

## Разработка и компьютерное моделирование регулятора переменного напряжения

*О.А. Кабышев, А.М. Кабышев*

*Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет).*

**Аннотация:** Разработка преобразователей электрической энергии с высокими энергетическими характеристиками является важной научно-технической задачей. Решение этой задачи невозможно без применения современных методов компьютерного моделирования. В данной работе, разработана компьютерная модель и принципиальная схема регулятора переменного напряжения с высокочастотной импульсной модуляцией выходного напряжения. Применяются методы цифровой обработки сигналов и компьютерного моделирования. Представлены результаты гармонического анализа выходного напряжения регулятора. Исследованы электромагнитные процессы, протекающие в схеме регулятора. Получены временные диаграммы токов и напряжения. Результаты компьютерного моделирования могут найти применение при разработке преобразователей электрической энергии для электротехнологических процессов.

**Ключевые слова:** компьютерное моделирование, регулятор переменного напряжения, алгоритм, высокочастотная импульсная модуляция, временные диаграммы, транзисторный ключ, система управления, гармонический состав, демпфирующая цепь, тиристор, активно-индуктивная нагрузка

Регуляторы переменного напряжения применяются в системах электропитания технологических процессов, в которых требуется изменение (регулирование, стабилизация) величины таких параметров электроэнергии, как: напряжение, ток, мощность. Регулирование параметров электроэнергии необходимо для управления процессами в электрохимических и электротермических установках. Как правило, такие электроустановки отличаются высокой мощностью, поэтому предъявляются повышенные требования к энергетическим показателям систем электропитания.

Процесс регулирования параметров электроэнергии оказывает негативное влияние на ее качество. Для улучшения качества электроэнергии, в настоящее время, разрабатываются и находят широкое применение фильтрокомпенсирующие устройства [1–5]. Также, ведутся исследования направленные на улучшение энергетических характеристик

преобразователей электрической энергии и уменьшения их влияния на питающую сеть [6–9].

Основными элементами любого регулятора переменного напряжения, является силовой блок и система управления.

Современная элементная база электронных компонентов дает возможность использовать в силовом блоке регуляторов полупроводниковые (тиристорные, транзисторные) ключи, что обеспечивает преобразование электроэнергии с высоким коэффициентом полезного действия.

Ответственную роль играет система управления, которая позволяет реализовать управление ключами силового блока по следующим алгоритмам [10]: фазовое управление с отстающим углом управления; фазовое управление с опережающим углом управления; двустороннее фазовое управление; высокочастотная импульсная модуляция; широтно-импульсное регулирование (ШИР). Отмеченные алгоритмы имеют свои достоинства и недостатки и находят свои области применения.

Целью данной работы является разработка регулятора переменного напряжения с высокими энергетическими показателями, которая включает в себя обоснование выбора алгоритма управления силовым блоком, а также разработку принципиальной схемы силовой части и системы управления регулятора.

Для решения поставленной задачи, в системе *Matlab* [11], была разработана компьютерная модель регулятора переменного напряжения.

Компьютерная модель состоит из двух блоков. В первом блоке происходит формирование выходного напряжения регулятора, реализуется один из следующих алгоритмов управления силовыми ключами: фазовое управление; двухстороннее фазовое управление; высокочастотная импульсная модуляция. В качестве примера, ниже приведен код программы,

---

реализующий высокочастотную импульсную модуляцию напряжения регулятора:

```
clear all;
F=50.;%частота
t=0:1/(F*360):1/F;%время
%построение сигнала
x=sqrt(2)*sin(2*pi*F*t);
a=20;%угол управления(эл.град)
a1=a/2;
if a>0
for n=0:36:180;
    for i=n-a1:n+a1;
        r=abs(i);
        if r>0 x(r)=0;
        end;
    end;
end;
for i=1:181;
    x(i+180)=-x(i);
end;
end;
figure(1);
plot(t,x),grid;
title('временная диаграмма');
```

На рис.1 показан результат работы программы, сформирован сигнал с высокочастотной импульсной модуляцией.

