

Однофазные источники бесперебойного питания серии ДПК:

динамические и спектральные характеристики

В статье приведены результаты экспериментального исследования динамических режимов и гармонического состава входных и выходных токов и напряжений отечественных однофазных источников бесперебойного питания (ИБП) серии ДПК мощностью 1–3 кВ·А. Рассмотрены результаты испытаний при работе ИБП на нелинейную, двигательную и статическую линейную нагрузки.

Валерий Климов,
к. т. н.

vklimov@tensy.ru

Андрей Портнов
Владимир Коротков,
к. т. н.
Валерий Смирнов,
к. т. н.
Сергей Сыромятников,
к. т. н.
Роберт Бейм,
к. т. н.

Динамические характеристики являются важными потребительскими свойствами источников бесперебойного питания, отражающими их надежную работу при коммутации нагрузки, скачках сетевого напряжения, перегрузках и других возмущениях, возникающих в системе «сеть — ИБП — нагрузка». Данная работа посвящена результатам экспериментального исследования динамических режимов ИБП с двойным преобразованием энергии серии ДПК мощностью 1–3 кВ·А производства ЗАО «Энергетические технологии» [1]. Исследования проводились на электродинамической модели кафедры «Электроэнергетические системы» МЭИ. Для регистрации и обработки результатов экспериментов использовались программно-технический комплекс ПТК «Нева», разработанный НПФ «Энергосоюз», и регистратор качества электрической энергии «Парма РК1.01».

Функциональные особенности силовой цепи ИБП

Функциональная схема силовой цепи ИБП, в состав которой входит выпрямитель — корректор коэффициента мощности (В-ККМ), а также инвертор (ИНВ), приведена на рис. 1.

В-ККМ выполняет три функции:

- осуществляет преобразование напряжения сети переменного тока в стабилизированное напряжение постоянного тока, обеспечивая питание инвертора стабильным напряжением постоянного тока 700 В;

- обеспечивает потребление из сети входного тока, совпадающего по фазе с напряжением сети и практически синусоидальной формы, вне зависимости от характера нагрузки ИБП, что позволяет иметь входной коэффициент мощности, близкий к единице;
- обеспечивает мягкий старт для уменьшения пускового входного тока ИБП.

Высокочастотный корректор коэффициента мощности (ККМ) в ИБП выполнен по схеме повышающего преобразователя (бустера) с дифференциальным выходом на диодах VD1–VD4, емкостях C1, C2 и силовом дросселе L1, включенном во входную цепь переменного тока [2]. Силовой транзистор ККМ VT1 управляется сигналом с широтно-импульсной модуляцией (частота ШИМ 20–30 кГц) с помощью специализированной микросхемы типа UC 3854.

Инвертор (ИНВ) преобразует напряжение постоянного тока 700 В в синусоидальное напряжение 50 Гц 220 В. Блок инвертора выполняется по полумостовой бестрансформаторной схеме на IGBT-транзисторах VT2, VT3. Силовые транзисторы управляются высокочастотными ШИМ-сигналами (20 кГц). Широтно-импульсная модуляция сигналов осуществляется по синусоидальному закону, что обеспечивает высокую точность выходного напряжения. Синусоидальная форма выходного напряжения формируется из высокочастотных ШИМ-импульсов с помощью выходного фильтра L2, C3.

Преобразователь постоянного напряжения (ППН) (на рис. 1 не приведен) обеспечивает повышение и стабилизацию напряжения аккумуляторной батареи (АБ) до уровня, необходимого для надежной работы инвертора в автономном режиме. Принципиальная схема ППН представляет собой двухтактный дифференциальный высокочастотный преобразователь на двух группах параллельно включенных силовых транзисторов и высокочастотном трансформаторе, мощность которого с учетом потерь в инверторе должна превышать выходную мощность ИБП. Транзисторы управляются ШИМ-сигналами с микросхемы контроллера типа UC 3525, который в свою очередь получает сигналы разрешения работы с платы управления ИБП.

