

# Источники бесперебойного электропитания:

## устройство, принципы действия и применение

Если зарядно-подзарядные агрегаты (ЗПА), рассмотренные в одной из предыдущих статей автора, являются важнейшим элементом систем оперативного питания постоянного тока, то источники бесперебойного питания (ИБП) являются не менее важным компонентом систем оперативного питания переменного тока и вообще систем собственных нужд 0,4-кВ подстанций и электростанций. Существует множество разновидностей ИБП, отличающихся по топологии, принципу действия, конструктивному исполнению и применению. Имеются у ИБП и серьезные проблемы.

Владимир Гуревич

### Разновидности источников бесперебойного питания

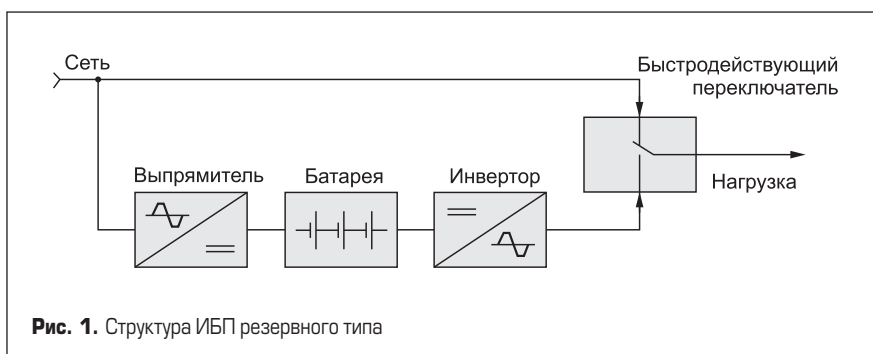
Существует множество разновидностей ИБП, отличающихся и по топологии, и по принципу действия, и по конструктивному исполнению. В соответствии с международным стандартом IEC 62040-3 [1] различают три основных типа ИБП:

- резервный — Passive Standby, который ранее назывался Off-Line (IEC 62040-3.2.20);
- линейно-интерактивный — Line-Interactive (IEC 62040-3.2.18);
- с двойным преобразованием — Double Conversion, который ранее назывался On-Line (IEC 62040-3.2.16).

ИБП резервного типа (рис. 1) наиболее простой и дешевый. В нормальном режиме работы нагрузка получает питание прямо из сети. При пропадании напряжения в питающей сети нагрузка переключается на инвертор и батарею с помощью быстродействующего переключателя за время 3–10 мс при потере главного питания. То есть при использовании такого ИБП возможны кратковременные перерывы питания от нескольких миллисекунд до половины периода питающего напряжения. Это является одним из недостатков такого ИБП, хотя для большинства

видов нагрузок такие провалы и не являются критическими. Еще одним недостатком ИБП такого типа является то, что в нормальном режиме работы в нагрузку из сети поступают все неблагоприятные воздействия, такие как искажения формы напряжения, импульсные перенапряжения, отклонения частоты и напряжения и т. д. Для частичной компенсации этих недостатков ИБП резервного типа снабжают дополнительными пассивными фильтрами гармоник, варисторами и т. д., включенными параллельно выходной цепи. Как правило, по такому принципу строятся самые дешевые и самые маломощные ИБП (до 1,5–2 кВт), например бытовые ИБП для компьютеров, встроенные источники питания которых допускают кратковременные провалы напряжения.

В линейно-интерактивном ИБП (рис. 2) нет отдельного зарядного устройства для батареи. Она получает питание с выхода постоянно работающего выпрямителя-инвертора. Нагрузка постоянно питается от сети через быстродействующий переключатель, как и в ИБП резервного типа. Основное отличие линейно-интерактивного ИБП заключается в наличии устройства регулирования (стабилизации) выходного напряжения  $U_R$  контролируемого, как правило, микропроцессором, который отслеживает напряжение линии (питающей сети) и реагирует на его изменение. Собственно говоря, именно поэтому такой ИБП и называется линейно-интерактивным (еще одно название — Voltage Independent, «независимый от напряжения»). Регулятор-стабилизатор напряжения может быть чисто электронным или феррорезонансным (в ИБП относительно небольшой мощности), а также может быть выполнен на основе автотрансформатора или вольтодобавочного трансформатора, первичная обмотка которого включена последовательно в расщелку цепи главного питания, а вторичная (обмотка возбуждения) — к дополнительному инвертору мощностью примерно около 20% мощности основного инвертора.



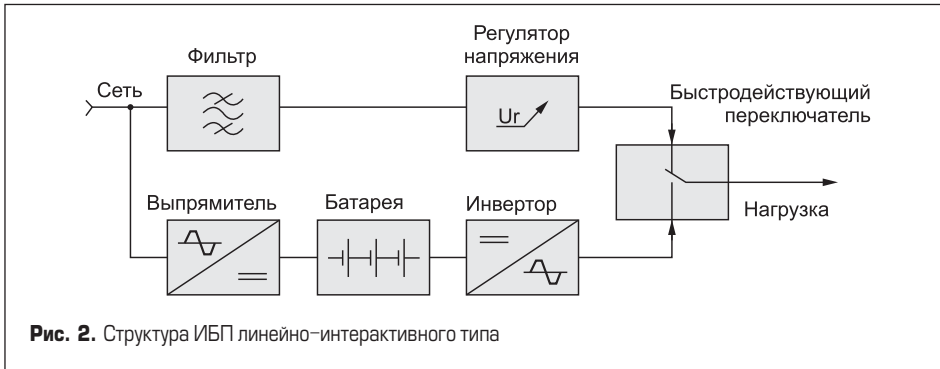


Рис. 2. Структура ИБП линейно-интерактивного типа

В последнем случае устройство называют «ИБП с дельта-преобразованием». Эта технология была разработана и запатентована компанией Silicon Group, в настоящее время ставшей подразделением American Power Conversion.

Если же напряжение в питающей сети пропадает совсем или выходит за заданные сравнительно широкие рамки, в которых осуществляется его регулирование, только тогда происходит переключение на питание от инвертора и батареи после размыкания быстродействующего переключателя. В любом случае гальваническая развязка нагрузки от питающей сети в таком ИБП обычно не обеспечивается, а частота напряжения в нагрузке полностью определяется питающей сетью. ИБП такого типа мощностью от 1 до 10 кВт нашли широкое применение в офисах и для питания промышленного компьютерного оборудования средней мощности.

Наиболее совершенными и дорогими являются ИБП с двойным преобразованием, в которых входное переменное напряжение сети сначала преобразуется в постоянное, а затем это постоянное напряжение преобразуется обратно в переменное (рис. 3). Выходное переменное напряжение такого ИБП практически никак не зависит от напряжения питающей сети ни по уровню, ни по частоте, поскольку оно во всех режимах работы полностью формируется из постоянного напряжения на выходе выпрямителя постоянно работающим инвертором. По этой причине такие ИБП называют иногда Voltage-Frequency Independent, то есть независимыми от напряжения и частоты. Они применяются для питания наиболее ответственных потребителей (например, крупных корпоративных серверов, систем управления непрерывными технологическими процессами, а также для построения централизованных систем гарантированного электропитания), требующих полной изоляции от питающей сети.