Во втором блоке компьютерной модели выполняется разложение сформированного сигнала на гармонические составляющие, используется дискретное преобразование Фурье (ДПФ) [12]:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) * e^{-j2\pi nk/N},$$

где  $X(k)$  – компонента ДПФ;  $k$  – номер гармоники (0,1,2,..N-1);  $x(n)$  – мгновенные значения дискретной функции (анализируемого напряжения на выходе регулятора);  $n$  – номер выборки дискретного сигнала (0,1,2,..N-1);  $N$  – количество выборок дискретного сигнала. Формируется амплитудный спектр сигнала (зависимость амплитуд гармоник от их номера).

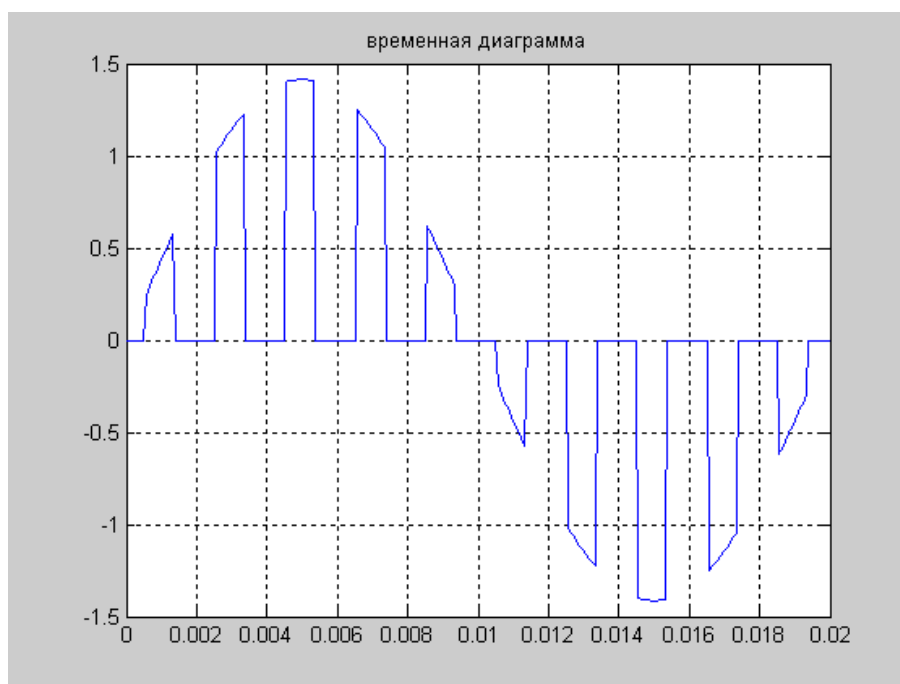


Рис. 1. – Форма напряжения на выходе регулятора (сигнал с высокочастотной импульсной модуляцией)

Начальные фазы гармоник вычисляются по формуле:

$$\varphi(k) = \arctan(X_{imag}(k)/X_{real}(k)),$$

где  $X_{imag}(k)$ ,  $X_{real}(k)$  – соответственно мнимая и действительная часть  $X(k)$  компоненты ДПФ. Формируется фазовый спектр сигнала (зависимость фаз гармоник от номера гармоник).

На рис.2 и рис.3 показан соответственно амплитудный и фазовый спектр сигнала приведенного на рис.1.

