



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-1-46-51>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 533.9.072

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ ДЛЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ РАЗРЯДА БАРЬЕРНОГО ТИПА

А.Л. БАРАХОЕВ, О.И. ТИХОН, В.В. ТУБОЛЬЦЕВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 20 марта 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы, касающиеся особенностей работы и настройки режимов высоковольтного импульсного источника питания на основе последовательного автономного резонансного инвертора с обратными диодами, использованного для возбуждения разряда атмосферного давления барьерного типа. Указывается, что характерными особенностями работы автономных резонансных инверторов является возникновение затухающих колебаний напряжения в LC-контуре инвертора, а также зависимость выходного переменного напряжения от отношения рабочей частоты инвертора (частота открытия тиристоров) к собственной резонансной частоте LC-контур. В зависимости от этого отношения инвертор может работать в режиме прерывистого, граничного и непрерывного тока. Амплитуда и форма выходного напряжения инвертора контролировались при помощи делителя напряжения 1:1000 осциллографом С1-65А. Вид управляющих импульсов для отпирания тиристоров получен при помощи осциллографа С1-167. Установлено, что при несимметричном следовании управляющих импульсов друг относительно друга вследствие особенностей работы повышающих трансформаторов величина высоковольтного переменного напряжения на выходе инвертора оказывается недостаточной для возбуждения разряда атмосферного давления барьерного типа. В случае симметрии управляющих импульсов величина напряжения на выходе инверторного каскада достигает требуемых для пробоя диэлектрической среды величин. Получены осциллограммы выходного напряжения инвертора при регулировании его рабочей частоты. Показано, что амплитудное значение напряжения на газоразрядной нагрузке увеличивается по мере повышения рабочей частоты инвертора. Для частоты управляющих импульсов 250 Гц значение выходного амплитудного напряжения инвертора составило 3,4 кВ, для 460 Гц – 4,0 кВ, а для 550 Гц – 4,2 кВ.

Ключевые слова: барьерный разряд, полумостовой резонансный инвертор, высоковольтные импульсы.

Конфликт интересов Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности. Авторы выражают благодарность Будько Г.П. за помощь в снятии электрических характеристик инвертора.

Для цитирования. Барахоев А.Л., Тихон О.И., Тубольцев В.В. Исследование режимов работы высоковольтного источника питания для возбуждения разряда барьерного типа. Доклады БГУИР. 2021; 19(1): 46-51.

STUDY OF THE OPERATING MODES OF THE HIGH VOLTAGE POWER SOURCE FOR BARRIER TYPE DISCHARGE EXCITATION

ANDREY L. BARAKHOEV, OLEG I. TIKHON, VLADISLAV V. TUBOLTSEV

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 20 March 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

Abstract. The issues related to the features of operation and modes setting of a high-voltage switching power source based on a sequential autonomous resonant inverter with reverse diodes used to excite an atmospheric pressure barrier type discharge are discussed in the article. It is indicated that the characteristic features of the autonomous resonant inverters operation are the occurrence of damped voltage fluctuations in the LC circuit of the inverter, as well as the dependence of the output alternating voltage on the ratio of the inverter operating frequency (thyristor switching frequency) to the natural resonant frequency of the LC circuit. Depending on this ratio, the inverter can operate in discontinuous, boundary and continuous current mode. The amplitude and shape of the inverter output voltage were controlled using a 1:1000 voltage divider with a C1-65A oscilloscope. The shape of the gate trigger pulses was obtained using a C1-167 oscilloscope. It is established that when the gate trigger pulses are asymmetrical relative to each other due to the operation features of the step-up transformers, the value of the alternating high-voltage at the inverter output is insufficient to excite the atmospheric pressure barrier type discharge. In the case of the gate trigger pulses symmetry, the output voltage of the inverter stage reaches the values required for the breakdown of the dielectric medium. Oscillograms of the inverter output voltage while adjusting its operating frequency are obtained. It is shown that the amplitude value of the voltage at the gas-discharge load increases as the operating frequency of the inverter increases. For the gate trigger pulses frequency of 250 Hz the value of the inverter output voltage amplitude was 3.4 kV, for 460 Hz – 4.0 kV, and for 550 Hz – 4.2 kV.

Keywords: barrier discharge, half-bridge resonant inverter, high voltage impulses.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

Gratitude. The authors are grateful to Budko G.P. for help in measuring of electrical characteristics of the inverter.

