

## РЕГУЛЯТОР ПЕРЕМЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ С МАЛЫМ ЧИСЛОМ КЛЮЧЕЙ И ЦИФРОВЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

**А.В. Удовиченко, Г.С. Зиновьев, Е.В. Гришанов, М.А. Жарков**

*Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия*

В работе рассматривается новый трехфазный регулятор переменного напряжения с малым числом ключей. Предлагаемый преобразователь является повышающе-понижающим с синусоидальными входными и выходными токами. Предложена методика расчета токов регулятора переменного напряжения по высшим гармоникам. Получены зависимости коэффициентов гармоник от глубины модуляции, используя метод АДУ, а также произведено сравнение с результатами имитационного моделирования. Оценка качества выходного и входного токов относительно частоты коммутации позволило выбрать оптимальный диапазон частот для экспериментального макета. Рассмотрена и проанализирована цифровая система управления регулятора переменного напряжения с малым числом ключей, которая выполнена на базе микроконтроллера *Atmel AVR Atmega*. Приведены эпюры токов и напряжений регулятора с цифровой системой управления, полученные в ходе эксперимента.

*Ключевые слова:* повышающе-понижающий регулятор, коммутируемые конденсаторы, маловентильные регуляторы переменного напряжения, прямой метод расчета.

### Введение

Регуляторы переменного напряжения с улучшенной электромагнитной совместимостью нашли широкое применение в области силовой электроники, как в прикладных, так и фундаментальных научных исследованиях. За последнее десятилетие были предложены многозонные регуляторы переменного напряжения [1–4], с пофазными коммутаторами [5], с коммутируемым квази-импедансом сети. Рассматривались транзисторные регуляторы переменного напряжения с реакторами и конденсаторами в безтрансформаторном исполнении [6–9]. Топологии таких регуляторов переменного напряжения являются развитием схем повышающих и повышающе-понижающих *DC-DC* регуляторов [10–11], а также рассматриваемые в данной работе регуляторы переменного напряжения с коммутируемыми конденсаторами [12–20].

Последние сравнивались с регуляторами, основанными на коммутации квази-импеданса источника питания с высокой частотой и трехфазным *АС-АС* преобразователем Кука. У предложенного регулятора переменного напряжения коэффициент повышения напряжения достигает 4,2 против 1,2 и 2,01 соответственно. При этом качество тока предлагаемого регулятора сопоставимо,  $K_T$  в районе 2–5 %. По коэффициенту мощности регулятора переменного напряжения с малым числом ключей выигрывает у преобразователя, основанного на коммутации квази-импеданса источника питания, и составляет 0,8–0,97 против 0,75. По отношению реактивной мощности конденсаторов к выходной мощности системы наблюдается заметное снижение, до 9 раз [21].

Приводится этап разработки экспериментального макета предлагаемого регулятора переменного напряжения. К основным задачам в данной работе можно отнести развитие прямого метода расчета действующих значений токов и напряжений регулятора переменного напряжения по их высшим гармоникам и разработка цифровой системы управления, обеспечивающей соответствующие режимы работы преобразователя.

Во втором разделе данной работы предлагаются топологии нового трехфазного регулятора переменного напряжения с малым числом ключей и аналитический расчет. В третьем разделе приводится код программы цифровой системы управления. В четвертом разделе обсуждаются результаты эксперимента регулятора. Последний раздел посвящен выводам.

### 1. Новые трехфазные регуляторы переменного напряжения с малым числом ключей

На рис. 1 показан регулятор переменного напряжения (РПН) с малым числом ключей [22] и его схема замещения для одной фазы.

В работе [21] был проанализирован данный регулятор, регулировочная характеристика которого показана на рис. 2, а также проводился расчет методом АДУ2 первых гармоник токов и напряжений, здесь предлагается анализ схемы по высшим гармоникам.

Для расчета по высшим гармоникам была взята  $k$ -я гармоника коммутационной функции (1) (при частоте коммутации 1000 Гц).

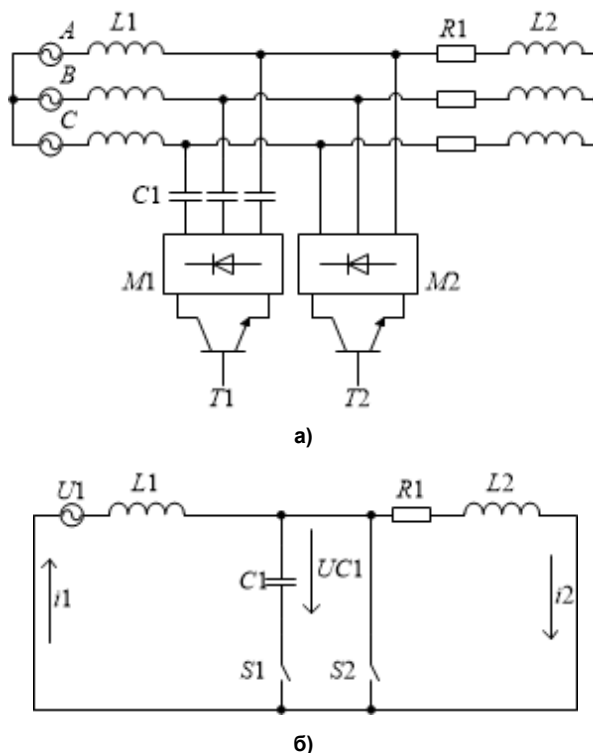


Рис. 1. Регулятор переменного напряжения с малым числом ключей: а – трехфазный вариант; б – однофазный вариант

