

# О СПЕКТРЕ ТОКА В ПИТАЮЩЕЙ СЕТИ ПРИ РАБОТЕ МОЩНОГО ОДНОФАЗНОГО МОСТОВОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ НА АКТИВНУЮ НАГРУЗКУ

Беспалов Н.Н., Романов А.М.

ГОУВПО «Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева», г. Саранск,  
Научно-производственное предприятие «Электронная техника — МГУ», г. Саранск  
Тел.: (834-2) 24-37-05. E-mail: [bnn48@mail.ru](mailto:bnn48@mail.ru)

**Аннотация.** В статье рассматриваются вопросы формирования спектра тока в питающей сети при работе одного из типов статических преобразователей — мощного однофазного мостового выпрямителя на основе силовых полупроводниковых диодов с разными и одинаковыми величинами их параметров в состоянии высокой проводимости.

**Ключевые слова:** силовой полупроводниковый прибор, вольт-амперная характеристика, напряжение, ток, статический преобразователь, мощный однофазный мостовой выпрямитель, спектр тока.

**Annotation.** In article it is considered questions of formation of a spectrum of a current in a power line at work of one of types of static converters — the powerful single-phase bridge rectifier on the basis of power semi-conductor diodes with different and identical sizes of their parameters in a condition of high conductivity.

**Key words:** power semi-conductor device, volt-ampere characteristic, voltage, current, static converter, powerful single-phase bridge rectifier, current spectrum.

## Введение

В настоящее время в устройствах силовой электроники, предназначенных для преобразования электрической энергии, существует проблема электромагнитной совместимости питающей сети и преобразователей. Генерируемые источниками питания напряжение синусоидальной формы доходя до потребителя, в большинстве случаев преобразуется в постоянное. В процессе преобразования участвуют нелинейные элементы, обуславливающие появление в питающей сети тока периодической несинусоидальной формы. Это свидетельствует о существенном расширении спектра тока в питающей сети, а также о появлении в ней постоянной составляющей. Появление дополнительных гармоник обусловлено различными факторами и, в частности, прохождением тока через силовые полупроводниковые приборы (СПП).

Статья посвящена рассмотрению спектра тока питающей сети при работе мощного однофазного мостового выпрямителя (МОМВ) на основе силовых полупроводниковых диодов на активную нагрузку. Целью исследования было проведение оценки влияния на спектр входного тока статических преобразователей на основе СПП разброса величин параметров их характеристик в состоянии высокой проводимости. Выбор для исследования схемы МОМВ обусловлен относительной простотой расчёта его спектра входного тока.

## Особенности построения модели МОМВ

На рис. 1 представлена схема МОМВ, взятая для исследования.

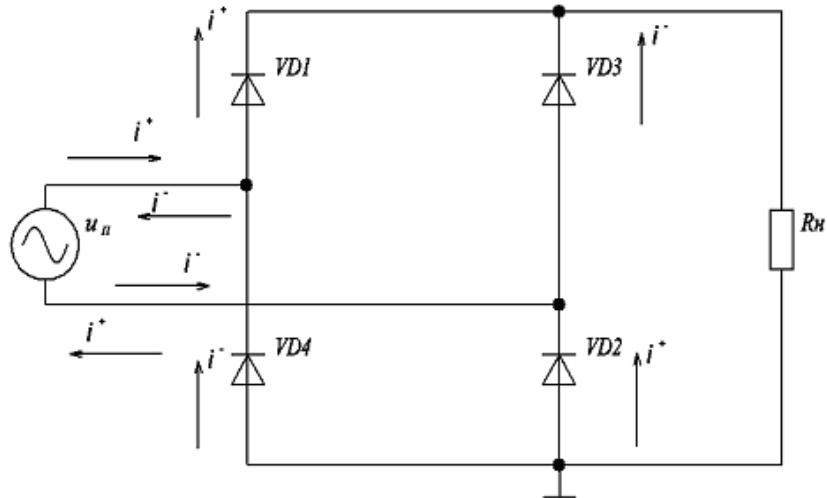


Рис. 1. Схема МОМВ

Основными элементами схемы являются диоды  $VD1 - VD4$ . Для расчёта схемы использована их модель, которая основывается на кусочно-линейной аппроксимации вольтамперной характеристики (ВАХ) в прямом направлении. Модель состоит из резистора  $r_F$  эквивалентного дифференциальному сопротивлению реального диода и источника напряжения  $U_{F0}$  эквивалентного пороговому напряжению. Падение напряжения на модели диода описывается выражением:

