

УДК 621.316.722.025

РЕГУЛЯТОР ПЕРЕМЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ С ПОФАЗНЫМИ КОММУТАТОРАМИ И ЦИФРОВОЙ СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ**А.В. Удовиченко¹, А.В. Сидоров¹, А.О. Бештинов²**¹*Новосибирский государственный технический университет*²*ЗАО «Эрасиб»*

В статье рассматривается бестрансформаторный регулятор переменного напряжения с пофазными коммутаторами, способный повышать напряжение без потери качества тока в системе. Такой преобразователь может быть использован для систем плавного пуска двигателей или в качестве стабилизатора напряжения. Предложена упрощенная топология регулятора, с одним ключом в фазе. Рассмотрена и проанализирована цифровая система бестрансформаторного регулятора переменного напряжения с пофазными коммутаторами, которая выполнена на базе микроконтроллера Atmel AVR Atmega. Приведены результаты эксперимента с цифровой системой управления. Также приведен аналитический расчет действующих значений по первым гармоникам токов и напряжений регулятора переменного напряжения с пофазными коммутаторами и его упрощенной версии.

Ключевые слова: регулятор переменного напряжения, повышающе-понижающий, бестрансформаторный, алгебраизация дифференциальных уравнений.

DOI: 10.17212/1727-2769-2018-2-93-105

Введение

В настоящее время существует несколько решений построения бестрансформаторных регуляторов переменного напряжения (РПН). Наиболее известные топологии регуляторов переменного напряжения:

- с двунаправленными ключами [1];
- с четырехквadrантными ключами [2, 3];
- с коммутируемым квази-импедансом источника питания [4];
- с входным конденсаторным делителем напряжения [5];
- с коммутируемыми и обходными конденсаторами [6];
- с высокочастотным АС-звеном [7, 8].

Топологии регуляторов переменного напряжения модернизируются исходя из следующих требований: повышение напряжения с коэффициентом усиления больше единицы, регулирование напряжения до номинальных величин, также стабилизация напряжения. В настоящее время большое внимание уделяется именно качеству тока и напряжения, что влечет за собой развитие существующих АС–АС-преобразователей до устройств улучшения качества электроэнергии, в том числе устройств мягкого пуска электродвигателей и стабилизаторов напряжения [9–10]. Вследствие этого регуляторы стали модернизировать новыми комбинациями реактивных элементов [11].

Так или иначе, баланс между эффективностью, надежностью, габаритами и стоимостью систем привел к развитию сразу нескольких областей построения регуляторов переменного напряжения.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-38-00262мол_а.

1. РПН с пофазными коммутаторами

Исходя из анализа структур регуляторов переменного напряжения [8], следует отметить, что преобразователи должны обладать малым числом полупроводниковых ключей и реактивных элементов, при этом обеспечивая все необходимые функции, присущие регуляторам.

Транзисторный регулятор переменного напряжения с пофазными коммутаторами представлен на рис. 1 [12, 13]. В качестве ключей S1 и S2 принимается встречно-параллельное включение IGBT-транзисторов, что представляет собой ключ переменного тока.

Коммутируя ключи реакторной и конденсаторной ветви, можно добиться регулирования напряжения на нагрузке с возможностью его повышения до 20 %. При этом качество электроэнергии остается высоким при малых и средних значениях этих показателей.

Кроме того данный регулятор может быть упрощен до варианта без ключа переменного тока в конденсаторной ветви (рис. 2).

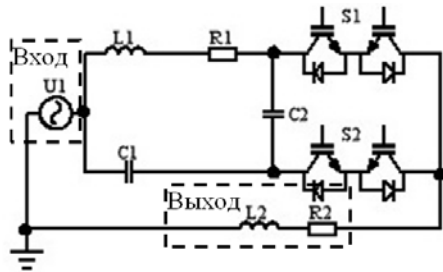


Рис. 1 – Регулятор переменного напряжения с пофазными коммутаторами

Fig. 1 – An AC voltage regulator with per phase switches

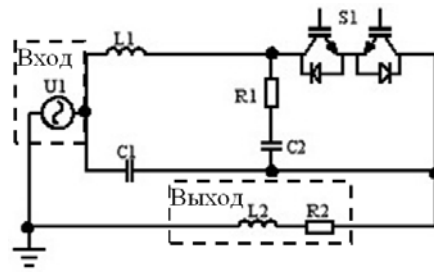


Рис. 2 – Упрощенный регулятор переменного напряжения с коммутируемым реактором

Fig. 2 – A simplified AC voltage regulator with switched reactor

Демпфирующий резистор R_1 и демпфирующий конденсатор C_2 необходимы, чтобы во время выключения ветви с реактором накопленная в нем энергия перенаправилась в демпфирующую ветвь.

