

# ОДИН ИЗ СПОСОБОВ УЛУЧШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДИОДНЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ С ДРОССЕЛЬНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Ю.И. Хохлов, В.В. Прохоров  
г. Челябинск, ЮУрГУ

Исследуется один из вариантов улучшения энергетических показателей диодных выпрямителей с дроссельным управлением.

Потребление электрической энергии в ряде энергоемких отраслей промышленности осуществляется на постоянном токе с использованием полупроводниковых диодных преобразователей. При этом объекты электротехнологии и транспорта требуют оснащения выпрямительных агрегатов системами автоматического или ручного регулирования электрического режима. Но применение управляемых вентилях (тиристоров) зачастую нецелесообразно ввиду больших величин преобразуемой мощности. Вместе с тем существует эффективный способ управления диодными выпрямителями - дроссельное регулирование [1-4]. Оно, также как и тиристорное, с целью предотвращения резкого снижения энергетических показателей осуществляется в пределах одной ступени дискретного трансформаторного регулирования. Несмотря на то, что дроссельный способ управления не лишен определенных недостатков, существуют пути их преодоления [4-7].

В статье рассматривается один из способов улучшения энергетических показателей диодных выпрямителей с дроссельным управлением на примере трехфазной мостовой схемы, представленной на рис. 1. Она основана на трех дросселях насыщения ДН1-ДН3, рабочие обмотки которых включены последовательно во вторичные фазные цепи трансформатора. Обмотки управления под-

ключены к тиристорному мосту  $VS1-VS6$ , замкнутому накоротко, а также к шинам выпрямленного напряжения  $U_d$  через дополнительный выпрямительный мост на вентилях  $VD7-VD12$  (показан пунктиром). Обмотки смещения у ДН отсутствуют.

Работает схема следующим образом. При появлении положительного напряжения на соединенных последовательно рабочей обмотке ДН и вентиле основного моста  $VD1-VD6$  последний открывается и дроссель начинает выводиться из ненасыщенного состояния. В это время ток через его рабочую обмотку изменяется пренебрежимо мало, и все напряжение вентильного плеча оказывается приложенным к ней. На этом этапе ДН представляет собой трансформатор напряжения, поэтому напряжение рабочей обмотки трансформируется в обмотку управления с коэффициентом  $k_{дн} = W_{оу} / W_{ор} > 1$ . В момент времени, когда напряжение на соответствующем вентиле дополнительного моста  $VD7-VD12$  становится положительным, он открывается и начинается процесс коммутации.

Таким образом, введение в схему дополнительного диодного моста  $VD7-VD12$  позволяет процессу коммутации начаться не после насыщения ДН, а раньше, что приводит к уменьшению угла сдвига первой гармоники фазного тока трансформатора и, следовательно, к увеличению  $\cos \phi$  агрегата.