$$u_{FVD} = U_{F0} + i_F r_F. \quad (1)$$

Ток от переменного источника питания одновременно протекает только по двум силовым полупроводниковым ключам. В момент времени протекания положительной полуволны работают диоды  $VD1$  и  $VD2$ , при отрицательной полуволне ток протекает по диодам  $VD3$  и  $VD4$ . Таким образом, получается два контура протекания тока (рис. 2) разграниченного по времени (от  $0$  до  $\pi$  – положительная цепь, от  $\pi$  до  $2\pi$  – отрицательная цепь). Направление тока, напряжение питания и сопротивление нагрузки в контурах идентичны,

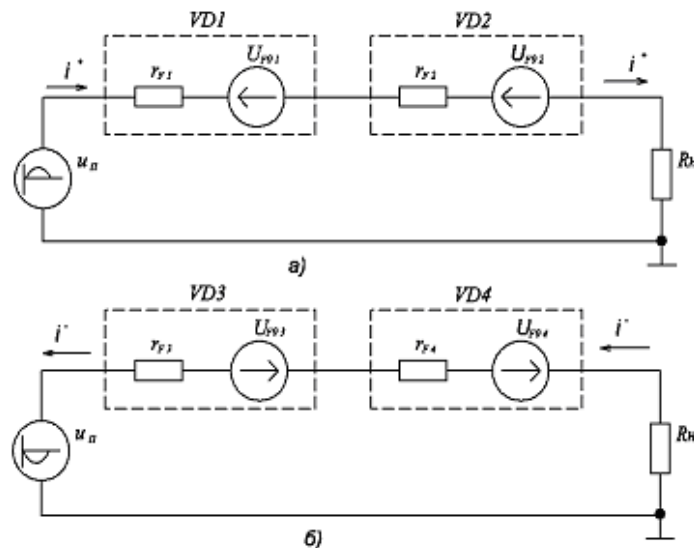


Рис. 2. Цепи протекания тока положительного (а) и отрицательного (б) направлений.

следовательно, влиять на величину тока могут только элементы схемы замещения СПП.

Получено математическое представление спектра тока питающей сети МОМВ.

При этом постоянная составляющая входного тока питания определяется как сумма интегралов токов положительного и отрицательного направлений в цепях МОМВ по двум полупериодам:

$$I_{0I} = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{2U_m - \pi \sum_{n=1}^n U_{F0n}^+}{\sum_{n=1}^n r_{F_n}^+ + R_j} - \frac{2U_m - \pi \sum_{n=1}^n U_{F0n}^-}{\sum_{n=1}^n r_{F_n}^- + R_j} \right) \quad (3)$$

Аналогично постоянной составляющей, интеграл для определения амплитуды синусной и косинусной составляющей разбит на два полупериода. Таким образом, получены следующие формулы для вычисления гармоник тока во входной цепи МОМВ:

при  $k=1$ :

$$I_1 = \sqrt{\left( \frac{1}{2} \left( \frac{U_m}{\sum_{n=1}^n r_{F_n}^- + R_j} + \frac{U_m}{\sum_{n=1}^n r_{F_n}^+ + R_j} \right) - \frac{1}{2\pi} \left( \frac{\sum_{n=1}^n U_{F0n}^-}{\sum_{n=1}^n r_{F_n}^- + R_j} + \frac{\sum_{n=1}^n U_{F0n}^+}{\sum_{n=1}^n r_{F_n}^+ + R_j} \right) \right)^2}, \quad (4)$$