**Статический ключ**

Быстродействующий переключатель в ИБП с двойным преобразованием уже не участвует в процессе нормальной работы устройства, а применяется лишь при возникновении перегрузки инвертора или какой-либо неисправности в нем. В этом случае потребитель автоматически переключается с высоким быстродействием напрямую в сеть, причем

синхронно, то есть с сохранением фазового угла переменного тока в нагрузке. Если переключение на байпас (bypass — буквально «обходной путь») было вызвано перегрузкой во внешней цепи, то после ее устранения ИБП автоматически возвращается в нормальный режим работы. Такой переключатель называется байпасным (обходным). Автоматический байпас имеется не во всех типах ИБП, например, в нем нет смысла в маломощных ИБП резервного типа.

Для обеспечения высокого быстродействия байпасного переключателя его строят на основе мощного полупроводникового ключа, чаще всего на двух встречно-параллельно включенных тиристорах в каждой фазе (рис. 4), поэтому он и называется статическим ключом (Static Switch).

При продолжительном протекании через статический ключ полного тока нагрузки в нем будет выделяться большое количество тепла, и поэтому тиристоры, во-первых, должны быть рассчитаны на полный ток нагрузки с соответствующими запасами, а во-вторых, должны быть снабжены громоздкими и тяжелыми радиаторами. Этого можно избежать, если в течение очень короткого времени после включения статического ключа зашунтировать тиристоры контактами обычного электромагнитного контактора (рис. 4б).

Однако считается [2], что надежность статического ключа, выполненного по схеме рис. 4б, ниже, чем ключа по схеме рис. 4а с тиристорами, выбранными с соответствующими запасами по току и напряжению.

Статические ключи конструктивно выполняются не только как составная вну-

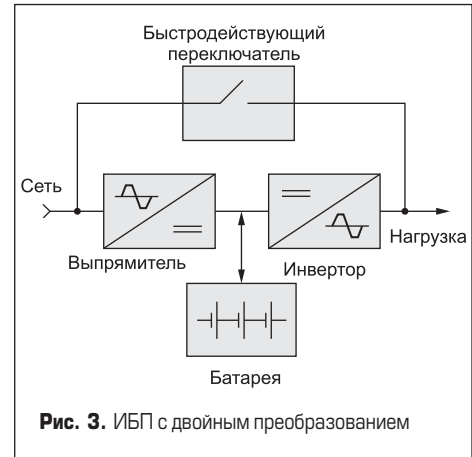


Рис. 3. ИБП с двойным преобразованием

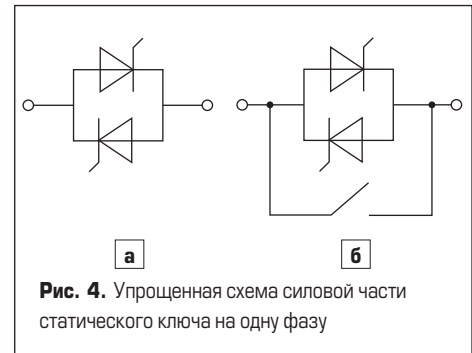


Рис. 4. Упрощенная схема силовой части статического ключа на одну фазу

тренная часть ИБП, но и в виде самостоятельных изделий (рис. 5), которые применяются для быстродействующего синхронизированного с сетью переключения питания потребителей с основного источника на резервный, для переключения между ИБП и т. д.

Помимо автоматического, почти во всех ИБП промышленного назначения средней и большой мощности имеется еще и ручной байпас, предназначенный для обеспечения технического обслуживания ИБП без перерыва электроснабжения нагрузки. Выполняется он на основе обычного переключателя достаточной мощности с ручным приводом, соединяющим напрямую нагрузку с питающей сетью в обход ИБП.

**Инвертор**

Инверторы (преобразователи постоянного напряжения в переменное) являются



Рис. 5. Статические ключи различной мощности, выполненные в виде самостоятельных изделий

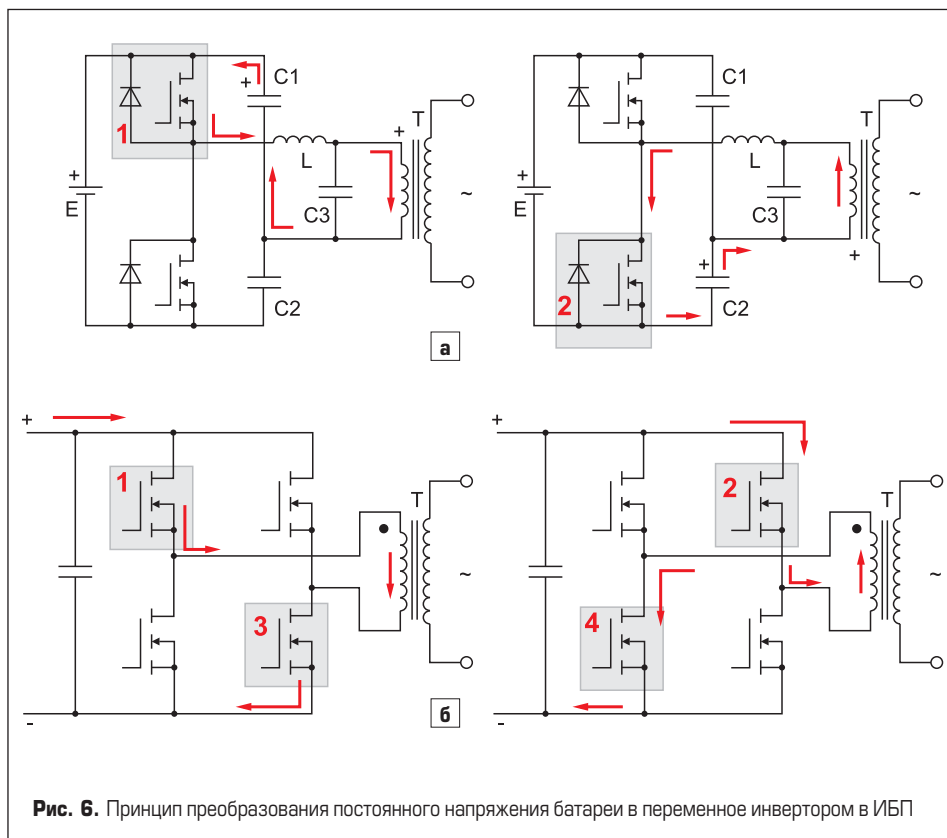


Рис. 6. Принцип преобразования постоянного напряжения батареи в переменное инвертором в ИБП

важнейшей и неотъемлемой частью всех без исключения типов ИБП. Силовые инверторы выполняют, как правило, на мощных полевых транзисторах или IGBT, работающих в ключевом режиме, то есть отпирающихся и запирающихся с частотой в десятки-сотни килогерц.