Трехфазный вариант такого регулятора представляет собой три параллельно включенных РПН с соответствующей нагрузкой, которой может являться двигатель. Предлагаемый бестрансформаторный регулятор переменного напряжения с пофазными коммутаторами свободен от ограничений типовых устройств плавного пуска [14], содержащих встречно-параллельные тиристоры: пониженные энергетические показатели во время пуска, что связано с несинусоидальностью форм выходных напряжений и выходных и входных токов, а также с наличием сдвига фазы тока относительно напряжения, увеличивающегося по мере регулирования вниз выходного напряжения; ограниченный сверху единицей коэффициент преобразования по напряжению, не позволяющий сохранять номинальное напряжение на выходе регулятора при снижении входного напряжения.

2. Аналитический расчет

В предлагаемой работе оценка качественных характеристик производится при помощи прямого метода расчета алгебраизации дифференциальных уравнений (АДУ2) [15]. Также нами построена математическая модель регулятора, изображенного на рис. 1, по первой гармонике.

Для обоих состояний схемы (когда ключ S1 или S2 замкнут) мы записали дифференциальные уравнения (1):

$$\begin{cases} L_2 \frac{di_2}{dt} + R_2 i_2 - u_{c1} - \psi u_{c2} = u_1, \\ L_1 \frac{di_{L1}}{dt} + R_1 i_{L1} + u_{c1} + u_{c2} = 0, \\ C_1 \frac{du_{c1}}{dt} + i_2 - i_{L1} = 0, \\ C_2 \frac{du_{c2}}{dt} + \psi i_2 - i_{L1} = 0. \end{cases} \quad (1)$$

Было выведено соотношение первой гармоники спектра коммутационной функции, которое имеет вид

$$\psi_{(1)} = M_1 + \frac{1}{\pi} \sin(2\pi M_1) \cos(2\pi f t) - \frac{1}{\pi} (\cos(2\pi M_1) - 1) \sin(2\pi f t). \quad (2)$$

Здесь f – частота коммутации ключей, $M_1 = 1 - M$, M – глубина модуляции.

При алгебраизации дифференциальных уравнений все переменные системы уравнений раскладываются на гармонические функции по методу АДУ2, затем расщепляются первые гармоники на активные (а) и реактивные (р) составляющие, ортогональные друг другу. После усреднения за период первой гармоники получаем систему алгебраических уравнений для синусных и косинусных составляющих, записанную в матричной форме:

$$\begin{pmatrix} R_2 & 0 & -1 & -\psi_{\sin} & \omega L_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_1 & 1 & 1 & 0 & \omega L_1 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \omega C_1 & 0 \\ \psi_{\sin} & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \omega C_2 \\ \omega L_2 & 0 & 0 & 0 & -R_2 & 0 & 1 & \psi_{\cos} \\ 0 & \omega L_1 & 0 & 0 & 0 & -R_1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & \omega C_1 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \omega C_2 & -\psi_{\cos} & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I_{2(1)a} \\ I_{L1(1)a} \\ U_{C1(1)a} \\ U_{C2(1)a} \\ I_{2(1)p} \\ I_{L1(1)p} \\ U_{C1(1)p} \\ U_{C2(1)p} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{1(1)a} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Отсюда можно найти значения токов и напряжений системы и построить зависимость первой гармоники выходного напряжения от глубины модуляции – регулировочная характеристика $U_{2(1)}^* = f_1(M)$ (рис. 3), а также зависимость первой гармоники выходного напряжения от первой гармоники выходного тока – внешняя характеристика регулятора $U_{2(1)}^* = f_1(I_{2(1)}^*)$ (рис. 4) (где $U_{2(1)}^*$ – относительная величина, взятая по отношению к входному напряжению U_1 , а $I_{2(1)}$ – относительная величина, взятая по отношению к базовому току $I_6 = U_1 / \sqrt{L_1/C_1}$). Также зная активную и реактивную составляющую тока нагрузки, можно определить зависимость входного коэффициента сдвига тока по первой гармонике относительно входного напряжения – входной коэффициент мощности $\cos \phi_{1(1)} = f_1(M)$.