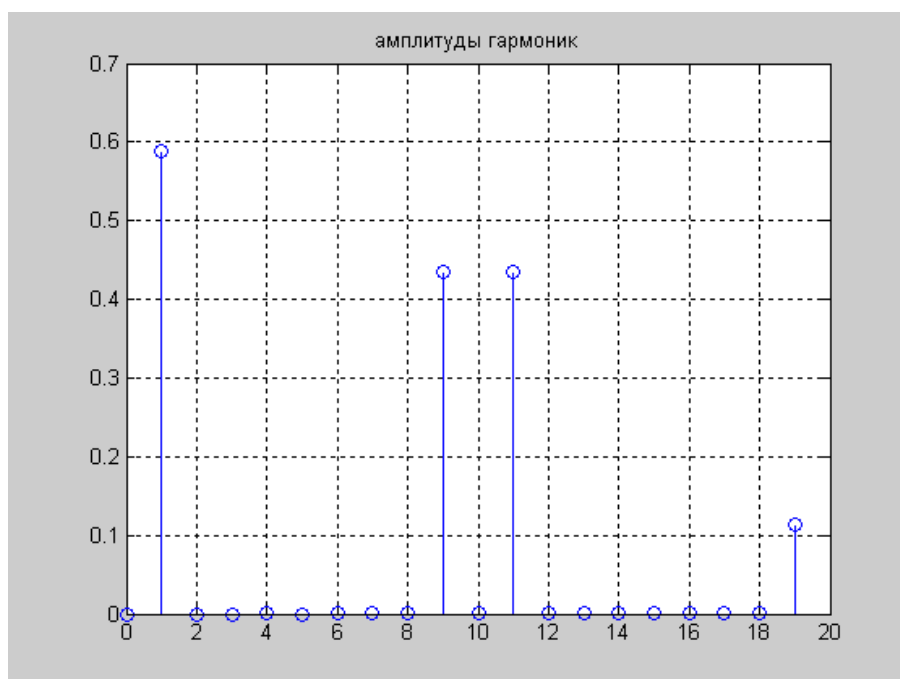


Рис. 2.– Амплитудный спектр сигнала

На рис. 2 видно, что при высокочастотной модуляции отсутствуют относительно низкочастотные (3, 5 и 7) гармоники. Искажение формы напряжения (отличие формы напряжения от синусоидальной) связано с появлением высших гармонических составляющих (9, 11, 19 и т.д), вызванных высокочастотной модуляцией.

На рис.3 видно, что фазовый сдвиг первой гармоники равен нулю.

Рассмотренная компьютерная модель регулятора переменного напряжения позволяет выполнить сравнение различных алгоритмов управления силовым блоком. Сравнение показало, что алгоритм высокочастотной импульсной модуляции имеет ряд преимуществ перед другими алгоритмами: в гармоническом спектре отсутствуют низкочастотные гармоники, начальные фазы первой гармоники напряжения на выходе регулятора и естественно первой гармоники потребляемого из

сети тока равны нулю. Высшие гармонические составляющие, вызванные процессом модуляции, могут быть при необходимости легко отфильтрованы. Отмеченные особенности дают возможность разрабатывать преобразователи электрической энергии с высоким значением коэффициента мощности.

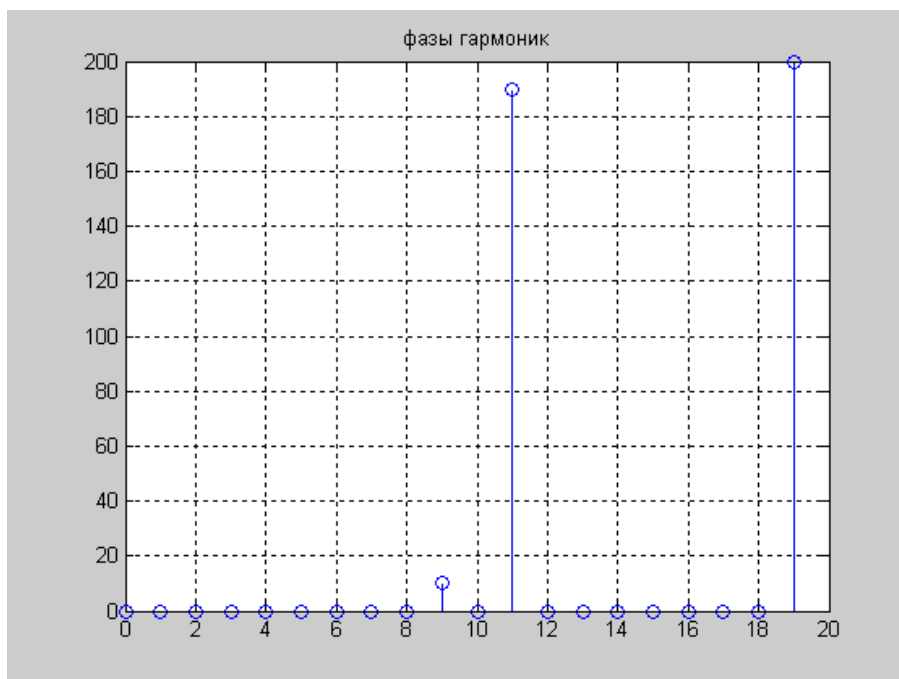


Рис. 3.– Фазовый спектр сигнала

На рис.4 показана принципиальная схема разработанного регулятора переменного напряжения. Для исследования процессов, протекающих в регуляторе, схема адаптирована для моделирования в среде программного продукта *Orcad* [13]. Схема выполнена на основе силового *IGBT* транзистора *Z1*, который включен в диагональ диодного моста: *D1*, *D2*, *D5*, *D6*. Источник переменного напряжения *V1* моделирует сеть электропитания. Функции нагрузки регулятора переменного напряжения выполняют элементы *R9*, *L1*.