Чаще всего применяются инверторы, выполненные по схеме полумоста (рис. 6а) или полного моста (рис. 6б). В схеме полумоста конденсаторы C1 и C2 заряжены до половины напряжения источника питания каждый ( $U_{C1,C2} = 0,5E$ ). При отпирании транзистора 1 происходит разряд конденсатора C1 через первичную обмотку трансформатора T. Этот импульс разрядного тока протекает через первичную обмотку трансформатора и создает напряжение во вторичной обмотке. При запирании транзистора 1 и отпирании транзистора 2 через ту же обмотку трансформатора протекает в противоположном направлении импульс тока разряда конденсатора C2.

Таким образом, через первичную обмотку трансформатора T протекают импульсы тока противоположной полярности (т. е. переменный ток).

Строго говоря, транзисторы формируют не один, а целую пачку импульсов различной ширины. Регулирование уровня выходного напряжения осуществляется изменением ширины импульсов управления транзисторами, т. е. изменением времени нахождения транзисторов в проводящем состоянии. Такой принцип управления транзисторами (рис. 7) называется широтно-импульсной модуляцией (ШИМ).

Благодаря индуктивности трансформатора пачки импульсов тока противоположной полярности, формируемые транзисторами,

становятся похожими по форме на обычную синусоиду. В схеме полного моста (рис. 6б) вместо двух конденсаторов используются два дополнительных транзистора.

В этой схеме серия последовательных отпираний и запираний пар транзисторов 1 и 3, а затем 2 и 4 приводит к формированию пачек двуполярных импульсов тока в первичной обмотке трансформатора T. В остальном эта схема аналогична рассмотренной выше. На выходе инвертора установлены, как правило, дополнительные сглаживающие фильтры, содержащие мощные дроссели и конденсаторы.

Далеко не всегда на практике применяют ИБП в их классическом виде, как было описано выше. При наличии на рынке от-

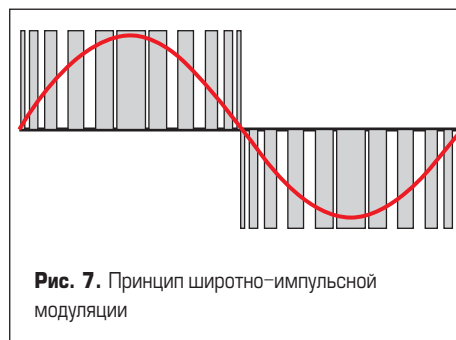


Рис. 7. Принцип широтно-импульсной модуляции

дельно инверторов и статических ключей иногда устанавливают дополнительно лишь инвертор и статический ключ, поскольку недостающие до полноценного ИБП батарея и зарядное устройство (ЗПА) уже имеются на большинстве подстанций и электростанций.

**Групповое включение ИБП**

Групповое включение ИБП применяется в том случае, когда мощности одного ИБП недостаточно, а также в том случае, когда необходимо обеспечить повышенную надежность электроснабжения потребителя. В простейшем случае применяют параллельное включение двух ИБП. Сделать это можно только с устройствами одинакового типа, снабженными специальным блоком принудительного деления нагрузки. Другое дело — последовательное включение двух ИБП (рис. 8).

В этом случае ИБП могут быть различного типа без всяких дополнительных узлов для выравнивания нагрузки. При таком включении постоянно работает ИБП 1, получающий питание от главного источника, а ИБП 2 находится в так называемом «холодном резерве». При повреждении ИБП 1 его статический ключ (S.S.) включает ИБП 2, питающийся от вспомогательного источника.

Считается, что такое включение обеспечивает большую надежность электроснабжения потребителей, чем параллельное.

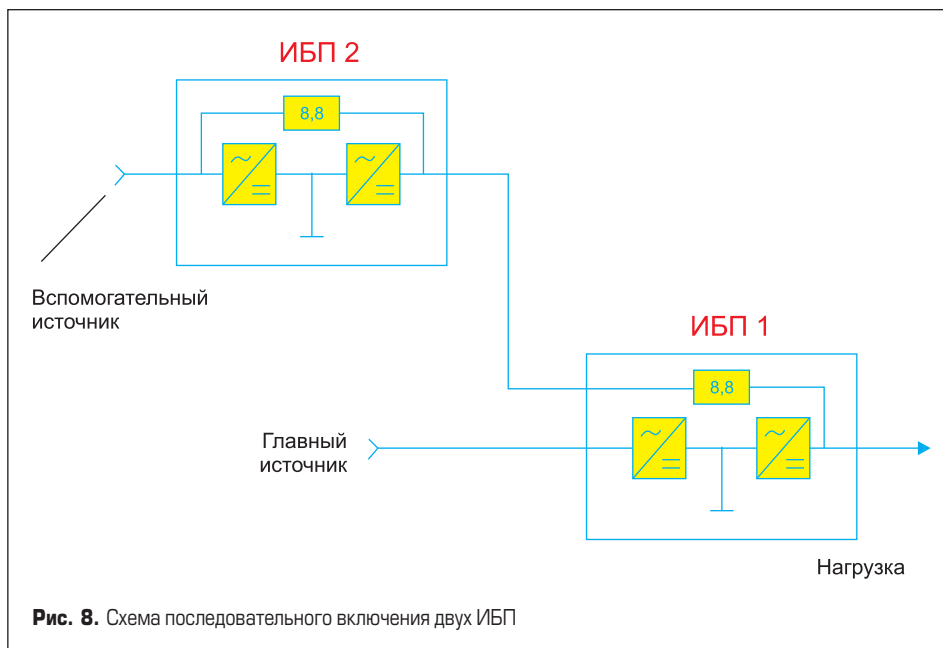


Рис. 8. Схема последовательного включения двух ИБП

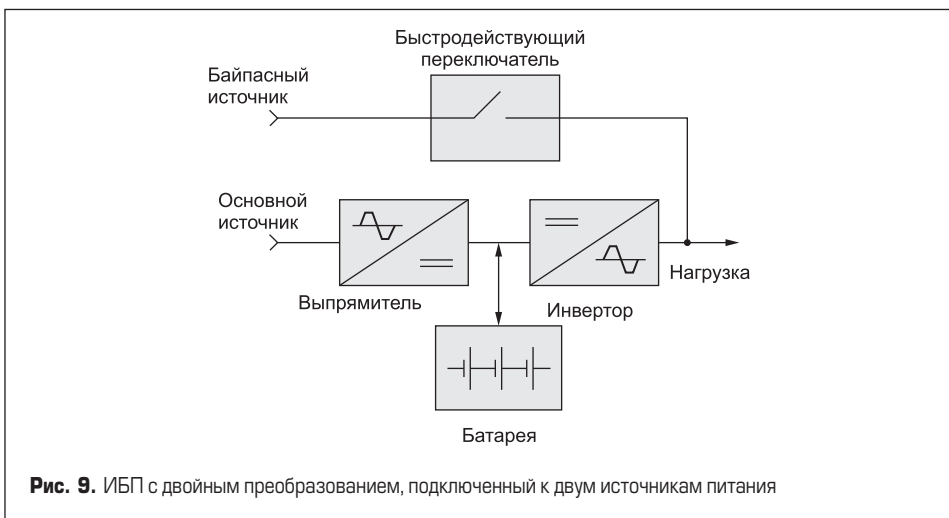


Рис. 9. ИБП с двойным преобразованием, подключенный к двум источникам питания

Использование двух независимых источников питания переменного тока применяется для повышения надежности и единичных ИБП (рис. 9).