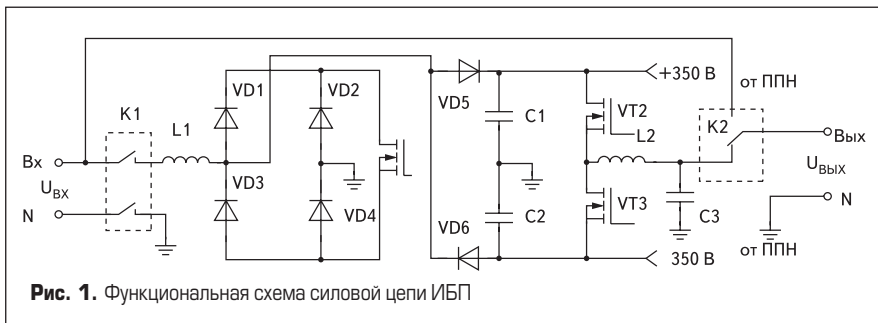


Рис. 1. Функциональная схема силовой цепи ИБП

К дифференциальной выходной обмотке высокочастотного трансформатора подключены две группы диодов, обеспечивающие выпрямление и формирование на конденсаторах C1, C2 (рис. 1) высоковольтного напряжения постоянного тока +350, -350 В относительно общей шины для питания инвертора в автономном режиме работы ИБП.

Краткое описание используемого оборудования при проведении исследований

Электродинамическая модель (ЭДМ) может воспроизводить различные, в том числе аварийные режимы электроэнергетической системы, что позволяет проводить испытания натурных образцов оборудования в условиях, близких к реальным. На ЭДМ может быть воспроизведен широкий спектр различных возмущений: короткие замыкания и отключения фаз источника, сброс и наброс нагрузки, генерирование напряжения заданной формы.

Модернизированный программно-технический комплекс ПТК «Нева» позволяет задавать определенные режимы ЭДМ в соответствии со специальной программой «Управление экспериментом». В функции ПТК входят:

- мониторинг текущего режима энергообъекта;
- цифровое осциллографирование переходных процессов;
- управление коммутирующей аппаратурой по временному или логическому признаку;
- представление на экране монитора временных диаграмм и мгновенных значений спектральных характеристик исследуемого процесса;
- печать регистрируемых данных эксперимента.

Регистратор показателей качества электрической энергии «Парма РК1.01» дает возможность получать усредненные за 3 с значения гармонических составляющих напряжения до 40-й гармоники включительно и коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения K_u . Эти характеристики входят в показатели качества электрической энергии питания электропотребителей общего назначения [3].

В статье рассматриваются результаты испытаний при работе ИБП на однофазную нелинейную, двигательную и статическую линейную нагрузки.

Однофазная эталонная нелинейная нагрузка (ЭНН) имитировалась с помощью диодного моста, нагруженного на параллельно соединенные емкость и резистор (рис. 2).

Дополнительный резистор R_s , служащий для ограничения бросков тока заряда емкости, может быть включен как со стороны переменного, так и постоянного тока выпрямительного моста. Коэффициент мощности ЭНН принимается равным 0,7, то есть 70% полной мощности S должно рассеяться в виде активной мощности на резисторах R_s и R_1 .

Величина R_s выбирается из условия рассеяния активной мощности, равной 4% общей полной мощности ЭНН, а R_1 (нагрузочный резистор) — 66% полной мощности S (В·А).

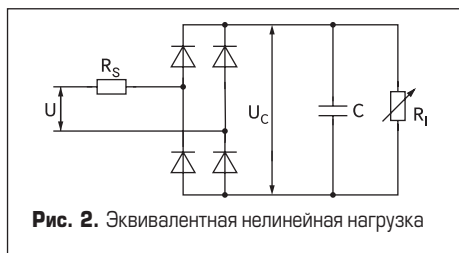


Рис. 2. Эквивалентная нелинейная нагрузка

Расчетные соотношения для выбора элементов ЭНН следующие [5]:

$$R_s = 0,04(U^2/S) \text{ Ом}; R_1 = 2,25(U^2/S) \text{ Ом}; C = 0,15(10^6/R_1) \text{ мкФ},$$

где U — действующее номинальное значение выходного напряжения ИБП (В).

В качестве двигательной нагрузки использовался компрессор холодильного агрегата с пиковой мощностью при включении 1700 В·А.

