

## НАПІВПРОВІДНИКОВІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ

УДК 621.314

### КОМБИНИРОВАННЫЕ УПРАВЛЯЕМЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ ОДНОФАЗНОГО ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

**В.И. Зозулев**<sup>1</sup>, канд. техн. наук, **А.Ф. Бондаренко**<sup>2</sup>, канд. техн. наук, **В.Я. Юрчишин**<sup>3</sup>, канд. техн. наук

1 – Институт электродинамики НАН Украины,  
пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина

2, 3 – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского»,  
пр. Победы, 37, Киев, 03056, Украина  
e-mail: dep8ied@ied.org.ua

*Предложены схемотехнические решения комбинированных управляемых выпрямителей (КУВ), в которых расширены возможности способов фазового управления (ФУ) и широтно-импульсной модуляции (ШИМ) ключами КУВ. Показано, что сетевые КУВ, собранные путем сочетания схем выпрямления Латура-Греца, обладают наиболее широким диапазоном регулирования их выходных напряжений – в пределах 300...600 В при питании от сети ~ 220 В. Рассмотрены четыре разновидности управляемых выпрямителей Латура-Греца. На примере обобщенной блок-схемы Латура (классической и сдвоенной)-Греца показано, что предпочтительным является создание в них двухуровневой ШИМ. При таком подходе улучшаются качество и эффективность стабилизации выходного напряжения данных выпрямителей. Обобщены преимущества предлагаемых КУВ – автономных и в составе устройств силовой преобразовательной техники. Библ. 7, рис. 7, таблица.*

**Ключевые слова:** комбинированные управляемые выпрямители, схемы выпрямления Латура-Греца, фазовое управление, широтно-импульсная модуляция.

**Введение.** Выпрямители напряжения переменного тока (одно- и трехфазного) применяются в значительной части устройств силовой преобразовательной техники (ПТ). Особенность выпрямителей заключается в том, что их технико-экономические показатели (ТЭП) неразрывно связаны с ТЭП устройств ПТ в целом. Причем для ряда устройств ПТ именно с помощью обновленных выпрямителей становится доступным заметное повышение их эффективности. Реализация задачи такого целевого обновления выпрямителей предлагается путем создания комбинированных управляемых выпрямителей (КУВ) на основе расширения возможностей способов фазового управления (ФУ) и широтно-импульсной модуляции (ШИМ) ключами КУВ. Причем расширение способов ФУ и ШИМ лучше всего достигается при их функциональном воплощении в структуры разработанных КУВ – сетевых и трансформаторных (с трансформатором на входе КУВ). Анализ существующих управляемых (стабилизированных) выпрямителей [1–3] показал, что функции управления (стабилизации) обычно реализуются путем установления в нераспределенные (однофункциональные) силовые цепи ключей, которые работают согласно разным видам ФУ или ШИМ. При этом выпрямленное напряжение регулируется только в сторону его уменьшения. В статье предлагается построение управляемых выпрямителей путем сочетания схем выпрямления Латура-Герца (Л-Г). Согласно такой структуре возможно регулирование напряжения от выпрямленного по схеме Греца ( $U_B^I$ ) до выпрямленного по схеме Латура ( $U_B^II$ ). Для КУВ предлагается использовать их двухуровневое напряжение, созданное отдельно согласно схемам Латура и Греца с целью реализации в данных КУВ двухуровневого фазоимпульсного управления или ШИМ [4, 5].

Эти КУВ, кроме отмеченной возможности устанавливать их выходное напряжение  $U_B^{II}$  в пределах  $U_B^I \leftrightarrow U_B^{II}$ , имеют преимущества в части качества стабилизации выходного

напряжения, электромагнитной совместимости, снижения потерь на ключах. В связи с изложенным исследование предлагаемых КУВ является актуальным.

**Цель работы** – представление и обобщение результатов экспериментальных исследований предлагаемых вариантов комбинированных управляемых выпрямителей и моделирования основных из них, построенных путем реконфигурации их распределенных структур с расширением способов фазового управления и широтно-импульсной модуляции.