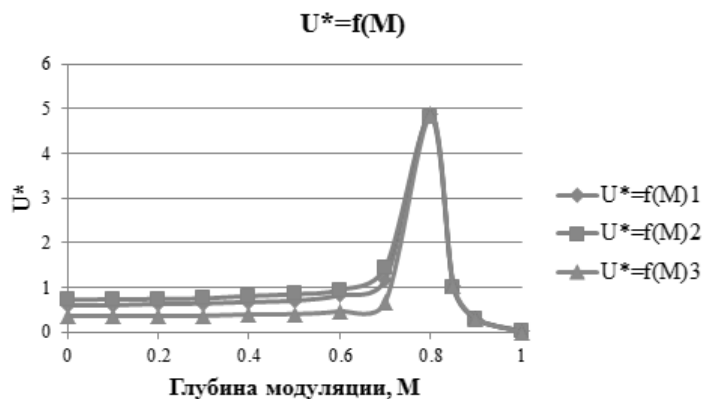


Рис. 2. Регулировочные характеристики РПН с малым числом ключей

$$\psi = 1 - M + \frac{1}{\pi k} \sin[2\pi k(1 - M)] \cdot \cos(2\pi kft) - \frac{1}{\pi k} [\cos[2\pi k(1 - M)] - 1] \sin(2\pi kft); \quad (1)$$

$$\psi_{\cos} = \frac{2 \sin(\pi k M) \cos(\pi k) \sin(Tk\omega_1) (8\pi^2 - T^2 k^2 \omega_1^2)}{\pi k T \omega_1 k (16\pi^2 - T^2 k^2 \omega_1^2)}, \quad (2)$$

где  $M$  – глубина модуляции.

Дифференциальные уравнения системы при включенном ключе  $S_1$  и  $S_2$  соответственно, составленные, используя 1-й и 2-й законы Кирхгофа:

$$\begin{cases} L_1 \frac{di_1}{dt} + u_{C1} = u_1; \\ L_2 \frac{di_2}{dt} + R_1 i_2 - u_{C1} = 0; \\ i_1 - C_1 \frac{du_{C1}}{dt} - i_2 = 0; \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} L_1 \frac{di_1}{dt} = u_1; \\ L_2 \frac{di_2}{dt} + R_1 i_2 = 0; \\ i_1 - i_2 = 0. \end{cases} \quad (4)$$

С учетом коммутационной функции система примет вид:

$$\begin{cases} L_1 \frac{di_1}{dt} + u_{C1} = u_1; \\ L_2 \frac{di_2}{dt} + R_1 i_2 - u_{C1} = 0; \\ i_1 - C_1 \frac{du_{C1}}{dt} - i_2 = 0. \end{cases} \quad (5)$$

В результате алгебраизации системы уравнений методом АДУ2 получим следующую систему алгебраических уравнений в матричной форме:

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & -\psi_{\cos(n)} & \omega L_1 & 0 & 0 \\ 0 & -R_1 & \psi_{\cos(n)} & 0 & \omega L_2 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -\omega C_1 \psi_{\cos(n)} \\ \omega L_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \psi_{\sin(n)} \\ 0 & \omega L_2 & 0 & 0 & R_1 & -\psi_{\sin(n)} \\ 0 & 0 & -\omega C_1 \psi_{\sin(n)} & 1 & -1 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I_{1(n)r} \\ I_{2(n)r} \\ U_{C1(n)r} \\ I_{1(n)a} \\ I_{2(n)a} \\ U_{C1(n)a} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Полученные результаты расчета представлены в таблице, где показано отношение действующих значений высших гармоник (полученных, используя (6)) к действующему значению первой гармоники выходного тока [21], и на рис. 2 совместно с результатами моделирования в программе PSIM.

Результаты расчета высших гармоник и сравнение с первыми гармониками

$M$	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
$I_{2(20)}/I_{2(1)}$	0,08979	0,0189	0,06221	0,0951	0,10604
$K_{гI}(PSIM)$	0,026	0,038	0,051	0,063	0,076
$M$	0,7	0,8	0,85	0,9	0,999
$I_{2(20)}/I_{2(1)}$	0,11118	0,11952	0,1215	0,12285	0,12386
$K_{гI}(PSIM)$	0,088	0,094	0,106	0,112	0,062

Из представленных выше результатов видно, что доля высших гармоник в выходном токе составляет менее 10 % при  $M < 0,8$  из чего можно сделать вывод, что выходной ток имеет практически синусоидальную форму, при этом данные расчета совпадают с данными моделирования при  $M < 0,9$ .

Анализ качества токов регулятора проводился как при фиксированном значении частоты коммутации транзисторов  $f_{ком} = 1,8$  кГц (рис. 3 и 4), так и в диапазоне частот. Данный случай применим только в виртуальной модели, поскольку в реальной частота коммутации ключей ограничена возможностями микроконтроллера. Тем не менее, были сняты характеристики качества входного и выходного тока регулятора переменного напряжения с малым числом ключей. Диапазон частот был выбран от 500 Гц до 1 МГц. Результат анализа приведен на рис. 5 и 6. Начиная с 2 кГц, коэффициент гармоник как для входного, так и для выходного тока не превышает 5 %, что говорит о высоком качестве модулируемого тока.