В качестве линейных нагрузок использовались лампы накаливания и нагревательные приборы.

Перечень исследуемых динамических характеристик ИБП

1. Изменение рабочего режима ИБП.
 - 1.1. Переход с сетевого режима на АБ (питание от аккумуляторных батарей).
 - 1.2. Переход с АБ на сетевой режим.
 - 1.3. Переход с режима двойного преобразования энергии (ДПЭ) на режим байпас.
2. При этих исследованиях определяются предельные значения входного напряжения при смене режимов работы ИБП в зависимости от величины нагрузки и гистерезис входного напряжения по возврату из автономного режима в сетевой.
2. Отклонение выходного напряжения от установившегося значения при переходных процессах.
 - 2.1. Ступенчатое изменение (наброс/сброс) линейной нагрузки.
 - 2.2. Ступенчатое изменение нелинейной нагрузки.
 - 2.3. Включение ИБП на двигательную нагрузку.

При этих исследованиях определяются провалы и всплески мгновенных значений вы-

ходного напряжения и тока и время возврата в установившийся режим работы ИБП после скачков нагрузки.

3. Реакция ИБП на скачки входного напряжения.
 4. Перегрузочные и защитные способности ИБП.
 - 4.1. Перегрузочные возможности инвертора.
 - 4.2. Условия перехода на байпас.
 - 4.3. Эффективность электронной защиты для отключения ИБП при значительных перегрузках и коротком замыкании.
 5. Гармонический состав выходного напряжения и тока в переходных и установившихся процессах.
 6. Влияние коэффициента искажения синусоидальности входного напряжения на гармонический состав выходного напряжения.
- Указанный перечень динамических характеристик отражает общие требования к ИБП, изложенные в стандартах [4, 5].

Результаты экспериментальных исследований

1. Исследование диапазона изменения входного напряжения, при котором ИБП серии ДПК сохраняет сетевой режим двойного преобразования энергии без перехода на АБ, показало, что полученные результаты соответствуют уровню показателей передовых производителей ИБП.

В таблице 1 приведены полученные результаты измерений при значениях нагрузки 30%, 70% и 100% номинальной величины.

Гистерезис входного напряжения по возврату из аккумуляторного режима в сетевой составил 13–17 В. Исследование ИБП при повышенных входных напряжениях до 275 В показало устойчивую работу при 100%-ной нагрузке без перехода на АБ во всем диапазоне нагрузок.

Таблица 1

Нагрузка, %	Нижнее предельное значение входного напряжения, В		
	Заявленное	Измененное	Возврат в сетевой режим
30	118	117	134
70	140	138	151
100	160	158	175