**Постановка задачи.** Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: 1) провести численное моделирование электромагнитных процессов в цепях основных предложенных схем комбинированных управляемых выпрямителей, подтверждающих их базовые принципы работы; 2) выполнить соответствующие экспериментальные исследования на предмет верификации численного моделирования и основных принципов функционирования исследованных вариантов комбинированных управляемых выпрямителей; 3) обобщить эффективность преобразовательных свойств рассмотренных комбинированных управляемых выпрямителей – в автономном режиме и в системе сеть – электропитаемые устройства силовой преобразовательной техники.

### Материалы исследований.

**1. Комбинированный выпрямитель Латура-Греца с дискретно устанавливаемым выходным напряжением** (рис. 1). Этот выпрямитель представляет собой сочетание схемы Греца (мост VD1...VD4, конденсатор C3) и схемы удвоения напряжения Латура (диоды VD1, VD2, конденсаторы C1, C2). Связь между этими схемами осуществляется с помощью переключки П. В зависимости от соотношения емкостей конденсаторов C1, C2 и C3 выходное напряжение  $U_B^{ЛГ}$  выпрямителя

Латура-Греца (Л-Г) может быть дискретно задано в пределах  $U_B^{ЛГ} \approx (1,0 \dots 1,8) U_{BH}^Г$ , где  $U_{BH}^Г$  – выпрямленное номинальное напряжение выпрямителем Греца при его номинальных мощности нагрузки  $P_H^Г$  и пульсациях  $\delta_{II}^Г$ .

Кривые рис. 2	C1, C2 (≈%)	C3 (≈%)
1	0	100
2	40	60
3	80	20
4	100	0
5	20	90
6	40	80

В таблице приведен пример выбора дискретных значений напряжения  $U_{BH}^{ЛГ}$  при условии постоянства (с допуском до  $\pm 5\%$ ) значений  $\sim U_{вх} \approx 220$  В;  $P_H^{ЛГ} \approx 500$  Вт;  $\delta_{II}^{ЛГ} \approx 3,0\%$ . Соотношение между  $C1 = C2$  и  $C3$  подбиралось экспериментальным путем, исходя из выполнения указанных условий как целевой функции оптимизации значений  $C1 \dots C3$ . Согласно такой целевой функции можно также определить емкости  $(C1 \dots C3)^{opt}$  расчетно-аналитическим путем [1]. Условия постоянства значений  $\sim U_{вх}$ ,  $P_H^{ЛГ}$ ,  $\delta_{II}^{ЛГ}$  установлены в

связи с тем, что существует ряд нагрузок для КУВ устройств силовой преобразовательной

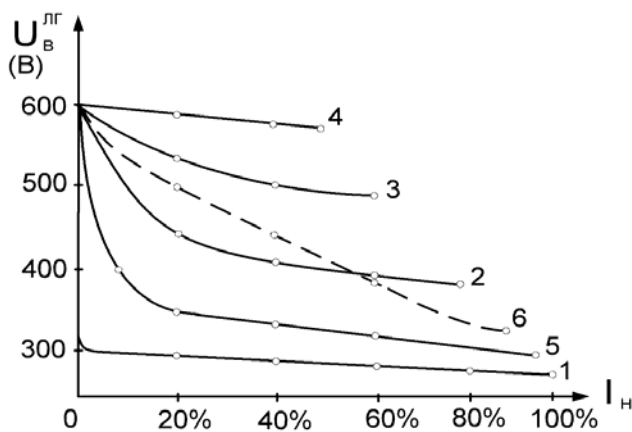


Рис. 2

техники, например, магнитно-полупроводниковые генераторы импульсов (МПГИ) [6], инверторы [5], для которых оптимальным является повышенное выпрямленное напряжение (практически до удвоенного) по сравнению с напряжением  $U_{BH}^Г$ . При  $P_H^{ЛГ} = \text{const}$  увеличивается КПД данного КУВ и соответственно нагруженных на него указанных устройств ПТ. Такое функциональное свойство сетевого КУВ (рис. 1) использовано при формировании концепции повышения КПД в целом МПГИ [6].

