помощью изменения  $E_o$ , при этом сигнал обратной связи от СУ по каналу стабилизации  $U_n$  изменением коэффициента модуляции ( $K_m$ ) ШИМ в инверторе отключается. Схемой управления с помощью программы в компьютере формируется  $K_m = 100\%$ .

- Получены следующие результаты:
- нестабильность напряжения выхода  $U_n$  ИБП, при изменениях входного напряжения в пределах 220 В  $\pm 20\%$  и мощности нагрузки в пределах от 500 до 1500 Вт составляет  $\pm 0,7\%$ ; Если увеличить емкость конденсатора выходного фильтра блока СВ, ранее рассчитанного на мощность 1500 Вт, то можно получить при максимальной мощности 1750 Вт нестабильность  $\pm 1,1\%$ ;
- коэффициент нелинейных искажений КНИ лежит в пределах 2,1–4,1%.

Для проверки работы ИБП в режиме обратной связи по цепи регулирования глубины модуляции ШИМ в инверторе (по существу это имитация режимов работы в различных состояниях аккумуляторной батареи) необходимо сделать следующее. Согласно методике испытаний сигнал обратной связи от СУ по каналу стабилизации  $U_n$  регулированием  $E_o$  отключается, а сигнал обратной связи по каналу стабилизации  $U_n$  изменением  $K_m$  подключается. При этом для реализации этого режима изменялся уровень стабилизации выходного напряжения  $E_o$  уставкой местной стабилизации  $E_o$  в блоке конвертора.

При испытаниях в этом случае получены следующие результаты:

- нестабильность напряжения выхода  $U_n$  ИБП, при изменении входного напряжения инвертора  $E_o$  (аналог напряжения аккумуляторной батареи) в пределах от 134,4 до 165,8 В и мощности нагрузки в пределах от 500 до 2000 Вт составляет  $\pm 0,32\%$ ;
- коэффициент нелинейных искажений находится в пределах 2,3–4,1%.

Для проверки работы ИБП в режиме действия обоих контуров обратной связи (штатный режим работы) необходимо сделать следующее. Согласно методике испытаний все связи СУ с конвертором и инвертором подключаются. Схемой управления с помощью программы в компьютере формируется  $K_m = 85\%$ , в условной точке  $E_o = 145$  В.

При испытаниях получены следующие результаты:

- нестабильность напряжения выхода  $U_n$  ИБП при изменениях входного напряжения в пределах 220 В  $\pm 20\%$  и мощности нагрузки в пределах от 500 до 1750 Вт составляет  $\pm 0,7\%$ ;
- коэффициент нелинейных искажений находится в пределах 2,3–3,3%.

Для энергетических параметров ИБП получены следующие результаты:

- КПД в режиме обратной связи по цепи конвертора при изменении входного напряжения в пределах 220 В  $\pm 20\%$  и мощности нагрузки в пределах от 500 до 1600 Вт составляет: для блока конвертора  $\eta_{кон} = 0,88-0,91$ , для блока инвертора  $\eta_{инв} = 0,88-0,92$ ;
- КПД в режиме штатной работы системы стабилизации при номинальном входном напряжении 220 В и мощности нагрузки от 500 до 2000 Вт для инвертора и конвертора, а также для всего блока силового тракта ИБП представлен на рис. 3а;
- КПД ИБП в режиме, эквивалентном работе от аккумуляторной батареи (при напряжении  $U_{AB} = 145$  В), представлен на рис. 3б.

При определении предельных режимов работы силовых электронных компонентов, которые использованы в схемах силовых устройств ИБП, получены следующие результаты испытаний:

- для блока конвертора максимальный импульсный ток транзисторов каждого из силовых модулей СМ1–СМ3 составил 25 А, максимальный средний ток 7,09 А. Предельный ток для двух параллельных транзисторов типа КП809Б1 — 19,2 А, таким образом, коэффициент нагрузки для транзисторов

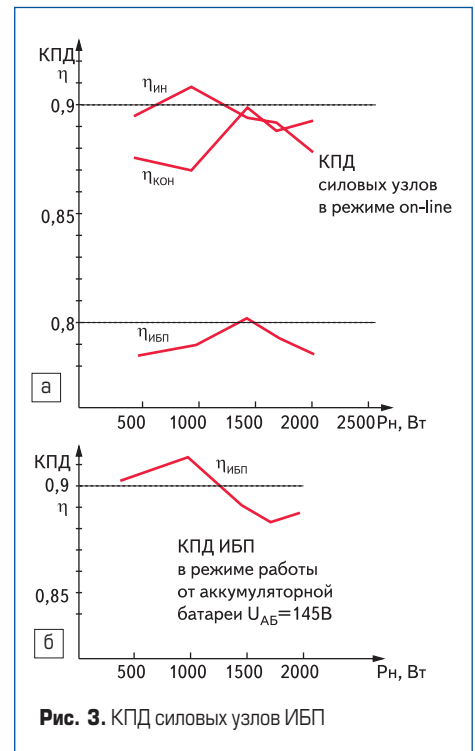


Рис. 3. КПД силовых узлов ИБП

составляет  $K_n = 0,37$ . Аналогичный коэффициент нагрузок имеют и силовые диоды конвертора;