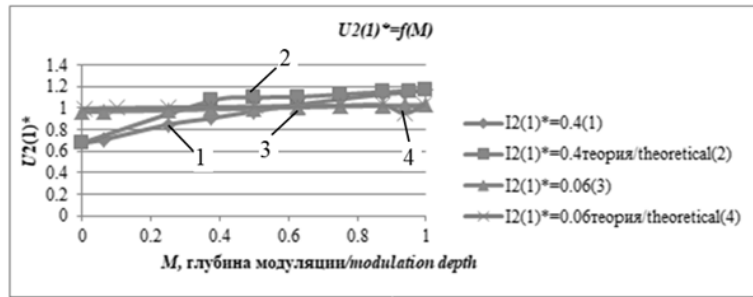


Рис. 3 – Регулировочные характеристики РПН с пофазными коммутаторами

Fig. 3 – RAV characteristics with per phase switches control

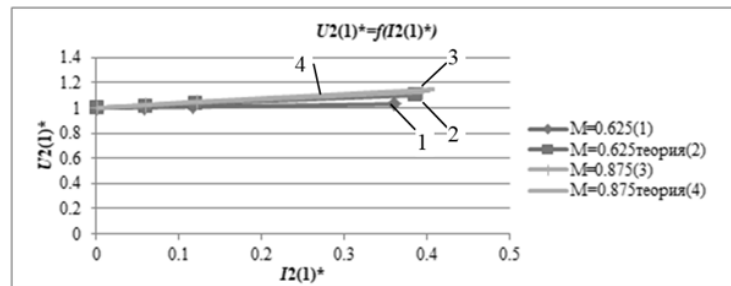


Рис. 4 – Внешние характеристики РПН с пофазными коммутаторами

Fig. 4 – RAV external characteristics with per phase switches

Построенные регулировочные и внешние характеристики приведены совместно с соответствующими характеристиками, полученными в программе моделирования PSIM (под номерами 1, 3). Как видно из характеристик, рабочий диапазон повышения напряжения находится в пределах $M = [0,65; 1]$, при этом максимальное значение выходного напряжения достигает 1,2 кратного увеличения при достаточно высоком качестве. Была произведена оценка качества выходного напряжения и построена зависимость коэффициента гармоник напряжения от глубины модуляции (рис. 5).

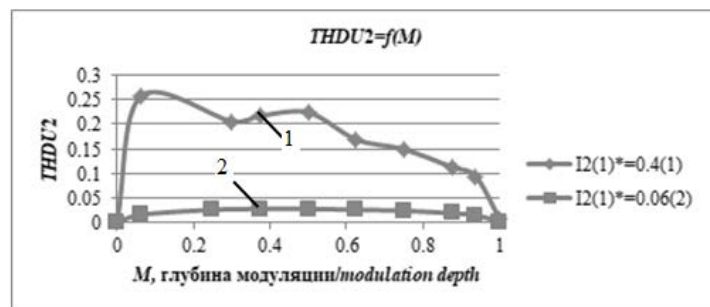


Рис. 5 – Коэффициент гармоник выходного напряжения РПН с пофазными коммутаторами

Fig. 5 – RAV output voltage THD with per phase switches

Повышенное выходное напряжение достигается в диапазоне глубины модуляции $M = [0,65; 1]$, на более низких уровнях глубины модуляции можно получить стабилизированное, как видно из рис. 4.

Для построения математической модели регулятора переменного напряжения с коммутируемым реактором по первой гармонике, как и ранее, воспользуемся прямым методом расчета АДУ2.

Система уравнений схемы для обоих ее состояний с использованием аналитической записи первых гармоник коммутационной функции по методу АДУ2 имеет вид

$$\begin{vmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \omega C_1 & 0 \\ \psi_{\sin} & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\omega C_1 & \psi'_{\sin} \omega C_2 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & \omega L_1 & 0 & 0 & R_1 \omega C_2 \\ 0 & R_2 & -1 & 0 & 0 & \omega L_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \omega C_1 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\omega C_1 & \psi'_{\cos} \omega C_2 & -\psi_{\cos} & 1 & 0 & 0 \\ \omega L_1 & 0 & 0 & R_1 \omega C_2 & 0 & 0 & -1 & -1 \\ 0 & \omega L_2 & 0 & 0 & 0 & -R_2 & 1 & 0 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} I_{1(1)a} \\ I_{2(1)a} \\ U_{C1(1)a} \\ U_{C2(1)a} \\ I_{1(1)p} \\ I_{2(1)p} \\ U_{C1(1)p} \\ U_{C2(1)p} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ U_{1(1)a} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix}, \quad (4)$$

где $\psi'_{\cos} = 1 - \psi_{\cos}$ и $\psi'_{\sin} = 1 - \psi_{\sin}$.

Спектр коммутационной функции (2) используется тот же, что и в регуляторе, изображенном на рис. 1.

Методика расчета аналогична той, что приведена ранее. По ее результатам были получены действующие значения первых гармоник токов и напряжений и построено семейство внешних характеристик (рис. 6), где $I_6 = U_1 / \sqrt{L_1 / C_1}$.

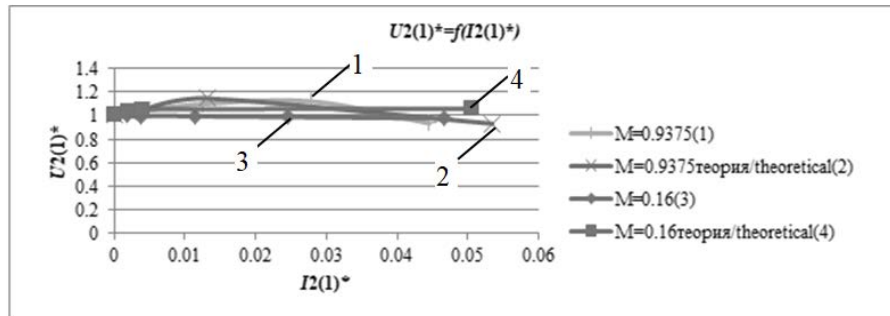


Рис. 6 – Внешние характеристики РПН с коммутируемым реактором

Fig. 6 – RAV external characteristics with a switched reactor

Как видно из внешней характеристики, повышение выходного напряжения происходит вплоть до $I_2 / I_6 = 0,06$ при значении M , близком к единице, при этом максимальное значение выходного напряжения до 1,15 раза больше входного при достаточно высоком качестве.