На рис. 2 для КУВ (рис. 1) показаны варианты 1-6 его внешних характеристик  $U_B^{JГ} = f(I_H)$  при условии постоянства  $\sim U_{вх}$ ,  $P_H^{JГ}$ ,  $\delta_{П}^{JГ}$  и соотношения между  $C1$ ,  $C2$  и  $C3$  согласно указанным для кривых 1-6 в таблице. Как видно, изменяя соотношение между  $C1$ ,  $C2$  и  $C3$  можно дискретно выставить выпрямленное сетевое напряжение  $U_B^{JГ} \approx 300; 400; 500$  и  $600$  В (кривые 1-4). Изменяя соотношение значения емкостей между  $C1$ ,  $C2$  и  $C3$  на заданном дискретном уровне, можно влиять на характер кривых, например, 5 и 6: первая имеет участки (рис. 2) приблизительного постоянства напряжения примерно от 20 до 100 %  $I_H$ , мощности примерно от 10 до 20 %  $I_H$  и тока примерно от нуля до 10 %  $I_H$ ; вторая имеет в основном участок приблизительного постоянства мощности от нуля до 80 %  $I_H$ . То есть КУВ (рис. 1) с внешними характеристиками 5, 6 (рис. 2), как наиболее простой источник и с повышенным КПД, отвечает требованиям к электропитанию спецнагрузок отдельных видов технологий: электросварочной, электродуговой, плазменной и др. КУВ (рис. 1) с приведенными внешними характеристиками на рис. 2 и возможными другими им подобными (между характеристиками 1 и 4) могут быть востребованными для устройств ПТ при изменении потребляемого ими тока в пределах от  $1,0 I_H$  до примерно  $0,4 \dots 0,8 I_H$ . Поэтому для достижения стабилизированного и/или регулируемого спектра внешних характеристик в пределах кривых 1 и 4 (рис. 2) предлагаются следующие варианты КУВ однофазного электропитания.

**2. Однофазно управляемый выпрямитель Латура-Греца (ОУВ-ЛГ) – рис. 3.** Если ключ  $VS$  заперт, то при полуволне  $\sim U_{вх}$  ( $\cap$ ) конденсаторы  $C1$ ,  $C2$  подзаряжаются последовательно по схеме Греца. При отрицательной полуволне  $\sim U_{вх}$  ( $\cup$ ) подзаряжается только конденсатор  $C2$ . В результате напряжение  $U_B^{JГ} = U_B^{JГ}(\min)$  примерно равно  $U_{BH}^Г$  – выпрямленному номинальному напряжению по схеме Греца. Если ключ  $VS$  от-

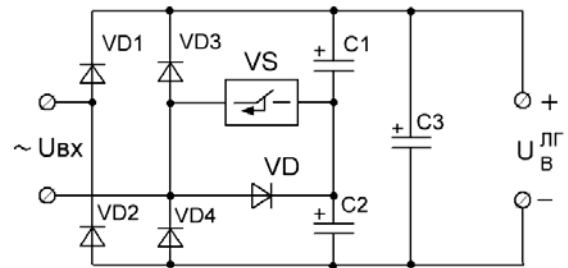


Рис. 3

крыт на все время подзарядки  $C1$  от  $\sim U_{вх}$  ( $\cap$ ), то  $U_{вых} = U_B^{JГ}(\max)$ , определяемое соотношением емкостей между  $C1$ ,  $C2$  и  $C3$ . В схеме рис. 3 применена модификация импульсно-фазового управления ключом  $VS$ , приспособленная к цепи непосредственной подзарядки  $C1$ , исключая часть тока, который поступает в нагрузку непосредственно от сети. Такая модификация определилась как фазовая времязарядная модуляция (Ф-ВЗМ). Согласно Ф-ВЗМ ключом  $VT$  (рис. 3) экспериментально и путем численного моделирования подтверждено изменение напряжения  $U_B^{JГ} = U_B^{JГ}(\max) \leftrightarrow U_B^{JГ}(\min)$  при изменении угла управления  $\alpha = (\approx 0,5\pi \leftrightarrow \approx 0,8\pi)$ . Схема ОУВ-ЛГ (рис. 3) является наиболее упрощенной, но ввиду ее однофазного управления она имеет соответствующие ограничения по мощности.

Макетирование схемы рис. 3 проведено при  $C1 = C2 = 600$  мкФ;  $C3 = 950$  мкФ;  $R_H = 350$  Ом; регулируемое напряжение  $U_B^{JГ} = 290$  В  $\leftrightarrow$  420 В.

