

## Пассивные корректоры коэффициента мощности для однофазных и трехфазных модулей питания

Игорь ТВЕРДОВ

**Рассмотрены вопросы создания пассивных корректоров коэффициента мощности для модулей питания, работающих от однофазных и трехфазных сетей. Пассивные корректоры, использующие только дроссели и конденсаторы просты, надежны и не генерируют радиопомех. Для таких корректоров приведены технические решения и основные соотношения для проектирования.**

Сетевые источники вторичного электропитания (ИВЭП) с бестрансформаторным входом (БТВ), благодаря высоким энергетическим и массо-габаритным характеристикам, за последние 20 лет практически вытеснили традиционные. В то же время возникли две серьезные проблемы, связанные с применением таких ИВЭП. Первая связана с тем, что теперь в состав радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) входит новый мощный генератор радиопомех, который заметно ухудшил электромагнитную обстановку. Чтобы уменьшить помехи в блоках питания на основе ИВЭП с БТВ, используются фильтры радиопомех (ФРП), как во входных, так и в выходных цепях, которые занимают до 10% объема блока [1].

Еще одна проблема таких ИВЭП связана с импульсным потреблением тока. В ИВЭП с БТВ входной выпрямитель с емкостным фильтром потребляет от сети импульсный ток длительностью всего 0,25–0,3 полупериода при соответствующем увеличении его амплитуды. Несинусоидальный характер потребляемого тока вызывает искажения формы кривой напряжения питающей сети, причем наиболее остро это проявляется в сетях ограниченной мощности, к которым относятся системы электроснабжения (СЭС) автономных объектов. Известно, что такие СЭС строятся на основе встроенных электроагрегатов, прицепных электростанций, электроустановок с отбором мощности, значение которой выбирается соизмеримым с мощностью, потребляемой РЭА.

С искажениями формы кривой напряжения первичных источников ограниченной мощности разработчики РЭА сталкивались и раньше, при применении трансформаторных выпрямительных устройств. Обычным требованием было использование выпрямительных нагру-

зок, которые составляли не более 20–30% от мощности первичных источников. Внедрение ИВЭП с БТВ резко обострило эту проблему.

Искажения формы кривой напряжения питающей сети не только нарушают функционирование других потребителей, подключаемых параллельно с ИВЭП с БТВ к ЭА, но и нарушают работу самого источника. Форма напряжения на выходе ЭА при работе на ИВЭП с БТВ соизмеримой мощности становится трапецеидальной. Регулятор ЭА старается поддерживать среднее значение этого напряжения на уровне среднего значения напряжения синусоидальной формы. В результате значительно возрастают токи намагничивания сетевых трансформаторов в сервисных источниках ИВЭП с БТВ, которые перегреваются и выходят из строя.

При импульсном потреблении тока также резко возрастает мощность искажений. Коэффициент мощности ИВЭП с БТВ не превышает значения 0,7. На стационарных объектах, где применяются десятки ПК с такими ИВЭП, из-за дополнительной мощности искажений приходится увеличивать мощность силового ввода. Например, для питания десяти автоматизированных рабочих мест с персональными компьютерами требуется мощность порядка 3 кВт. При этом от сети будет одновременно потребляться активная мощность 3 кВт и мощность искажения 1,5 кВА, которая по последствиям равна реактивной мощности. При этом должен быть установлен силовой ввод, рассчитанный на мощность 3,35 кВА. В США именно эта мощность учитывается при оплате электроэнергии автономного объекта.

Имеется еще одна причина, из-за которой потребляемый ток в стационарных объектах должен быть синусоидальным. В большинстве зданий проложен нейтральный провод

меньшего сечения, чем фазный. При нагрузках с низким коэффициентом мощности нейтральный провод, в котором высшие гармоники суммируются, перегружается и сгорает.

По перечисленным причинам Международная электротехническая комиссия (МЭК) с 1992 года ввела стандарт 552-2, требующий обязательной коррекции коэффициента мощности ( $\alpha$ ) для потребителей мощностью более 200 Вт.