Приведенные характеристики совмещены с соответствующими характеристиками, полученными в модели программы PSIM.

Кроме того, по полученным данным в процессе моделирования была снята зависимость входного коэффициента мощности от глубины модуляции (рис. 7) и оценено качество входного тока, которое представлено в виде зависимостей коэффициента гармоник тока от глубины модуляции (рис. 8).

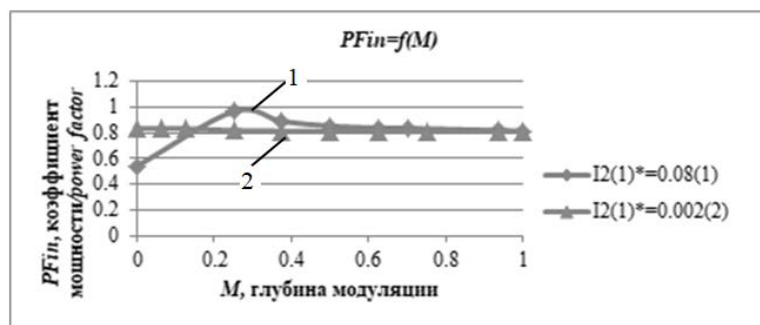


Рис. 7 – Входной коэффициент мощности РПН с коммутируемым реактором

Fig. 7 – RAV input power factor with a switched reactor

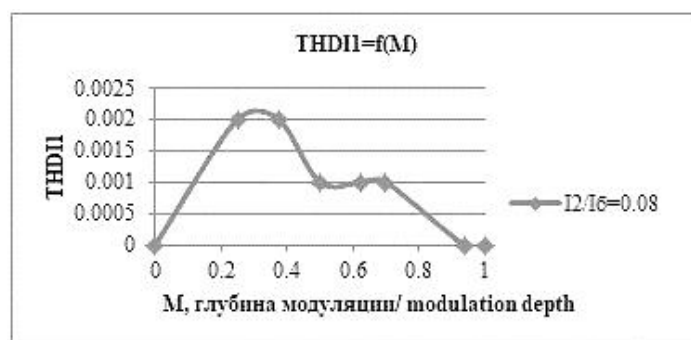


Рис. 8 – Коэффициент гармоник входного тока РПН с коммутируемым реактором

Fig. 8 – THD of RAV input current with switched reactor current

Качество входного тока и выходного напряжения, оцененное их коэффициентами гармоник, составило менее 5 %, как видно из рисунков. Это удовлетворяет требованиям ГОСТ 32144–2013.

3. Результаты моделирования

Нами получены временные диаграммы входных и выходных токов и напряжений при помощи программы моделирования PSIM для транзисторного регулятора переменного напряжения с двумя ключами переменного тока (рис. 9).

На рис. 10 приведены временные диаграммы токов и напряжений для упрощенного транзисторного регулятора переменного напряжения с коммутируемым реактором. Далее эти осциллограммы будут сопоставлены с соответствующими графиками, полученными уже в экспериментальном макете. Стоит отметить, что исходя из эюр видно, что ток нагрузки $I_{нА}$ синусоидален и не содержит высокочастотных составляющих.

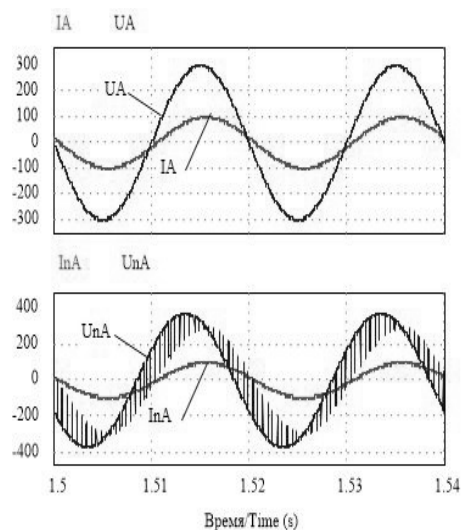


Рис. 9 – Эпюры входных и выходных токов и напряжений

Fig. 9 – Input and output voltage and current diagrams

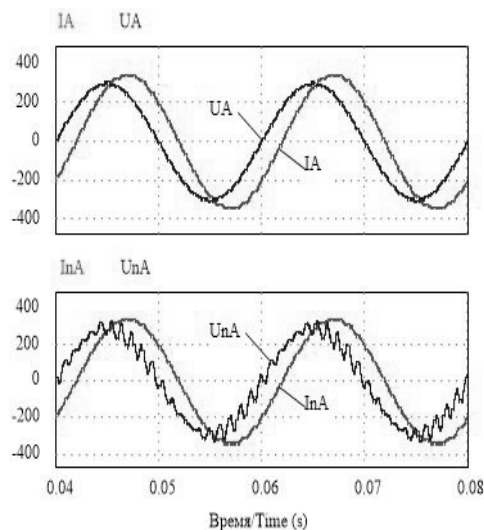


Рис. 10 – Временные диаграммы токов и напряжений упрощенного регулятора с коммутируемым реактором

