

Однонаправленные и обратимые

бестрансформаторные импульсные преобразователи

В статье рассмотрены, обобщены и унифицированы бестрансформаторные однонаправленные и обратимые импульсно-модуляторные конвертеры и циклоконвертеры, а также инверторы на их основе. Предложена базовая структура обратимого прямоходового двуполярного конвертера (ОПДК) для обеспечения двусторонней совместимости питающих каналов постоянного и переменного тока.

**Станислав Резников, д. т. н.
Олег Гильбурд
Евгений Парфенов**

rezn@formatek.ru

Однонаправленные преобразователи

Базовыми простейшими импульсными модуляторами для построения полупроводниковых статических преобразователей традиционно считаются так называемые «понижающий», «повышающий» и «инвертирующий безразличный» (понижающе-повышающий) с соответствующими регулировочными характеристиками (при непрерывности тока дросселя) $K_U = U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}} = f(\gamma)$ [1]:

$$K_U = \gamma, K_U = 1 / (1 - \gamma), K_U = -\gamma / (1 - \gamma),$$

где $\gamma = \Delta t_u / T_{\text{шим}}$ — относительная длительность импульса. К менее известным, но все же встречающимся простейшим модуляторам относятся еще три, также бестрансформаторные:

Регулировочные характеристики при непрерывности тока дросселя:

$$\left. \begin{aligned} \text{а) «понижающий»: } U_3 = \gamma U_2; \quad U_3 = \frac{-\gamma}{1-\gamma} U_1; \quad U_2 = \frac{1}{1-\gamma} U_1 \\ \text{б) «повышающий»: } U_2 = \frac{1}{1-\gamma} U_1; \quad U_3 = \frac{-\gamma}{1-\gamma} U_1; \quad U_3 = \gamma U_2 \\ \text{в) «инвертирующий безразличный»: } U_3 = \frac{-\gamma}{1-\gamma} U_1; \quad U_3 = \gamma U_2; \quad U_2 = \frac{1}{1-\gamma} U_1 \end{aligned} \right\} (U_1 + U_3 - U_2 = 0)$$

г) «универсально-двухключевой понижающий» (с двуполярным выходом):

$$U_3 = (2\gamma - 1)U_2; \quad U_2 = \frac{1}{1-\gamma} U_1$$

д) «универсально-двухключевой с переменной структурой»

$$\left\{ \begin{aligned} \text{синхр. ШИМ} \\ U_3 = \frac{-\gamma}{1-\gamma} U_1 \\ U_3 = \frac{-\gamma}{1-\gamma} U_2 \\ U_2 = \frac{1}{1-\gamma} U_1 \end{aligned} \right\} \left\{ \begin{aligned} \text{ЭК-ШИМ} \\ \text{п. а, б, в} \end{aligned} \right\} \left\{ \begin{aligned} \text{ЭК''-ШИМ} \\ U_3 = \frac{1}{1-\gamma} U_2 \\ U_1 = \frac{-\gamma}{1-\gamma} U_2 \end{aligned} \right\} (U_1 + U_3 - U_2 = 0)$$

е) схема Поликарпова-Кука (с промежуточным конденсатором и вторым дросселем):

$$\begin{aligned} U_3 &= [-\gamma / (1 - \gamma)]U_1; \\ U_3 &= \gamma U_4; \\ U_2 &= 1 \times U_4 = [1 / (1 - \gamma)]U_1 \end{aligned}$$

- а) «синхронно-двухключевой понижающий» (с двуполярным выходом) ($K_U = 2\gamma - 1$);
- б) «универсально-двухключевой с переменной структурой» ($K_U = \gamma, K_U = 1 / (1 - \gamma), K_U = -\gamma / (1 - \gamma)$);
- в) схема Поликарпова-Кука (с промежуточным конденсатором и вторым дросселем) ($K_U = -\gamma / (1 - \gamma)$) [2].

Все вышеупомянутые регулировочные характеристики приведены на рис. 1.

Следует, однако, заметить, что если дополнить все перечисленные выше схемы вспомогательным фильтровым конденсатором, включенным между зажимами входа и выхода (по схеме треугольника совместно с имеющимися основными фильтрами), то указанные схемы во многом унифицируются за счет появления дополнительного канала питания (см. рис. 2).