Система управления состоит из схемы синхронизации и генератора прямоугольных импульсов. В состав схемы синхронизации входят элементы: *U2*, *V2*, *V3* и *Q2*. Резисторы *R4*, *R5* задают режим работы транзисторного ключа *Q2*.

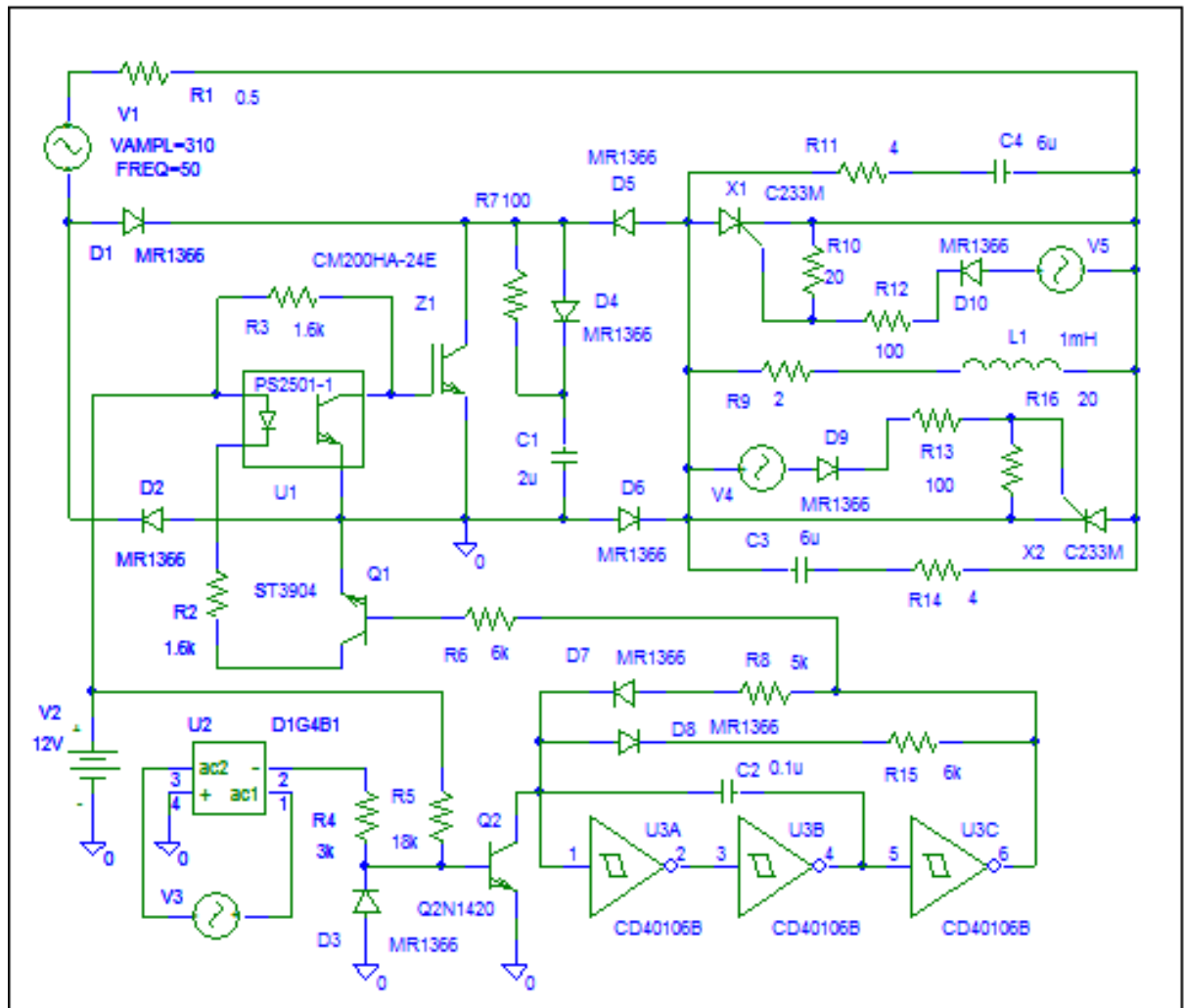


Рис. 4.– Схема регулятора переменного напряжения

Источникам переменного напряжения  $V3$ ,  $V4$ ,  $V5$ , в реальной схеме, соответствуют вторичные обмотки трансформатора, первичная обмотка которого подключена к сети электропитания.

