

Электроэнергетическая и электромагнитная совместимость

ВТОРИЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ ИМПУЛЬСНОГО ПИТАНИЯ С АВТОНОМНЫМИ СИСТЕМАМИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Часть III. Обзор и анализ схемотехнических средств,
выбор перспективных направлений модернизации

Статья продолжает цикл работ, посвященных выбору способов и схемотехнических решений, обеспечивающих сохранение качества электроэнергии питающей сети и допустимого уровня генерируемых электромагнитных помех при работе вторичных источников импульсного питания (ВИИП) с емкостным накопителем в составе автономных систем (АСЭС), в частности транспортных [1, 2].

Приведен обзор и анализ известных схемотехнических средств, применяемых в ВИИП для сохранения качества питающей электроэнергии АСЭС, а также предлагаются перспективные направления модернизации.

Станислав Резников, д. т. н.
Владимир Бочаров, к. т. н.
Евгений Парфенов
Николай Гуренков
Александр Корнилов

К известным схемотехническим средствам, применяемым в различных силовых статических преобразователях (ССП) и применимым в ВИИП для сохранения качества питающей электроэнергии АСЭС, относятся следующие:

- стабилизаторы входной (потребляемой из сети) мощности (тока) и промежуточные (буферные) накопители;
- корректоры коэффициента мощности (ККМ);
- схемы с расщеплением зарядных и коммутлируемых цепей с временными сдвигами («многофазные»);
- коммутационно-демпфирующие цепи снижения dU/dt и dI/dt в диодно-транзисторных узлах и схемы с исключением «сквозных и инверсных сверхтоков»;
- фильтры и расщепляющие сетевые трансформаторы (РСТ).

Проанализируем назначения, виды и возможности перечисленных средств в указанной последовательности, кроме фильтров и РСТ, достаточно подробно рассмотренных в литературе [3–7].

Стабилизаторы входной мощности и промежуточные накопители

Эти устройства достаточно подробно описаны в предыдущих статьях [1, 2], а также в [3–16] и в их би-

блиографиях. Однако следует акцентировать внимание на принципиальных факторах, определяющих пути дальнейших исследований.

Для ВИИП с непосредственным однокаскадным преобразованием на базе ИЕП:

- Применение индуктивно-емкостных преобразователей (ИЕП) нецелесообразно при низкой частоте сети (50 Гц). При повышенной частоте сети (400 Гц и выше) они могут успешно использоваться без промежуточного накопителя и без специального (активного) ККМ, однако при этом всегда будут проигрывать по среднечастотному значению коэффициента мощности (χ_{cp}).
- Вызываемая ИЕП модуляция активной мощности, потребляемой ВИИП из сети, способна вызвать колебания в системе привод-магистральный генератор АСЭС и, как следствие, модуляцию напряжения и частоты сети. При этом модуляция частоты может привести к неустойчивости системы.
- Применение современных мощных высоковольтных и относительно высокочастотных транзисторов и запираемых тиристоров допускает создание ВИИП на базе плавно-регулируемого ИЕП (а не только с релейно-шунтируемым выходом), что позволит снизить воздействие на сеть и повысить точность ре-

гулирования выходных параметров (предразрядного напряжения и паузы, форму зарядно-го тока и др.).

Для ВИИП с непосредственным однокаскадным преобразованием на базе высоковольтных зарядных ККМ:

- Обеспечение остаточного напряжения емкостного накопителя (неполная разрядка или колебательная двойная перезарядка), а также минимизация длительности предразрядной и послеразрядной пауз являются принципиально необходимыми не только для снижения воздействий на питающую сеть, но и для повышения КПД, снижения токовых перегрузок п/п приборов и повышения надежности ВИИП.
- В качестве высоковольтного зарядного ККМ целесообразно использовать либо повышающие модуляторы с последовательно-составными транзисторами и секционированными накопителями, либо трансформаторные (в частности, трансреакторные) ККМ на базе однотактных модуляторов или регулируемых трансформаторных инверторов прямоугольного тока.