На рис. 3 приведена обобщенная схема традиционных простейших бестрансформаторных импульсных

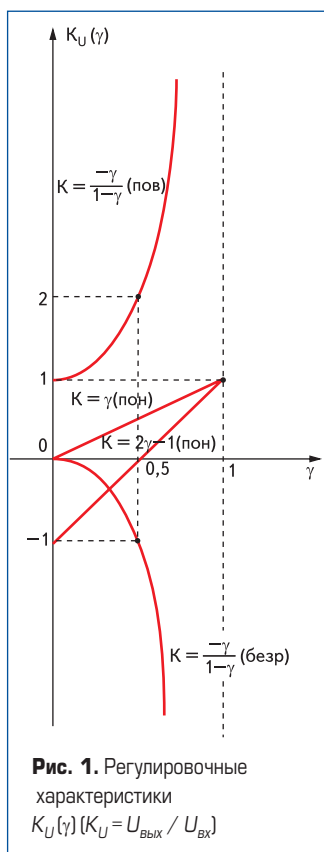


Рис. 1. Регулировочные характеристики $K_U(\gamma) (K_U = U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}})$

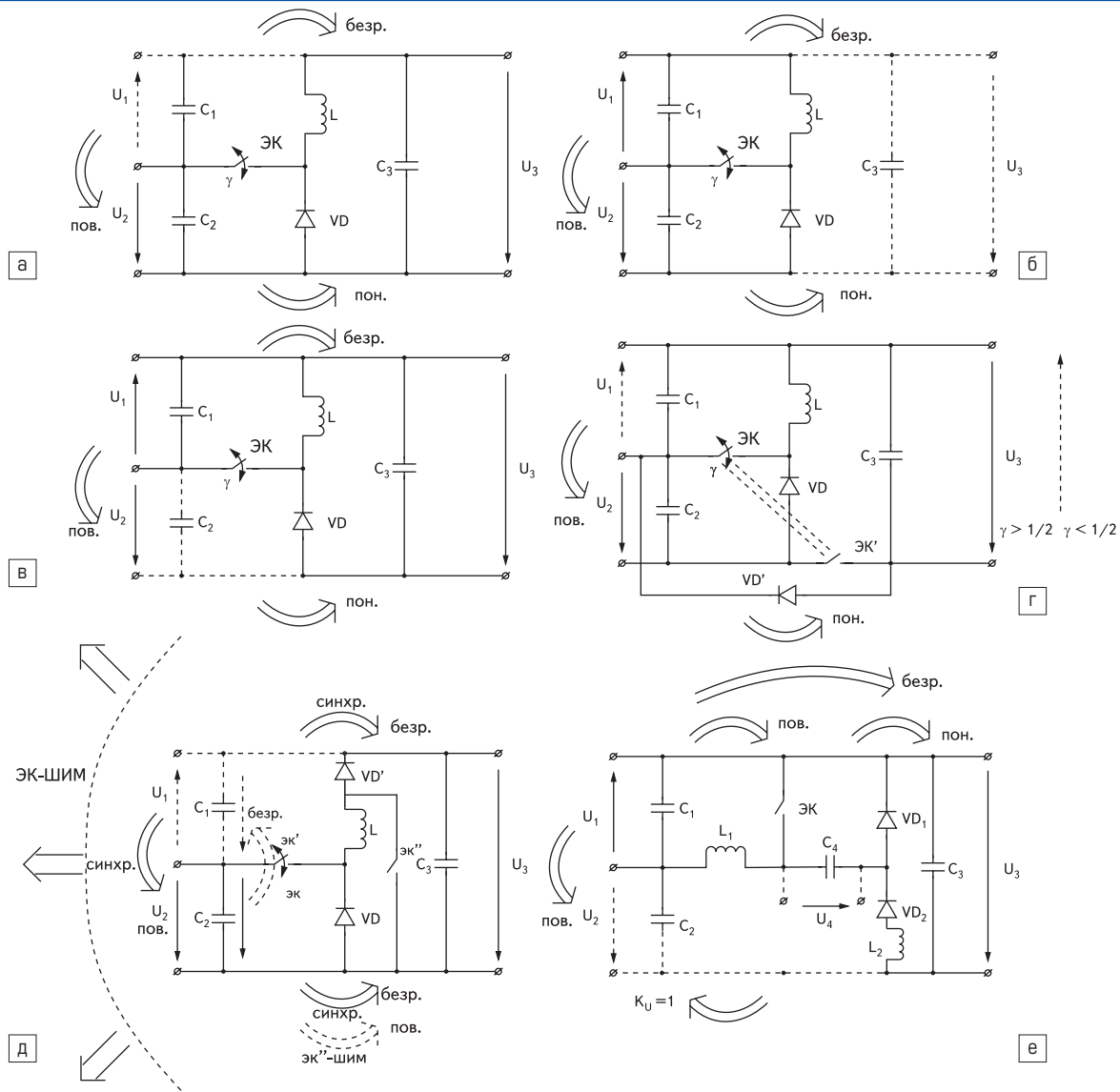


Рис. 2. Традиционные простейшие бестрансформаторные импульсные конверторы с дополнительным каналом питания (показан пунктиром)

конверторов и их регулировочные характеристики при непрерывности тока дросселя. На схеме обозначено: γ — коэффициент заполнения импульса при ШИМ-регулировании; О/П — однополярное преобразование; Р/П — разно-

полярное преобразование; О/П и Р/П — оба преобразования, в зависимости от соотношения $\gamma \geq 0,5$; пон., пов. и безр. — понижающее (прямоходовое), повышающее (прямоходовое) и безразличное (обратноходовое) преобразо-

вания; ЭК и ЭК' — основной и вспомогательный (синхронные) электронные ключи.