**3. Двухфазно управляемый выпрямитель Латура-Греца (ДУВ-ЛГ) показана на рис. 4.** Принцип работы этой схемы соответствует описанному для схемы, показанной на рис. 3. Только здесь, вследствие введения ключа с двусторонней проводимостью  $VS$ , управляемо подзаряжается от отрицательной полуволны напряжения  $\sim U_{вх}$  ( $\cup$ ) также конденсатор  $C2$ . При подборе аналогично схеме рис. 1 соотношений между емкостями  $C1$ ,  $C2$  и  $C3$  с помощью ключа  $VS$  обеспечивается регулирование выходного напряжения  $U_B^{JГ}$  в пределах  $U_B^Г \leftrightarrow U_B^Г$ , т.е., например, для  $\sim U_{вх} = 220$  В – в диапазоне  $\approx (300$  В  $\leftrightarrow$  600 В). Такой широкий диапазон регулирования

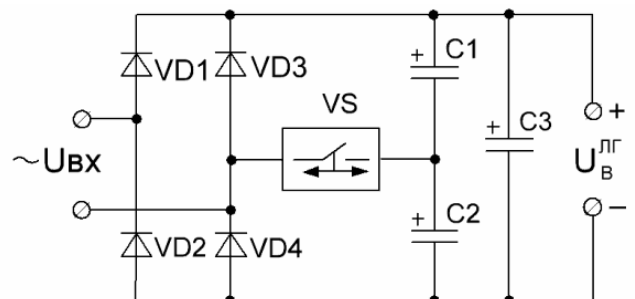


Рис. 4

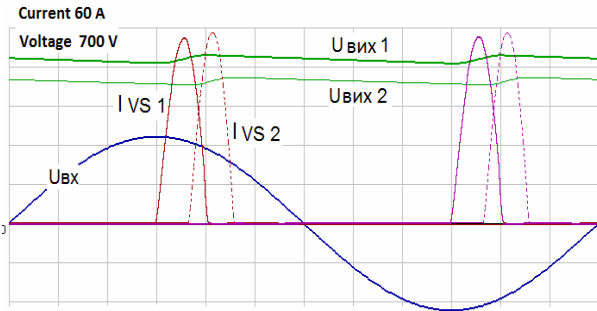


Рис. 5

мально  $\pm (10 \dots 30) \%$  относительного выбранного дискретного значения  $U_B^{JГ}$  ( $Dг$ ) в диапазоне  $U_B^Г \leftrightarrow U_B^Г$ . При  $U_B^Г (Dг) \approx 380$  В проведено моделирование схемы рис. 4, основным результатом которого представлен на рис. 5 временными диаграммами подзарядных токов  $I_{VS1}$ ,  $I_{VS2}$  через ключ  $VS$  и определенные ими напряжения  $U_{вых1}$ ,  $U_{вых2}$ , соответствующих углам управления  $\alpha_1 \approx 0,5\pi$  и  $\alpha_2 \approx 0,8\pi$  фазовой времязарядной модуляции. Соответствующие эксперименты подтвердили результаты моделирования и предложенный способ регулирования выходного напряжения схемы рис. 4.

Макетирование схемы рис. 4 проведено при  $C1 = C2 = 50$  мкФ;  $C3 = 1000$  мкФ;  $R_n = 480$  Ом; регулируемое напряжение  $U_B^{JГ} \approx (300 \text{ В} \leftrightarrow 400 \text{ В})$ .

Управляемый выпрямитель имеет не только наиболее широкий диапазон регулирования напряжения  $U_B^{JГ}$ , но и определенные ограничения по мощности. Для расширения применений КУВ по мощности при электропитании от однофазной сети предлагается следующий вариант КУВ.

**4. Управляемый выпрямитель Латура (сдвоенный)-Греца (УВ-2ЛГ)** – рис. 6. В этой схеме для управления сдвоенным выпрямителем Латура потребовалось бы два двунаправленных ключа  $VS$  (рис. 4), что нерационально. Поэтому предложено управлять подзарядом конденсаторов  $C1$ ,  $C2$  одним ключом  $VT$ , используя фазоимпульсное управление им. При открытом ключе  $VT$  в течение полного времени подзаряда конденсаторов  $C1 \dots C4$  от положительной полуволны напряжения  $\sim U_{вх}$  ( $\cap$ ) подзаряжаются одновременно  $C1$  и  $C4$ , а от отрицательной полуволны  $\sim U_{вх}$  ( $\cup$ ) –  $C1$  и  $C3$ . То есть выпрямитель ( $VD1 \dots VD4$ ,  $C1 \dots C4$ ) становится двухтактным и с умножением напряжения примерно в  $1,1 \dots 0,9$  раза в зависимости от соотношения емкостей  $C1 \dots C4$  и  $C5$  – аналогично схеме рис. 1.