Для ВИИП с двухкаскадным преобразованием и промежуточным емкостным накопителем:

- В качестве стабилизатора входной мощности целесообразно использовать импульсный корректор коэффициента мощности на базе повышающего ШИМ.
- Для снижения энергоемкости (массы и габаритов) промежуточного накопителя ($C_{ПН}$), снижения воздействий на сеть и повышения среднециклического КПД целесообразно снижать длительность предразрядной и послеразрядной пауз, а также обеспечить неполную разрядку (или колебательную двойную перезарядку) основного емкостного накопителя.
- В качестве зарядного преобразователя при средней и большой среднециклической мощности ВИИП ($P_{ср} > 0,5 - 1$ кВт) целесообразно использовать:
 - при низковольтном $C_{ПН}$ или (и) требовании гальванической развязки — трансформаторный конвектор с промежуточным инверторным звеном повышенной частоты;
 - при высоковольтном $C_{ПН}$ — бестрансформаторный высоковольтный ШИМ-конвектор с последовательно-составными транзисторами либо бестрансформаторный повышающий «транспорт заряд» (оба с секционированным рабочим накопителем).

Корректоры коэффициента мощности

С тех пор как Международная электротехническая комиссия (МЭК) и Европейская организация по стандартизации в электротехнике (CENELEC) приняли стандарты IEC555 и EN60555, устанавливающие ограничения на содержание гармоник во входном токе ВИП и других устройств, а также после появления основного стандарта для разработки ВИП мощностью более 75 Вт с коррекцией

коэффициента мощности EN61000-3-2 (начиная с января 2001 г.), на входах всех потребителей, питающихся от общей электросети, необходимо устанавливать корректоры коэффициента мощности. Считается, что $\chi \geq 0,95$ — хороший показатель; $0,95 > \chi \geq 0,9$ — удовлетворительный; $0,8$ — плохой; $0,7$ — очень плохой (большинство компьютерного оборудования); $0,65$ — характерен для двухполупериодного однофазного выпрямителя без ККМ [17].

Пассивные ККМ

Для наглядной оценки эффективности пассивных ККМ рассмотрим три характерных примера применения схем с относительно небольшим значением коэффициента гармоник входного тока ($K_T < 0,18$) и малыми тепловыми потерями [17] (рис. 1). В примечании к рис. 1 для сравнения приведены те же показатели

при использовании только предвключенного дросселя. Следует отметить, что по показателям качества электроэнергии на входе выигрывает первая схема, а по КПД и пульсациям выходного напряжения — последняя.

Пассивные ККМ обладают рядом преимуществ: низкая стоимость, простота, отсутствие высокочастотных помех и динамических (коммутационных) потерь. Однако они имеют плохие удельные характеристики (инерционность) и ограниченный коэффициент мощности, отсутствует возможность регулирования выходного напряжения. По этим причинам их использование сильно ограничено [17–21]. Применительно к ВИИП они обладают еще одним специфическим недостатком: низким значением среднециклического коэффициента мощности $\chi_{ср}$ из-за большого диапазона циклического изменения эквивалентного активного сопротивления выпрямительной