На рис. 4 приведена аналогичная обобщенная схема бестрансформаторных импульсных конверторов Поликарпова-Кука с промежуточным конденсатором (C_4) и их регулировочные характеристики при непрерывности токов дросселей.

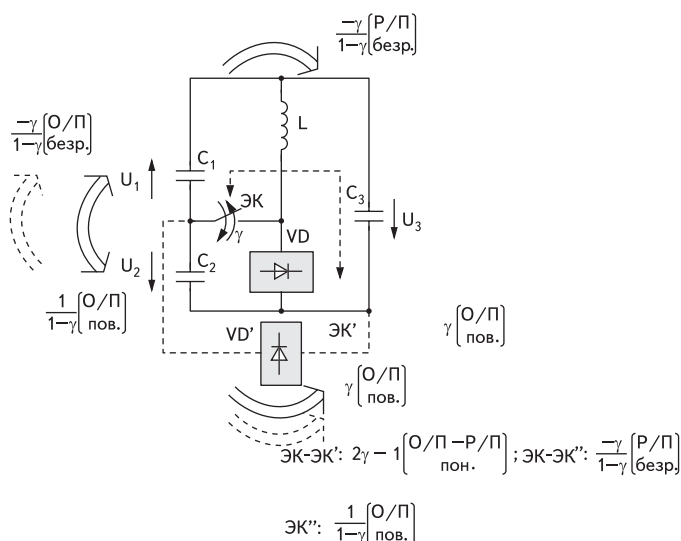


Рис. 3. Обобщенная схема традиционных простейших бестрансформаторных импульсных конверторов и регулировочные характеристики при непрерывности тока дросселя

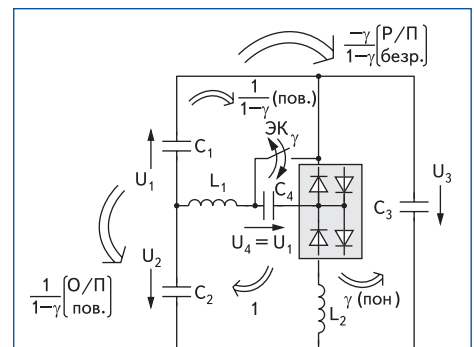


Рис. 4. Обобщенная схема бестрансформаторных импульсных конверторов Поликарпова-Кука с промежуточным конденсатором и регулировочные характеристики при непрерывности токов дросселей

На рис. 5 представлена возможная модернизация классической схемы Поликарпова-Кука [3] с указанием на следующие преимущества:

- гладкий потребляемый ток в широком диапазоне коэффициентов заполнения;
- на первичной стороне согласующего трансформатора напряжение больше напряже-