**Проблема качества электроэнергии в сетях с ИБП**

С ростом мощности современных ИБП (а она может достигать сотен киловатт и даже единиц мегаватт) резко обострилась проблема загрязнения сетей электроснабжения высокочастотными гармониками, являющимися результатом искажений формы тока, потребляемого из сети мощными ИБП (рис. 10). Такие ИБП, как уже отмечалось выше, выполняются с двойным преобразованием. Они обеспечивают потребителей, подключенных к их выходу, электроэнергией хорошего качества, но в то же время существенно «загрязняют» питающую сеть, из которой потребляют энергию.

Любой искаженный (или несинусоидальный) периодический сигнал (ток, напряжение) может быть математически представлен состоящим из набора чисто синусоидальных сигналов, среди которых может быть выделен сигнал основной частоты, и набора синусоидальных сигналов с частотой, кратной частоте основного сигнала.

Так, например, если частота основного сигнала равна 50 Гц, то частота второй гармоники будет 100 Гц, а пятой — 250 Гц. Сигналы с частотой выше основной называются гармониками, а сигналы с частотой ниже — субгармониками. Разложение несинусоидального (искаженного) периоди-

ческого сигнала на набор синусоидальных сигналов носит название разложения в ряд Фурье. Суть этого метода в том, что всегда можно подобрать ряд гармонических (то есть синусоидальных) сигналов с такими амплитудами, частотами и начальными фазами, алгебраическая сумма ординат которых в любой момент времени равна ординате результирующего несинусоидального сигнала (рис. 11).

Наличие гармоник в электрических сетях отрицательно сказывается как на самих сетях (увеличение тока в нулевом проводе, дополнительные потери и нагрев проводов и кабелей, ускоренное старение их изоляции, резонансные явления), так и почти на всех видах электрооборудования, за исключением, разве что, простейших нагревательных приборов. Возникают вредные наводки и в телекоммуникационных и управляющих сетях; появляется повышенный акустический шум в электромагнитном оборудовании, усиливается вибрация в электромашинных системах, ускоренными темпами пересыхает изоляция электрических машин, перегреваются трансформаторы и конденсаторы и т. д. По этой причине допустимый уровень гармоник в электрических сетях ограничен стандартами.

Количество гармоник в электрических сетях принято характеризовать коэффициентом гармонических искажений (КГИ, или Total Harmonic Distortion, THD). Для напряжения этот коэффициент рассчитывается по формуле:

$$THD_{\%} = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \dots + V_{\infty}^2}}{V_1} \times 100\%,$$

где  $V_2, V_3, V_4 \dots$  — напряжения соответственно второй, третьей, четвертой и последующих гармоник, а  $V_1$  — напряжение первой (основной).

В русскоязычной технической литературе существует некоторая путаница в использовании терминов «коэффициент нелинейных искажений» (КНИ) и «коэффициент гармонических искажений» (КГИ), связанная с тем, что эти разные, в принципе, понятия часто путают между собой, применяя то одно, то другое для обозначения того, что в стандарте ГОСТ 13109-97 [3] называется «коэффициентом искажения синусоидальности кривой напряжения». Мы будем использовать обозначение КГИ в качестве эквивалента международному обозначению THD.

Формула для расчета КГИ по току имеет такой же вид, за исключением того, что вместо гармоник напряжения в нее входят гармоники тока. Из-за существенного отрицательного влияния гармоник на электрооборудование максимально допустимая величина КГИ по напряжению ограничена международными стандартами IEC и американским стандартом IEEE на уровне 5% для электрических сетей общего назначения с напряжением от 120 В до 69 кВ. В некоторых других стандартах, например в британских [4–5], а также в российском ГОСТ 13109-97 для сетей 0,4 кВ максимально допустимая величина КГИ по напряжению составляет 8%.

Что касается ограничений для гармонических искажений по току, то здесь дело обстоит значительно сложнее, и стандарты не дают фиксированного для всех случаев значения, поскольку максимально допустимое значение гармонических искажений по току в сети зависит от свойств самой сети, в частности, от ее импеданса, определяемого по максимально возможному току короткого замыкания сети. А в российском ГОСТ 13109-97 вообще нет никаких ограничений по искажениям тока. Зависимость допустимого уровня гармоник в сети от ее импеданса можно проиллюстрировать на примере участка сети с мощной нелинейной нагрузкой, включенной в конце магистральной линии, и относительно маломощных линейных нагрузок, распределенных по сети (рис. 12).

Если через магистральную линию (например, кабельную) протекает несинусоидальный ток величиной 100 А с коэффициентом нели-



Рис. 10. ИБП большой мощности

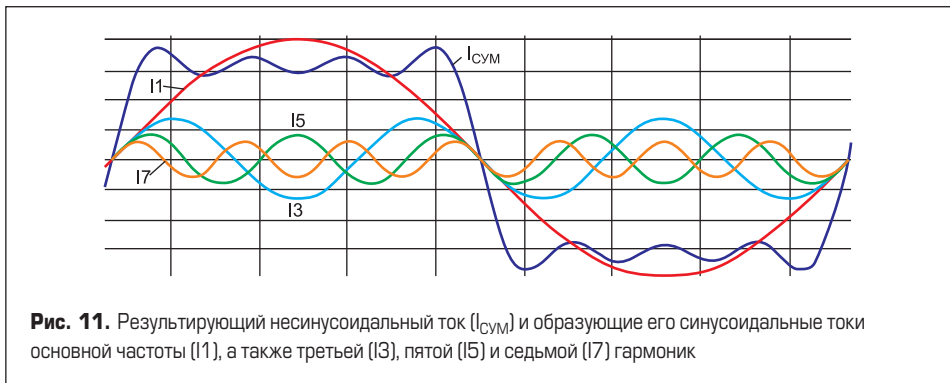


Рис. 11. Результирующий несинусоидальный ток ( $I_{\text{сум}}$ ) и образующие его синусоидальные токи основной частоты ( $I_1$ ), а также третьей ( $I_3$ ), пятой ( $I_5$ ) и седьмой ( $I_7$ ) гармоник



Рис. 12. Распределение гармоник тока и напряжения в сети с мощной нелинейной нагрузкой и линейными нагрузками, распределенными по сети

нейных искажений 25,5%, то этот ток создает на участках этой линии падения напряжения. Чем больше импеданс линии, тем большее падение напряжений каждой гармоники создает соответствующая гармоника тока. В результате источником напряжения для маломощных линейных нагрузок будет нелинейное напряжение, обуславливающее протекание через линейную нагрузку нелинейного тока со всеми вытекающими из этого негативными последствиями. В связи с этим становится понятным, почему стандарты увязывают максимально допусти-

мое значение искажений по току с параметрами сети, ведь в зависимости от импеданса участков сети один и тот же протекающий нелинейный ток будет по-разному влиять на потребителей, питающихся от этой сети (табл. 1).