Fig. 10 – Input and output voltage and current diagrams of a simplified regulator with a switched reactor

4. Цифровая система управления

При разработке макета регулятора переменного напряжения с пофазными коммутаторами (рис. 11) основное внимание было уделено его цифровой системе управления (рис. 12).

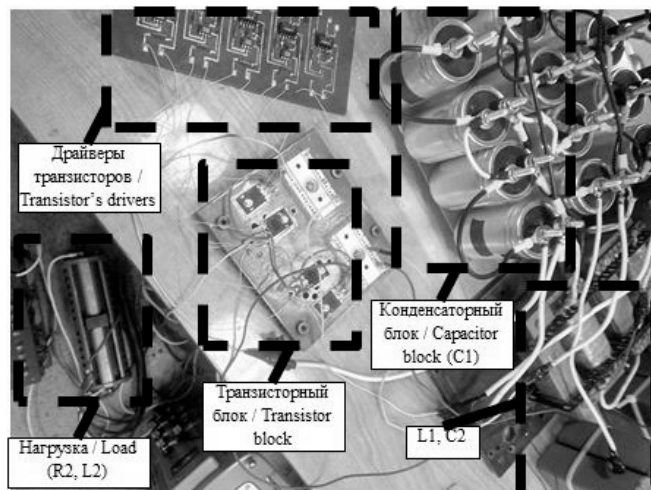


Рис. 11 – Макет регулятора переменного напряжения с пофазными коммутаторами

Fig. 11 – A model of an AC voltage regulator with per phase switches

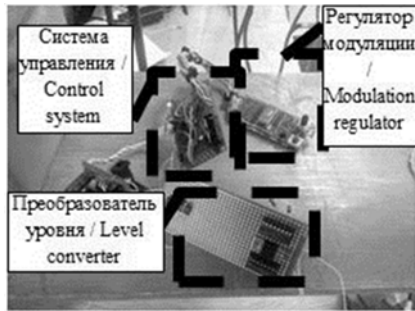


Рис. 12 – Система управления на базе микроконтроллера Atmel AVR Atmega 128A

Fig. 12 – A control system based on the Atmel AVR Atmega 128A microcontroller

Программирование выполнялось на языке СИ в программе редакторе и компиляторе WINAVR с использованием программатора AVR910 [16]. В качестве микроконтроллера был выбран Atmel AVR Atmega 128A [17]. Данный микроконтроллер удовлетворяет всем требованиям, имеющий в своем составе два таймер/счетчика с ШИМ, а также наличие АЦП, с помощью которого возможна реализация регулятора модуляции. Таймер 1 отвечает за ШИМ, таймер 0 – за индикацию. Индикатор показывает текущее задание на модуляцию. Стоит отметить, что на выходе системы управления установлен буфер, усиливающий выходной ток импульса управления транзистором, а также преобразователь уровня с 5 В до 15 В. Это необходимое условие при работе с предлагаемой системой управления.

Алгоритм данной системы

1. Настройка программатора для его согласования с контроллером.
2. Настройка таймеров под широтно-импульсную модуляцию, дополнительную задержку на выдачу импульсов, индикацию уровня модуляции.
3. Инициализация АЦП под регулятор модуляции.
4. Инициализация таймера 1, формирующего ШИМ с частотой 1,8 кГц.
5. Основная функция: реализация слежения за напряжением по внешнему прерыванию int4. Прерывание срабатывает по переднему фронту; формирование сигнала задания, по факту поступления сигнала на АЦП с ручки управления (переменный резистор формирует напряжение от 0 до 5 В). При превышении заданного уровня напряжения нагрузки выставляется флаг, по которому сигнал задания снижается и фиксируется до установленного значения.