Генератор прямоугольных импульсов выполнен на основе логических элементов:  $U3A$ ,  $U3B$ ,  $U3C$ . Конденсатор  $C2$ , резисторы  $R8$ ,  $R15$  и диоды  $D7$ ,  $D8$  образуют времязадающую цепь генератора. Изменяя величины резисторов  $R8$ ,  $R15$  можно изменять частоту и скважность импульсов генератора. Работа генератора синхронизирована с питающей сетью, при переходе синусоидального напряжения сети электропитания через ноль открывается транзисторный ключ  $Q2$ , на выходе генератора (элемент  $U3C$ )

формируется сигнал высокого уровня, открывается транзисторный ключ  $Q1$  и выключается силовой транзистор  $Z1$ , формируется пауза в выходном напряжении регулятора (на нагрузке  $R9, L1$ ). При закрывании транзисторного ключа  $Q2$  генератор импульсов вступает в работу, что приводит к периодическому включению и выключению силового транзисторного ключа  $Z1$ , на нагрузке формируется модулированное импульсами переменное напряжение. Элементы  $R7, C1, D4$  образуют демпфирующую цепь (уменьшают скорость нарастания напряжения на транзисторном ключе  $Z1$ ).

Тиристоры  $X1, X2$  с соответствующими цепями управления ( $V5, D11, R12, R10, V4, D10, R13, R16$ ) и демпфирующими цепями ( $R11, C4, C3, R14$ ) необходимы для работы схемы на активно-индуктивную нагрузку. Они обеспечивают возможность протекания тока, вызванного накопленной в индуктивности нагрузки энергией, в моменты выключенного состояния силового ключа  $Z1$ . Источники переменного напряжения  $V4, V5$  (обмотки трансформатора) предназначены для формирования токов, протекающих через управляющие электроды соответствующих тиристоров  $X1$  и  $X2$ . Источники  $V4, V5$  включены таким образом, чтобы ток управления протекал через управляющий электрод того тиристора, для которого в данный момент времени напряжение источника  $V1$  является обратным (запирающим). Это исключает возможность протекания сквозных токов (исключает моменты одновременной работы ключа  $Z1$  и одного из тиристоров).

Результаты компьютерного моделирования приведены на рис.5 и рис.6.

На рис.5 показаны временные диаграммы напряжения на нагрузке и тока, протекающего через нагрузку, имеющую активно-индуктивный характер.



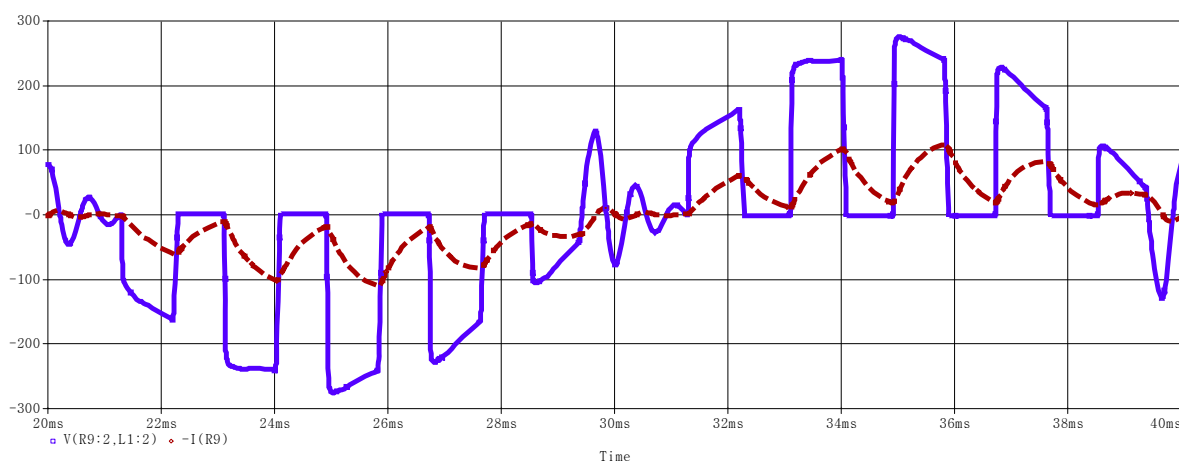


Рис. 5.– Диаграммы тока (пунктирная линия) и напряжения (сплошная линия) на нагрузке при  $R9=2$  Ом и  $L1=1$  мГн