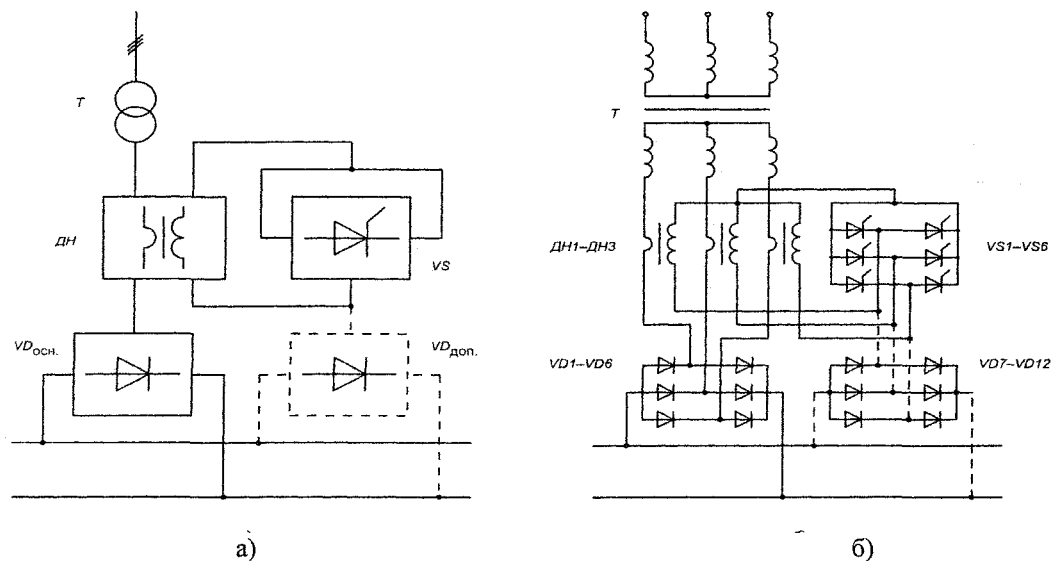


Рис. 1

Длительность процесса выведения дросселей определяет угол дроссельного управления, а следовательно, и величину выпрямленного напряжения  $U_d$ . Оперативное изменение этого угла осуществляется открыванием в нужные моменты времени тиристоров  $VS1-VS6$  [4-6], в результате чего ДН переводятся в режим трансформаторов тока и перестают оказывать влияние на цепи основных вентилях. Задержка моментов открывания тиристоров относительно точек пересечения фазных ЭДС определяется углом тиристорного управления  $\alpha_t$  схемы. За период питающего напряжения происходит два перемагничивания сердечников ДН.

В ходе анализа работы схемы была создана ее аналитическая модель, описывающая процессы в схеме в зависимости от соотношений углов  $\alpha_t$ ,  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$ . На рис. 2 для примера показаны кривые фазного тока трансформатора и напряжения на нагрузке, полученные в результате просчета аналитической модели в программе Mathcad.

Помимо этого создана модель для численного исследования схемы в программе Matlab, изображенная на рис. 3. Формы токов и напряжений приведены для сравнения в обычном варианте (без дополнительных вентилях  $VD7-VD12$ ) - рис. 4, а и при наличии таковых - рис. 4, б. Спектры фазного тока трансформатора показаны на рис. 5.

Видно, что включение дополнительного диодного моста оказывает положительное влияние на коэффициент сдвига, уровень гармоник фазного тока и уровень пульсаций выпрямленного напряжения.

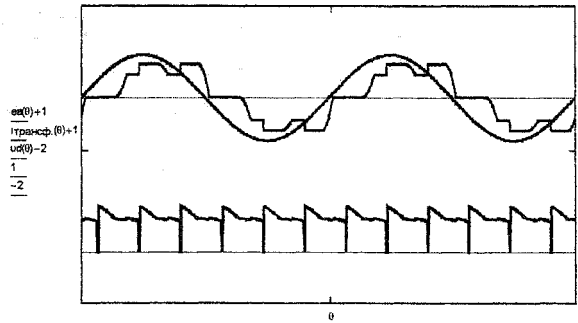


Рис. 2

Примеры осциллограмм, снятых в процессе физического моделирования работы схемы, показаны на рис. 6. Здесь цифрами обозначены: 1 - фазная ЭДС трансформатора, 2 - фазный ток трансформатора, 3 - напряжение на дросселе насыщения, 4 - напряжение на основном вентиле, 5 - ток дополнительного вентиля, 6 - напряжение на дополнительном вентиле.

По результатам экспериментального исследования построен ряд характеристик. Так, на рис. 7, б показана область существования внешних характеристик исследуемой схемы в максимальном для нее диапазоне регулирования в сравнении с характеристиками схемы без дополнительных вентилях в этом же диапазоне регулирования (рис. 7, а). При угле  $\alpha_t = 0$  характеристики совпадают, а с увеличением угла управления ее жесткость у рассматриваемой схемы увеличивается. При этом глубина регулирования выпрямленного напряжения