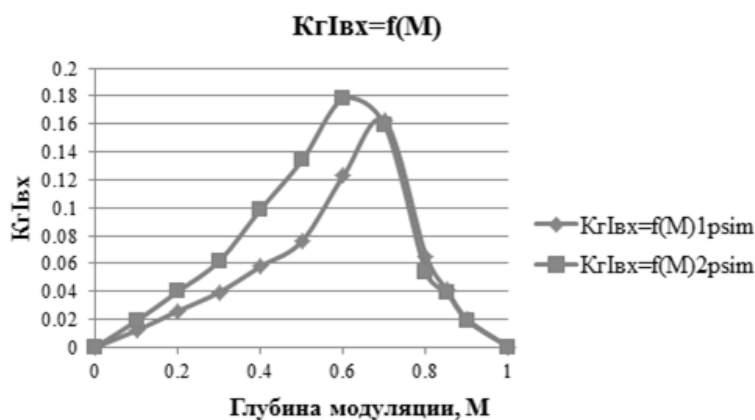


Рис. 3. Коэффициент гармоник входного тока:  $K_{гI_{вх}} = f(M)1psim$  при  $I_{вых}^* = 0,5$  (моделирование);  $K_{гI_{вх}} = f(M)2psim$  при  $I_{вых}^* = 0,4$  (моделирование)

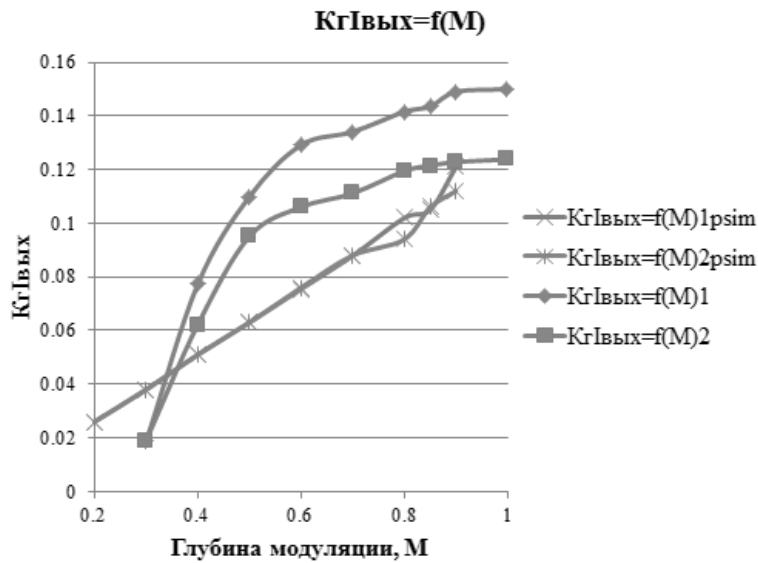


Рис. 4. Коэффициент гармоник выходного тока:  $K_{гI_{\text{вых}}} = f(M)1psim$  при  $I_{\text{вых}}^* = 0,5$  (моделирование);  $K_{гI_{\text{вых}}} = f(M)2psim$  при  $I_{\text{вых}}^* = 0,4$  (моделирование);  $K_{гI_{\text{вых}}} = f(M)1$  при  $I_{\text{вых}}^* = 0,5$  (расчет);  $K_{гI_{\text{вых}}} = f(M)2$  при  $I_{\text{вых}}^* = 0,4$  (расчет)

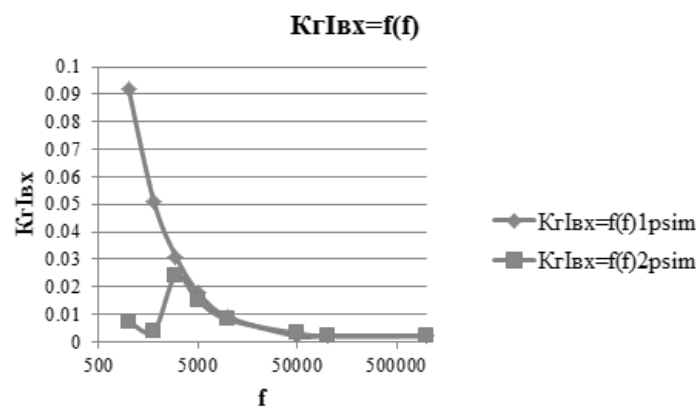


Рис. 5. Коэффициент гармоник входного тока относительно частоты коммутации транзисторов в логарифмическом масштабе:  $K_{гI_{\text{вх}}} = f(f)1psim$  при  $I_{\text{вых}}^* = 0,5$  (моделирование);  $K_{гI_{\text{вх}}} = f(f)2psim$  при  $I_{\text{вых}}^* = 0,4$  (моделирование)