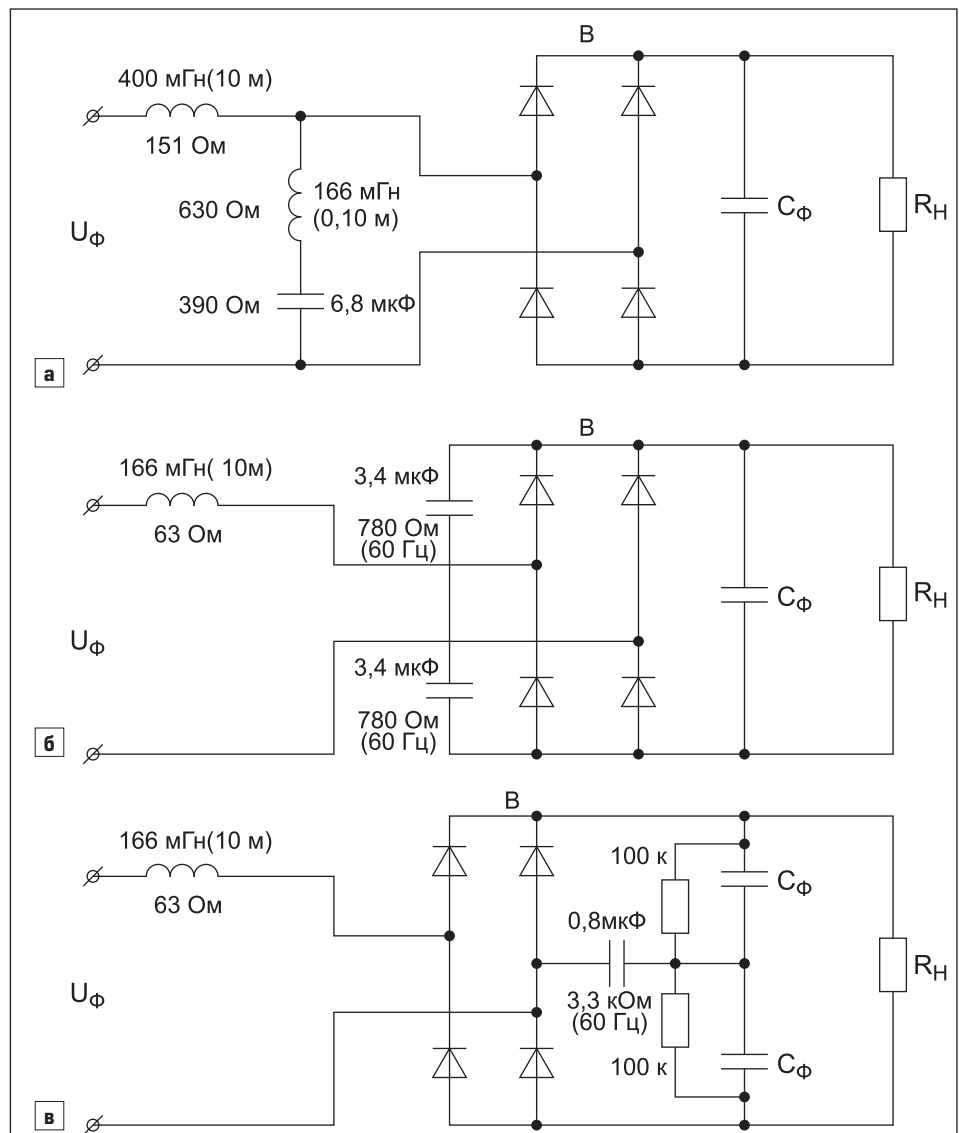


Рис. 1. Мостовой выпрямитель с пассивными корректорами мощности (ККМ) с выходным конденсаторным фильтром ($U_{\phi} = 230$ В, 60 Гц, $C_{\phi} = 230$ В, $R_{\phi} = 500$ Ом): а) с резонансным фильтром ($K_T = 0,05$, $\chi = 0,99$); б) с предвключенным дросселем и шунтирующими конденсаторами в 2-х плечах выпрямителя ($K_T = 0,1736$, $\chi = 0,966$); в) с предвключенным дросселем и двухконденсаторным фильтром с емкостной цепочкой между средними точками фильтра и 2-х плеч ($K_T = 0,1736$, $\chi = 0,966$)

Примечание: при использовании только предвключенного дросселя 130 мГн (10 м) при том же C_{ϕ} : $K_T = 0,51$, $\chi = 0,716$.