Чтобы обеспечить синусоидальную форму потребляемого тока, на входе ИВЭП с БТВ устанавливают активные или пассивные корректоры коэффициента  $\alpha$ . Активные корректоры, построенные на основе транзисторных высокочастотных преобразователей, позволяют получить высокий коэффициент мощности (более 0,98) и имеют КПД от 96 до 98%. Но сложность активных корректоров снижает надежность и увеличивает стоимость ИВЭП в целом. Возрастает и радиопомехи. Поэтому необходимо исследовать пассивные корректоры, которые просты и надежны, так как состоят из одного дросселя и нескольких конденсаторов, а также привлекательны благодаря их низкой цене.

На рис. 1 показан корректор [2], в котором элементы были оптимизированы на математической модели с целью получения максимального коэффициента мощности.

По результатам оптимизации для расчета  $L$  и  $C$  могут быть рекомендованы следующие выражения:

$$L = 0,12R_H/\omega, \quad (1)$$

$$C = (1,127 \times 10^{-6})/L, \quad (2)$$

где  $C = C_1 + C_2$ , мкФ.

Расчеты элементов корректора по соотношениям (1, 2) позволяют получить максимальный коэффициент  $\alpha$ , равный 0,98.

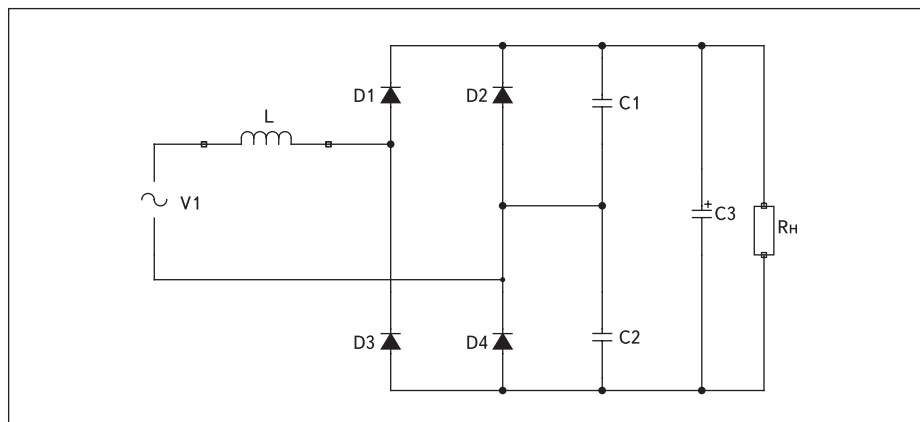


Рис. 1. Принципиальная схема корректора коэффициента мощности

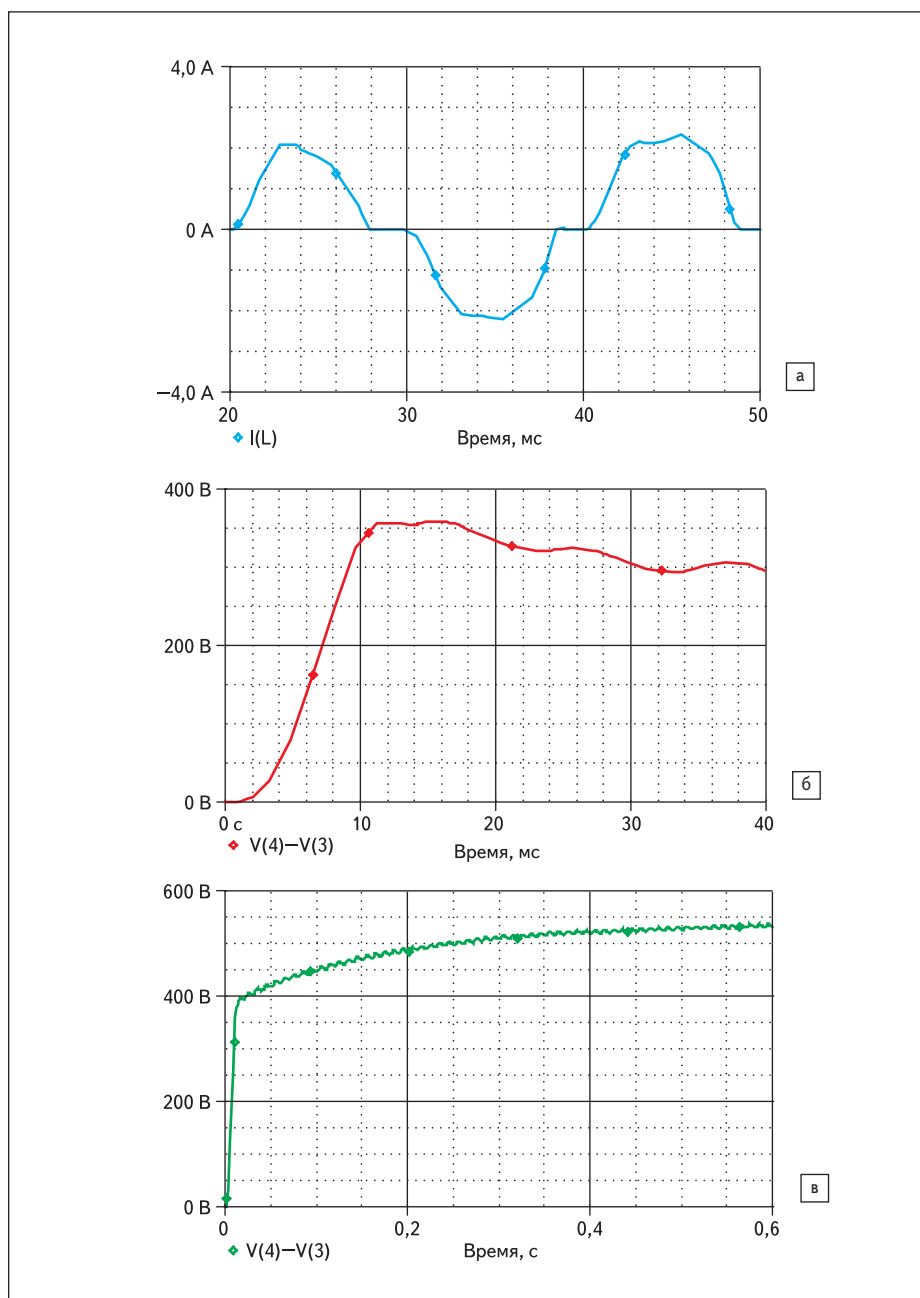


Рис. 2. а) Входной ток; б) напряжение на выходе корректора мощности  $P_{ном}$ ; в) напряжение на выходе корректора мощности  $0,1 \times P_{ном}$

Контур LC настроен на третью гармонику 150 Гц с небольшой расстройкой ( $\approx 10\%$ ) с целью лучшей фильтрации высших гармоник.