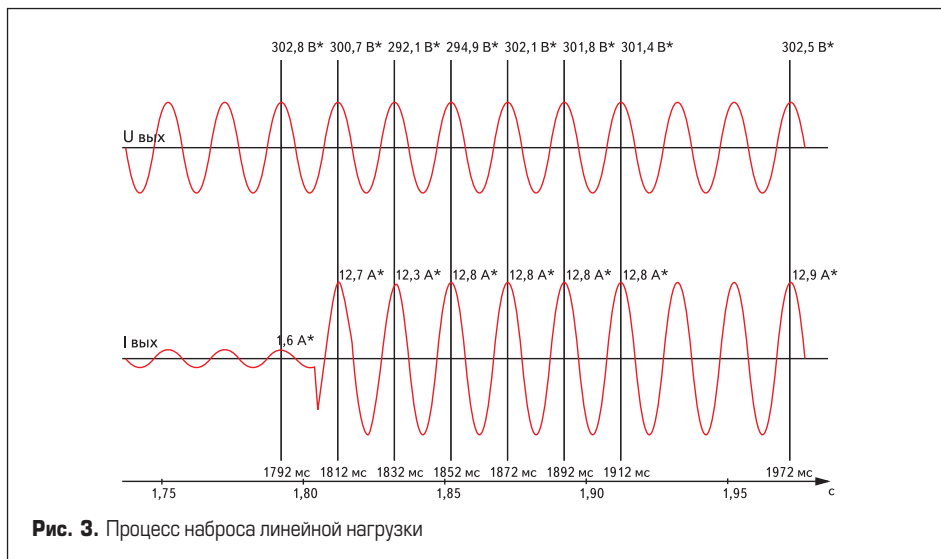


Рис. 3. Процесс наброса линейной нагрузки

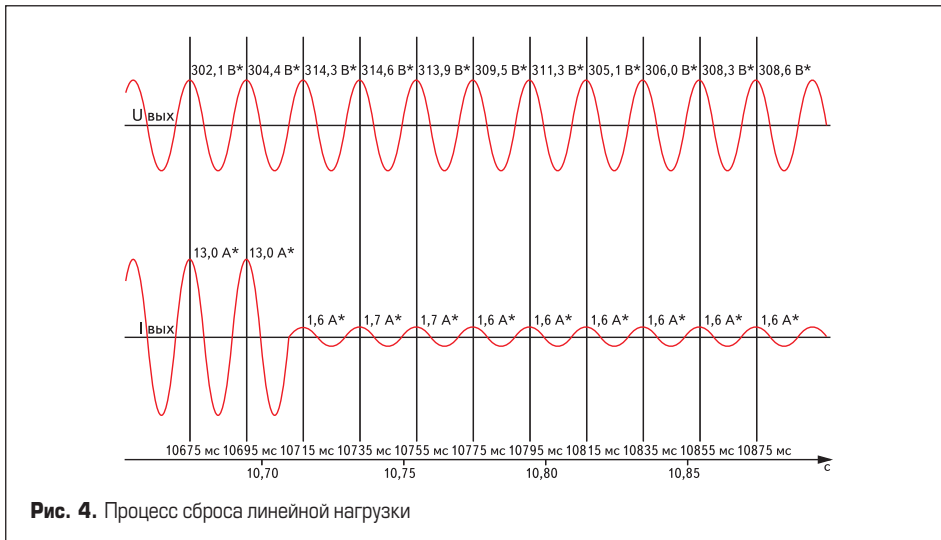


Рис. 4. Процесс сброса линейной нагрузки

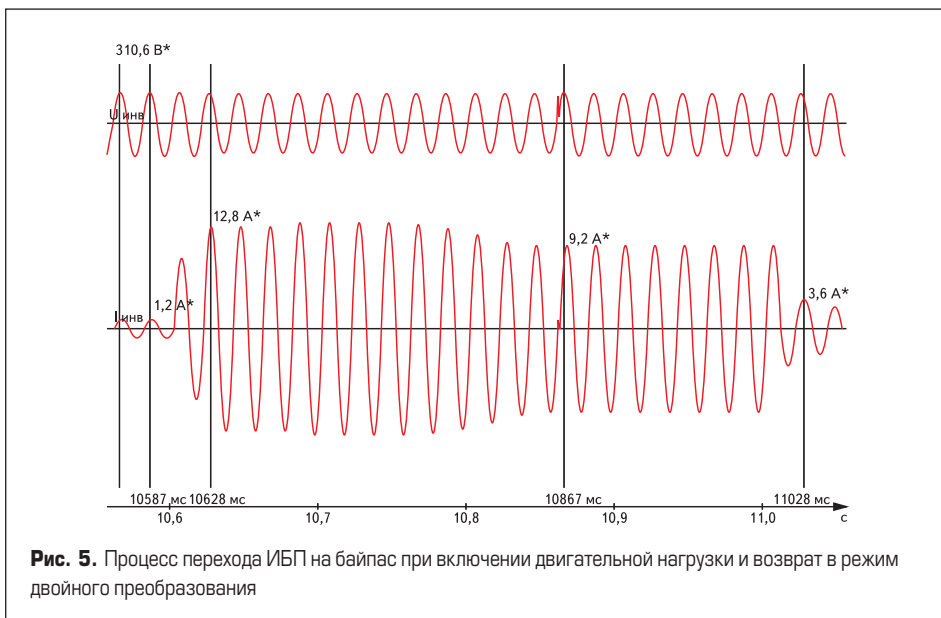


Рис. 5. Процесс перехода ИБП на байпас при включении двигательной нагрузки и возврат в режим двойного преобразования