На рис.6 показана временная диаграмма потребляемого из сети тока.

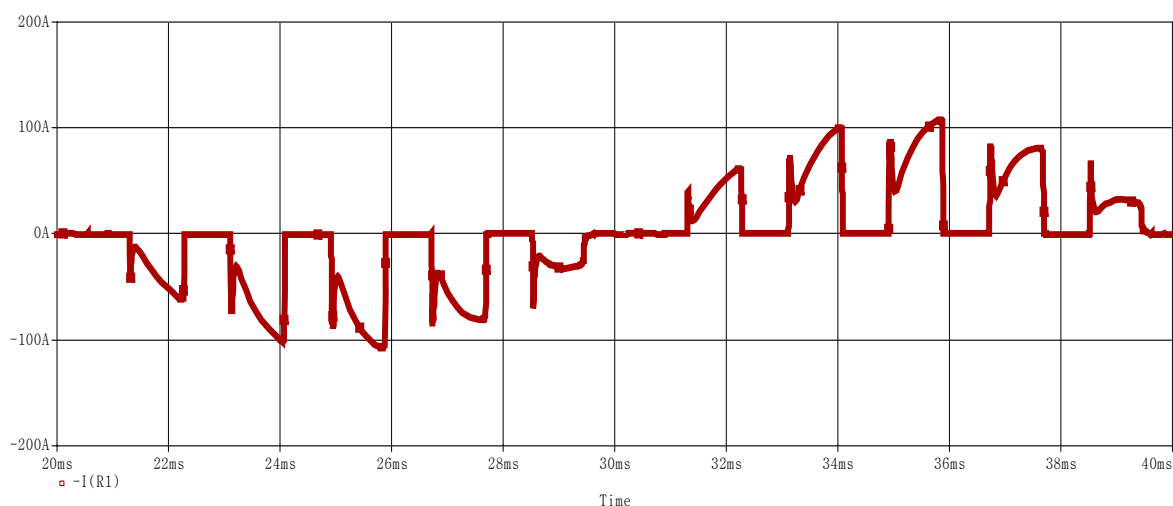


Рис. 6. – Диаграмма тока потребляемого из сети при  $R9=2$  Ом и  $L1=1$  мГн

На форму напряжения и токов оказывают влияние, протекающие в схеме переходные процессы, обусловленные наличием реактивных элементов.

Регулирование величины напряжения и тока на выходе регулятора возможно за счет изменения скважности импульсов генератора.

Разработанные компьютерные модели и результаты моделирования могут найти применение (при разработке преобразователей электрической энергии на основе регулятора переменного напряжения) для анализа, протекающих электромагнитных процессов и для оптимизации параметров преобразователя.

### Литература

1. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. М.: Энергоатомиздат, 2010. 375 с.

2. Греков Э.Л., Филимонов С.И. Влияние фильтрокомпенсирующего устройства на аварийные режимы работы тиристорного преобразователя в карьерных электрических экскаваторах // Электротехнические системы и комплексы. 2014. №2 (23). С. 28-32.

3. Tenti, P., P. Mattavelli and E. Tedeschi, 2007. Compensation Techniques Based on Reactive Power Conservation. Electrical Power Quality and Utilization, Journal, Vol. XIII, No.1: pp.17-24.

4. Иванова Н.А., Прохоренко Е.В., Черепанский В.Н. Создание и исследование имитационной модели динамического компенсатора искажения напряжения // Инженерный вестник Дона, 2017, №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4569/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4569/).

5. Титов В.Г., Плехов А.С., Бинда К.А., Титов Д.Ю. Итерационный алгоритм оптимального управления компенсационными преобразователями // Инженерный вестник Дона, 2013, №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1927/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1927/).