5. Результаты эксперимента

Пример работы макета с данной системой управления показан на рис. 13 и 14. Экспериментальный макет регулятора переменного напряжения с пофазными коммутаторами запускался при разных входных и выходных параметрах. При работе на входном напряжении $U_{вх} = 33$ В, нагрузка выбрана $R_2 = 6$ Ом, $L_2 = 77$ мГн. Данные элементов самого регулятора: $L_1 = 812$ мкГн, $C_1 = 40$ мкФ, $C_2 = 4$ мкФ. Выходное напряжение при этом было повышено до 39 В. При входном напряжении 18,9 В выходное было повышено до 23,6 В. Напряжение и ток нагрузки регулятора, управляемого данной системой управления при данных параметрах, показаны на рис. 13. Также были сняты осциллограммы с меньшей по величине индуктивностью $L_2 = 1,4$ мГн и большими по величине емкостями $C_1 = 160$ мкФ, $C_2 = 8$ мкФ. Результаты этого эксперимента представлены на рис. 14.

Также был снят в компьютерной модели коэффициент полезного действия в рабочем режиме регулятора, который достигает 0,95 %. Построена зависимость КПД от глубины модуляции (рис. 15).

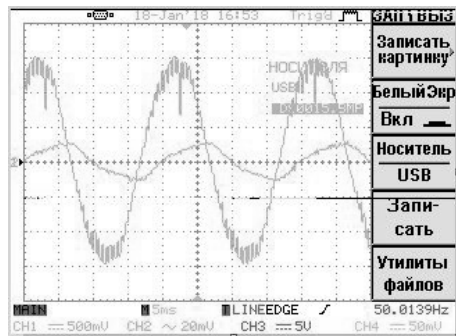


Рис. 13 – Эпюры выходного тока и напряжения при $L_1 = 812 \text{ мкГн}$, $C_1 = 40 \text{ мкФ}$, $C_2 = 4 \text{ мкФ}$

Fig. 13 – Output voltage and current diagrams ($L_1 = 812 \text{ μH}$, $C_1 = 40 \text{ μF}$, $C_2 = 4 \text{ μF}$)

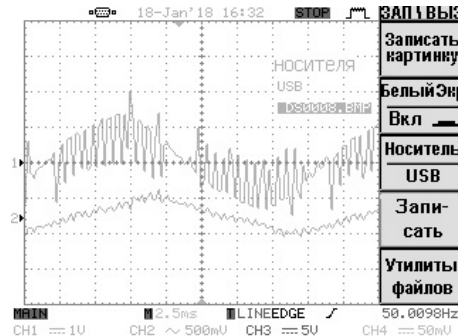


Рис. 14 – Эпюры выходного тока и напряжения при $L_1 = 1,4 \text{ мГн}$, $C_1 = 160 \text{ мкФ}$, $C_2 = 8 \text{ мкФ}$

Fig. 14 – Output voltage and current diagrams ($L_1 = 1.4 \text{ мH}$, $C_1 = 160 \text{ μF}$, $C_2 = 8 \text{ μF}$)