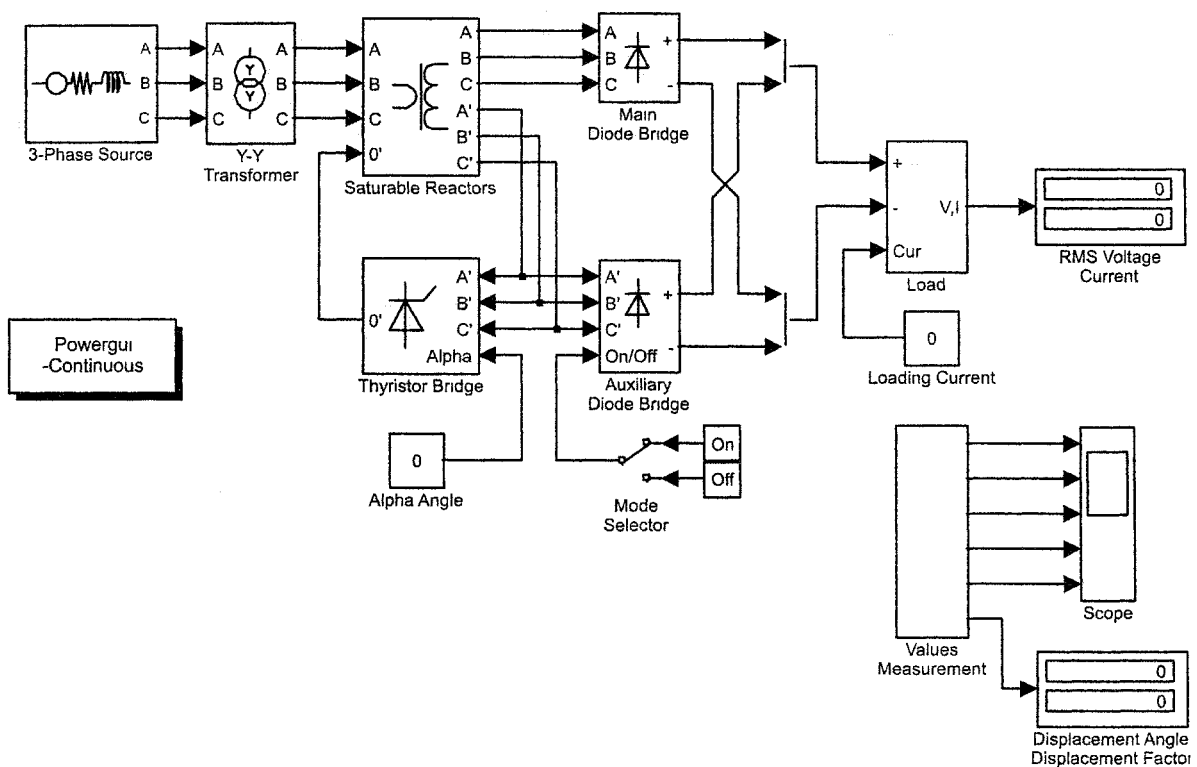


Рис. 3

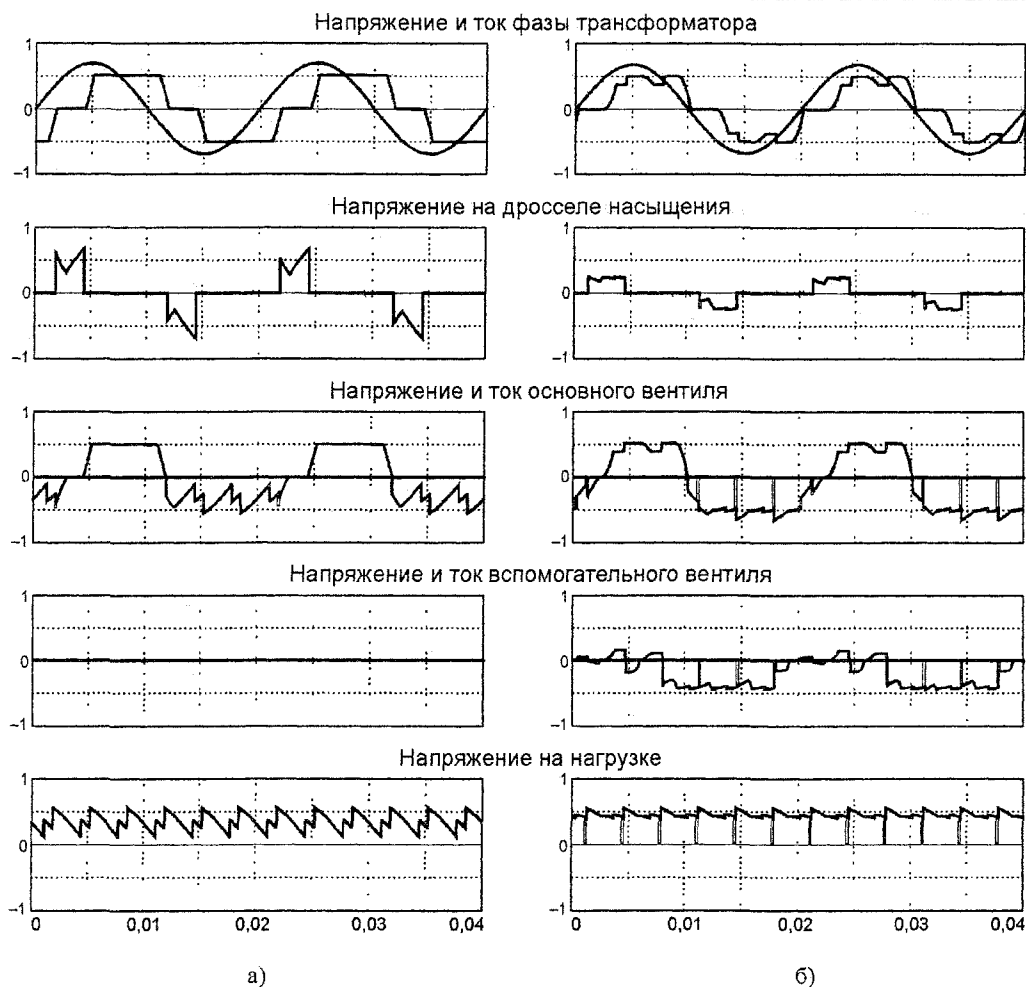