Управляемость УВ-2ЛГ (рис. 6) исходит из того, что при открытом ключе  $VT$  выпрямленные напряжения согласно схемам Латура и Греца находятся в соотношении  $U_B^Г > U_B^Г$ , что приводит к запираанию диодов  $VD7$ ,  $VD8$  и блокировке конденсатора  $C5$  от моста  $VD2, VD4, VD7, VD8$ . При запертом ключе  $VT$  диоды моста  $VD7$ ,  $VD8$  становятся разблокированными и напряжение  $U_B^{JГ} \approx U_B^Г$ . Диоды  $VD5$ ,  $VD6$  в сдвоенной схеме Латура нужны для блокировки перераспределения зарядов между  $C3$ ,  $C1$  и  $C2$ ,  $C4$ .

Промежуточные состояния ключа  $VT$  (между «0» и «1»), заданные изменением фазового угла  $\alpha$  в пределах  $\alpha \approx (0,3 \dots 0,9)\pi$ , определяют регулирование выходного напряжения

УВ-2ЛГ в пределах  $U_B (2ЛГ) = U_B^{min} (2ЛГ) \dots U_B^{max} (2ЛГ)$ , где значения этих предельных напряжений устанавливаются согласно выбору соотношений между емкостями  $C1 \dots C4$  и  $C5$  для выбранного дискретного номинального значения  $U_B^{ном} (2ЛГ)$ .

Из изложенного следует, что УВ-2ЛГ имеет ориентировочно равные огра-

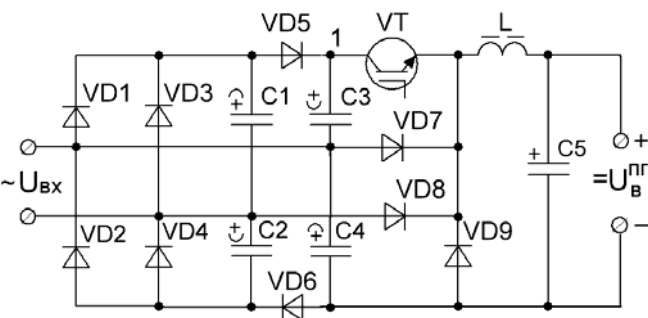


Рис. 6

ничения по мощности с выпрямителем по схеме Греча, что вместе с управляемостью УВ-2ЛГ предопределяет расширенное применение схемы Латура, включая ее сочетание со схемой Греча. Причем управляемость УВ-2ЛГ осуществляется только одним однонаправленным ключом VT. Кроме того, согласно такому подходу допустимо управлять ключом VT способом широтно-импульсной модуляции (ШИМ) – рис. 7, где В – сдвоенный выпрямитель Латура (2Л), схемы рис. 6.