при  $k=2, 4, 6, 8, \dots, 40$ :

$$I_{k_{\text{н.ч.}}} = \sqrt{I_k'^2 + I_k''^2} = \sqrt{I_k'^2} = \sqrt{\left( \frac{2}{\pi(n^2 - 1)} \left( \frac{U_m}{\sum_{n=1}^n r_{F_n}^- + R_j} - \frac{U_m}{\sum_{n=1}^n r_{F_n}^+ + R_j} \right) \right)^2}, \quad (5)$$

при  $k=3, 5, 7, 9, \dots, 39$ :

$$I_{k_{\text{ч.}}} = \sqrt{I_k'^2 + I_k''^2} = \sqrt{I_k''^2} = \sqrt{\left( -\frac{2}{3\pi n} \left( \frac{U_m}{\sum_{n=1}^n r_{F_n}^- + R_j} + \frac{\sum_{n=1}^n U_{F0n}^+}{\sum_{n=1}^n r_{F_n}^+ + R_j} \right) \right)^2}, \quad (6)$$

где  $k$  — индекс, определяющий номер гармоники;  $I_{k_{\text{ч.}}}$  — амплитуда чётной гармоники;  $I_{k_{\text{н.ч.}}}$  — амплитуда нечётной гармоники;  $U_{F0}$  — пороговое напряжение диода;  $R_H$  — сопротивление нагрузки;  $r_F$  - дифференциальное сопротивление диода  $n$  — индекс, определяющий количество силовых полупроводниковых ключей, входящих в состав цепи;  $U_m$  — амплитуда напряжения питания.

### Моделирование спектра входного тока МОМВ

Для моделирования была применена модель мощного силового диода Д183-6300. При этом выбрано напряжение питания  $U_{II}=380$  В и сопротивлению нагрузки  $R_H=0,0195$  Ом. Моделирование проводилось до сороковой гармоники, так как согласно ГОСТ Р 13109 — «Электромагнитная энергия. Электромагнитная совместимость. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения», гармонический состав тока ограничен сороковой гармоникой.

На рис. 3 представлены ВАХ диодов однофазного мостового выпрямителя с одинаковыми величинами параметров для всех приборов (паспортные данные —  $U_{F0}=0,77$  В,  $r_F=0,00004$  Ом). При этом наблюдается полная симметрия цепей протекания тока положительного и отрицательного направлений.

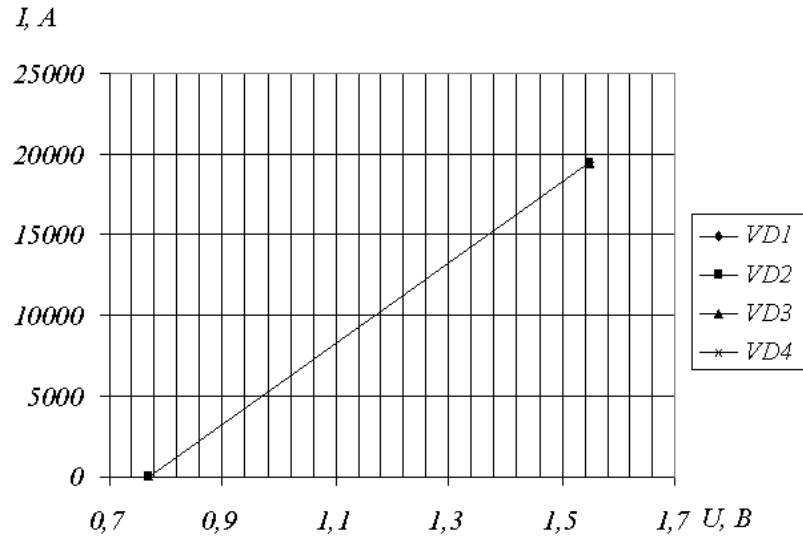


Рис. 3. ВАХ  $VD1-VD4$  с одинаковыми величинами параметров  $U_{F0}$  и  $r_F$ .