Рис. 4

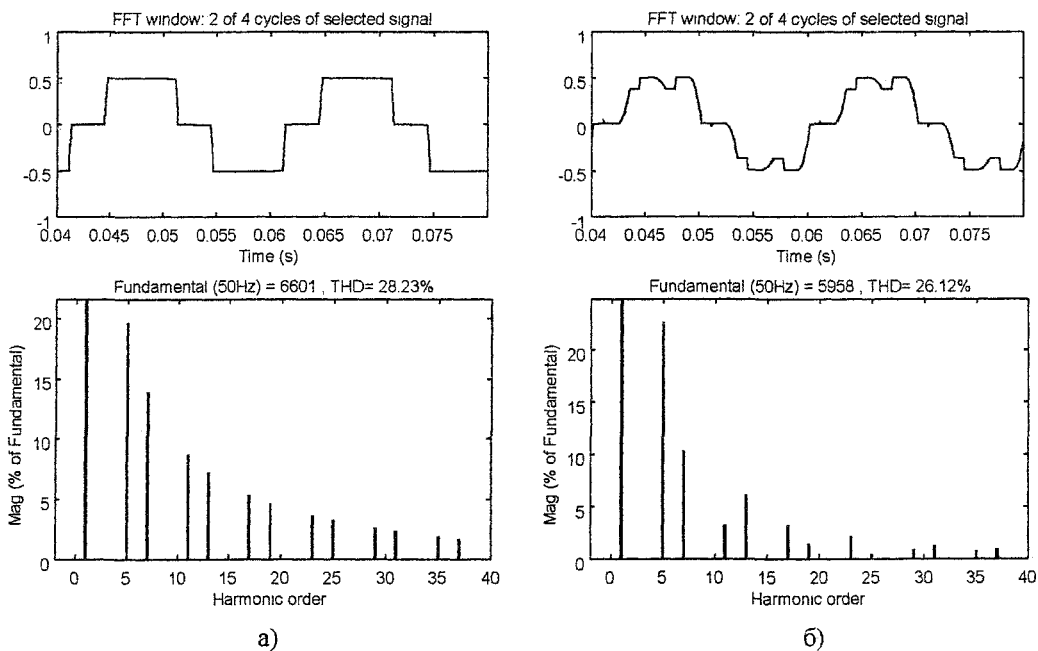
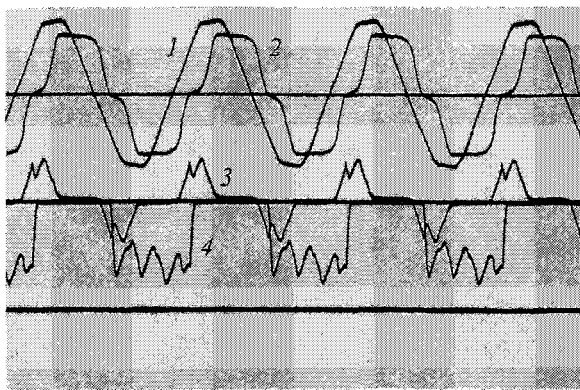