ния питания, что снижает коэффициент трансформации в повышающих преобразователях, упрощает конструкцию трансформатора (по сравнению со схемой с выводом средней точки трансформатора) и уменьшает его паразитные параметры;

- при стабилизации напряжения на нагрузке и увеличении питающего напряжения мак-

симальное напряжение на ключах и других элементах схемы преобразователя растет существенно медленнее, чем напряжение питания; за счет этого снижается класс применяемых приборов;

- из двух ключевых приборов, составляющих плечо схемы, один существенно разгружен по току, и значительный вклад в потери вносит лишь один ключ из пары, что позволяет существенно повысить КПД схемы;
- энергия, накапливаемая в индуктивности рассеяния трансформатора во время импульса, автоматически выводится в нагрузку или первичный источник питания, для чего не требуется каких-либо изменений или дополнений схемы;
- схема (рис. 5в) устойчива к несимметрии, которая может быть несимметрией управления или несимметрией параметров элементов.

К недостаткам схемы можно отнести возможность появления «сквозных» сверхтоков в полупроводниковых ключах при воздействии помех на цепи схемы управления.

Анализ возможных вариантов схем безтрансформаторных преобразователей, вытекающих из вышеприведенных обобщенных схем, убедительно показывает их однонаправленность. Для обеспечения обратимости преобразования и его многорежимности (с понижением или повышением напряжения) необходима иная схема — с переменной структурой.

Обратимые преобразователи

Одним из возможных вариантов является схема четырехмодульного обратимого прямоходового однополярного конвертора, приведенная на рис. 6. Помимо четырех модуляторов к недостаткам схемы относится неспо-

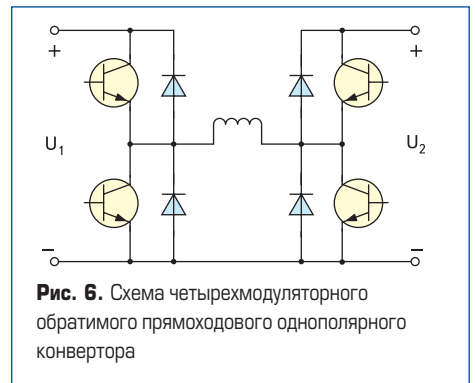
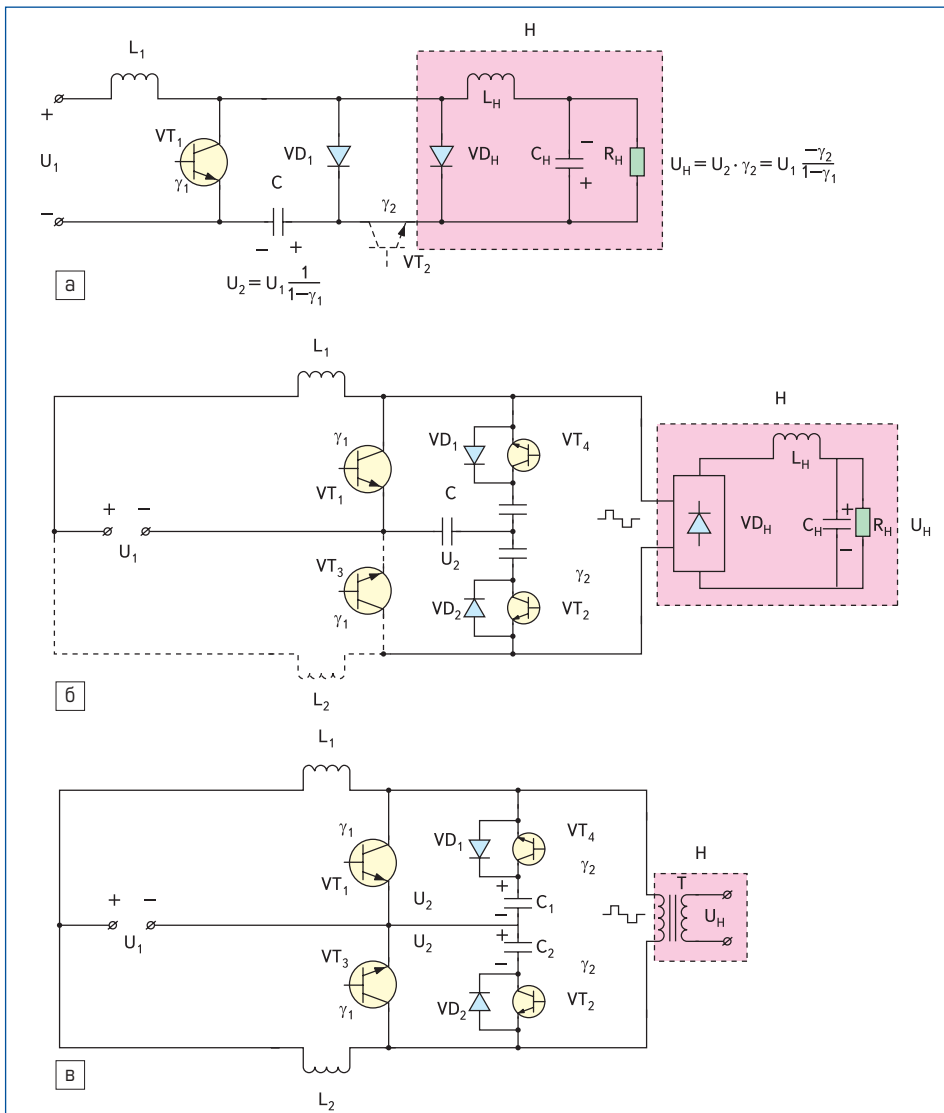