- для блока инвертора максимальный импульсный ток транзисторов (режим ШИМ) каждого из силовых модулей ИН1+ИН3 составил 17 А, средний ток — 8,5 А, коммутационный пик тока — 21 А. Предельный ток для двух параллельных транзисторов типа КП813А1 — 30 А, импульсный ток — 100 А, таким образом, коэффициент нагрузки для транзисторов инвертора составляет  $K_n = 0,28$ , а для коммутационного пика  $K_{ин} = 0,21$ ;
- максимальный импульсный ток транзисторов коммутатора (ТКИ) составил 12,6 А в режиме активной нагрузки ИБП и 20 А в режиме при емкостной нагрузке 10 мкФ. Предельный ток для транзисторов ТКИ составляет 40 А (транзисторный силовой модуль завода «ИСКРА», г. Ульяновск, аналог модуля ESM 4045D СВ-451 фирмы STMicroelectronics). Значит, коэффициент нагрузки для транзисторов ТКИ составляет: для активной нагрузки  $K_n = 0,36$ , а для активно-емкостной нагрузки  $K_n = 0,6$ . Аналогичные коэффициенты нагрузок имеют силовые диоды модуля выпрямителя (МВ).

Одной из дополнительных целей проведения испытаний образца ИБП было определение «запасов» разработанного блока по выходной нагрузочной мощности. С другой стороны, представляло некоторый интерес определение «живучести» системы бесперебойного питания при некоторых нештатных (аварийных) режимах, возникновение которых позволяет оценить эффективность структуры узлов, предназначенных для защиты силовых элементов от необратимых повреждений. Рассмотрим результаты испытаний ИБП по определению запаса по выходной мощности.

Наглядной иллюстрацией полученных результатов являются осциллограммы, приведенные на рис. 4.

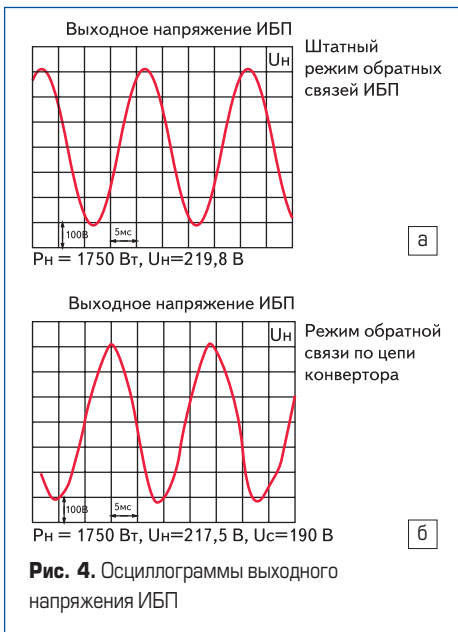


Рис. 4. Осциллограммы выходного напряжения ИБП

Как видно на осциллограмме, приведенной на рис. 4а, выходное напряжение ИБП при входном напряжении 220 В находится в нормальных пределах  $U_n = 219,8$  В, а мощность нагрузки при этом составляет 1750 Вт. Но уже при меньшем входном напряжении  $\sim U_c = 190$  В выходное напряжение ИБП при нагрузке 1750 Вт начинает падать:  $U_n = 217,5$  В (осциллограмма на рис. 4б). Объясняется это тем, что в этом режиме повышенной мощности выходное напряжение конвертора  $E_0 = 124$  В, то есть практически оно не регулируется контуром обратной связи по цепи конвертора. При этом обратная связь не «отрабатывает» низкочастотную пульсацию на входе конвертора, что приводит к почти удвоенному росту переменной составляющей этого напряжения. При этом пульсация напряжения равна  $E_{\text{вх}} \sim 40$  В (размах), в отличие от нормального режима действия обратной связи, которое при входном напряжении ИБП 175 В равно 20–30 В (размах), при этом уровень напряжения  $E_0$  составляет 130–132 В. Работа на предельной мощности нагрузки подтверждается ухудшением коэффициента нелинейные искажений, что наглядно видно по форме кривых выходного напряжения ИБП (рис. 4а, б). Для первой осциллограммы КНИ = 2,7%, а для второй — 3,7%. Таким образом, проведенные испытания подтвердили наличие запаса по нагрузочной мощности на выходе ИБП. В то же время, при увеличении емкости выходного фильтра блока СВ, например, до 1000 мкФ, выходная мощность 1800 Вт (2000 ВА) уверенно обеспечивается в режиме on-line. При этом, как показал эксперимент, сохраняется устойчивая работа ИБП при изменении входного напряжения в пределах 220 В  $\pm 20\%$ . Рассмотрим результаты испытаний ИБП при некоторых нештатных (аварийных) режимах. Испытания работы силовых узлов блока в нештатных режимах выполнялись путем создания аварийных ситуаций следующего характера:

1. Изменение полярности (переполусовка) входного напряжения инвертора  $E_0$ .
2. Переполусовка входного напряжения обратной связи от СУ на систему регулирования  $E_0$  в конверторе.

При реализации этих ситуаций получены следующие результаты испытаний:

- в первом режиме обратное напряжение  $E_0$  шунтировалось входными электролитическими конденсаторами и обратными диодами в плечах блока инвертора (ИН1–ИН3). В результате конвертор стал работать в режиме короткого замыкания по выходному току  $I_0$ , при этом ток короткого замыкания  $I_{0\text{кз}}$  снижался до 10–12 А и повреждений элементов в системе не было. Такой результат объясняется как спецификой работы квази-резонансных преобразователей (существует предельный ток, отдаваемый резонансным конденсатором в силовых модулях СМ1–СМ3), так и особенностями схемы защиты по току конвертора;
- во втором режиме система бесперебойного питания автоматически перешла в режим стабилизации  $U_n$  изменением коэффициента модуляции  $K_m$  в ШИМ-инверторе, то есть контур регулирования  $E_0$  от СУ не работал, а ИБП продолжал эффективно функционировать в режиме действия одного контура обратной связи.

Отметим еще один важный вывод.

Во всех испытанных режимах работы ИБП система управления формировала плавный подъем выходного напряжения  $U_n$ , с временем подъема 0,5 с, а при выключении также формировался плавный спад  $U_n$  с тем же временем 0,5 с. Достигалось это заданным алгоритмом работы СУ. При включении ИБП подавался сигнал дистанционного управления (ДУ) (включения) конвертора, затем формировался процесс плавного подъема  $U_n$  изменением глубины модуляции  $K_m$ , а при выключении ИБП снимался сигнал ДУ конвертора, затем с помощью  $K_m$  плавно уменьшалось выходное напряжение.

### Особенности функционирования системы бесперебойного питания при малых нагрузках

Остановимся более подробно на работе ИБП при малых нагрузках, в частности, при мощности нагрузки меньше 500 Вт. Кривая выходного напряжения ИБП при работе блока от аккумуляторной батареи (имитация  $E_0 = 165$  В) представлена на рис. 5, там же (в увеличенном масштабе времени) приведен фрагмент осциллограммы, обозначенный «А».

Как видно на рисунке, в моменты перехода выходного напряжения ИБП через «ноль» имеется некоторая «постоянная» составляющая.

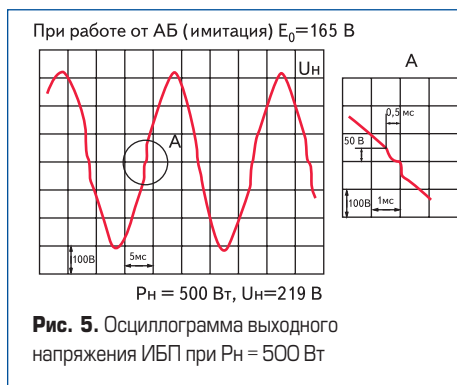


Рис. 5. Осциллограмма выходного напряжения ИБП при  $P_n = 500$  Вт

Подробное рассмотрение этого процесса (фрагмент «А» на рис. 5) показывает, что с уровня  $U_n = 50$  В напряжение снижается до нуля в течение 0,5 с, а в следующем полупериоде напряжение скачком достигает значения подставки 50 В. Отметим, что такое искажение кривой выходного напряжения ИБП приводит к росту КНИ до значения 4,1%. Этот процесс возникновения «постоянной» составляющей в полупериодах выходного напряжения ИБП при малых нагрузках мощности ( $R_n > 90$  Ом) имеет тенденцию возрастания до 100 В в режиме холостого хода. Проблема ухудшения кривой выходного напряжения при значительном увеличении  $R_n$  усугубляется при комплексном характере нагрузки ИБП. Особенно это проявляется в случае емкостной нагрузки. Когда в процессе испытаний в качестве дополнительной нагрузки на выход блока подключался конденсатор 10 мкФ, это вызывало значительное увеличение импульса тока перезаряда конденсатора, подключенного к нагрузке.