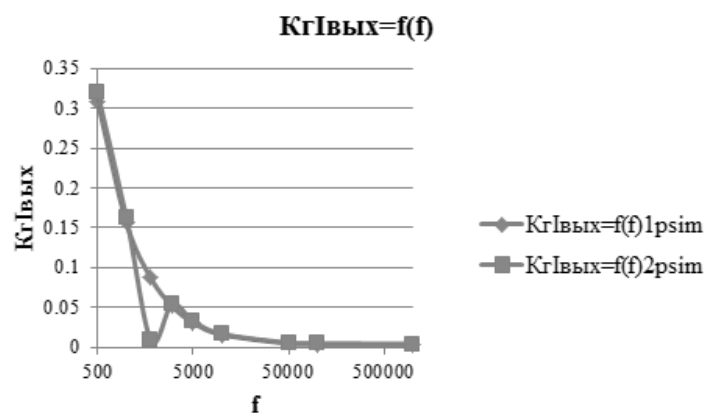


Рис. 6. Коэффициент выходного тока относительно частоты коммутации транзисторов в логарифмическом масштабе:  $K_{гI_{\text{вых}}} = f(f)1psim$  при  $I_{\text{вых}}^* = 0,5$  (моделирование);  $K_{гI_{\text{вых}}} = f(f)2psim$  при  $I_{\text{вых}}^* = 0,4$  (моделирование)

## 2. Цифровая система управления

В статье рассматривается цифровая система управления для нового трехфазного регулятора переменного напряжения с малым числом ключей (рис. 1а), созданная на базе микроконтроллера *Atmel AVR Atmega 128A* [23]. Программирование выполнялось на языке СИ в программном редакторе и компиляторе *WINAVR* с использованием программатора *AVR910* [24]. На рис. 9а показана предлагаемая система управления.

В системе управления имеется буфер, который формирует импульсы управления с заданной амплитудой напряжения и тока, этот блок выполнен на аналоговых элементах, преобразователь уровня и буфер на КМОП логике (*CD40109* и *CD4050*).

Кроме того, изначально система выполнялась в разомкнутом варианте, но в дальнейшем потребовалось слежение за уровнем выходного напряжения. Была доработана программа, а также к системе управления добавился еще один блок, с помощью которого снимался сигнал с датчика напряжения и подавался на вход процессора. Реализована система авторегулирования, используя ПИ-закон. Блок-схема данной системы показана на рис. 7.

Перейдем к самой системе управления. Микроконтроллер *Atmel AVR Atmega 128A* 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.

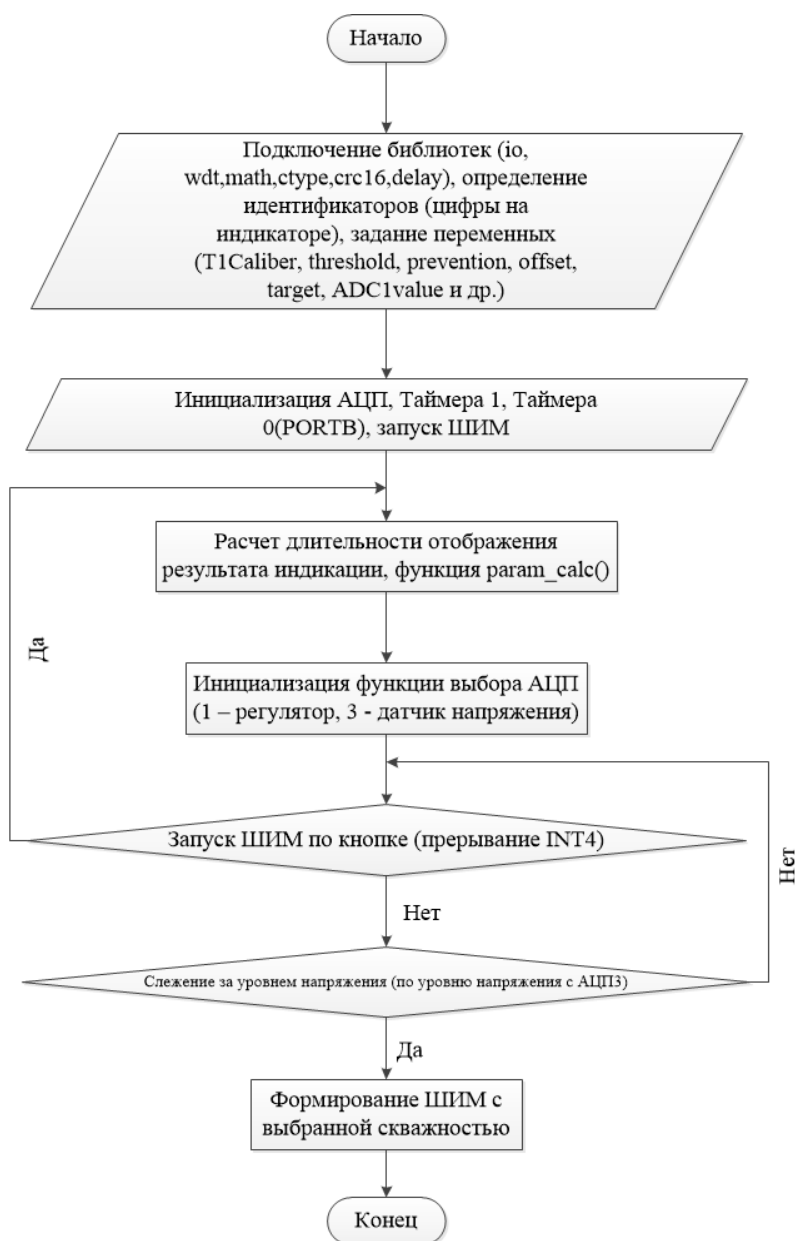


Рис. 7. Блок-схема цифровой системы управления

## Преобразовательная техника

По прерыванию Таймера 0 по переполнению (28,235 Гц) осуществляется индикация результата АЦП1 (регулятор) через порт С, так же запускается АЦП3, результат которого сохраняется в переменную *ADC3value*, который в основном цикле участвует в разрешении на ШИМ. Кнопка «Пуск/Стоп» запускает внешнее прерывание *INT4*, разрешающее/запрещающее работу ШИМ. Индикатор показывает текущее задание на модуляцию.