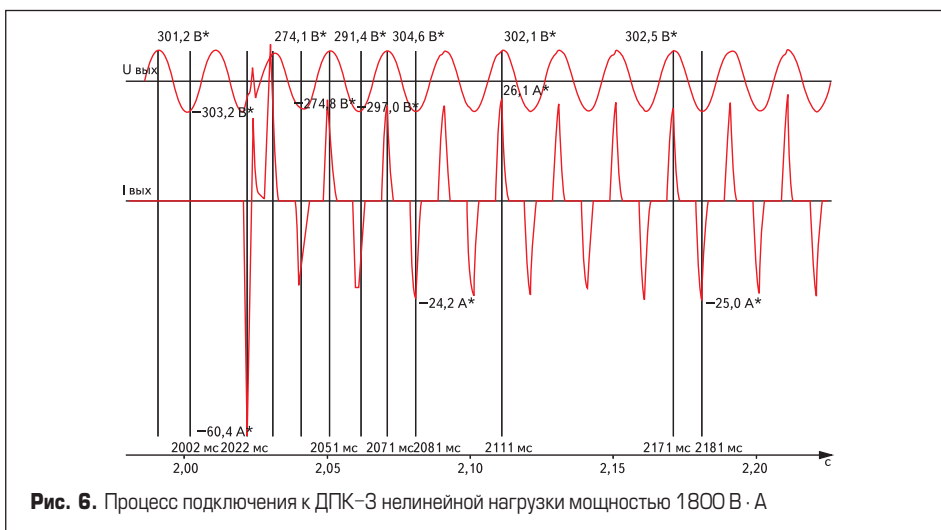


Рис. 6. Процесс подключения к ДПК-3 нелинейной нагрузки мощностью 1800 В · А

Таблица 2

Характер нагрузки	Режим работы ИБП	Коэффициент искажения синусоидальности выходного напряжения, %	Номер гармоники и % содержания				
			2	3	5	7	9
Линейный	Сетевой	0,76	0,37	0,5	0,33	0,2	0,09
	Автономный	0,81	0,37	0,42	0,47	0,29	0,15
Нелинейный	Сетевой	0,94	0,28	0,62	0,55	0,11	0,27
	Автономный	0,83	0,27	0,48	0,52	0,15	0,26

2. Результаты исследования переходных процессов при скачках нагрузки приведены на рисунках 2–5. Анализ данных показывает, что при скачке линейной нагрузки до 100% выходное напряжение снижается на 3,5% от величины установившегося значения и затем восстанавливается до исходного уровня за 60 мс (рис. 3). Отметим, что статическая точность стабилизации ИБП составляет $\pm 2\%$.

При скачкообразном сбросе 100% линейной нагрузки зарегистрировано увеличение выходного напряжения на 4% и возврат к установившемуся значению в течение 100 мс (рис. 4).

На рис. 5 приведены осциллограммы выходного напряжения и тока при включении двигательной нагрузки, при которой суммарная мощность составила 150% номинальной мощности ИБП. В связи с перегрузкой ИБП через 0,24 с автоматически перешел в режим байпас, а затем, при окончании режима пуска двигателя, вновь перешел в режим двойного преобразования. При этом видно, что переход из режима двойного преобразования в байпас и наоборот происходит мгновенно, без искажений кривых напряжения и тока.

На рис. 6 приведены осциллограммы выходного напряжения и тока ДПК-3 при включении нелинейной нагрузки, коэффициент амплитуды (крест-фактор) которой равен 2,84, а полная мощность составляла 1800 В·А. Первоначальный всплеск тока превысил в 2,4 раза пиковое значение в установившемся режиме. При этом выходное напряжение снизилось на 9% от установившегося значения и затем восстановилось до исходного уровня в течение 40 мс.

3. Исследования поведения ИБП при скачках входного напряжения показало, что ИБП обеспечивает практически мгновенную реакцию на возмущения, и стабильность выходного напряжения остается в пределах статической точности $\pm 2\%$.

4. Перегрузочные способности инвертора ИБП можно характеризовать следующими показателями. При превышении нагрузки более 10% от номинальной величины инвертор продолжает работу в течение 30 с, а затем ИБП переходит на байпас. В случае увеличения нагрузки до 150% инвертор продолжает работать 0,2 с до перехода на байпас. Процесс перехода на байпас и возврат в режим двойного преобразования был приведен на рис. 5.