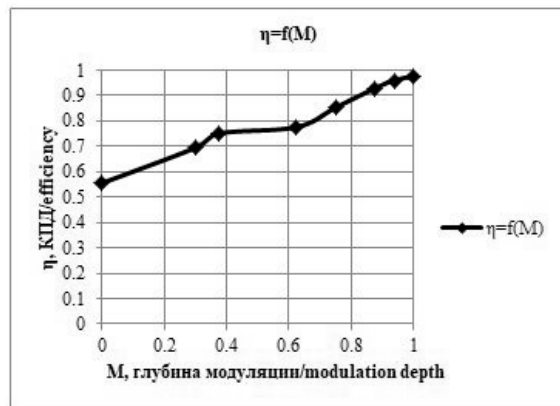


Рис. 15 – КПД регулятора

Fig. 15 – Regulator efficiency

Заключение

Таким образом, в ходе выполнения работы нами было построено расширение прямого метода расчета (АДУ2) действующих значений токов и напряжений, приводящее к дифференциальным уравнениям с периодическими разрывными коэффициентами. По результатам этого метода расчета переменных состояний были построены энергетические характеристики и оценено качество напряжения и тока. А также получены уравнения для первых гармоник всех переменных состояний выходных переменных, по результатам которых построены основные характеристики регулятора: внешние, регулировочные при помощи разложения переменных коэффициентов в ряд Фурье. Построенные характеристики, совмещенные с характеристиками, построенными по результатам моделирования программы PSIM, совпали от 90 до 99 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. AC-AC single phase matrix converter with harmonic filter and boost characteristics: a study / M.F.M. Zin, A. Idris, M.N. Seroji, N. Hamzah // 2012 IEEE Student Conference on Research and Development, SCORED. – Penang, 2012. – P. 166–171.
2. A fast AC voltage regulator / N. Vazquez, A. Velazquez, C. Hernandez, E. Rodríguez, R. Orosco // 2008 IEEE International Power Electronics Congress – CIEP. – Mexico Morelos, 2008. – P. 162–166.
3. **Vazquez N., Velazquez A., Hernandez C.** AC voltage regulator based on the AC-AC buck-boost converter // 2007 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, ISIE. – Vigo, Spain, 2007. – P. 533–537.
4. **Zinoviev G.S., Udovichenko A.V.** New family of AC regulators with the switched quasi-impedance of power supply or load // 14th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM 2013), Altai, Erlagol, 1–5 July 2013. – Novosibirsk, 2013. – P. 377–381.
5. **Zinoviev G.S., Udovichenko A.V., Maksimenko V.N.** Energy saving devices for soft start-up of alternative-voltage motors // Proceedings of the 2009 International Forum on Strategic Technologies: IFOST 2009, October 21–23, 2009, Ho Chi Minh City, Vietnam. – Ho Chi Minh City, 2009. – P. 262–266.
6. A novel circuit topology of three-phase direct AC-AC PWM voltage regulator / N.A. Ahmed, M. Miyatake, H.W. Lee, M. Nakaoka // Conference Record of the 2006 IEEE Industry Applications Conference Forty-First IAS Annual Meeting. – 2006. – Vol. 4. – P. 2076–2081.
7. **Keyhani H., Toliyat H.A.** A soft-switched three-phase AC-AC converter with a high-frequency AC link // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2014. – Vol. 50, iss. 4. – P. 2637–2647.
8. **Sidorov A.V.** AC voltage regulators review // 17th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM), Erlagol, Altai, 30 June – 4 July, 2016: proceedings. – Novosibirsk, 2016. – P. 563–572.
9. **Zinoviev G.S., Udovichenko A.V.** Power-efficient smooth-start devices in alternating-current engines // Russian Electrical Engineering. – 2009. – Vol. 80, N 12. – P. 691–694.
10. **Udovichenko A.V.** New transformerless AC voltage regulators as devices to improve of power quality // 12th International Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering: proceedings APEIE-2014. – Novosibirsk, 2014. – Vol. 1. – P. 766–769.
11. **Zinoviev G.S., Udovichenko A.V.** AC voltage regulators with switched capacitors // IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC). – Varna, 2016. – P. 44–49.
12. **Zinoviev G.S., Udovichenko A.V.** Transformerless step-up regulators of the alternating voltage with sinusoidal input and output currents // Technical Electrodynamics. – 2012. – N 3. – P. 69–70.
13. **Зиновьев Г.С., Сидоров А.В., Удовиченко А.В.** Повышающе-понижающие регуляторы переменного напряжения с улучшенной электромагнитной совместимостью // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2013. – № 6. – С. 53–57.
14. **Браславский И.Я.** Асинхронный полупроводниковый электропривод с параметрическим управлением. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 224 с.
15. **Зиновьев Г.С.** Основы силовой электроники. – 5-е изд. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2012. – 667 с.
16. **Евстифеев А.В.** Микроконтроллеры AVR семейств Тіпу и Mega фирмы ATMEL. – 2-е изд., стер. – М.: Додэка-XXI, 2005. – 560 с.
17. Datasheet Atmega 128 [Electronic resource]. – URL: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/doc2467.pdf> (accessed: 08.06.2018).

AC VOLTAGE REGULATOR WITH PHASE SWITCHES AND A DIGITAL CONTROL SYSTEM

Udovichenko A.V., Sidorov A.V., Beshtinov A.O.

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

The transformerless AC voltage regulator with phase-to-phase commutators is considered. The regulator is able to increase the voltage without loss of current quality in the system. Such converters can be used for soft start systems of motors or as a voltage regulator. A simplified topology of the regulator with one key in the phase is proposed. A digital system of an AC transformerless regulator with phase-shift switches is considered and analyzed. This digital system is based on the Atmel AVR Atmega microcontroller. The results of the experiment with a digital control system are shown. An analytical calculation of the effective values for the first harmonics of the currents and voltages of the AC voltage regulator with phase-shift switches and its simplified version are also given.

Keywords: AC voltage regulator, buck-boost, transformerless, algebraization of differential equations.