Алгоритм расчета данной системы:

1. Настройка фьюзибитов для согласования программатора с контроллером.
2. Настройка таймеров под широтно-импульсную модуляцию, мертвое время (опционально), 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. Объем программы составил 103 кБ и 298 строк программного кода. Кроме того, создан отдельный функциональный заголовочный *.h* файл, который подключается в основной программе. Для программирования контроллера потребовалась настройка «Makefile». В данном редакторе выбирается тип микроконтроллера, программатора, порт к которому он подключен, частота контроллера (выбирается по частоте кварцевого генератора) (рис. 8).

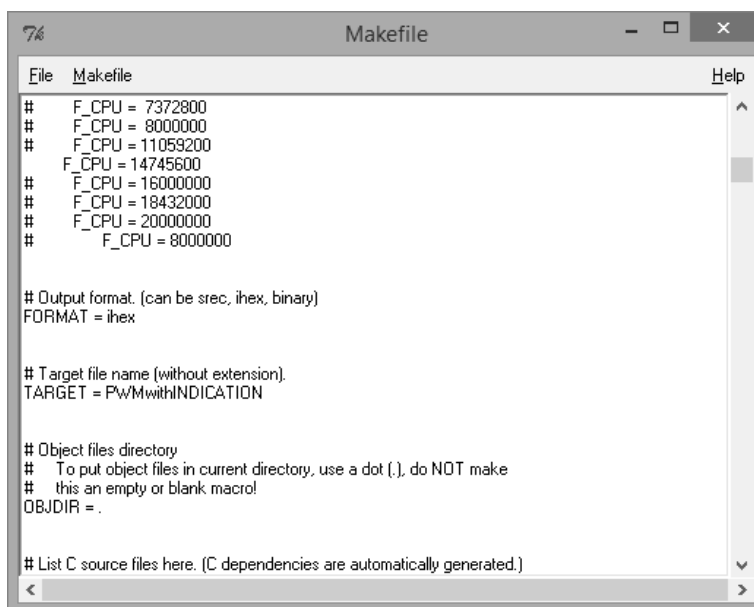


Рис. 8. Настройка «Makefile»

Пример кода:

```
//Header file with settings from user, location of the adjustment function.
#include <util/delay.h>
#define DeadTime 0; // number of beats for dead time
extern char TICaliber = 9; // the width of the PWM timer//8,9,10
//extern char TICaliberA; //to adjust the timer for the desired bit capacity
//extern char TICaliberB; //are recorded in TCCR1A&B
extern int threshold = 80; //40
extern int prevention = 40; int Counter[] = {0xfd, //green
0xfe, //red
0xff}; //green&red
int i = 0; void counter(void)
{while (1)
{PORTD = Counter[i]; _delay_ms(20); i++; PORTD = 0xF0; _delay_ms(20);
if (i == 4) //4
{i = 1; return 1;}}
```

### 3. Результаты эксперимента

Пример работы данной системы управления показан на рис. 10. Для верификации приводятся эюры, полученные в средстве математического

моделирования *PSIM* (рис. 11). Экспериментальный макет регулятора переменного напряжения (рис. 9) работает на активно-индуктивную нагрузку  $R = 6 \text{ Ом}$ ,  $L = 0,077 \text{ Гн}$ . Конденсаторы преобра-