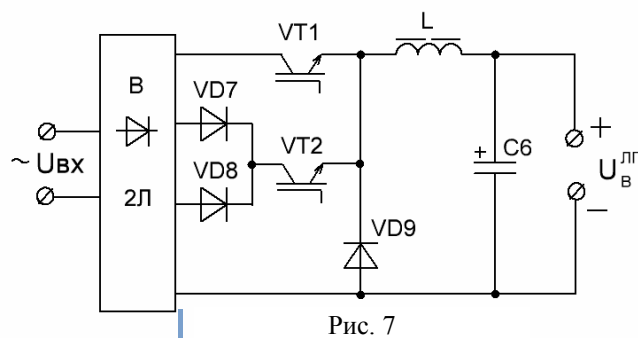


Рис. 7

Здесь для стабилизации напряжения  $U_B^{\text{ЛГ}}$  схем выпрямления Латура-Греча (при открытом VT1) и Греча (при запертом VT1) рационально устанавливается  $U_B$  (2ЛГ)  $\approx (1,2 \dots 1,3) U_B^{\text{ЛГ}}$ . Ключ VT1, дроссель L и замыкающий диод VD9 – это понижающий импульсный стабилизатор, функционирующий в отличительном режиме в паре с ключом VT2, который при заданных изменениях напряжения  $\sim U_{\text{ВХ}}$  постоянно открыт с минимальным падением напряжения на нем. При запертом ключе VT1 ток на дроссель L поступает через диоды VD7 и VD8 (от схемы Греча) и VT2 («1»), который блокируется при отпирании ключа VT1. То есть ведущий ШИМ – управляемый ключ VT1 в одном процессе задает ведомое ШИМ-управление ключом VT2, причем без подачи на него импульсов управления. Ключ VT2 запирается по сигналу от схемы управления при аварийных ситуациях, в том числе вместе с ключом VT1. Как видно, такая реконфигурированная структура схемы рис. 7 предопределяет оптимизацию суммарных потерь на ключах VT1, VT2 по сравнению с одиночным ключом и улучшение таких показателей, как электромагнитная совместимость, качество стабилизации, защитные свойства и др.

### Основные результаты исследований

Получены базовые результаты исследования комбинированных управляемых (стабилизированных) выпрямителей (КУВ), которые рекомендуются для исходного выбора схемотехнического решения выпрямителей однофазного электропитания как отдельного устройства силовой преобразовательной техники (ПТ), так и в составе ряда устройств ПТ.

Предложено для таких устройств ПТ, как магнитно-полупроводниковые генераторы импульсов [6], инверторы [5], конверторы [7] использовать варианты рассмотренных КУВ, что предопределяет улучшение основных показателей данных устройств ПТ вследствие:

- повышения питаемого их напряжения больше сетевого выпрямленного до 1,8...2,0 раз, причем без применения трансформаторов или повышающих стабилизаторов. При повышенном выпрямленном напряжении и одной и той же потребляемой мощности уменьшаются потери энергии в КУВ и в самих устройствах ПТ примерно до 1,5...2,0 раз, коэффициент передачи трансформатора – до 2 раз (и в определенной мере его зависимых показателей), емкости накопительных конденсаторов – до 4 раз;

- регулирования выпрямленного напряжения в широких пределах приблизительно от 300 В до  $\sim 600$  В при питании от  $\sim 220$  В наиболее доступным способом, что упрощает определенный класс устройств ПТ, например, испытательных, лабораторных, программируемых;

- возможности формирования спектра внешних характеристик (рис. 2), соответствующих требованиям к электропитанию спецнагрузок отдельных технологий (кривые 5, 6, рис. 2) – например, сварочной, электроразрядной, электротермической и др.;

- расширения ограничения по мощности сдвоенного (двухтактного) выпрямителя по схеме Латура (рис. 6);

- создания на базе схем Латура-Греча более простого, чем аналоги [4, 7], стабилизированного выпрямителя с двухуровневой ШИМ. Согласно этому способу ШИМ и данным аналога [4] в сравнении с одноуровневой ШИМ улучшаются электромагнитная совместимость, качество стабилизации и снижаются потери на ключах;

– выявленого путем математического моделирования (специализированная программа OMEGA v. 2013) свойства схемы рис. 4, согласно которому возможно улучшение спектрального состава входного тока и уменьшение его крест-фактора (КФ) путем введения последовательной индуктивности на входе выпрямителя. Так, при прочих равных условиях управления и значении последовательной индуктивности КФ входного тока составил: для схемы Греца – 2,9...3,1; схемы Латура – 3,5...3,6; схемы рис. 4 – 2,2...2,8. Для сравнения – идеальная форма синусоидального тока имеет КФ = 1,41.

В дополнение к отмеченному установлены потенциально выгодные функциональные свойства управляемых выпрямителей Латура-Греца:

- компенсация провалов выпрямленного напряжения схемой Греца ( $U_B^I$ ) с помощью большего выпрямленного напряжения схемой Латура ( $U_B^I$ );
- коррекция и оптимизация пульсаций напряжения  $U_B^I$  с помощью напряжения  $U_B^{II}$ .