Спектр входного тока в симметричном режиме (рис. 4) имеет в своём составе первую гармонику и высшие нечётные гармоники. При этом постоянная составляющая и чётные гармоники отсутствуют.

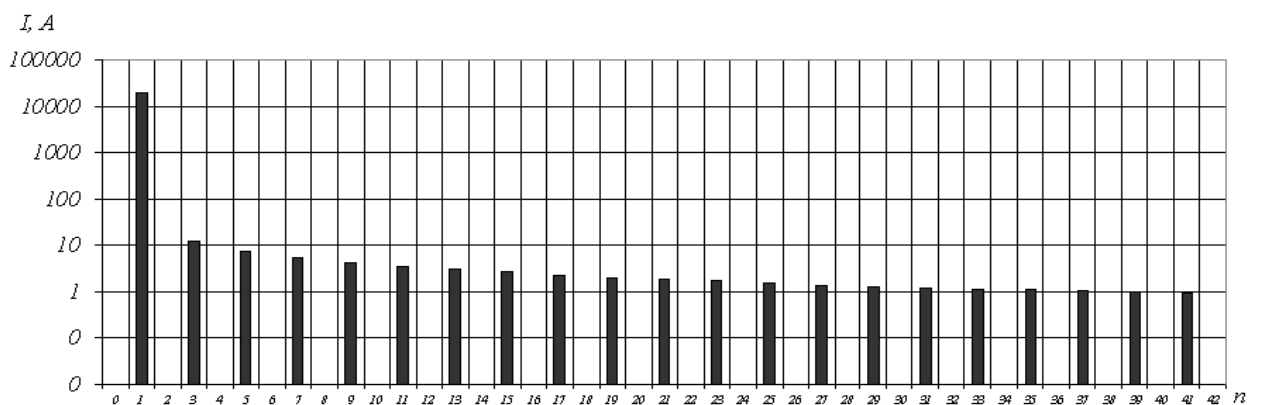


Рис. 4. Спектр входного тока МОМВ при одинаковых величинах параметров силовых диодов в прямом направлении.

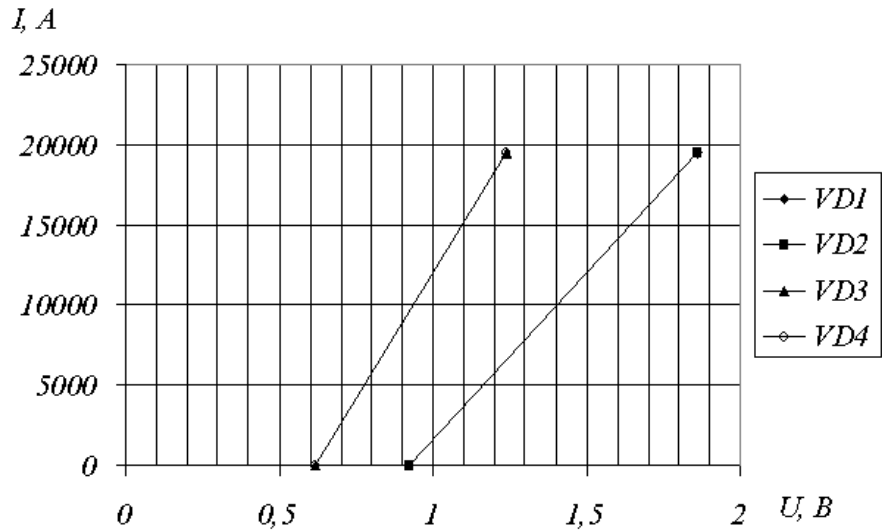


Рис. 5. ВАХ  $VD1$ - $VD4$  с различными величинами параметров  $U_{F0}$  и  $r_F$ .

На рис. 5 представлены ВАХ диодов однофазного мостового выпрямителя с различными величинами их параметров. При этом разбросы величин их параметров был принят следующими: +20% для  $VD1$  и  $VD2$  ( $U_{F0}=0,924$  В,  $r_F=0,000048$  Ом) и -20% для  $VD3$  и  $VD4$  ( $U_{F0}=0,616$  В,  $r_F=0,000032$  Ом) относительно величин используемых в предыдущем случае. При этом наблюдается полная несимметрия цепей протекания тока положительного и отрицательного направлений.