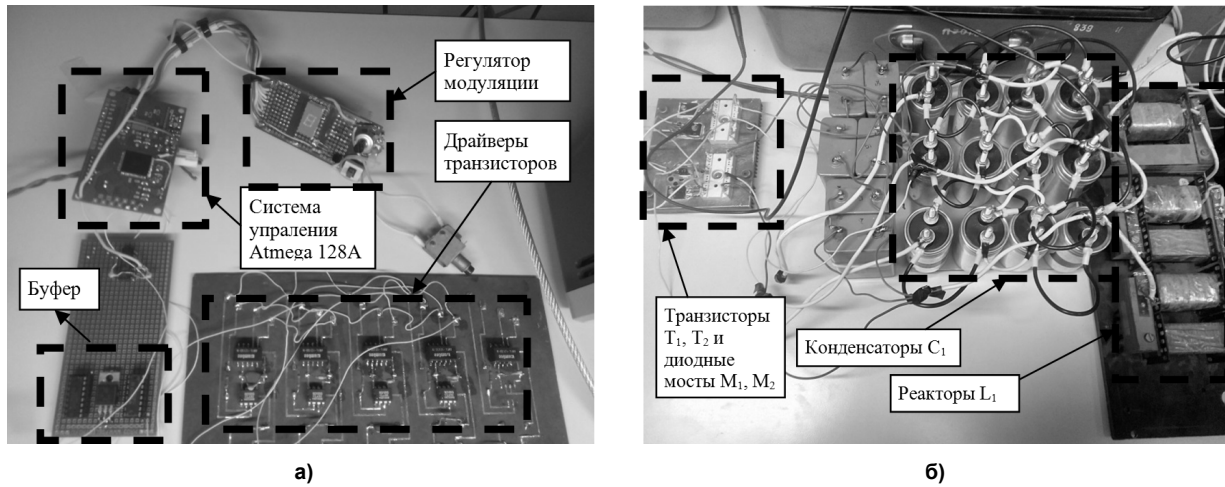
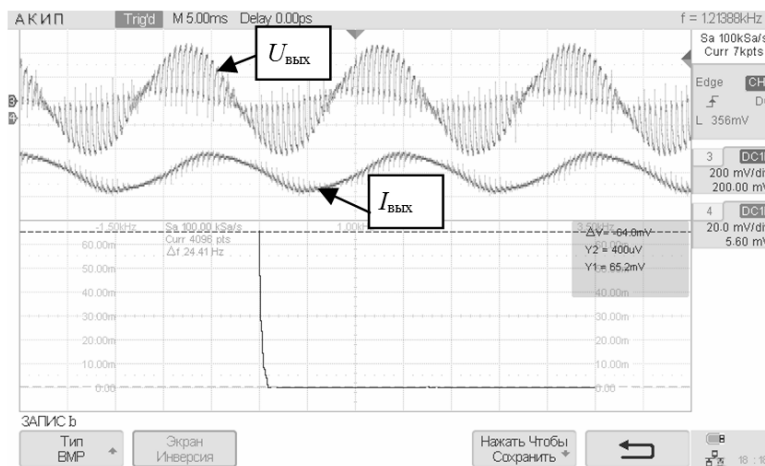
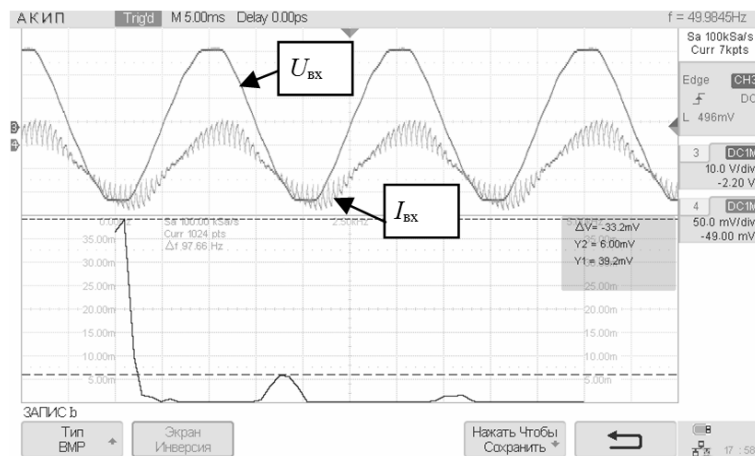


Рис. 9. Экспериментальный макет регулятора переменного напряжения с малым числом ключей: а – цифровая система управления регулятора переменного напряжения с коммутируемыми конденсаторами; б – силовая схема



а)



б)

Рис. 10. Осциллограммы токов и напряжений регулятора переменного напряжения с малым числом ключей: а – выходное напряжение, ток и спектр тока; б – входное напряжение, входной ток и спектр тока; в – импульсы управления

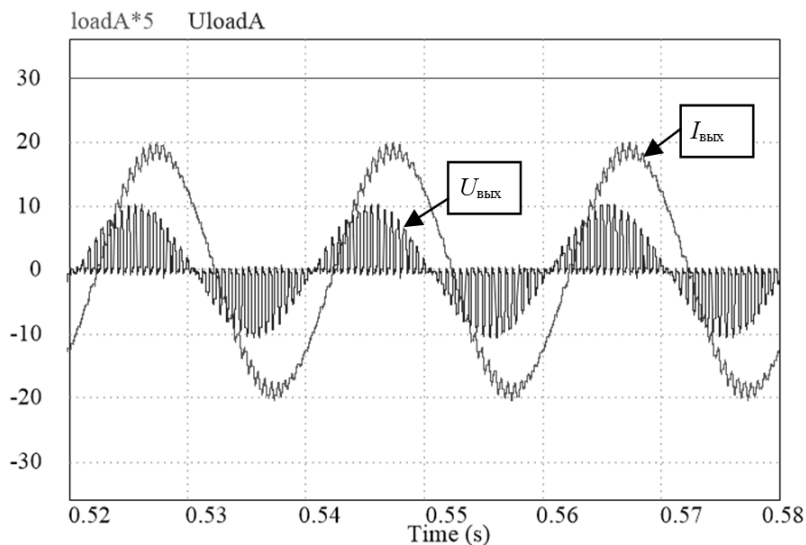


Рис. 11. Осциллограммы выходного напряжения и тока регулятора в программе PSIM

зователя выбраны емкостью  $C = 20$  мкФ, с возможностью увеличения до 80 мкФ (путем соединения в параллель) и входной дроссель составляет  $L = 812$  мкГн.

Частота коммутации составляет 1,8 кГц, что соответствует требуемому диапазону при оценке качества токов регулятора (рис. 10 и 11).