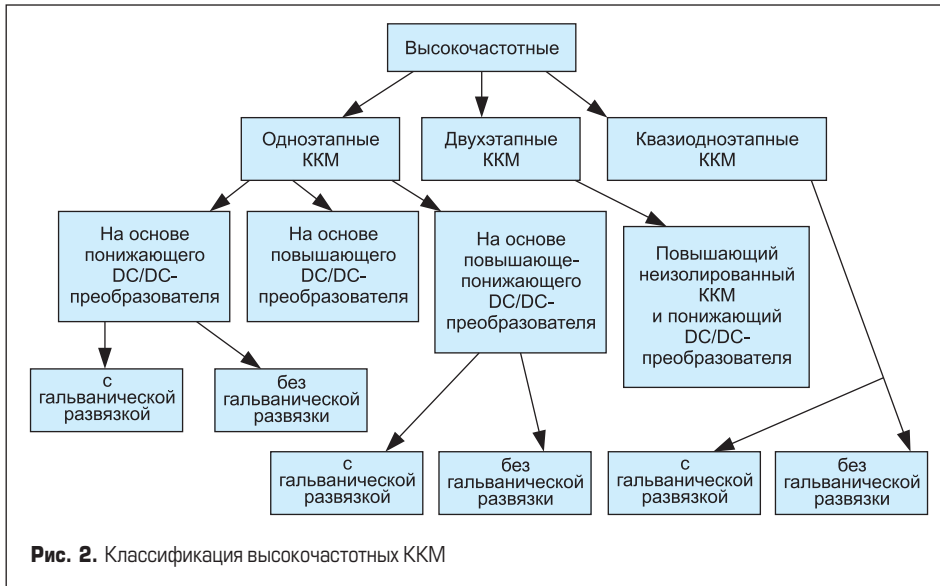


Рис. 2. Классификация высокочастотных ККМ

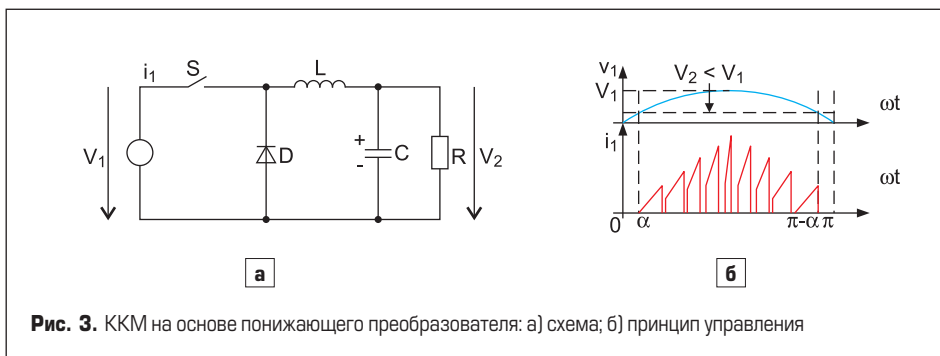


Рис. 3. ККМ на основе понижающего преобразователя: а) схема; б) принцип управления

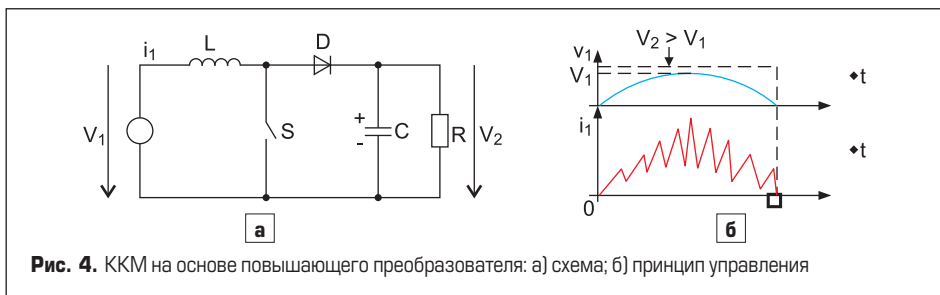


Рис. 4. ККМ на основе повышающего преобразователя: а) схема; б) принцип управления

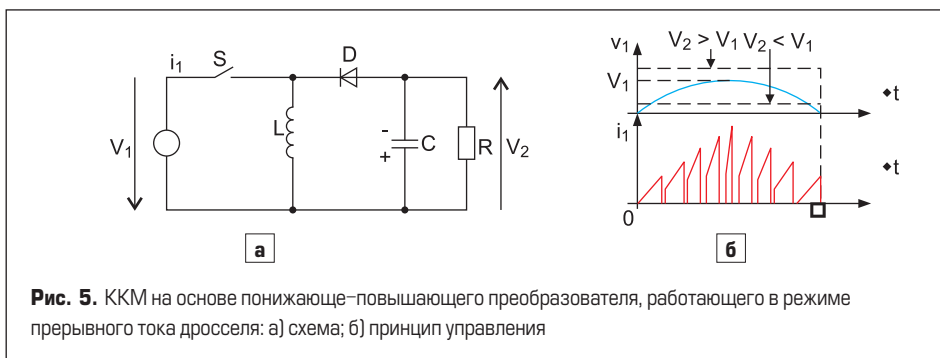


Рис. 5. ККМ на основе понижающе-повышающего преобразователя, работающего в режиме прерывного тока дросселя: а) схема; б) принцип управления