Отличие THD тока от TDD:

$$I_{THD} = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + I_5^2 + \dots}}{I_1} \times 100\%,$$

$$I_{TDD} = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + I_5^2 + \dots}}{I_L} \times 100\%.$$

Таблица 1. Предельные значения искажений тока в сетях общего назначения с номинальным напряжением от 120 В до 69 кВ (IEEE Std.519)

$I_{sc}/I_L$	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
120 В–69 кВ						
<20	4	2	1,5	0,6	0,3	5
20–50	7	3,5	2,5	1	0,5	8
50–100	10	4,5	4	1,5	0,7	12
100–1000	12	5,5	5	2	1	15
>1000	15	7	6	2,5	1,4	20

Примечание:  $I_{sc}$  — ток короткого замыкания (Short Circuit Current);  $I_L$  — максимальный ток нагрузки (Maximum Load Current);  $h$  — номер гармоники; TDD — Total Demand Distortion (коэффициент искажения потребляемого тока нагрузки).

Таблица 2. Токи, измеренные в цепи шестипульсного частотно-регулируемого электропривода мощностью около 150 кВт

Нагрузка, %	Ток, А		Ток гармоник, А				$I_{THD}$ , %	$I_{TDD}$ , %
	RMS	60 Гц	5	7	11	13		
100	233	182	118	80	12	12	79	79
75	187	142	96	70	15	7	86	65
50	134	96	69	54	17	5	96	48
25	67	43	33	29	14	9	120	30

Таблица 3. Нормы эмиссии гармонических составляющих тока для симметричных трехфазных нагрузок (ГОСТ Р 51317.3.12-2006)

Минимальное значение $R_{sc}$	Предельно допустимое значение гармонической составляющей тока $I_n/I_1$ , %				Предельно допустимое значение коэффициента гармонических составляющих, %	
	$I_5$	$I_7$	$I_{11}$	$I_{13}$	СКГС	ЧВКГС
33	10,7	7,2	3,1	2	13	22
66	14	9	5	3	16	25
120	19	12	7	4	22	28
250	31	20	12	7	37	38
350	40	25	15	10	48	46

Примечание:  $I_n$  — значение тока n-ой гармонической составляющей,  $I_1$  — значение основной составляющей тока.

То есть если THD тока является отношением среднеквадратичного напряжения суммы высших гармоник тока (кроме первой) к току первой гармоники ( $I_1$ ), то TDD — это отношение среднеквадратичного напряжения суммы высших гармоник тока (кроме первой) к максимальному току нагрузки ( $I_L$ ). Стандарт IEEE Std.519 рекомендует в качестве максимального тока нагрузки использовать усредненное за 12 месяцев значение. В режиме полной номинальной нагрузки  $I_{THD} = I_{TDD}$  (табл. 2) [7].

Из таблицы 2 хорошо видно, что с уменьшением нагрузки электропривода общее количество «загрязнений» сети ( $I_{THD}$ ) возрастает (что связано с режимом работы инвертора), а расчетное значение  $I_{TDD}$  — наоборот, уменьшается, что означает снижение вредного влияния электропривода на сеть. Из этого, в частности, следует, что даже очень большие значения коэффициента гармонических искажений тока в цепи нелинейной нагрузки могут не оказывать существенного влияния на других потребителей, питающиеся от той же сети, особенно если мощность сети (максимальный ток короткого замыкания) значительно превышает мощность нагрузки (большое значение  $I_{sc}/I_L$ ).

Использование методики, предусмотренной стандартом IEEE Std.512, позволяет вполне корректно оценить влияние искажений тока. Несколько иной подход предлагается в российских стандартах [8–10], в которых в зависимости от тока нагрузки (<16, >16, <75 А) приведены таблицы максимальных допустимых значений токов (в процентах по отношению к первой гармонике) для каждой гармоники (табл. 3), а также отличающиеся от описанных выше обобщенные показатели для гармоник:

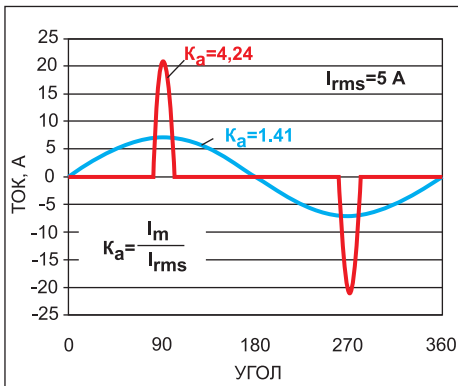
$$СКГС = \sqrt{\sum_{n=2}^{40} \left( \frac{I_n}{I_1} \right)^2}, \quad ЧВКГС = \sqrt{\sum_{n=14}^{40} \left( \frac{I_n}{I_1} \right)^2},$$

где: СКГС — суммарный коэффициент гармонических составляющих; ЧВКГС — частичный взвешенный коэффициент гармонических составляющих;

$$R_{sc} = U_{nom} / (\sqrt{3} Z_{equ}),$$

$I_{equ}$  — максимальное среднеквадратичное значение тока.

Дополнительно к рассмотренным выше показателям гармонического состава тока и напряжения применяются и другие показатели, например такие, как крест-фактор (Crest Factor), который иногда называют также коэффициентом амплитуды ( $K_a$ ) или пик-фактором. Крест-фактор — это отношение амплитудного значения сигнала к его действующему значению (RMS) (рис. 13). Кроме крест-фактора, применяется также и такой показатель, как коэффициент формы кривой (Form Factor) — отношение действующего значения сигнала к его среднему значению. Для синусоидального сигнала крест-фактор равен 1,41, а коэффициент формы — 1,11.



**Рис. 13.** Крест-фактор (коэффициент амплитуды  $K_a$ ) для синусоидального и несинусоидального токов с одинаковым действующим значением ( $I_{rms}$ ) 5 А

Еще одним показателем, характеризующим влияние искажений тока (напряжения), вносимых нелинейными нагрузками в электрические сети, является так называемый К-фактор (K-Factor). Фактически К-фактор — это коэффициент увеличения потерь в силовом трансформаторе за счет нелинейности нагрузки. В соответствии со стандартами Underwriters Laboratories [11, 12] К-фактор рассчитывается по следующей формуле:

$$K = \sum_{h=1}^{\infty} (I_{h(rms)})^2 h^2,$$

где  $I_{h(rms)}$  — среднеквадратичное (rms) значение тока гармоники  $h$ , потребляемого нагрузкой,  $h$  — номер гармоники.