Расчетный параметр  $L \times I^2$  использован для определения объема стали Э330 сердечника V дросселя L. Данные расчета LC-корректоров на мощность 400, 800, 1200 Вт сведены в таблицу 1.

Таблица 1. Данные расчета LC-корректоров на мощность 400, 800, 1200 Вт

$P_{ном}$ Вт	$R_n$ Ом	$X_L$ Ом	L мГн	C мкФ	I А	$L \times I^2$ ВА	$V_{ст}$ см <sup>2</sup>	C3 мкФ
400	234	28,08	88,4	12,7	2,2	0,428	82	200
800	117	14,04	44,2	25,5	4,4	0,86	196	400
1200	78	9,36	30	37,5	6,6	1,3	300	600

В результате математического моделирования получены значения выходного напряжения моста  $U_0$  для номинальной мощности  $P_{ном}$  и для  $0,1 \times P_{ном}$  и определена форма входного тока (рис. 2). Все корректоры обеспечивают коэффициент мощности  $> 0,98$ .

Для дросселя L необходимо применять ленточные сердечники с зазором, так как ток основной гармоники является подмагничивающим для дросселя, фильтрующего третью гармонику, или торы с порошкообразными сердечниками. При создании опытного образца для дросселя использованы замкнутые магнитопроводы из многослойного железа фирмы EPCOS, у которых магнитная проницаемость постоянна в широком диапазоне изменений напряженности магнитного поля, а также перспективные конденсаторы MRP.

Правильное построение корректора предполагает компромисс между массой, которая определяется дросселем, и стоимостью, определяемой величиной C. Уменьшение величины L в контуре на третью гармонику вызывает ухудшение коэффициента  $\alpha$  и рост стоимости корректора, хотя вес корректора снижается. В качестве примера в таблице 2 приведены расчетные значения коэффициента мощности для различных значений индуктивности дросселя при выходной мощности корректора 1200 Вт.