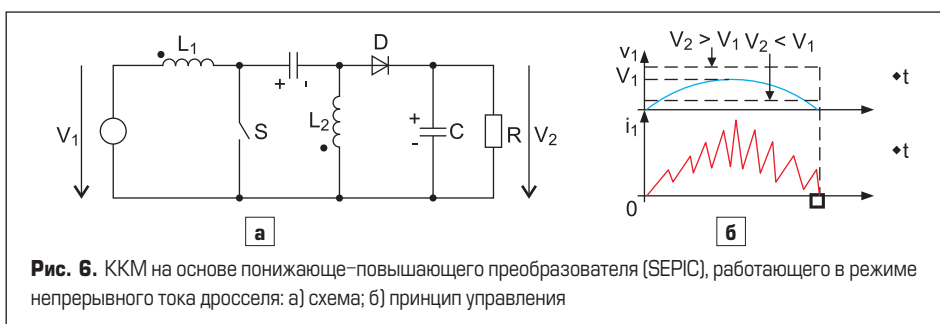


Рис. 6. ККМ на основе понижающе-повышающего преобразователя (SEPIC), работающего в режиме непрерывного тока дросселя: а) схема; б) принцип управления

нагрузки (от режима, близкого к КЗ, до режима, близкого к ХХ). Особенно это относится к ККМ с резонансными фильтрами. Однако интерес представляют совмещенные схемы ИЕП-ККМ.

Высокочастотные активные ККМ

Обладая максимальными удельными характеристиками, высокочастотные активные ККМ обеспечивают высокий коэффициент мощности, причем не только для стационарной нелинейной нагрузки, но и его среднециклическое значение (χ_{cp}) при квазиустановившейся циклической нагрузке (ВИИП). К их недостаткам можно отнести необходимость относительно сложной системы управления и вносимые в сеть электромагнитные помехи.

Потребляемая из сети мгновенная мощность ККМ даже при идеальном коэффициенте ($\chi = 1$) имеет переменный характер, а выходную мощность желательно обеспечивать приблизительно постоянной (хотя бы в течение нескольких периодов сетевого напряжения). Поэтому выходной ток выпрямителя и его выходное напряжение всегда будут иметь пульсацию с двойной частотой сети, а ее глубина зависит нагрузки. Таким образом, емкость выходного фильтра является накопителем разницы потребляемой и отдаваемой мощности.

В [21] предложена классификация высокочастотных ККМ, представленная на рис. 2.

Схемы однокаскадных ККМ и принципы управления приведены на рис. 3–6 [21].

Применительно к ВИИП одноэтапные (однозвенные) ККМ на основе понижающего конвертора рассматривать нецелесообразно. Двухэтапные (двухзвенные) ККМ в составе ВИИП со стационарной нагрузкой представляют собой повышающий преобразователь, который обеспечивает необходимый коэффициент мощности, буферный фильтр и понижающий конвертор, обычно — для получения низкого постоянного напряжения, не содержащего пульсаций с удвоенной сетевой частотой. Они выигрывают по сравнению с одноэтапными по динамическим характеристикам, однако имеют большую стоимость, более сложную схему управления и более низкий КПД. В случае применения двухэтапного ККМ в составе ВИИП отпадает необходимость добавления дополнительного зарядного преобразователя, так как второй преобразователь ККМ может выполнять функцию зарядки накопителя. При этом следует отличать полученный однокаскадный ВИИП с буферным фильтром, установленным на выходе первого преобразователя ККМ и имеющим относительно малую емкость конденсатора, от двухкаскадного ВИИП с промежуточным емкостным накопителем, имеющим большую емкость.

Оценить коэффициенты загрузки транзисторов и диодов в составе повышающих или понижающе-повышающих одноэтапных ККМ двухкаскадных ВИИП или в составе

первого преобразователя двухэтапных ККМ однокаскадных ВИИП можно по таблице [21]. Значения $K_{загр}$ соответствуют произвольному периоду коммутации или управляющего сигнала ШИМ-регулятора.