### Заключение

1. Проанализирована модель трехфазного регулятора переменного напряжения с малым числом ключей, используя метод алгебраизации дифференциальных уравнений и пакет моделирования PSIM.

2. Определено расширение области применимости прямого метода расчета энергетических показателей конверторов [21] на их модели с переменными параметрами. Получены действующие

значения высших гармоник токов и напряжений. Это позволило оценить искажение кривой тока и напряжения по отношению к их первым гармоникам. На рабочем участке  $K_f$  не превысил 10 %

3. Определен оптимальный диапазон частоты коммутации ключей по отношению к коэффициенту гармоник входного и выходного тока регулятора. Он соответствует частотам выше 2 кГц.

4. Результаты эксперимента сходятся с результатами расчета регулятора переменного напряжения в пределах 5 %. Возможности использования цифровой системы управления позволили реализовать систему слежения за напряжением нагрузки регулятора.

5. Благодаря малому числу ключей ресурсы предложенной системы управления были перенаправлены на организацию дополнительных систем слежения, в том числе за током нагрузки.

### Литература/References

1. Information of Firms Danfoss (Denmark), Emerson (Sweden) etc. Available at: <http://www.danfoss.com/>, <http://www.emerson.com/> (accessed 10.11.2018).

2. Шепелин В.Ф., Кальсин В.Н., Донской Н.В., Фёдоров Б.С., Никитин А.С. Тиристорные системы плавного пуска высоковольтных двигателей на базе устройств серии УБПВД. Научно-исследовательские и проектные разработки. Инжиниринг. С. 166–168. [Shepelin V.F., Kalsin V.N., Donskoi N.V., Fedorov B.S., Nikitin A.S. [Thyristor Systems of Soft Start of High-Voltage Motors Based on Devices of the UBPVD Series]. *Research and Development. Engineering*, pp. 166–168. (in Russ.)]

3. Ткачук А., Кривовяз В., Копырин В., Силуков А. Тиристорный преобразователь для плавного пуска высоковольтных асинхронных электродвигателей. Силовая электроника. 2007. № 1. С. 54–57. [Tkachuk A., Krivoviyaz V., Kopyrin V., Silukov A. [Thyristor Converter for Soft Starting of Asynchronous Electric Motors]. *Silovaya elektronika* [Power Electronics], 2007, no. 1, pp. 54–57. (in Russ.)]

4. Сравнительный анализ вариантов технического решения плавного пуска мощных асинхронных электродвигателей. <http://www.nppsatur.ru/article.htm> (дата обращения: 10.10.2018). [Srvnritel'nyy analiz variantov tekhnicheskogo resheniya plavnogo puskа moshchnykh asinkhronnykh elektrodvigatelay] [Comparative Analysis of Designs for Soft Start-up of Powerful Asynchronous Electric Motors]. Available at: <http://www.nppsatur.ru/article.htm> (accessed 10.10.2018).]