Причины возникновения таких негативных процессов в инверторе напряжения имеют неоднозначный характер:

- некоторые схемные особенности, например, в нашем случае — наличие в тракте получения переменного напряжения звена постоянного тока (узел «В» в модуле МВ, рис. 2);
- необходимость замыкания реактивного тока нагрузки через узлы ТКИ и МВ. В ряде случаев для решения этого вопроса может использоваться специальный «обратный» преобразователь, который «сбрасывает» избыточную реактивную энергию, например, на вход или выход конвертора (рекуперация энергии).

Практика показывает, что во многих случаях поставщик ИБП всячески избегает прямых указаний на работу при малой мощности нагрузки. Например, показывает в выходных данных технические характеристики при нагрузке 100% и 50% номинальной мощности. В других случаях иногда указывается работа в определенном диапазоне выходной мощности, особенно для ИБП на большую мощность 15–100 кВА. Но, практически всегда, допустимый коэффициент мощности нагрузки, как правило, указывается не менее 0,8.

В нашем случае уже в начале разработки блока инвертора обнаружили проблемы с его работой на малых токах нагрузки. Однако, принимая во внимание, что в первую очередь необходимо было отрабатывать основную схему в условиях предельных (заданных) мощностей нагрузки, то на первом этапе велась интенсивная разработка общей схемы блока инвертора на выходную мощность 1800–2000 ВА. Тем более, что именно при максимальной выходной мощности определяются лучшие энергетические характеристики инвертора, например КПД.

Для обеспечения работы ИБП при малых нагрузках необходимо доработать исходную схему блока инвертора. На наш взгляд, одним из путей доработки схемы инвертора (рис. 2) является применение других структур получения переменного напряжения от входного постоянного. Представляет определенный интерес схема инвертора, рассмотренная в работе [3].

На рис. 6 представлена схема инвертора, построенная на основе цифрового управления силовыми электронными ключами. Как видно на рисунке, постоянное напряжение  $U_{вх}$  (DC) через дроссель L1 поступает на инвертор, представляющий собой двухтактный полумостовой нерегулируемый преобразователь. Входное напряжение подается на конденсаторы C1, C2 и два ключевых полевых транзистора VT1, VT2. Силовой трансформатор Tr1 инвертора работает на высокой частоте, например, на частоте 20 кГц. Выходное прямоугольное напряжение типа меандр с амплитудой полупериода  $V_2$  со вторичной обмотки трансформатора подается на диагональ мостового преобразователя (циклоконвертер). Плечи циклоконвертера выполнены в виде электронных ключей переменного тока, каждый из которых представляет собой мостовой диодный выпрямитель, выход которого замыкает силовой полевой транзистор VT3 (или в других плечах VT4, VT5, VT6 соответственно). Выходное переменное напряжение мостового циклоконвертера в виде последовательности прямоугольных импульсов, модулированных по длительности по синусоидальному закону низкой частоты ( $\sim V_{ц.к.}$ ), через высокочастотный сглаживающий фильтр  $L_f, C_f$  подается на выходные клеммы переменного напряжения низкой частоты  $U_{вых}$  (AC).

Поясним работу циклоконвертера. На входную диагональ моста поступает напряжение  $V_2$  в виде импульсного «питания». При этом напряжение  $V_2$  на входе моста меняет знак поочередно: один полупериод, например, положительный (отмечен знаком «О» на рис. 6), а другой отрицательный (отмечен знаком «□» на рис. 6). Это входное «питающее» напряжение модулируется в цифровом виде по определенному закону следующим образом. Импульсы управления на транзисторы VT3 и VT5 поступают со сдвигом по закону ШИМ, причем на VT3 поступает передний фронт импульса ШИМ одного полупериода модуляции (40 кГц), а на VT5 — передний фронт импульса ШИМ следующего полупериода модуляции. Управляющие сигналы на затворы другой пары транзисторов VT6 и VT4 формиру-

ются в виде импульсов, которые являются синхронными с напряжением  $V_2$ . При этом на транзистор VT6 поступает импульс, синхронный с положительным полупериодом  $V_2$ , (отмечен знаком «О» на рис. 6), а на VT4 — синхронный с отрицательным полупериодом  $V_2$  (отмечен знаком «□» на рис. 6). В результате такого алгоритма управления происходит следующее.