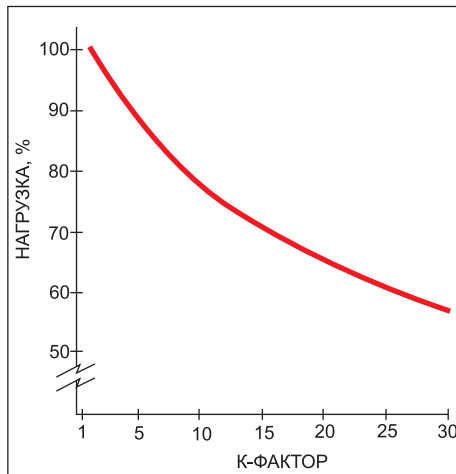
Часто в литературе приходится встречать эту формулу со ссылкой на стандарт IEEE [13]. Это распространенная ошибка, поскольку в этом стандарте предлагается иной показатель оценки влияния несинусоидальности тока на силовые трансформаторы, который называется Harmonic Loss Factor — коэффициент потерь от гармоник  $F_{HL}$ :

$$F_{HL} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} I_h^2 h^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} I_h^2} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2 h^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2}.$$

Между этими двумя показателями имеется следующее соотношение:

$$K = \left[ \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} I_h^2}{I_R^2} \right] F_{HL}.$$

Не существует прямой корреляции между THD с одной стороны, и К-фактором или  $F_{HL}$  с другой, поэтому в стандарте IEEE [13] приведены таблицы с результатами расчетов  $F_{HL}$  для различных наборов гармоник в токе нагрузки. Имеются и таблицы с расчетами К-фактора для различных типов нагрузок. К сожалению, зная К-факторы отдельных индивидуальных нагрузок, подключенных к сети, нельзя определить его суммарное (результатирующее) значение по той при-



**Рис. 14.** Зависимость максимально допустимой загрузки силового трансформатора от К-фактора его нагрузки

чине, что увеличение в сети разнородных гармоник, произведенных различными нагрузками, приводит не к увеличению, а к уменьшению степени «загрязненности» сети гармониками и, естественно, к уменьшению и THD, и К-фактора. Происходит это в результате компенсирующего влияния друг на друга гармоник, произведенных различными нелинейными нагрузками. Однако из этих таблиц можно получить определенную полезную информацию. Например, из этих таблиц следует, что для нагрузки в виде ламп накаливания  $K = 1$ ; для источника бесперебойного питания без фильтра на входе  $K = 13$ , а для такого же ИБП с фильтром  $K = 4$ .

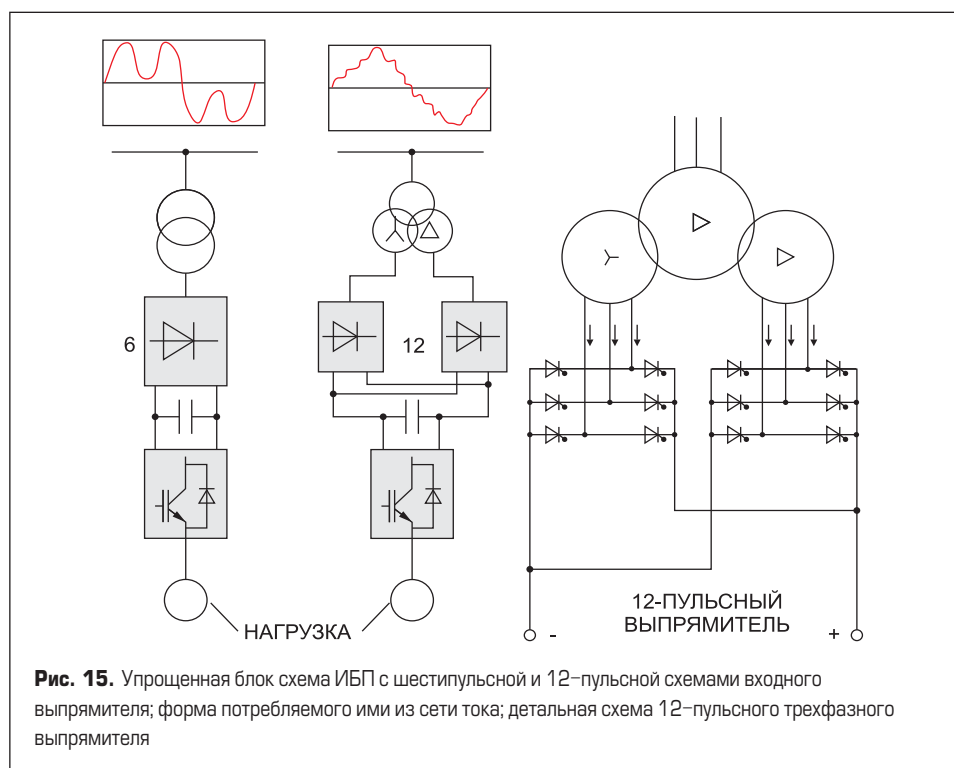
Полностью нагруженный сухой трансформатор при К-факторе, равном 4, выделяет на 10% больше тепла, чем при линейной нагрузке ( $K = 1$ ), а при  $K = 13$  он выделяет уже на 25% больше тепла, ко-

торое должно куда-то отводиться, если трансформатор полностью нагружен, или на такую же величину должна быть уменьшена нагрузка трансформатора [14]. В частности, рис. 14 показывает, что при наличии мощного ИБП без специального фильтра и использовании в качестве нагрузки ( $K = 13$ ) силового трансформатора собственных нужд на подстанции или электростанции, мощность трансформатора должна быть как минимум на 25% больше мощности нагрузки, в то время как для ИБП с фильтром ( $K = 4$ ) это превышение составляет около 10%.

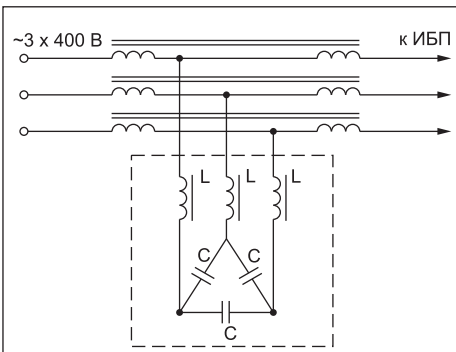
Для питания мощных нелинейных нагрузок выпускаются специальные трансформаторы с улучшенным охлаждением, для которых указывается максимальный К-фактор нагрузки, при котором трансформатор можно нагружать на все 100% (для обычного трансформатора  $K = 1$ ).

Из всего вышесказанного становится понятной важность проблемы искажений тока и напряжений, вносимых в питающую сеть мощными нелинейными нагрузками, и актуальность борьбы с ними. Источник бесперебойного питания является именно такой нелинейной нагрузкой. Какие же меры борьбы с этими искажениями применяют в сетях с мощными ИБП?