Отмеченные свойства и возможность обеспечения стабильности напряжения  $U_B^{III}$  в пределах  $\pm (1,0 \dots 2,0) \%$  предопределяют исключение ШИМ или других модуляций инверторов, конверторов, генераторов в системе «стабилизированный выпрямитель Латура-Греца (СВЛ-Г) и данные устройства», охваченные обратной связью на управляющий вход СВЛ-Г. Согласно такому решению достигаются упрощение системы устройств ПТ и улучшение ее электромагнитной совместимости.

**Выводы.** 1. Предложенные варианты комбинированных управляемых выпрямителей однофазного электропитания вследствие их улучшенных технико-экономических показателей, изложенных выше, могут широко применяться автономно и в составе таких устройств преобразовательной техники, как магнитно-полупроводниковые генераторы импульсов, инверторы, конверторы, источники электропитания спецнагрузок отдельных электротехнологий.

2. Рассмотренные КУВ в составе отмеченных устройств ПТ также улучшают их ТЭП вследствие повышенного выпрямленного сетевого напряжения, его возможности регулировать или дискретно устанавливать в пределах приблизительно 300...600 В при электропитании  $\sim 220$  В; возможности формирования в отмеченных пределах заданного спектра внешних характеристик КУВ для спецнагрузок, способности КУВ компенсировать кратковременные провалы сетевого напряжения и коррекции пульсаций выпрямленного напряжения.

3. Представленный стабилизированный выпрямитель с двухуровневой ШИМ на базе схем Латура-Греца является более простым, чем аналоги. Улучшенные параметры такого выпрямителя, охваченного обратной связью с выхода питаемых устройств ПТ, дают возможность исключить в них ШИМ и другие виды модуляций, что в целом предопределяет улучшение качества стабилизации выходных напряжений, электромагнитную совместимость и зависимые другие показатели системы выпрямитель – устройство ПТ.

1. Векслер Г.С., Пилинский В.В. Электропитание аппаратуры. Киев: Вища шк. Головное изд-во, 1986. 383 с.
2. Руденко В.С., Сенько В.И., Чиженко И.М. Преобразовательная техника. Киев: Вища шк. Головное изд-во, 1983. 431 с.
3. Шрайберг Г. 300 схем источников питания. Выпрямители. Импульсные источники питания. Линейные стабилизаторы и преобразователи. Пер. с франц. Москва: ДМК, 2000. 224 с.
4. Голубев В.В. Импульсное преобразование переменного напряжения. Киев: Наук. думка, 2014. 248 с.
5. Михальський В.М. Засоби підвищення якості електроенергії на вході і виході перетворювачів частоти та напруг з широтно-імпульсною модуляцією. Київ: Інститут електродинаміки НАН України, 2013. 340 с.
6. Волков И.В., Зозулев В.И., Кускова Н.И., Христо А.И. Развитие принципов построения предтрансформаторной части высоковольтных магнитно-полупроводниковых генераторов импульсов. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2017. Вип. 47. С. 45–53.
7. Ирвин М. Готтлиб. Источники питания. Конверторы. Линейные и импульсные стабилизаторы. Пер. с англ. Москва: Постмаркет, 2002. 544 с.

УДК 621.314

**В.І. Зозульов**<sup>1</sup>, канд. техн. наук, **О.Ф. Бондаренко**<sup>2</sup>, канд. техн. наук, **В.Я. Юрчишин**<sup>3</sup>, канд. техн. наук

<sup>1</sup> – Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна

<sup>2, 3</sup> – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»,  
пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна

**КОМБІНОВАНІ КЕРОВАНІ ВИПРЯМЛЯЧІ ОДНОФАЗНОГО ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ**

Запропоновано схемотехнічні рішення комбінованих керованих випрямлячів (ККВ), в котрих розширені можливості способів фазового керування (ФК) і широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) ключами ККВ. Показано, що мережні ККВ, які складені шляхом поєднання схем випрямлення Латура-Греца, мають найбільш широкий діапазон регулювання їх вихідних напруг – у межах  $\sim (300 \dots 600)$  В при живленні від мережі  $\sim 220$  В. Розглянуто чотири різновиди керованих випрямлячів Латура-Греца. На прикладі узагальненої блок-схеми Латура (класичної та подвоєної) – Греца показано, що переважним є створення в них дворівневої ШІМ. При такому підході покращуються якість і ефективність стабілізації вихідної напруги цих випрямлячів. Узагальнено переваги запропонованих ККВ – автономних і у складі пристроїв силової перетворювальної техніки. Бібл. 7, рис. 7, таблиця.