При одновременном совпадении по длительности и знаку импульсов управления для пары транзисторов VT3 $\leftrightarrow$ VT6, а также для пары транзисторов VT5 $\leftrightarrow$ VT6 на выходных выходах циклоконвертера образуется последовательность прямоугольных импульсов. Эти чередующиеся импульсы положительной и отрицательной полярности, модулированные по длительности, в соответствии с синусоидальным законом низкой частоты после фильтра высокой частоты (40 кГц) образуют выходное переменное напряжение низкой частоты  $U_{вых}$ . Закон чередования импульсов цифрового управления для транзисторов VT1–VT6 задается программой, реализованной с помощью микроконтроллера [3].

Интересно отметить, что практически похожую схему управления ключами в усилителе с ШИМ и выходом на переменном токе [4] предложил в 1971 г. известный специалист по системам электропривода О. А. Косов.

Завершая анализ схемы силового инвертора, которая может служить прототипом для проведения доработки первоначальной схемы, отметим следующее. Новые элементы и узлы достаточно легко могут быть встроены в исходную структуру:

- режим работы полумостового инвертора в *новой* схеме, по существу, — частный случай импульсной модуляции, а именно он является режимом максимальной длительности импульса ШИМ;
- силовой трансформатор в *новой* схеме не требует изменений, причем напряжение  $V_2$ , так же как в прежней схеме, будет образовано суммой напряжений от трех трансформаторов модулей (ИН1–ИН3);
- блок модуля выпрямителя МВ (рис. 2) в *новой* схеме исключается, а мостовой транзис-

торный коммутатор ТКИ (рис. 2) необходимо преобразовать в схему циклоконвертера. Для этого можно, например, применить 4 транзистора MOSFET IRFPS40N60K фирмы International Rectifier ( $U_{DSS} = 600$  В,  $I_D = 40$  А,  $R_{DS(on)} = 0,11$  Ом). Эти транзисторы должны замыкать выход постоянного тока каждого из 4 диодных мостов. Для монтажа схем диодных мостов можно использовать 4 изделия КД637ДС (2 диода Шоттки с обжимом катодом  $U_{обр.} = 600$  В,  $I_{max} = 2 \times 25$  А,  $I_{max.имп.} = 2 \times 50$  А) и 8 диодов КД636Д ( $U_{обр.} = 600$  В,  $I_{max} = 30$  А,  $I_{max.имп.} = 60$  А);

- усилитель импульсов управления с трансформаторным выходом (УИ), применяемый для затворов транзисторов полумостового инвертора прежней схемы остается неизменным в *новой* схеме, то есть для трех модулей ИН1–ИН3 (шесть транзисторов) используются имеющиеся сейчас платы УИ (шесть штук). Для управления дополнительными транзисторами VT3–VT6 циклоконвертера необходимо добавить еще 4 унифицированные платы УИ;
- общее количество сигналов от системы управления на транзисторы всего блока инвертора (включая схему циклоконвертера) остается неизменным, поэтому нужно только изменить программу работы процессора СУ, адаптировав ее к закону управления транзисторами VT3–VT6 циклоконвертера.

### Итоги разработки ИБП нового типа

Разработка ИБП нового типа с учетом рассмотренных результатов проведенных испытаний силовых блоков показала:

- эффективность заложенных схемных решений узлов и блоков, а также правильность основного алгоритма работы;
- соответствие основных энергетических параметров ИБП лучшим зарубежным образцам в части выходного напряжения, КПД и КНИ. Причем, в отличие от большинства зарубежных ИБП, *выходное напряжение гальванически развязано* от сетевого напряжения;
- выходное напряжение ИБП синхронизировано с входным (сетевым) благодаря работе системы фазовой подстройки частоты (ФАПЧ), что позволяет корректно (в пределах одного полупериода сети) перейти на работу от аккумуляторной батареи при пропадании сети во время режима байпас. Причем обратный переход совершается также при синхронизации с появлением сетевого напряжения. Эти процессы «мягкого» переключения обеспечиваются схемой электронного ключа переменного тока, системой ФАПЧ и алгоритмом работы системы управления в переходных режимах работы ИБП;
- необходимость доработки узла ТКИ с целью обеспечения режима работы ИБП при малых нагрузках. При этом расчеты и эксперимент показали, что выполненная доработка не изменит полученные высокие основные технические параметры ИБП;
- возможность в режиме on-line получения выходной мощности 1800 Вт при увеличении емкости выходного фильтра блока СВ, а при