Шестипульсные выпрямители, применяемые в трехфазных ИБП, создают высокий уровень пятой гармоники тока в питающей сети (рис. 15). Поэтому для снижения искажений в ИБП часто применяют 12-пульсные схемы, образованные двумя трансформаторами со вторичными обмотками, включенными по схемам «звезда» и «треугольник», и двух выпрямительных мостов, выходы которых включены параллельно. Другой мерой уменьшения влияния ИБП на питающую сеть является применение мощных резонансных фильтров пятой гармоники (как наиболее



**Рис. 15.** Упрощенная блок схема ИБП с шестипульсной и 12-пульсной схемами входного выпрямителя; форма потребляемого ими из сети тока; детальная схема 12-пульсного трехфазного выпрямителя



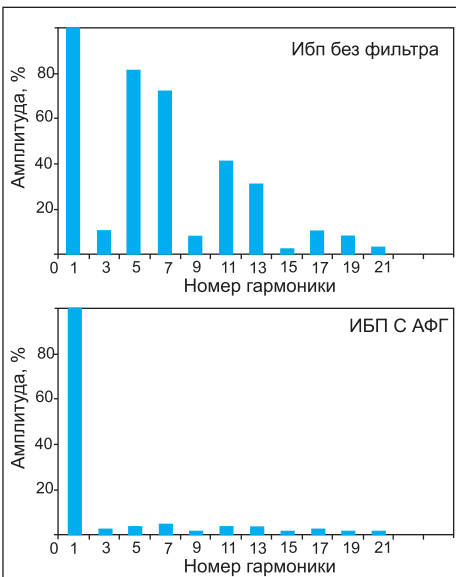
**Рис. 16.** Пассивный резонансный фильтр 5-й гармоники для ИБП

значимой в спектре), содержащих дроссели и конденсаторы (рис. 16).

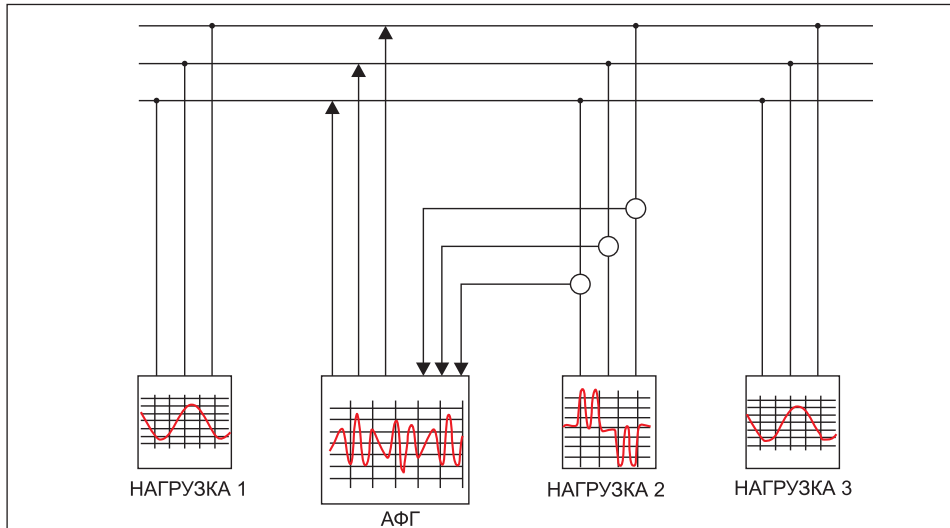
Эффективной мерой уменьшения влияния ИБП на питающую сеть является также снижение импеданса распределительной сети (рис. 12). Это достигается увеличением сечения кабелей (проводов). Максимальное эффективное сечение жил кабелей (проводов) составляет приблизительно 95 мм<sup>2</sup>. С дальнейшим увеличением сечения кабелей их индуктивность остается относительно постоянной, поэтому для еще большего снижения импеданса кабелей используют их параллельное соединение. Уменьшение влияния на питающую сеть может быть достигнуто и за счет разделения сети на участки с использованием на каждом из них своего ИБП меньшей мощности.

Весьма эффективной мерой борьбы с гармониками в сетях с мощными ИБП является применение активных фильтров гармоник (АФГ), которые анализируют гармонический состав тока в цепи с нелинейной нагрузкой и генерируют в сеть гармоники, находящиеся в противофазе с гармониками тока нагрузки (рис. 17).

Существует два основных типа АФГ, отличающихся по способу включения в сеть: последовательные и параллельные.



**Рис. 18.** Спектральный состав тока, потребляемого из сети ИБП без фильтра, и тока в магистральной линии с включенным АФГ



**Рис. 17.** Схема включения активного фильтра гармоник (АФГ) в сеть с мощным источником гармоник (нагрузка 2)

Последовательные АФГ включаются в разрыв трехфазной линии посредством вольтодобавочных трансформаторов. Обмотка с небольшим числом витков, намотанная толстым проводом, включена последовательно в разрыв цепи питания, а обмотка с большим числом витков и тонким проводом включена в выходную цепь АФГ. Такие устройства довольно громоздки и дороги. Большее распространение получили АФГ параллельного включения (рис. 17).

Применение АФГ оказывается очень эффективным (рис. 18), поскольку, в отличие от пассивных резонансных фильтров, активные подавляют все неосновные составляющие токов сетей в определенном диапазоне частот, в том числе неканонические и низкочастот-

ные. Такие устройства производятся сегодня многими компаниями и представлены на рынке во всем спектре мощностей на токи от десятков до сотен ампер (рис. 19).

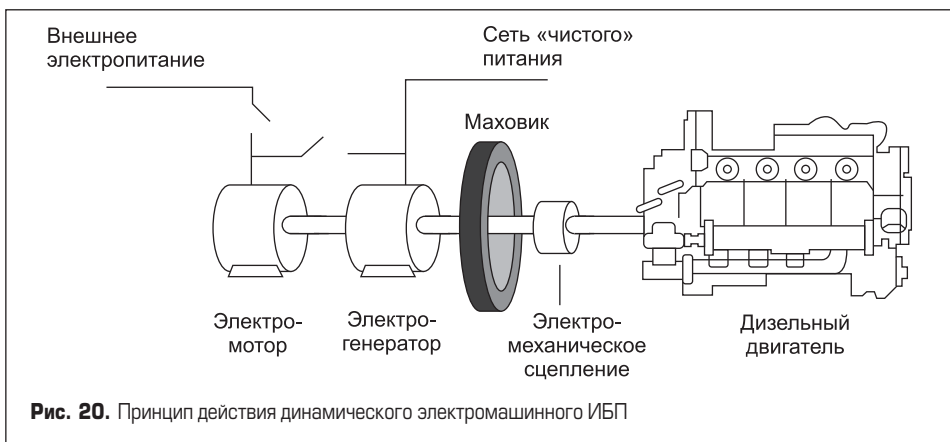
### Электромашинные и гибридные ИБП

Заканчивая рассмотрение ИБП, следует упомянуть об электромашинных агрегатах бесперебойного питания (рис. 20).