Рис. 5. Модернизация схемы Поликарпова-Кука: а) введение второго ключа \$VT_2\$ с коэффициентом заполнения \$\gamma_2\$; б) спаренная (двухтактная) схема с общим конденсатором (последовательность включения: \$VT_{1-2}, VT_{2-4}, VT_{3-4}\$); в) та же схема с расщепленным конденсатором для исключения подмагничивания трансформатора

Рис. 6. Схема четырехмодульного обратимого прямоходового однополярного конвертора

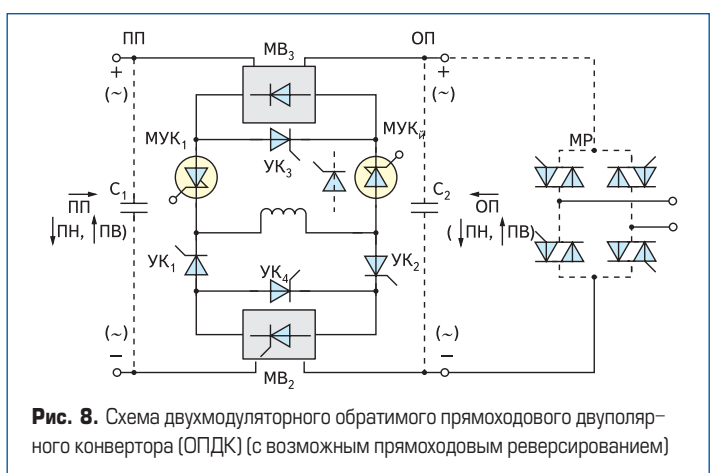
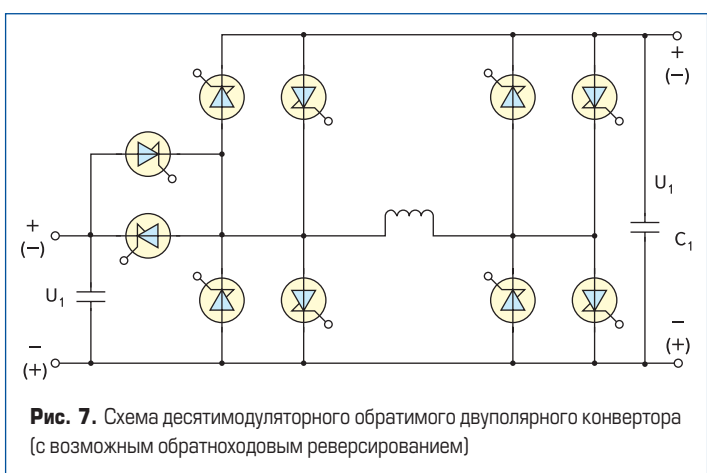


Рис. 7. Схема десятимодульного обратимого двуполярного конвертора (с возможным обратногоходовым реверсированием)

Рис. 8. Схема двухмодульного обратимого прямоходового двуполярного конвертора (ОПДК) (с возможным прямоходовым реверсированием)

способность работать при изменении полярности питающих напряжений.