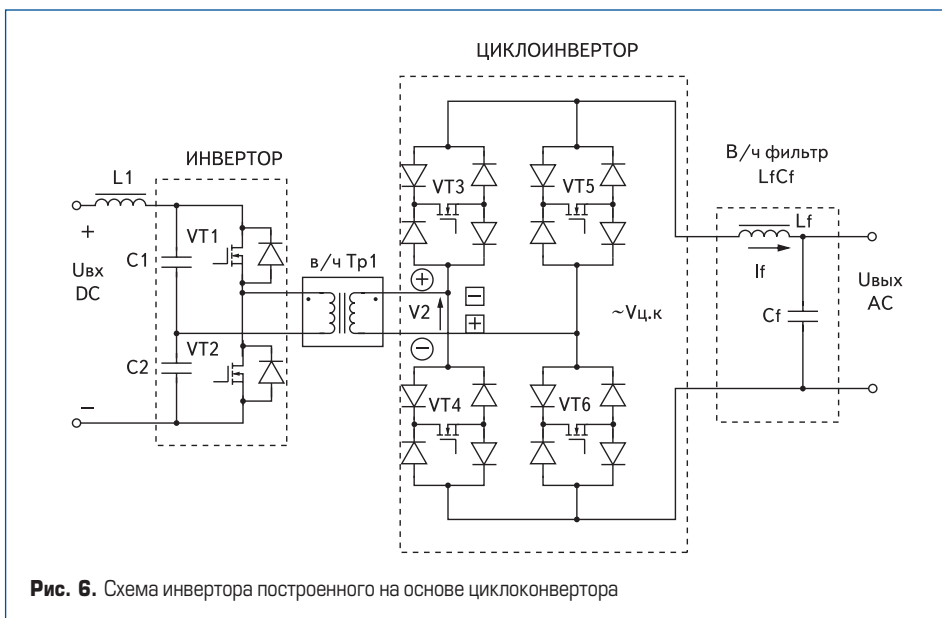


Рис. 6. Схема инвертора построенного на основе циклоконвертера

входном напряжении 220 В (–15, +20)% нагрузка ИБП может увеличиваться до 2000 Вт;

- массо-габаритные показатели ИБП соответствуют лучшим зарубежным образцам.

Завершая цикл публикаций по разработке ИБП в ЗАО «Электро-Петербург», авторы считают своим долгом упомянуть тех сотрудников фирмы, которые принимали активное участие в этой оригинальной разработке, проведенной в сжатые сроки. Основную часть разработки выполняли: президент компании С. К. Яковлев — умер в 2003 г., научно-технический руководитель работы С. А. Эраносян ведущие разработчики силовых преобразовательных блоков Ю. А. Перов — умер в 1999 г. и П. Л. Шадрин; ведущий специалист по силовому электроприводу О. Н. Ощепков, главный разработчик системы управления В. О. Цыпкин.

### Состояние и проблемы проектирования мощных систем бесперебойного питания

Для того чтобы рассмотреть проблемы ИБП с точки зрения сегодняшнего состояния развития техники, проведем обобщение характеристик различных типов этих блоков и основных входящих в него узлов. Анализ показал, что типовая структура ИБП включает в себя силовые блоки:

- входной выпрямитель, тиристорный регулятор, иногда дополнительный повышающий ключевой стабилизатор (DC/DC). Эти узлы формируют уровень постоянного напряжения, необходимого для подачи его на блок инвертора (DC/AC);
- мостовой инвертор, который формирует переменное выходное напряжение ИБП, обычно методом его синтеза с помощью импульсов ШИМ;
- развязывающий силовой сетевой трансформатор, устанавливаемый на входе блока, который поставляется при требовании заказчика гальванической изоляции нагрузки ИБП от питающей сети;
- байпасный электронный ключ, например, симистор переменного тока, назначение которого — создание резервного пути питания нагрузки при неисправности самого ИБП;
- аккумуляторную батарею, напряжение которой должно быть адаптировано к входному напряжению инвертора или к входу стабилизатора DC/DC;
- устройства заряда АБ;
- быстродействующий коммутатор, подключающий АБ при пропадании сетевого напряжения.