6. Брылина О.Г. Многозонный интегрирующий регулятор переменного напряжения, работающий при перегрузках по току // Электротехнические системы и комплексы. 2014. №2 (23). С. 19-20.

7. Титов В.Г., Плехов А.С., Бинда К.А., Титов Д.Ю. Управление энергосберегающими полупроводниковыми преобразователями //



Инженерный вестник Дона, 2013, №4. URL:  
ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1909/.

8. Kaniewski, J., P. Szczesniak, M. Jarnut and G. Benysek, 2015. Hybrid Voltage Sag/Swell Compensators: A Review of Hybrid AC/AC Converters. IEEE Industrial Electronics Magazine, vol. 9, No. 4: pp.37-48.

9. Makky, A.M., N.A. Ahmed and E.H. El- Zohri, 2003. Supply power factor improvement with single-phase AC voltage converter. IEEE, Conf. Proc., IEMDC'03 (issue vol. 2), Madison, Wisconsin USA, pp: 863 –868.

10. Обухов А.Е. Бестрансформаторные повышающе-понижающие регуляторы переменного напряжения в электротехнических системах кондиционирования качества электрической энергии: дис. ... канд техн. наук: 05.09.03. Новосибирск, 2003. 207 с.

11. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. 288 с.

12. А. Оппенгейм, Р. Шафер. Цифровая обработка сигналов. М.: Техносфера, 2006. 856 с.

13. Разевиг, В.Д. Система проектирования OrCAD 9.2 / М.:СОЛОН-Р, 2001. 530 с.

### References

1. Zhezhelenko I. V. Vysshie garmoniki v sistemah jelektrosnabzhenija prompredpriyatij [Higher harmonics in power supply systems of industrial enterprises]. М.: Jenergoatomizdat, 2010. 375 p.

2. Grekov Je.L., Filimonov S.I. Jelektrotehnicheskie sistemy i kompleksy. 2014. №2 (23). pp. 28-32.

3. Tenti, P., P. Mattavelli and E. Tedeschi, 2007. Compensation Techniques Based on Reactive Power Conservation. Electrical Power Quality and Utilization, Journal, Vol. XIII, No.1: pp.17-24.

4. Ivanova N.A., Prohorenko E.V., Cherepanskiy V.N. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2017, №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4569/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4569/).
  5. Titov V.G., Plehov A.S., Binda K.A., Titov D.Ju. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2013, №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1927/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1927/).
  6. Brylina O.G. Jelektrotehnicheskie sistemy i komplekсы. 2014. №2 (23). pp. 19-20.
  7. Titov V.G., Plehov A.S., Binda K.A., Titov D.Ju. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2013, №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1909/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1909/).
  8. Kaniewski, J., P. Szczesniak, M. Jarnut and G. Benysek, 2015. Hybrid Voltage Sag/Swell Compensators: A Review of Hybrid AC/AC Converters. IEEE Industrial Electronics Magazine, vol. 9, No. 4: pp.37-48.
  9. Makky, A.M., N.A. Ahmed and E.H. El- Zohri, 2003. Supply power factor improvement with single-phase AC voltage converter. IEEE, Conf. Proc., IEMDC'03 (issue vol. 2), Madison, Wisconsin USA, pp: 863 –868.
  10. Obuhov A.E. Bestransformatornye povyshajushhe-ponizhajushhie regulatory peremennogo naprjazhenija v jelektrotehnicheskikh sistemah kondicionirovanija kachestva jelektricheskoy jenerгии [Transformerless step-up and step-down AC voltage regulators in electrical power quality conditioning systems]. dis. ... kand tehn. nauk: 05.09.03. Novosibirsk, 2003. 207 p.
  11. Chernyh I.V. Modelirovanie jelektrotehnicheskikh ustrojstv v MATLAB, SimPowerSystems i Simulink [Modeling of electrical devices in MATLAB, SimPowerSystems and Simulink]. M.: DMK Press; SPb.: Piter, 2008. 288 p.
  12. A. Oppengejm, R. Shafer. Cifrovaja obrabotka signalov [Digital signal processing]. M.: Tehnosfera, 2006. 856 p.
  13. Razevig, V.D. Sistema proektirovanija OrCAD 9.2 [OrCAD 9.2 design system]. M.: SOLON-R, 2001. 530 p.
-