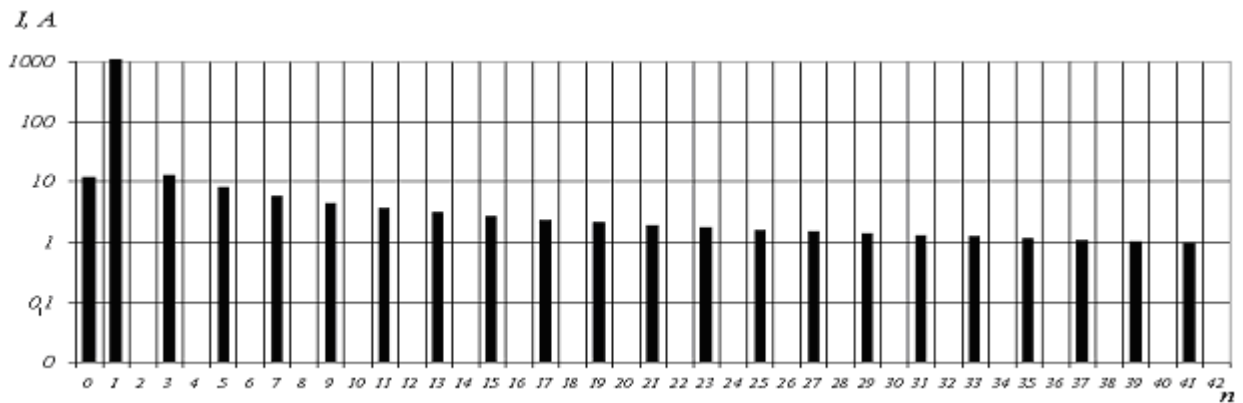


Рис. 6. Спектр входного тока МОМВ при различных величинах параметров силовых диодов в прямом направлении.

Спектр входного тока (рис. 6), как и в предыдущем варианте, представлен первой и нечётными гармониками. Однако в спектре появилась постоянная составляющая тока. При этом появляются чётные гармоники, которые, однако, пренебрежимо малы и поэтому не представлены на данном рисунке.

### Выводы

В рассматриваемой схеме мощного преобразователя силовые диоды вносят изменения в форму питающего тока, приводя его к несинусоидальному виду с появлением в его составе высших гармоник. При этом использование в составе преобразователя диодов с разными величинами параметров ВАХ в состоянии высокой проводимости обуславливает появление в составе тока в питающей цепи преобразователя постоянной составляющей. Снижение величины постоянной составляющей при таких токах в нагрузке можно обеспечить подбором приборов с идентичными величинами параметров ВАХ в состоянии высокой проводимости.

### Литература

1. ГОСТ Р 13109 — «Электромагнитная энергия. Электромагнитная совместимость. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения». – М. : Издательство стандартов, 1999. – 36 с.

### Сведения об авторах

**Беспалов Николай Николаевич** — кандидат технических наук, *заведующий кафедрой автоматики Мордовского государственного университета им. Н. П. Огарева*, e-mail: [bnn48@mail.ru](mailto:bnn48@mail.ru).

**Романов Андрей Михайлович** — аспирант *Мордовского государственного университета им. Н. П. Огарёва*, научный руководитель – *Беспалов Николай Николаевич*, e-mail: [a.romanov3@jes-holding.com](mailto:a.romanov3@jes-holding.com).

### ABOUT THE CURRENT SPECTRUM IN THE POWER LINE AT WORK OF THE POWERFUL SINGLE-PHASE BRIDGE RECTIFIER ON ACTIVE LOADING

N. N. Bespalov, A. M. Romanov  
Mordovian N. P. Ogarev state university,  
Scientific-production enterprise “Electronic technics — MSU”, Saransk  
Phone: (834-2) 24-37-05. E-mail: bnn48@mail.ru