DOI: 10.17212/1727-2769-2018-2-93-105

REFERENCES

1. Zin M.F.M., Idris A., Seroji M.N., Hamzah N. AC-AC single phase matrix converter with harmonic filter and boost characteristics: a study. *2012 IEEE Student Conference on Research and Development, SCOReD*, Penang, 2012, pp. 166–171.
2. Vazquez N., Velazquez A., Hernandez C., Rodríguez E., Orosco R. A fast AC voltage regulator. *2008 IEEE International Power Electronics Congress – CIEP*, Mexico Morelos, 2008, pp. 162–166.
3. Vazquez N., Velazquez A., Hernandez C. AC voltage regulator based on the AC-AC buck-boost converter. *2007 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, ISIE*, Vigo, Spain, 2007, pp. 533–537.
4. Zinoviev G.S., Udovichenko A.V. New family of AC regulators with the switched quasi-impedance of power supply or load. *14th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM 2013)*, Altai, Erlagol, 1–5 July 2013, pp. 377–381.
5. Zinoviev G.S., Udovichenko A.V., Maksimenko V.N. Energy saving devices for soft start-up of alternative-voltage motors. *Proceedings of the 2009 International Forum on Strategic Technologies: IFOST 2009*, October 21–23, 2009, Ho Chi Minh City, Vietnam. – Ho Chi Minh City, 2009. – P. 262–266.
6. Ahmed N.A., Miyatake M., Lee H.W., Nakaoka M. A novel circuit topology of three-phase direct AC-AC PWM voltage regulator. *Conference Record of the 2006 IEEE Industry Applications Conference Forty-First IAS Annual Meeting*, 2006, vol. 4, pp. 2076–2081.
7. Keyhani H., Toliyat H.A. A soft-switched three-phase AC–AC converter with a high-frequency AC link. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2014, vol. 50, iss. 4, pp. 2637–2647.
8. Sidorov A.V. AC voltage regulators review. *17th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM)*, Erlagol, Altai, 30 June – 4 July, 2016: proceedings, pp. 563–572.
9. Zinoviev G.S., Udovichenko A.V. Power-efficient smooth-start devices in alternating-current engines. *Russian Electrical Engineering*, 2009, vol. 80, no. 12, pp. 691–694.
10. Udovichenko A.V. New transformerless AC voltage regulators as devices to improve of power quality. *12th International Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering: proceedings APEIE-2014*, Novosibirsk, 2014, vol. 1, pp. 766–769.

11. Zinoviev G.S., Udovichenko A.V. AC voltage regulators with switched capacitors. *IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC)*, Varna, 2016, pp. 44–49.
12. Zinoviev G.S., Udovichenko A.V. Transformerless step-up regulators of the alternating voltage with sinusoidal input and output currents. *Technical Electrodynamics*, 2012, no. 3, pp. 69–70.
13. Zinoviev G.S., Sidorov A.V., Udovichenko A.V. Povyshayushche-ponizhayushchie regulatory peremennogo napryazheniya s uluchshennoi elektromagnitnoi sovmestimost'yu [Buck-boost AC voltage regulators with improved electromagnetic compatibility]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika – Russian Electromechanics*, 2013, no. 6, pp. 53–57. (In Russian).
14. Braslavskii I.Ya. *Asinkhronnyi poluprovodnikovyi elektroprivod s parametricheskim upravleniem* [Asynchronous semiconductor electric drive with parametric control]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988. 224 p.
15. Zinoviev G.S. *Osnovy silovoi elektroniki* [Power electronics]. 5th ed. Moscow, NSTU Publ., 2012. 667 p.
16. Evstifeev A.V. *Mikrokontrollery AVR semeystv Tiny i Mega firmy ATMEL* [The families of AVR Tiny and Mega ATMEL]. 2nd ed. Moscow, Dodeka-XXI Publ., 2005. 560 p.
17. *Datasheet Atmega 128*. Available at: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/doc2467.pdf> (accessed 08.06.2018).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Удовиченко Алексей Вячеславович – родился в 1987 году, канд. техн. наук, доцент кафедры электроники и электротехники, Новосибирский государственный технический университет. Область научных интересов: энергоэффективные регуляторы переменного напряжения, плавный пуск двигателей, силовая электроника. Опубликовано 44 научные работы. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: udovichenko@corp.nstu.ru).

Udovichenko Aleksey Vyacheslavovich (b. 1987) – Candidate of Sciences (Eng.), associate professor at the electronics and electrical engineering department, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on energy-efficient AC voltage regulators, soft-start of engines, and power electronics. He is the author of 44 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: udovichenko@corp.nstu.ru).



Сидоров Андрей Викторович – родился в 1989 году, аспирант кафедры электроники и электротехники, инженер 2-й категории Института силовой электроники, Новосибирский государственный технический университет. Область научных интересов: регуляторы переменного напряжения, силовые электронные трансформаторы. Опубликовано 14 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: Sidorov_corp@mail.ru).

Sidorov Andrey Victorovich (b. 1989), postgraduate student at the electronics and electrical engineering department, Novosibirsk State Technical University, a 2 category engineer in the Power Electronics Institute, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on ac voltage regulators and power electronic transformers. He is the author of 14 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: Sidorov_corp@mail.ru).



Бештинов Амыр Олегович – родился в 1993 году, инженер-конструктор ЗАО «Эрасиб». Область научных интересов: микропроцессорные системы управления. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: amyr.beshtinov.93@mail.ru).

Beshtinov Amyr Olegovich (b. 1989), engineer-designer of the Erasib company CJSC. His research interests are currently focused on microprocessor control systems. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia, Russia. E-mail: amyr.beshtinov.93@mail.ru).

*Статья поступила 29 января 2018 г.
Received January 29, 2018*

To Reference:

Udovichenko A.V., Sidorov A.V., Beshtinov A.O. Regulyator peremennogo napryazheniya s pofaznymi kommutatorami i tsifrovoy sistemoy upravleniya [AC voltage regulator with phase switches and a digital control system]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2018, no. 2 (39), pp. 93–105. doi: 10.17212/1727-2769-2018-2-93-105.