Таблица 2. Расчетные значения коэффициента мощности

Индуктивность L, мГн	30	15	10
Емкость C, мкФ	37,5	75	112
Коэффициент мощности $\alpha$ , %	98,8	95,38	89,64
Коэффициент гармоник K <sub>г</sub>	15,5	31,2	49,5

Судя по рис. 2в, при мощности  $0,1 \times P_{ном}$  напряжение на выходе корректора достигает значения 530 В. Чтобы исключить это перенапряжение, предлагается при малых мощностях отключать конденсаторы C1 и C2 от контура. Устройство [3], реализующее этот принцип, содержит дроссель фильтра третьей гармоники L1, диодный мост M1, конденсаторы фильтра C1, C2, оптосимистор V1,

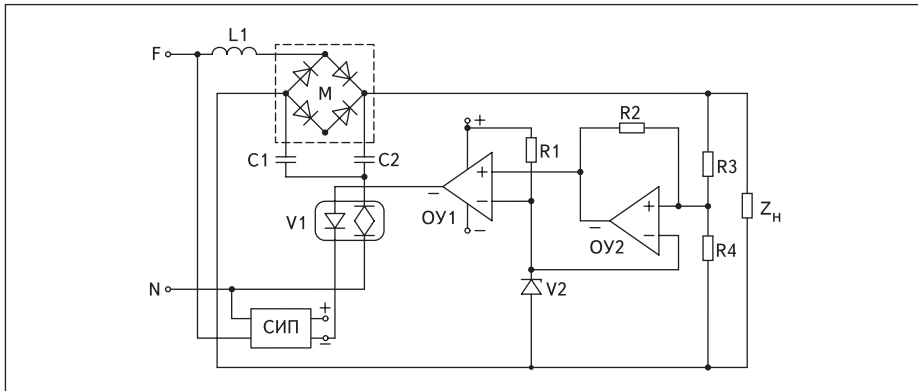


Рис. 3. Корректор с защитой от перенапряжения



Рис. 4. а) Блок питания DG800; б) блок питания VZ1200; в) источник бесперебойного питания ИБП600

сервисный источник питания (СИП), первый операционный усилитель ОУ1, источник опорного напряжения, включающий в себя сопротивление R1, стабилитрон V2, гистерезисное сопротивление R2, второй операционный усилитель ОУ2, сопротивления делителя R3, R4 (рис. 3).

Устройство работает следующим образом. При номинальной мощности и при ее уменьшении до 30% напряжение на нагрузке не превышает расчетных значений. На входе источника подключен фильтр третьей гармоники, состоящий из дросселя L1, конденсаторов C1 и C2, которые соединены с нейтралью через включенный оптосимистор V1.

При уменьшении мощности нагрузки ниже 30% от номинального значения напряжение на выходе моста становится выше расчетного значения, а напряжение, поступающее со средней точки делителя R3, R4 на инверсный вход операционного усилителя ОУ2, выше, чем опорное напряжение на неинверсном входе операционного усилителя ОУ1, становится выше опорного напряжения на неинверсном входе, а его выходное напряжение близко к нулю. Ток через светодиод прекращается, выключается оптосимистор

V1 и отключает от дросселя конденсаторы C1 и C2.

Напряжение на выходе моста снижается, однако наличие гистерезисного сопротивления R2 в операционном усилителе ОУ2 препятствует его новому переключению. Отключение конденсаторов оправдано, так как при малых нагрузках требования к синусоидальности входного тока сетевых источников питания снижаются, и часто достаточно одного дросселя в фазном проводе, чтобы получить приемлемую форму входного тока.

При увеличении тока нагрузки растет падение напряжения на дросселе L1, напряжение на выходе моста еще более снижается. В результате вновь переключаются операционные усилители ОУ1, ОУ2, включается оптосимистор V1, резонансные конденсаторы C1, C2 подсоединяются к дросселю L1, и входной ток становится близким к синусоидальному за счет фильтрации третьей гармоники.