Рис. 5

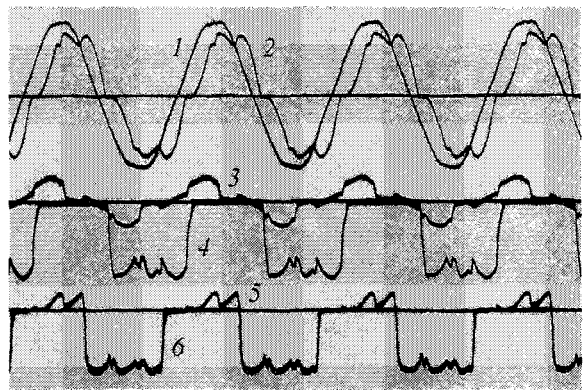
$$\Delta U_d^* = \frac{U_{d \max} - U_{d \min}}{U_{d \max}}$$

несколько меньше, чем в варианте без дополнительного моста (рис. 8 а, б).

Энергетические характеристики рассматриваемой схемы существенно лучше, чем у аналогичной без дополнительного выпрямительного моста (рис. 9 а, б, показаны при одинаковом диапазоне регулирования выпрямленного напряжения,

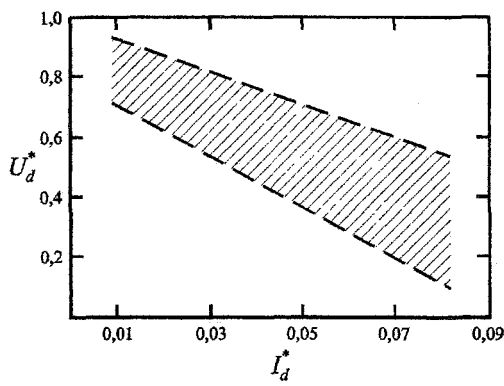


a)

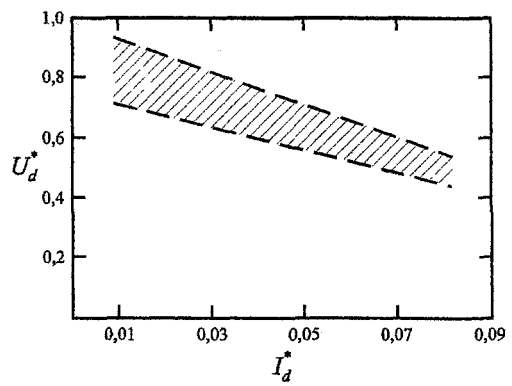


б)

Рис. 6

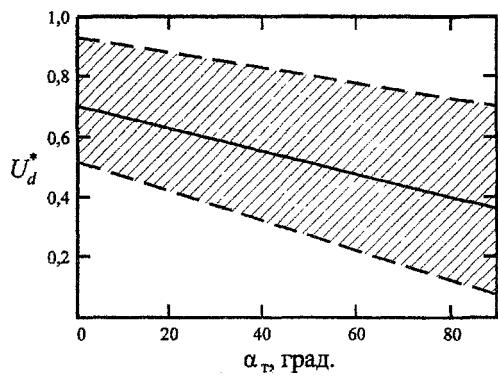


a)