Анализируя варианты силовых структур в различных типах ИБП, можно однозначно сделать следующий вывод. Наиболее сложный и «капризный» узел ИБП — это инвертор DC/AC. Дело не только в том, что его система управления силовыми ключами (ШИМ-импульсов с несущей высокой частотой) и низкой частотой в виде синусоидального закона изменения длительности импульса управления достаточно сложная, но и в том, что эта система идеально работает только на активную нагрузку. Совсем иная картина при работе инвертора на комплексную реак-

тивную нагрузку. Если рассмотреть работу инвертора при активно-емкостной нагрузке, то можно увидеть, что это приводит к некоторому ухудшению КНИ, которое вызвано значительным увеличением тока через транзисторы инвертора, ввиду процесса перезаряда конденсатора, включенного параллельно сопротивлению нагрузки. Однако в случае индуктивно-активного характера нагрузки работа инвертора еще больше усложняется. В этом случае происходит значительное ухудшение КНИ, так как очередное отпирание пары транзисторов инвертора (ШИМ-импульсами) задерживается, что обусловлено сдвигом тока относительно кривой напряжения. Таким образом, детерминированная фаза сигналов управления оказывается не синхронной с «нормальным» напряжением на переходе «сток-исток» транзисторов. Адаптировать систему управления транзисторами инвертора к текущей (конкретной) комплексной нагрузке ИБП не просто. Поэтому в мощных блоках ИБП параметр КНИ около 3–4% гарантируется только при нагрузке, имеющей  $\cos\phi = (1...0,8)$ .

В итоге можно утверждать, что самым «слабым» звеном среди силовых устройств систем бесперебойного питания с выходом на переменном токе является блок инвертора DC/AC.

Наконец, посмотрим на проблему реализации на рынке различных типов ИБП с точки зрения покупателя этих изделий. Здесь мы увидим удивительную картину, которая свидетельствует о чрезвычайном консерватизме выпускаемых типов ИБП. Речь идет о том, что продолжается выпуск большого количества ИБП с выходом на переменном токе (низкой, 50–60 Гц, сетевой частоты). Несмотря на то, что подавляющее число аппаратных средств построено без использования входных сетевых трансформаторов. Возникает разумный вопрос, нужна ли энергия переменного тока на входе отдельного устройства, если она напрямую, без трансформатора, сразу после выпрямления сетевого напряжения превращается в постоянное напряжение? Причем полученное напряжение в дальнейшем преобразуется в источниках вторичного электропитания, работающих на частотах 20–200 кГц и входящих в состав функциональных устройств, с целью получения гальванически развязанных от сети других напряжений, необходимых для работы этих устройств. Такое «навязывание» потребителю систем бесперебойного питания с выходом на переменном токе можно сравнить, например, со следующей гипотетической ситуацией. Представьте себе, что сейчас на предприятие, которое выпускает телевизоры, приходит реклама о поставке низкочастотных трансформаторов для блоков питания, встраиваемых в телевизионный приемник. Это абсурд, так как во всех телевизорах, а также в блоках питания компьютеров и практически во всех типах других приборов, таких как факсы, ксероксы, принтеры, видеомагнитофоны, DVD-проигрыватели, музыкальные центры и т. п. установлены импульсные ИВЭ с ВЧ-трансформатором, работающим на частотах 20–200 кГц.

Рассмотрим набор стандартных аппаратных средств на примере отделения банка, которое решило приобрести ИБП. Это поможет нам показать, насколько целесообразно и гармонично использовать в этих случаях ИБП, имеющих выход напряжения постоянного тока.

Основная офисная аппаратура банка состоит из 15–20 компьютеров, одного сервера, 5–6 принтеров, одного многофункционального ксерокса, специальных кассовых аппаратов и т. п. Задача системы бесперебойного питания — при пропадании сетевого напряжения выполнить следующие действия: обеспечить возможность в течение 15–20 минут продолжить работу по заданному алгоритму, составленному именно для этого случая. Обычно перечень действий персонала обусловлен специальной программой, которая активируется сразу после начала работы ИБП. Она оповещает персонал о начале корректного завершения всех текущих процедур, для того чтобы исключить при этом потерю оперативной информации, а также повреждение баз данных. Для случая, когда банк имеет вторую (резервную) сеть, выполнить шаги для перехода электронного оборудования на электропитание от второй сети. Если это не удастся, то необходимо провести стандартный выход из локальной сети банка, аналогичный процедуре при выключении оборудования в конце рабочего дня. Как видно из перечня установленного электронного оборудования, которое, по существу, является нагрузкой ИБП, все эти устройства могут получать электроэнергию от сети постоянного тока напряжением 260–280 В. При этом такое напряжение в принципе более комфортно для нормального функционирования всего перечисленного оборудования.