5. Divan D., Sastry J., Prasai A., Johal H. Thin AC Converters – A New Approach for Making Existing Grid Assets Smart and Controllable. *Proc. PESC 2008*, CD, pp. 1695–1701. DOI: 10.1109/PESC.2008.4592186
6. Montero-Hernandez O.C., Enjeti P.N. Application of a Boost AC-AC Converter to Compensate for Voltage Sags in Electric Power Distribution Systems. *PESC Proc.*, 2000, vol. 1, pp. 470–475. DOI: 10.1109/PESC.2000.878905
7. Fedyczak Z., Klutta M., Strzelecki R. Three-Phase AC-AC Semiconductor Transformer Topologies and Applications. *Proc. 2nd Conf. PEDC*, 2001, pp. 25–38.
8. Peng F.Z., Chen L., Zhang F. Simple Topologies of PWM AC-AC Converters. *IEEE Power Electronics Letters*, 2003, vol. 1, no. 1, pp. 10–13. DOI: 10.1109/LPEL.2003.814961
9. Floricaud D., Dumitrescu M., Popa I., Ivanov S. Basic Topologies of Direct PWM AC Choppers. *Annals of the University of Craiova. Electrical Eng. Series*, 2006, no. 30b, pp. 141–146.
10. Prasai A., Divan D. Dynamic Capacitor-VAR and Harmonic Compensation without Inverters. *Proc. EPE*, 2011, CD-ROM, file 831.
11. Liu Q., Deng Y., He X. A Novel AC-AC Shunt Active Power Filter without Large Energy Storage. *EPE*, 2011, CD-ROM, file 356.
12. Fedyczak Z., Strzelecki R., Sozański K. Review of Three-Phase PWM AC/AC Semiconductor Transformer Topologies and Applications. *Proc. Power Electronics Electrical Drives Automation & Motion – SPEEDAM*, 2002, pp. B5-19–24.
13. Fedyczak Z., Szcześniak P., Kaniewski J. Direct PWM AC Choppers and Frequency Converters. *W: Measurements Models Systems and Design*, ed. by J. Korbicz. Warszawa: Wydaw. Komunikacji i Łączności, 2007, pp. 393–424. ISBN: 978-83-206-1644-6
14. Ahmed N.A., Miyatake M., Lee H.W., Nakaoka M. A Novel Circuit Topology of Three-Phase Direct AC-AC PWM Voltage Regulator. *Proc. Industry Applications Conference, 41st IAS Annual Meeting*, 2006, pp. 2076–2081. DOI: 10.1109/IAS.2006.256821
15. Petry C.A., Fagundes J.C.S., Barbi I. New AC-AC Converter Topologies. *Proc. Industrial Electronics, ISIE '03*, 2003, vol. 1, pp. 427–431. DOI: 10.1109/ISIE.2003.1267287
16. Khan M.M., Rana A., Dong F. Improved AC/AC Choppers-Based Voltage Regulator Designs. *IET Power Electronics*, 2014, vol. 7, iss. 8, pp. 1989–2000. DOI: 10.1049/iet-pel.2013.0699
17. Petry C.A., Fagundes J.C., Barbi I. New Direct AC-AC Converters Using Switching Modules Solving the Commutation Problem. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Montreal, Que*, 2006, pp. 864–869. DOI: 10.1109/ISIE.2006.295748
18. 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, no. 4, pp. 2637–2647. DOI: 10.1109/TIA.2013.2290834
19. Alaei R., Khajehoddin S.A., Xu W. A Bidirectional AC/AC Multilevel Converter. *Proc. Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE*, 2015, pp. 2610–2615. DOI: 10.1109/ECCE.2015.7310026
20. Muneshima M., Nishida Y. A Multilevel AC-AC Conversion System and Control Method Using Y-Connected H-Bridge Circuits and Bidirectional Switches. *Proc. Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE*, 2013, pp. 4008–4013. DOI: 10.1109/ECCE.2013.6647232
21. Udovichenko A.V., Zinoviev G.S. AC Voltage Regulators with Switched Capacitors. *IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC)*, Varna, 2016, pp. 44–49. DOI: 10.1109/EPEPEMC.2016.7751972
22. Зиновьев Г.С. Повышающе-понижающий регулятор переменного напряжения. Патент РФ № 2580677; опубл. 2014, Бюл. № 10. [Zinoviev G.S. *Povyshayushche-ponizhayushchiy regulyator peremennogo napryazheniya* [Buck-Boost Regulator of Alternating Voltage]. Patent RF, no. 2580677, 2014.]
23. Datasheet Atmega 128. Available at: [http://www.atmel.com/dyn/resources/prod\\_documents/doc2467.pdf](http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc2467.pdf) (accessed 10.11.2018).
24. Евстифеев А.В. Микроконтроллеры AVR семейств Tiny и Mega фирмы ATMEL, 2-е изд., стер. М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2005. 560 с. [Evstifeev A.V. *Mikrokontrollery AVR semeystv Tiny i Mega firmy ATMEL* [AVR Microcontrollers of the Tiny and Mega Families of ATMEL]. 2nd ed., sr. Moscow, Publishing House “Dodeka-XXI”, 2005. 560 p.]

**Удовиченко Алексей Вячеславович**, канд. техн. наук, доцент, кафедра «Электроника и электротехника», Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск; udovichenko@corp.nstu.ru.

**Зиновьев Геннадий Степанович**, д-р техн. наук, профессор, кафедра «Электроника и электротехника», Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск; genstep@mail.ru.

**Гришанов Евгений Валерьевич**, младший научный сотрудник, кафедра «Электроника и электротехника», Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск; e.grishanov@corp.nstu.ru.

**Жарков Максим Андреевич**, ассистент, кафедра «Электроника и электротехника», Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск; maks.zharkoff@yandex.ru.

*Поступила в редакцию 15 октября 2018 г.*

---

DOI: 10.14529/power180409

## VOLTAGE REGULATOR WITH A FEW SWITCHES AND A DIGITAL CONTROL SYSTEM

**A.V. Udovichenko**, udovichenko@corp.nstu.ru,

**G.S. Zinoviev**, genstep@mail.ru,

**E.V. Grishanov**, e.grishanov@corp.nstu.ru,

**M.A. Zharkov**, maks.zharkoff@yandex.ru

*Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation*

The paper considers a new three-phase AC voltage regulator with a few switches. The proposed converter is buck-boost with sinusoidal input and output currents. A calculating method of AC voltage regulator currents using the highest harmonics is proposed. Dependences of harmonic coefficients on the modulation depth were obtained using the ADE method, and the results were compared to the simulation results. The evaluation of the output and input currents quality relative to the switching frequency allowed choosing the optimal frequency range for the experimental layout. The digital control system of the AC voltage regulator with a small number of switches, which is based on the Atmel AVR Atmega microcontroller, was reviewed and analyzed. The paper also presents the diagrams of currents and voltages of the regulator with a digital control system obtained during the experiment.

*Keywords: buck-boost regulator, switched capacitors, low-voltage AC voltage regulators, direct calculation method.*

*Received 15 October 2018*

---

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Регулятор переменного напряжения с малым числом ключей и цифровым управлением / А.В. Удовиченко, Г.С. Зиновьев, Е.В. Гришанов, М.А. Жарков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2018. – Т. 18, № 4. – С. 79–88. DOI: 10.14529/power180409

### FOR CITATION

Udovichenko A.V., Zinoviev G.S., Grishanov E.V., Zharkov M.A. Voltage Regulator with a Few Switches and a Digital Control System. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2018, vol. 18, no. 4, pp. 79–88. (in Russ.) DOI: 10.14529/power180409