Рассмотренные пассивные корректоры устанавливаются по требованию заказчика в блоки питания и источники бесперебойного питания [4] ООО «АЭИЭП» (рис. 4).

В таблице 3 приведены параметры блоков питания с корректорами.

Таблица 3. Основные параметры блоков питания

Наименование	Мощность, Вт	Увх	Увых, В	Ивых. макс, А	Кол-во выходных каналов	Габаритные размеры, мм	Масса*, кг
Донник	400	115 В / 400 Гц 220 В / 50 Гц	12, 15, 18,	33	1, 2, 3	110×74×217	2,5 (4)
Дягель	800		24, 27, 60	40	1, 2	152×80×305	3 (5)
Вяз	1200		24, 27,	40	1, 2	240×140×385	10 (12,5)
Береза	2000		48, 60	80	1, 2	230×215×382	12 (17)

\* В скобках указан вес блоков с корректором.

Пассивные корректоры практически не уступают по габаритам и КПД активным, хотя в несколько раз тяжелее. Но следует учесть, что пассивные корректоры, в отличие от активных, не увеличивают уровни радиопомех, а, наоборот, подавляют их за счет корректирующего дросселя L1. Это позволяет использовать ИВЭП с БТВ и пассивными корректорами в медицине, технике, связи, измерительной и другой аппаратуре, где требуются низкие уровни помех.

Похожую проблему приходится решать и при создании трехфазных ИВЭП с БТВ; хотя получить фазный ток, по форме близкий к синусоиде, в таких ИВЭП значительно проще. Известно, что в трехфазных ИВЭП в спектре входного тока отсутствуют гармоники, кратные трем, при этом коэффициент  $\alpha$  традиционного выпрямителя на основе трансформатора и трехфазного моста с LC-фильтром достигает 0,96. Но если на выходе моста оставить только емкость C1 (рис. 5), а такой конденсатор небольшой емкости необходим для работы большинства высокочастотных преобразователей, то коэффициент  $\alpha$  снижается до значения 0,7 [5], а форма фазного тока сильно искажается.

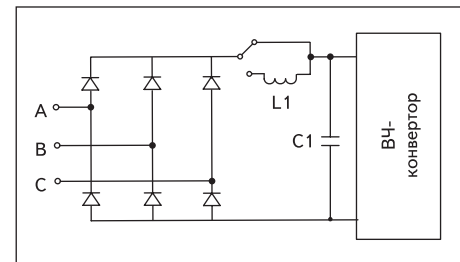


Рис. 5. Трехфазный мост с фильтром C и LC

Но стоит поставить между трехфазным мостом и конденсатором C1 небольшую индуктивность L1, как коэффициент  $\alpha$  значительно повышается, что объясняется высокой эффективностью подавления 5 из 7 гармоник индуктивностью L1, реактивное сопротивление которой  $x_{L1} = \omega \times L1$  растет с увеличением частоты. На рис. 6 представлена зависимость коэффициента мощности фазного тока от значения  $x^*$ , где  $x^*$  — нормированная величина реактивного сопротивления индуктивности L1:

$$x^* = x_{L1}/R_0,$$

$$R_0 = U_0/I_0,$$

$$\omega = 2\pi f,$$

где  $U_0, I_0$  — напряжение и ток на выходе моста.

Судя по рис. 6, если значение  $x^*$  близко к 0, то коэффициент мощности не превышает 0,7, а форма фазного тока сильно искажена (рис. 7а).

На рис. 7 значения фазного тока  $i_A$  нормированы относительно тока  $I_0$  ( $i_A^* = i_A/I_0$ ).

Анализ показывает, что достаточно увеличить величину  $x^*$  до 2,25%, как коэффицици-