В трехфазных сетевых преобразователях отсутствует эмиссия в сеть гармонических составляющих, кратных трем, поэтому коэффициент мощности выше, чем в однофазных схемах. Коэффициент мощности трехфазного шестипульсного выпрямителя с L-или LC-фильтром достигает 0,955, а пятая и седьмая гармоники сетевого тока составляют соответственно 20 и 14% [22]. Однако при этом обычно велики массо-габаритные и стоимостные показатели фильтра в цепи постоянного тока.

Среди трехфазных выпрямителей с ККМ известно устройство на базе трехфазного инвертора напряжения, работающего в обратимом режиме (так называемый активный выпрямитель) [23]. Если не требуется обратимости преобразования, что соответствует рассматриваемым устройствам (ВИИП), то более рациональным является схемное решение трехфазного выпрямителя с активным ККМ по схеме Виенна-выпрямителя [22, 24]. На рис. 7 приведен один из вариантов Виенна-выпрямителя — ККМ и варианты выполнения ключей переменного тока для обратимых модуляторов (ОМ). Нулевой провод сети может отсутствовать.

Для получения синусоидального синфазного сетевого тока необходимо и достаточно, чтобы к дросселям $L_{A,B,C}$ были приложены напряжения, основная гармоника которых равна [22]:

$$U_{LA1} = k_p U_{\phi} \cos(2\pi f_{cemu} t),$$

$$U_{LB1} = k_p U_{\phi} \cos(2\pi f_{cemu} t - 2\pi/3),$$

$$U_{LC1} = k_p U_{\phi} \cos(2\pi f_{cemu} t - 4\pi/3),$$

где k_p — коэффициент регулирования, пропорциональный мощности нагрузки.

Активная мощность нагрузки:

$$P = 3U_{\phi} I_1,$$

где $I_1 = (k_p U_{\phi}) / (2\pi f_{cemu} L)$ — основная гармоника сетевого тока.

Литература

1. Резников С., Бочаров В., Парфенов Е., Гуренков Н., Корнилов А. Электроэнергетическая и электромагнитная совместимость вторичных источников импульсного питания с автономными системами электроснабжения переменного тока. Часть I. Критерии эффективности схмотехнических средств // Силовая электроника. 2009. №3.
2. Резников С., Бочаров В., Парфенов Е., Гуренков Н., Корнилов А. Электроэнергетическая и электромагнитная совместимость вторичных источников импульсного питания с автономными системами электроснабжения переменного тока. Часть II. Обзор и систематизация известных структур и схем основных узлов. Приближенные критерии оценки элементов // Силовая электроника. 2009. №4.
3. Булеков В. П., Резников С. Б., Болдырев В. Г. и др. Электротехническая совместимость оборудования ЛА. М.: Изд-во МАИ. 1992.
4. Болдырев В. Г., Бочаров В. В., Булеков В. П., Резников С. Б. Электротехническая совместимость электрооборудования автономных систем. М.: Энергоатомиздат. 1995.
5. Болдырев В. Г., Бочаров В. В., Булеков В. П., Резников С. Б. Электротехническая совместимость электрооборудования ЛА (Электротехническая совместимость). Учебное пособие. М.: Изд-во МАИ. 1992.
6. Болдырев В. Г., Бочаров В. В., Булеков В. П., Резников С. Б. Основы теории электроэнергетической совместимости электрооборудования автономных систем. Учебное пособие. М.: Изд-во МАИ. 1997.
7. Балук Н. В., Болдырев В. Г., Булеков В. П., Кечиев Л. Н., Кириллов В. Ю., Литвак И. И.,

Постников В. А., Резников С. Б. Электромагнитная совместимость технических средств подвижных объектов. Учебное пособие. М.: Изд-во МАИ. 2004.