**Ключові слова:** комбіновані керовані випрямлячі, схеми випрямлення Латура-Греца, фазове керування, широтно-імпульсна модуляція.

**V. Zozulov<sup>1</sup>, O. Bondarenko<sup>2</sup>, V. Yurchyshyn<sup>3</sup>**

1 – The Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine

2, 3 – National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Peremohy, 37, Kyiv, 03057, Ukraine

**COMBINED CONTROLLED RECTIFIERS OF SINGLE-PHASE POWER SUPPLY**

The circuits of combined controlled rectifiers (CCR) with advanced possibilities of phase control (PhC) and pulse-width modulation control (PWM) methods of CCR switches are proposed. It is shown that the network CCR combining the Latour-Graetz rectification circuits have the widest range of the output voltage regulation (300...600 V) under the network supply  $\sim 220$  V. The four variants of Latour-Graetz controlled rectifiers are considered. The example of generalized block-diagram of Latour (classic and double) – Graetz showed that the use of two-level PWM control is preferable. This approach makes it possible to improve the quality and effectiveness of the output voltage stabilization. The benefits of the proposed CCR (as autonomous units and as parts of power converters) are highlighted. References 7, figures 7, table.

**Key words:** combined controlled rectifiers, Latour-Graetz rectification circuits, phase control, pulse-width modulation.

1. Veksler G.S., Pilinskiy V.V. Electro-feed-in devices of electro-acoustic and cinematechnical apparatus. Kyiv: Vyshcha shkola, 1986. 383 p. (Rus)
2. Rudenko V.S., Senko V.I., Chizenko I.M. Conversion technique. Kyiv: Vyshcha shkola. 1983. 431 p. (Rus)
3. Shrayberg G. 300 charts of sources of feed. Rectifiers. Impulsive sources of feed. Linear stabilizers and converters: Trudged. with franc. Moskva: DMK, 2000. 224 p. (Rus)
4. Holubev V.V. Pulse conversion of alternating voltage. Kyiv: Naykova dumka, 2014. 248 p. (Rus)
5. Mykhalskiy V.M. Means for improving the quality of electricity at the input and output of frequency and voltage converters with pulse-width modulation. Kyiv: Instytut Elektrodynamiky NAN Ukrainy, 2013. 340 p. (Ukr)
6. Volkov I.V., Zozulev V.I., Kuskova N.I., Khrysto O.I. Development of principles for constructing a pre-transformer part of magnetic-semiconductor pulse generators. Pratsi Instytutu elektrodynamiky NAN Ukrainy. 2017. Vyp. 47. P. 45–53. (Rus)
7. Yrvynh M. Hottlyb. Power supplies. Inverters. Converters. Linear and pulsed stabilizers. Moskva: Postmarket, 2002. 544 p. (Rus)

Надійшла 15.08.2018

Received 15.08.2018

УДК 621.314

## ОРГАНІЗАЦІЯ ПАРАЛЕЛЬНОЇ РОБОТИ ІМПУЛЬСНИХ СТАБІЛІЗАТОРІВ ПОСТІЙНОЇ НАПРУГИ НА ОСНОВІ ВИСОКОЧАСТОТНИХ МАГНІТНИХ ПІДСИЛЮВАЧІВ

**В.І. Яськів, А.В. Яськів**

Тернопільський національний університет ім. Івана Пулюя,

вул. Руська, 56, м. Тернопіль, 46001, Україна

e-mail: [yaskiv@yahoo.com](mailto:yaskiv@yahoo.com)

Для отримання високого рівня струму в навантаженні існує проблема організації паралельної роботи окремих стабілізаторів постійної напруги. Запропоновано методи ввімкнення на паралельну роботу імпульсних стабілізаторів постійної напруги на основі високочастотних магнітних підсилювачів. Сформульовано умови рівномірного розподілу струму навантаження між окремими стабілізаторами напруги. Наведено приклад реалізації такої системи. Бібл. 12, рис. 3.