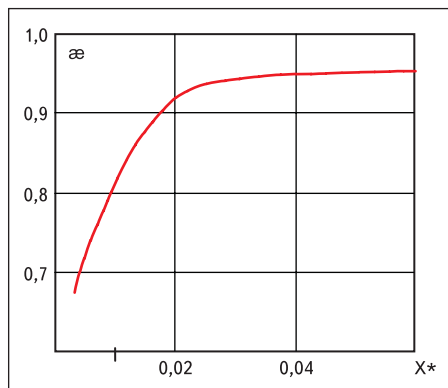


Рис. 6. Зависимость коэффициента мощности фазного тока от значения  $x^*$

ент  $\alpha$  повышается до значения 0,95. На рис. 7б показана форма фазного тока ИВЭП с БТВ, значение корректирующей индуктивности  $L_1$  которого посчитано по формуле:

$$L_1 = 0,0225 U_0 / (I_0 \times \omega). \quad (3)$$

Даже при такой незначительной индуктивности кривые фазного тока и коэффициентов  $\alpha$  ИВЭП с БТВ и традиционного трансформаторного ИВЭП с громоздким LC-фильтром (рис. 7в) практически не отличаются. Конструктивные расчеты показывают, что объем дросселя, индуктивность которого рассчитана по формуле (3), не превышает 3–5% от объема трехфазного ИВЭП с БТВ. Пассивные корректоры установлены в большинстве зарубежных трехфазных ИВЭП с БТВ, мощностью сотни Вт — единицы кВт. На рис. 8 показан такой дроссель, который применила в трехфазном ИВЭП с БТВ мощностью 900 Вт фирма Mean Well.

Корректирующие дроссели устанавливаются в модулях КД 1200М, на базе которых выпускается блок питания «Береза М» (рис. 9) мощностью 2000 Вт, рассчитанный на трехфазную сеть 380 В без нулевого провода.

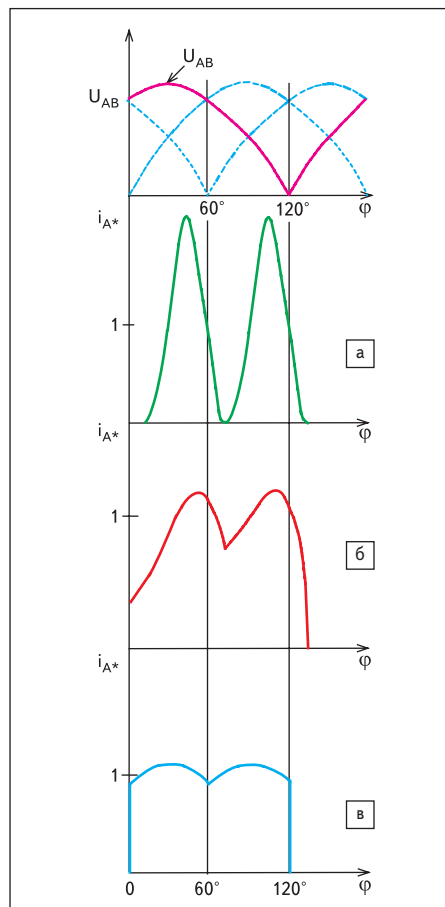


Рис. 7. Форма кривой фазной тока для трехфазного моста, работающего на емкость, с индуктивностью  $L_1$ : а) при  $x^* = 0,025\%$ , б) при  $x^* = 2,25\%$ ,  $\alpha = 0,945$ , в) при  $x^* = 2,25\%$  для трехфазного традиционного ИВЭП с LC-фильтром,  $\alpha = 0,945$

Если предыдущий блок «Береза» подключался к трехфазной сети по цепи фаза-ноль и для получения синусоидального входного тока на входе каждого модуля устанавливался корректор массой  $\approx 3,5$  кг, то в блоке «Береза М» реализованы преимущества трехфаз-



Рис. 8. Внутреннее устройство в ИВЭП с БТВ мощностью 1 кВт (стрелкой показан корректирующий дроссель  $L_1$ )



Рис. 9. Блок питания BR2000

ного подключения, и для получения такого же коэффициента  $\alpha$  на входе модуля необходим всего один дроссель с массой 0,8 кг. ■

## Литература

1. Твердов И. и др. Модернизация сетевых фильтров радиопомех на предприятии «АЭИЭП» // Электронные компоненты. 2005. № 8.
2. Redl R. Power-factor correction in bridge rectifier circuits with inductor and capacitor. APEC, 1995.
3. Твердов И. и др. Устройство коррекции коэффициента мощности. Патент РФ № 2328067, 2007.
4. Каталог продукции ООО «Александр Электрик» источники электропитания на диске, 2008, осень.
5. Ray W. Effect of supply reactance on power factor. APEC, 1998.