Эффективность электронной защиты инвертора проверялась при автономной работе ИБП путем включения двигательной нагрузки с превышением 150% номинальной нагрузки (пуск двигателя). Через 0,22 с после включения двигателя ИБП был отключен с помощью электронной защиты от перегрузки (рис. 7). Эксперимент подтвердил паспортные данные о перегрузочной способности инвертора (200 мс) и надежность срабатывания электронной защиты ИБП.

5. Исследование гармонического состава выходного напряжения и тока при линейной и нелинейной нагрузках показало, что ко-

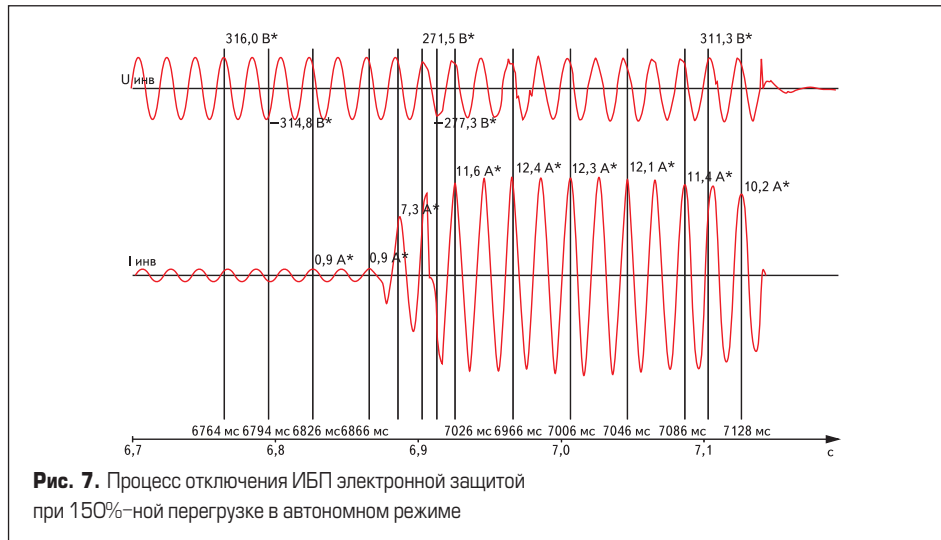


Рис. 7. Процесс отключения ИБП электронной защитой при 150%-ной перегрузке в автономном режиме

Таблица 3

Измеряемый параметр	Коэффициент искажения синусоидальности, %	Номер гармоники и % содержания				
		2	3	5	7	9
Выходное напряжение	3,8	-	3,05	0,57	1,32	0,76
Входное напряжение	2,15	-	1,44	0,69	1,36	0,31
Выходной ток	111	-	84	60	36	22
Входной ток	13	-	11	2,7	7	2,6

Таблица 4

Нагрузка, %	Место регистрации параметра	Коэффициент искажения синусоидальности напряжения, %	Номер гармоники и % содержания				
			2	3	5	7	9
0	Вход ИБП	40,81	0,1	13,3	27,9	6,8	16,9
	Выход ИБП	0,62	-	0,41	0,13	0,13	0,16
30	Вход ИБП	36,66	0,1	5,38	23,8	11,97	6,63
	Выход ИБП	1,03	-	0,52	0,25	0,11	0,07