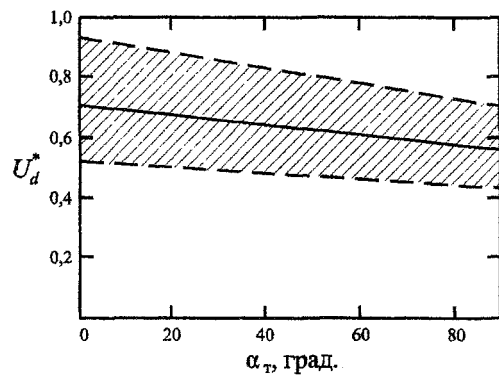


б)

Рис. 7

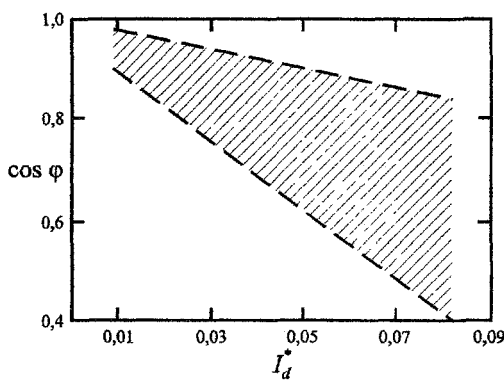


a)

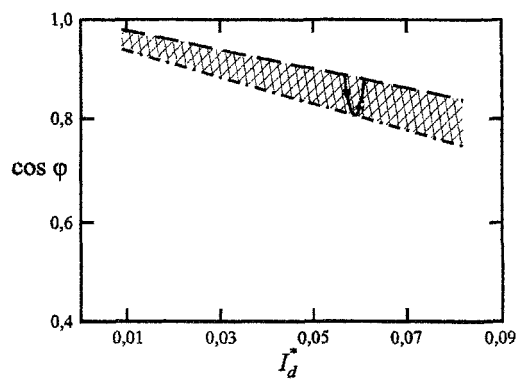


б)

Рис. 8



a)



б)

Рис. 9

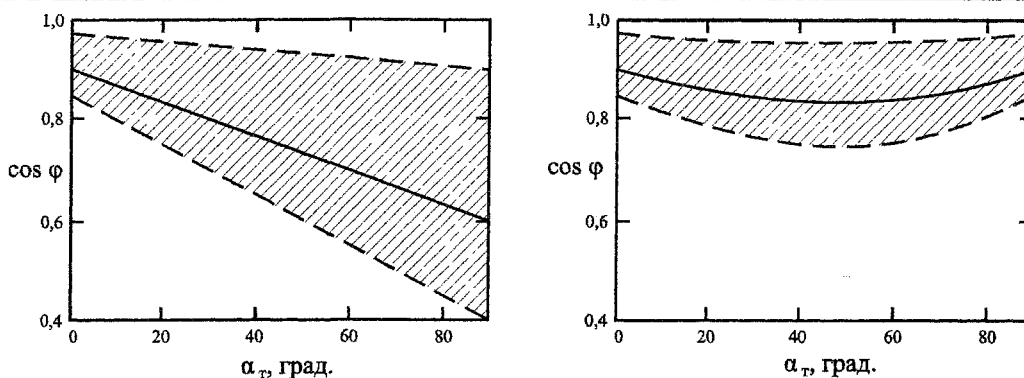


Рис. 10

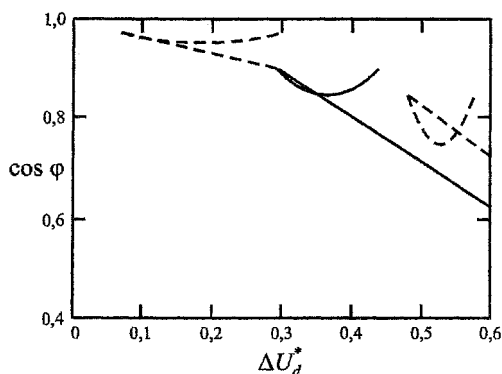


Рис. 11

максимально возможном для схемы с дополнительным мостом, стрелкой показано направление перемещения характеристики при увеличении угла управления). С увеличением угла управления  $\alpha_T$  величина коэффициента сдвига первой гармоники тока  $\cos \phi$  схемы с дополнительным мостом ухудшается медленнее, а после  $\alpha_T = 60^\circ$  начинает возрастать (рис. 10).