8. Болдырев В. Г., Бочаров В. В., Резников С. Б. Вторичные источники импульсного питания (ВИИП) // Практическая силовая электроника. 2001. №2.
9. Болдырев В. Г., Бочаров В. В., Резников С. Б. Генераторы импульсного тока с демпфированием потребляемой мощности // Практическая силовая электроника. 2002. №7.
10. Бут Д. А., Алиевский Б. Л., Мизюрин С. Р., Васюкевич П. В. Накопители энергии. Учебное пособие для вузов. М.: Энергоатомиздат. 1991.
11. Булатов О. Г., Иванов В. С., Панфилов Д. Н. Полупроводниковые зарядные устройства емкостных накопителей энергии. М.: Радио и связь. 1986.
12. Маршак И. С., Дойников А. С., Жильцов В. П. и др. Импульсные источники света. М.: Энергия. 1978.
13. Чиженок И. М., Бердинских Г. С. Зарядные устройства емкостных накопителей энергии. Киев: Наукова думка. 1980.
14. Волков И. В., Вакуленко В. М. Источники электропитания лазеров. Киев: Техника. 1976.
15. Вакуленко В. М., Иванов Л. П. Источники питания лазеров. М.: Советское радио. 1980.
16. Petersen L., Andersen M. Two — stage Power Factor Corrected Power Supplies: The Low Component — Stress Approach/IEEE Applied Power Electronic Conference APEC 2002.
17. Овчинников Д. А., Кастров М. Ю., Лукин А. В., Малышков Г. М., Герасимов А. А. Пассивные корректоры коэффициента мощности // Практическая силовая электроника. 2002. №5.
18. Dewan S. B. Optimum input and output filters for singlephase rectifier power supply/IEEE Trans. on Industry Applications, vol. IA17, no. 3, May/June 1981.
19. Vorperian V., Ridley R. B. A simple scheme for unity power factor rectification for high frequency ac buses/IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 5, no. 1, Jan. 1990.
20. K. Kit Sum. Improved valley-fill passive power factor correction current shaper approaches IEC specification limits/PCIM Magazine, Feb. 1998.
21. Овчинников Д. А., Кастров М. Ю. Классификация однофазных корректоров коэффициента мощности // Практическая силовая электроника. 2002. №6.
22. Чальгин Е., Во Минь Тьнин, Хоанг Ан Н. Виенна-выпрямитель — трехфазный корректор коэффициента мощности // Силовая электроника. 2006. №1.
23. Зиновьев Г. С. Основы силовой электроники. Учебное пособие. Изд. 3-е. Новосибирск: Изд-во НГТУ. 2004.
24. Овчинников Д. А., Кастров М. Ю., Лукин А. В., Малышков Г. М. Трехфазный выпрямитель с коррекцией коэффициента мощности // Практическая силовая электроника. 2002. Вып. 6.

Таблица. Коэффициенты загрузки транзисторов и диодов ККМ

Повышающий ККМ	Понижающе-повышающий ККМ
$K_{загр} = U_{вх} / U_{вх} = 1 / (1 - \gamma)$	$K_{загр} = 2 + U_{вх} / U_{вх} + U_{вх} / U_{вх} = 1 + \gamma / (1 - \gamma) + 1 / \gamma$

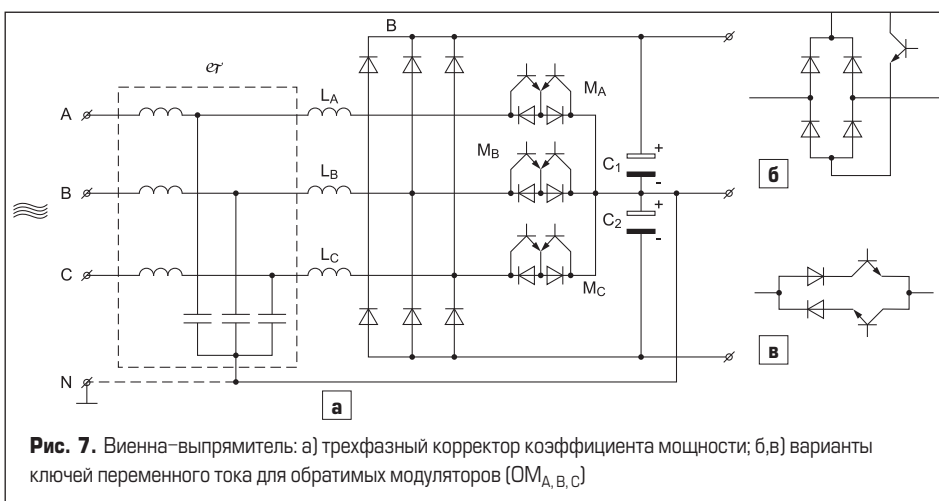


Рис. 7. Виенна-выпрямитель: а) трехфазный корректор коэффициента мощности; б, в) варианты ключей переменного тока для обратимых модуляторов (ОМ_{А, В, С})