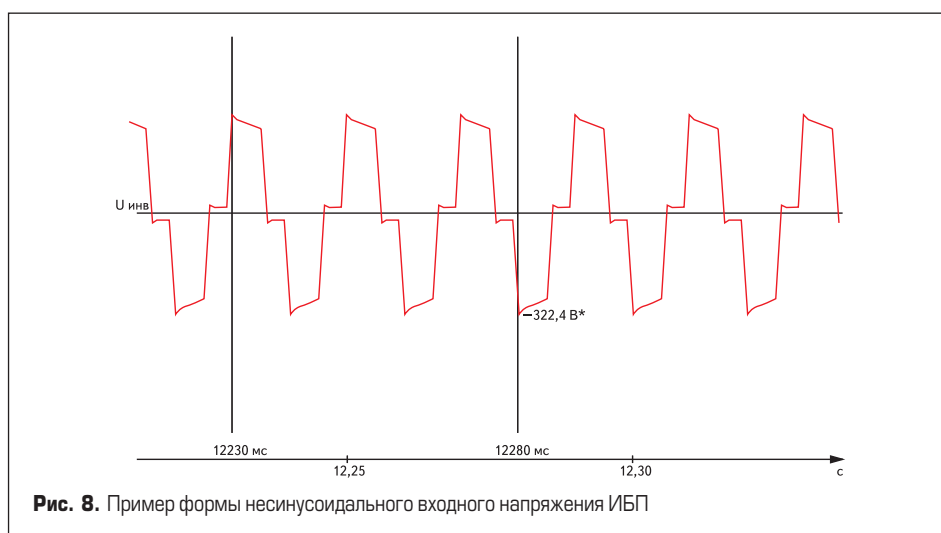


Рис. 8. Пример формы несинусоидального входного напряжения ИБП

эффицент искажения синусоидальной формы выходного напряжения не превышает допустимые значения [3] при любом характере нагрузки, как в сетевом, так и в автономном режимах. В таблице 2 приведен гармонический состав выходного напряжения ИБП ДПК-1, данные получены с помощью регистратора показателей качества электрической энергии «Парма РК1.01» в сетевом и автономном режимах работы ИБП при линейной нагрузке мощностью 390 В·А

(230 Вт) и нелинейной нагрузке мощностью 216 В·А (207 Вт).

В таблице 3 приведены результаты испытаний ДПК-3 на состав высших гармоник в выходном напряжении и токе при нелинейной нагрузке типа ЭНН мощностью 1800 В·А.

Как следует из анализа гармонического состава выходного напряжения, при использовании ИБП серии ДПК мы имеем напряжение с незначительным коэффициентом искажения синусоидальности $K_u = 3,8\%$ при существ-

венно нелинейной нагрузке и при допустимом содержании высших гармоник выходного напряжения инвертора 10% [3].

6. Влияние коэффициента искажения синусоидальности входного напряжения на гармонический состав выходного напряжения было исследовано на ЭДМ при входном напряжении от источника со значительным искажением синусоидальности кривой напряжения (рис. 8). Эксперимент показал полную работоспособность ИБП при такой форме входного напряжения в сетевом режиме с сохранением всех паспортных данных по предельному значению входного напряжения синусоидальной формы. С помощью регистратора показателей качества электрической энергии «Парма РК1.01» были произведены замеры гармонического состава напряжений на входе и выходе ИБП (таблица 4).

Как видно из результатов эксперимента, при существенно несинусоидальной форме входного напряжения (с коэффициентом искажения синусоидальности 36–41%) имеем на выходе ИБП серии ДПК практически синусоидальную форму напряжения ($K_u = 0,6–1\%$) и надежную работу ИБП в сетевом режиме в диапазоне входного напряжения, соответствующего паспортным данным для синусоидальной формы входного напряжения. Это обстоятельство особо важно при питании ИБП от дизель-генераторной установки (ДГУ) малой мощности, когда напряжение ДГУ имеет значительные искажения от синусоидальной формы.

Выводы

1. При включении ИБП серии ДПК на нелинейную нагрузку динамические характеристики обеспечивают высокую степень стабильности выходного напряжения при низком коэффициенте искажения его синусоидальности.
2. ИБП серии ДПК надежно защищают нагрузку от разнообразных возмущений в сети, в том числе от сильно искаженного высшими гармониками входного напряжения.
3. ИБП серии ДПК защищают сеть от влияния высших гармоник, присутствующих в токе нелинейных нагрузок.

Литература

1. Климов В. П. Источники бесперебойного питания серии ДПК малой мощности // Электрическое питание. 2006. № 1.
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. ГОСТ 13109-97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
4. ГОСТ 27699-88. Системы бесперебойного питания приемников переменного тока. Общие технические условия.
5. International Standard IEC 62040-3:1999, Uninterruptible Power Systems (UPS), part 3: Method of Specifying the Performance and Test Requirements.