В этих агрегатах электромотор постоянно вращает электрогенератор, питающий нагрузку. На их общем валу установлен маховик, и через муфту электромеханического сцепления к этому валу подсоединен вал дизельного двигателя. При исчезновении



**Рис. 19.** Внешний вид АФГ, производимых различными компаниями



**Рис. 20.** Принцип действия динамического электромашинного ИБП

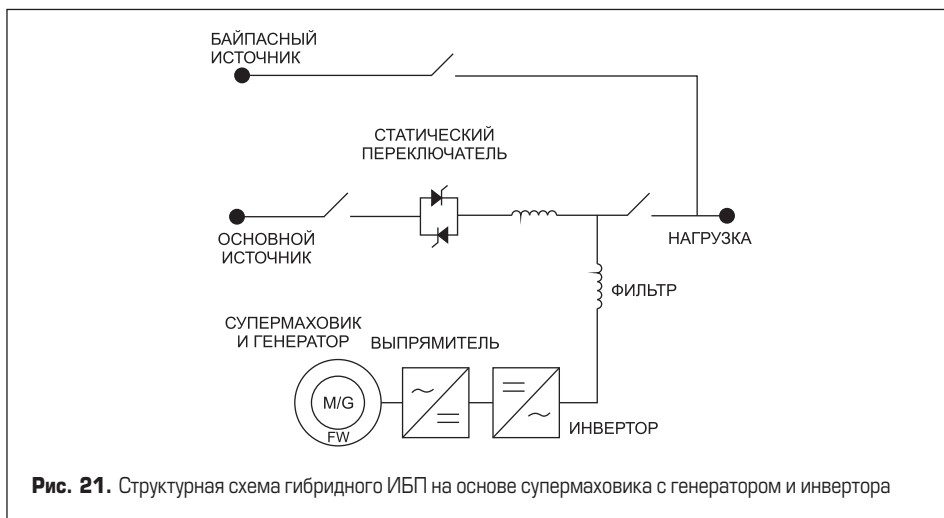


Рис. 21. Структурная схема гибридного ИБП на основе супермаховика с генератором и инвертора

внешнего электропитания генератор продолжает вращаться и вырабатывать электроэнергию в течение времени, необходимого для запуска дизеля. С восстановлением внешнего электропитания электродвигателя дизель заглохнет. Таким образом, обеспечивается бесперебойное электропитание потребителей.

Еще одной разновидностью ИБП, получающей в последнее время все большее распространение, является агрегат гибридного типа на базе супермаховика с генератором и инвертора (рис. 21).

В этом устройстве супермаховик с подшипниками на магнитной подвеске медленно разгоняется до очень высоких оборотов с помощью специального малоомощного электропривода, поддерживающего его вращение. Как правило, супермаховик помещен в вакуумную камеру, чтобы ему не мешало сопротивление воздуха. Супермаховик соединен с валом генератора посредством порошковой муфты сцепления с регулируемым скольжением для согласования очень высоких оборотов маховика со значительно более низкими оборотами генератора. По мере расходования энергии маховика и снижения его оборотов скольжение в муфте сцепления уменьшается.

Устройства такого рода выпускаются в виде конструкций шкафного типа (рис. 22).

Выпускаются также ИБП на таком принципе и в виде одиночных модулей, собираемых в большие группы в стандартном контейнере (рис. 23).

Литература

1. IEC 62040-3: 2004. Uninterruptible power systems (UPS). Part 3: Method of specifying the performance and test requirements.
2. Kulkarni A. A Hidden Reliability Threat in UPS Static Bypass Switches // White Paper № 96. American Power Conversion. 2006.
3. ГОСТ 13109-97 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения».
4. G5/4-1: 2005 Managing Harmonics. A Guide to ENA Engineering Recommendation.
5. BS EN 50160:2010 Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks.
6. IEEE Std. 519-1992. IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems, IEEE Industry Applications Society/Power Engineering Society.

7. Hoevenaars T., LeDoux K., Colosino M. Interpreting IEEE Std 519 and Meeting its Harmonic Limits in VFD Applications // Petroleum and Chemical Industry Conference. Record of Conference Papers. IEEE Industry Applications Society 50th Annual. 2003.
8. ГОСТ Р 51317.3.2-2006 (МЭК 61000-3-2:2005) «Совместимость технических средств электромагнитная. Эмиссия гармонических составляющих тока техническими средствами с потребляемым током не более 16 А (в одной фазе). Нормы и методы испытаний».
9. ГОСТ Р 51317.3.5-2006 (МЭК 61000-3-5:1994) «Совместимость технических средств электромагнитная. Ограничение колебаний напряжения и фликера, вызываемых техническими средствами с потребляемым током более 16 А, подключаемыми к низковольтным системам электроснабжения. Нормы и методы испытаний».
10. ГОСТ Р 51317.3.12-2006 (МЭК 61000-3-12:2004) «Совместимость технических средств электромагнитная. Ограничение гармонических составляющих тока, создаваемых техническими средствами с потребляемым током более 16 А, но не более 75 А (в одной фазе), подключаемыми к низковольтным системам электроснабжения общего назначения. Нормы и методы испытаний».
11. Standard UL1561. Dry-Type General Purpose and Power Transformers. 1994.
12. Standard UL1562. Transformers, Distribution, Dry-Type-Over 600 Volts. 1994.
13. IEEE C57.110/D7-1998. Recommended Practice for Establishing Transformer Capability When Supplying Nonsinusoidal Load Currents.
14. Deshpande K., Holmukhe R., Angal Y. K-Factor Transformers and Non-linear Loads // National Conference. Bharati Vidyapeeth Deemed University, College of Engineering. 2011.



Рис. 22. ИБП гибридного типа на базе супермаховика и инвертора, производимый компанией Caterpillar на мощности от 250 кВА (одиночный шкаф) до 1200 кВА (сборка, показанная на рисунке)

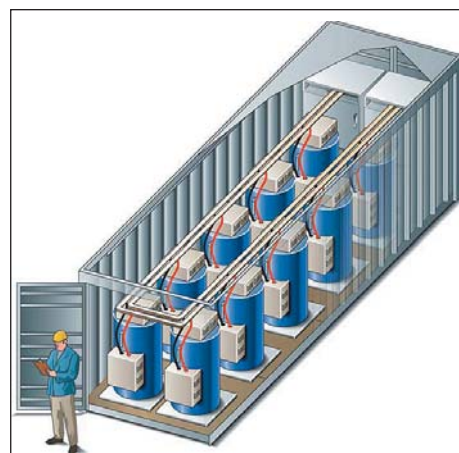


Рис. 23. ИБП гибридного типа на основе супермаховика и инвертора, производимые в виде отдельных модулей мощностью 250 кВА, собираемых в стандартном контейнере в блоки мощностью 2,5 МВА