For citation. Barakhoev A.L., Tikhon O.I., Tuboltsev V.V. Study of the operating modes of the high voltage power source for barrier type discharge excitation. Doklady BGUIR. 2021; 19(1): 46-51.

Введение

Барьерный разряд – вид газового разряда, возникающий при подведении переменного тока высокого напряжения к электродам при условии, что хотя бы один из них отделен от газового промежутка диэлектрическим барьером [1–3]. Технические приложения барьерного разряда нашли широкое применение в промышленности, например, для водоподготовки, очистки и модификации поверхностей, в эксимерных лампах и плазменных панелях телевизоров и т. д. [3]. В производстве изделий электронной техники интерес к разрядным системам барьерного типа обусловлен возможностью использовать их для сухой очистки кремниевых пластин от органических загрязнений, а также для удаления фоторезистивных маскирующих покрытий, не используя при этом вакуумное оборудование [4–6]. Для этого необходимо комплексное решение задач обеспечения стабильной и надежной работы как газоразрядных систем, так и источников их питания.

Методика проведения эксперимента

Для осуществления реакции синтеза озона в разряде барьерного типа необходимо получить импульсы высоковольтного напряжения амплитудой порядка 3 кВ на 1 мм разрядного промежутка [1]. Повышение концентрации озона достигается за счет увеличения частоты следования высоковольтных импульсов до нескольких десятков килогерц [7], а также изменением величины амплитуды напряжения высоковольтных разрядных импульсов.

Для питания разрядного модуля атмосферного давления барьерного типа в виде кожухотрубчатого теплообменника с несколькими параллельно соединенными элементами использован преобразователь частоты, состоящий из выпрямителя и полумостового резонансного инвертора с повышающими трансформаторами и обратно включенными диодами, схема которого показана на рис. 1. Газоразрядная система в виде трех параллельно соединенных трубчатых стеклоэлектродов как нагрузка E1, E2, E3 включена в диагональ инвертора через высоковольтные трансформаторы T1, T2.

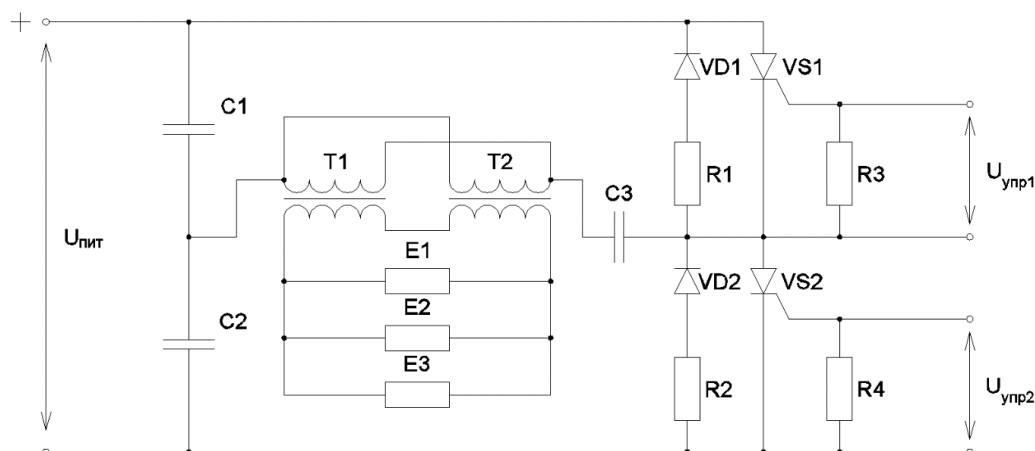


Рис. 1. Принципиальная схема полумостового резонансного инвертора
Fig. 1. Half-bridge resonant inverter circuit diagram

Собственная резонансная частота инвертора составляет $f_0 \approx 450$ Гц и рассчитывается исходя из величины индуктивности параллельно соединенных первичных обмоток высоковольтных трансформаторов T1, T2 общей величиной $L \approx 30$ мГн и емкости последовательно включенного конденсатора C3 $C \approx 4$ мкФ [8–10].

Схема управления силовыми тиристорами состоит из мультивибратора на двух однопереходных транзисторах, вырабатывающего две последовательности однополярных импульсов, сдвинутых друг относительно друга на полпериода выходного напряжения. Частота управляющих импульсов f регулируется в диапазоне от 250 до 550 Гц. Запирание тиристоров происходит в момент спада зарядного тока до нуля при полной зарядке конденсатора C3.