Зависимости коэффициента сдвига от глубины регулирования приведены на рис. 11. Здесь прямые линии соответствуют схеме без дополнительного моста, поднимающиеся вверх - исследуемой схеме.

На рис. 8, 10, 11 сплошной линией показаны соответствующие характеристики для номинального значения тока  $I_d$ .

Необходимо отметить, что некоторое отличие характеристик на рис. 7-10а в относительных единицах от канонической формы обусловлено небольшой (порядка единиц киловатт) мощностью испытательного стенда, значительной величиной потоков рассеяния трансформатора, а также сравнительно большим активным сопротивлением нагрузки. Тем не менее, проведенные исследования позволяют однозначно оценить качественный характер процессов в рассматриваемой схеме.

При пересчете в относительные единицы в качестве базовых взяты

$$U_{\text{б}} = \frac{3}{\pi} E_{2\text{лм}}, \quad I_{\text{б}} = \frac{E_{2\text{лм}}}{x_{\text{к}}},$$

где  $E_{2\text{лм}}$  - амплитуда линейной ЭДС трансформатора,

$x_{\text{к}}$  - индуктивное сопротивление контура коммутации.

Все зависимости получены при  $k_{\text{дн}} = 3$ . Увеличение этого коэффициента улучшает энергетические характеристики схемы, но снижает глубину регулирования выпрямленного напряжения, которая без учета коммутации определяется выражением

$$\Delta U_d^* = \frac{1}{k_{\text{дн}} + 1}.$$

Анализ результатов моделирования и экспериментального исследования позволяет заключить, что введение в схему дополнительного выпрямительного моста на диодах VD7-VD12 обеспечивает улучшение коэффициента сдвига первой гармоники тока  $\cos \phi$ , но сопровождается сужением диапазона регулирования выпрямленного напряжения  $\Delta U_d$ .

### Литература

1. Толстой, Ю.Г. Силовые полупроводниковые выпрямители, управляемые дросселями насыщения / Ю.Г. Толстой, Г.П. Мосткова, Ф.И. Ковалев. - М.: Наука, 1968.-260 с
2. Мосткова, Г.П. Сравнение схем включения дросселей насыщения при использовании их для управления трехфазным полупроводниковым выпрямителем / Г.П. Мосткова, Ф.И. Ковалев // Электромеханика. — 1962. — № 5.
3. Хохлов, Ю.И. Режимы работы компенсированных полупроводниковых выпрямителей /

## Преобразовательная техника

---

Ю. И. Хохлов, А.В. Баев // Промышленная энергетика ^ комбинированным способом регулирования напряжения. -1974.-№8. С. 16-20.

4. Хохлов, Ю.И. Компенсированные выпрямители с фильтрацией в коммутирующие конденсаторы. нечетнократных гармоник токов преобразовательных блоков /Ю.И. Хохлов. - Челябинск: ЧГТУ, 1995. - 355 с.

5. Пат. 1781793 (РФ) Управляемый выпрямитель / Ю.И. Хохлов. - Бюл. изобр., 1992, № 46.

6. Хохлов, Ю.И. Способы, дроссельного управления полупроводниковыми выпрямительными агрегатами / Ю.И. Хохлов, В.В. Прохоров // Промышленная энергетика. - 2000. -№ 5. - С. 47-49

7 Бобков, А..В. Управляемый выпрямитель с фазоступенчатым регулированием, выпрямленного напряжения для питания электролизеров / А.В. Бобков, В.А. Бобков, В.С. Копырин // Промышленная энергетика. -2000. -№ 6. -С. 42-45.

**Хохлов Юрий Иванович** в 1966 году окончил Челябинский политехнический институт. В 1991 году защитил докторскую диссертацию. Декан энергетического факультета, заведующий кафедрой систем электроснабжения, директор центра энергосбережения ЮУрГУ, профессор, член-корреспондент АЭН РФ. Специалист в области теоретических основ электротехники, силовой электроники и энергосбережения.

**Прохоров Владилен Владиленович** в 1995 году окончил Челябинский государственный технический университет, в 2001 - аспирантуру ЮУрГУ. Старший преподаватель кафедры систем электроснабжения. Направление научной деятельности - силовая электроника.