Практически неоспоримо, что такой подход к выбору типа первичного источника питания в виде постоянного напряжения, потенциально (в смысле его величины) соизмеримого с ныне действующим переменным сетевым напряжением, применим для многих информационно-вычислительных комплексов как коммерческого, так и специального назначения. Здесь следует отдать должное истории, которая показывает, каким образом производился выбор типа первичного источника питания для аппаратуры систем связи и телефонных сетей. Действительно, с самого начала в этих системах в качестве сетей первичного электропитания было использовано постоянное напряжение номиналов 24, 60 и, позднее, 48 В. Причем, надо отметить, что это был осознанный выбор, который позволял переходить на резервное питание (при пропадании первичного сетевого напряжения) непосредственно от аккумуляторной батареи в соответствующей комплектации (24, 48, 60) В.

Это объясняет кратность 12 В номиналов постоянного напряжения, которые установлены стандартом параметров на первичную сеть аппаратуры связи. В качестве примера гармоничного сочетания централизованного источника питания, по существу выполняющего функцию первичного источника энергии

для децентрализованной системы электропитания цифровой телефонной станции, служит устройство типа УПЦС 60/100. Это устройство питается от 3-фазной сети переменного тока и формирует выходное напряжение постоянного тока 60 В, которое во время заряда и разряда аккумулятора равно 48–72 В при токе нагрузки 100 А. Причем в этом изделии имеется аккумуляторная батарея, которая используется в качестве резервного источника питания при пропадании сети переменного тока, одновременно выполняя функцию фильтра.

Отсюда следует, что система бесперебойного питания нового типа ИБП в общем случае может выглядеть следующим образом. Входное переменное напряжение поступает на блок  *сетевого выпрямителя* и фильтра (СВ AC/DC), постоянное напряжение которого подается на блок  *конвертора* (КОН DC/DC), формирующего на выходе постоянное напряжение  $E_0 = 160$  В.  *Аккумуляторная батарея* (АБ) подключена к выходу конвертора через элементы зарядной цепи и является одним из элементов его буферного фильтра. Напряжение с выхода конвертора  $E_0$  поступает на блок  *повышающего стабилизатора* напряжения (ПСН), выходное постоянное напряжение которого  $U_n = (260...280)$  В является выходом ИБП. При пропадании переменного сетевого напряжения от аккумуляторной батареи напряжение  $U_{АБ}$  через электронный ключ пода-

ется на вход стабилизатора ПСН. В результате этого на выходе ИБП образуется постоянное напряжение  $U_n = (260...280)$  В.

Варианты мощных систем бесперебойного питания с выходом на постоянном токе, оптимальный выбор структуры силовой части, с точки зрения как вида входного переменного напряжения (однофазного или 3-фазного), так и выбора конфигурации (напряжения) АБ, будут рассмотрены авторами в последующих публикациях.

### Заключение

1. Рассмотрена разработка оригинального блока ИБП на мощность 1800 ВА, построенного на новом алгоритме работы, благодаря которому потребитель имеет возможность задавать один из 4 режимов работы системы бесперебойного питания. Причем этот выбор осуществляется с целью минимизации энергопотребления именно для конкретной аппаратуры, которая является нагрузкой ИБП.
2. Реализована структура силового тракта этого блока в виде двух преобразующих устройств, обеспечивающих гальваническую развязку выхода ИБП от сети как при работе в режиме on-line, так и при работе от аккумуляторной батареи. Причем в первом режиме получен КПД  $\eta_{\text{обн}}$  не менее 0,79, а во втором режиме — не менее 0,88. Эти

значения КПД получены при мощности нагрузки от 1000 до 2000 ВА.

3. Объективный анализ выпускаемых типов ИБП с выходом на переменном токе показал, что силовой инверторный блок, формирующий выходное переменное напряжение ИБП, является наиболее сложным из всех силовых блоков системы бесперебойного питания этого класса.
4. Показано, что для многих видов электронных комплексов различного назначения, предпочтительно использование ИБП с выходом на постоянном токе, который имеет более простую и надежную структуру силовой части.

### Литература

1. Эраносян С., Ланцов В. Источники бесперебойного питания: новый подход к синтезу // Силовая электроника. 2007. № 4.
2. Эраносян С., Ланцов В. Источники бесперебойного питания: новый подход к синтезу. Часть 2 // Силовая электроника. 2008. № 1.
3. Sun Y. S., Kim C. H., Lee J. W., Kim Y. H., Yoo Y. S. Fully Digitalized High Frequency Link DC/AC Converter. Труды конференции 1995 IEEE, pp.659–663. Гаага, Нидерланды. INTELEC' 95. October 29–November 1. 1995.
4. Косов О. А. Усилители мощности на транзисторах в режиме переключения. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Энергия, 1971.