На рис. 7 приведена схема десятимодуляторного обратимого двуполярного конвертора. Схема позволяет осуществлять обратное ходовое реверсирование полярности выходного напряжения относительно входного, то есть, по существу, может служить непосредственным циклоконвертором с общей точкой.

На рис. 8 приведена схема двухмодуляторного обратимого прямоходового двуполярного конвертора (ОПДК) с возможным прямоходовым реверсированием с помощью симисторного мостового реверсора (МР).

На рис. 9 показаны режимы работы ОПДК на переменном токе (без реверсирования), не требующие дополнительных пояснений.

Данная схема может обеспечить двустороннюю совместимость питающих каналов постоянного и переменного тока.

Она позволяет радикально упростить структуры преобразователей, исключив из них обратно-дублирующие звенья, а также инверторные звенья промежуточной повышенной частоты и трансформаторы. При этом в ОПДК используется только наиболее экономичное прямоходовое преобразование. Преимущества ОПДК наиболее существенно проявляются при использовании в качестве модуляторных ключей дорогостоящих мощных высоковольтных запираемых тиристоров типа IGCT.

В заключение рассмотрим схему универсального четырехключевого обратимо-реверсивного активного делителя (умножителя) напряжения (АДН), приведенную на рис. 10. При всей своей многофункциональности данная схема достаточно проста в изготовлении и управлении. Помимо обратимости и реверсивности АДН способен осуществлять режимы:

- а) «плавающего потенциала» средней точки (от $-max$ до $+max$);
 - б) «транспортера заряда» в многозвенном обратимом делителе (умножителе) повышенного напряжения без перенапряжений на обратимых электронных ключах (ОЭК) и др.
- В то же время следует отметить и следующие недостатки схемы:

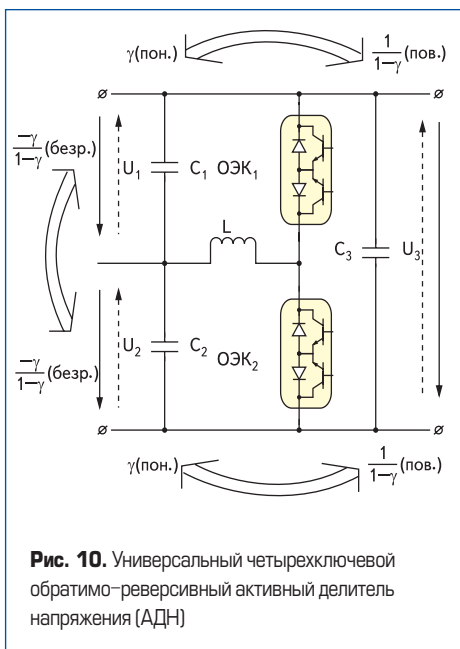


Рис. 10. Универсальный четырехключевой обратимо-реверсивный активный делитель напряжения (АДН)

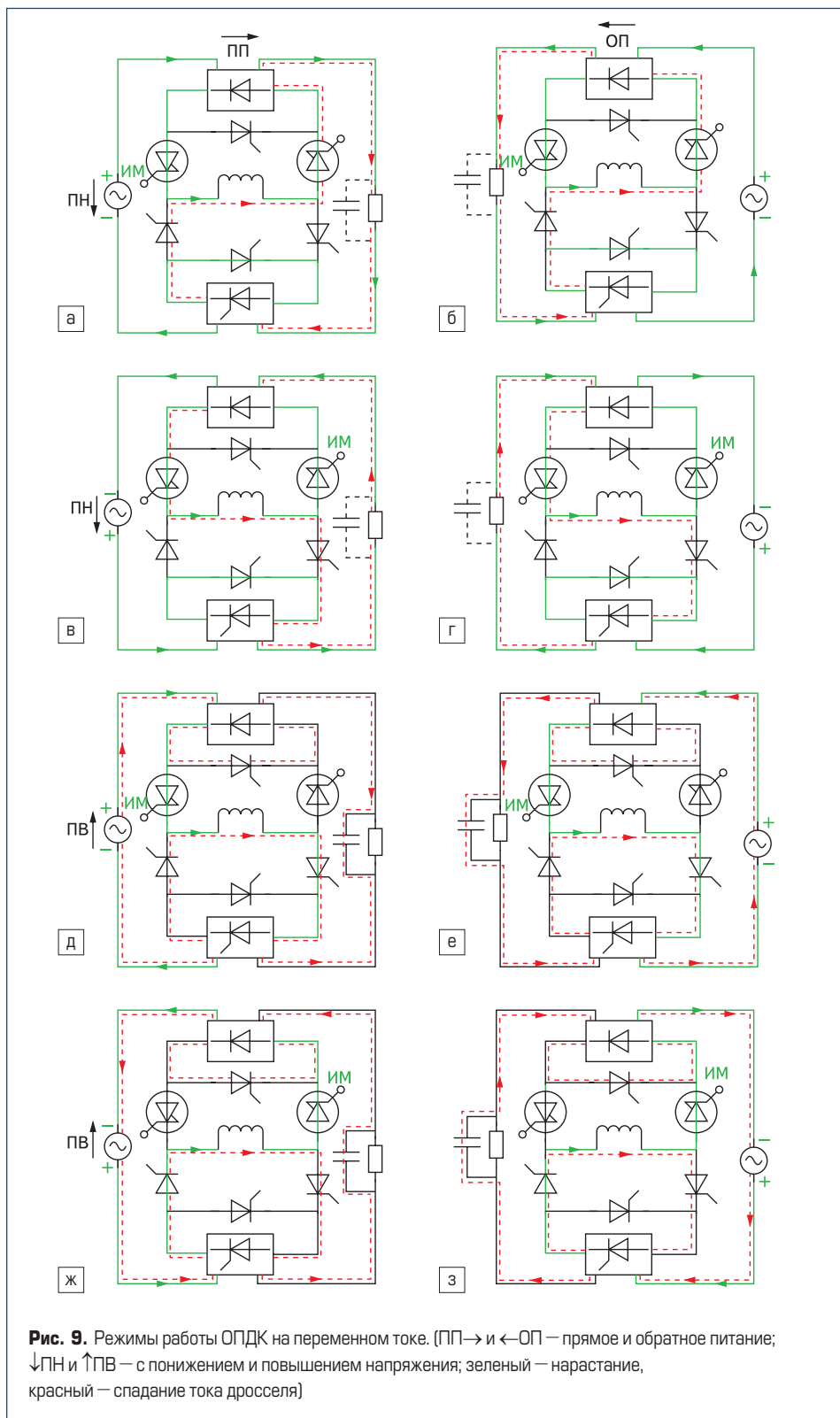


Рис. 9. Режимы работы ОПДК на переменном токе. (ПП→ и ←ОП – прямое и обратное питание; ↓ПН и ↑ПВ – с понижением и повышением напряжения; зеленый – нарастание, красный – спадание тока дросселя)

1. В варианте симметричной обратимости ($U_1 \Leftrightarrow U_2$) возможен только инвертирующий режим ($-\gamma / (1 - \gamma)$) с относительно низким КПД.
2. В варианте асимметричной обратимости ($U_3 \Rightarrow U_1, U_1 \Rightarrow U_3$) невозможны «безразличный» режим и двусторонние одинаковые режимы (понижение \Leftrightarrow понижение или повышение \Leftrightarrow повышение).
3. Потенциальная возможность установления режимов «сквозных сверхтоков» при случайном одновременном отпирании двух однонаправленных транзисторов в составе модульных обратимых электронных ключей (ОЭК_{1,2}).

Литература

1. Резников С. Б., Болдырев В. Г., Бочаров В. В., Булеков В. П., Постников В. А. Электроэнергетическая совместимость транспортных электроэнергетических комплексов с системами высоковольтного питания. Учебное пособие / Под ред. Резникова С. Б. Издательство МАИ, 2007.
2. Патент США 4.184.197, 1980.
3. Царенко А., Серегин Д. Новые схемы статических преобразователей электрической энергии и их сравнительный анализ // Силовая электроника. 2007. № 3.