Регулировка отдаваемой в нагрузку мощности осуществляется за счет изменения частоты подаваемых с мультивибратора управляющих импульсов, которые определяют рабочую частоту инвертора. Форма управляющих импульсов снималась при помощи осциллографа С1-167.

Форма выходного высоковольтного напряжения инвертора снималась при помощи делителя 1:1000 осциллографом С1-65А.

Результаты и их обсуждение

Форма управляющих импульсов показана на рис. 2. Цена одного деления осциллограмм по горизонтали составляет 1 мс, по вертикали – 1 В.

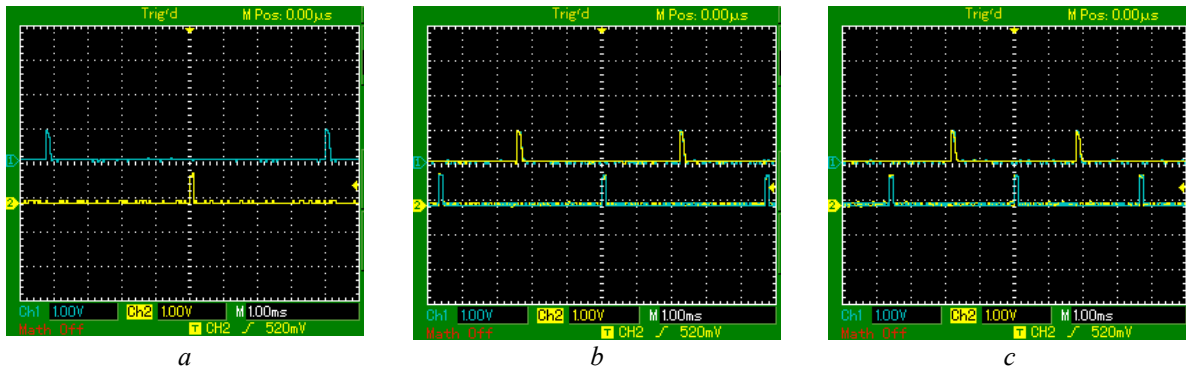


Рис. 2. Вид управляющих импульсов при частоте f : 250 Гц (a); 460 Гц (b); 550 Гц (c)
Fig. 2. Shape of gate trigger pulses when repetition rate f is: 250 Hz (a); 460 Hz (b); 550 Hz (c)

При частоте следования импульсов управления, меньшей резонансной частоты инвертора $f < f_0$, последний работает в режиме прерывистого тока (РПТ), при $f > f_0$ – в режиме непрерывного тока (РНТ) с формой выходного напряжения, близкой к синусоидальной [8–10]. Форма выходного высоковольтного напряжения инвертора показана на рис. 3, a для РПТ и рис. 3, b, c для РНТ. Цена одного деления осциллограмм по горизонтали – 1 мс, по вертикали – 2 В.

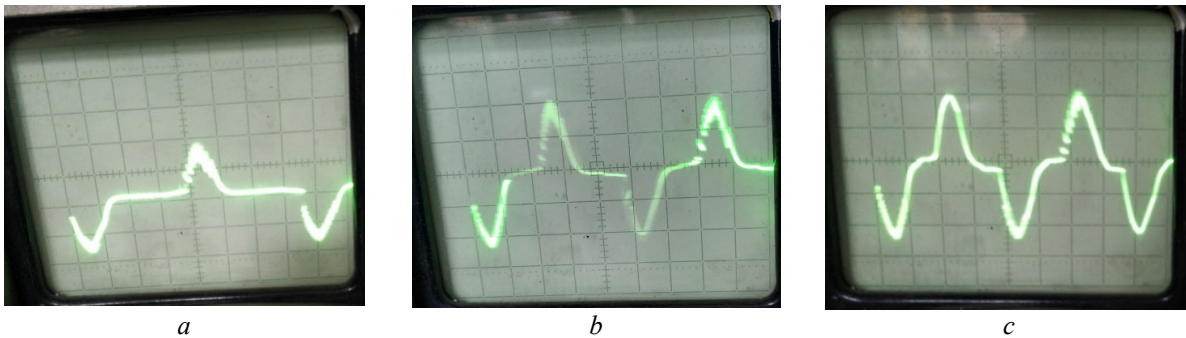


Рис. 3. Форма высоковольтного напряжения на выходе инвертора при частоте f управляющих импульсов: 250 Гц (a); 460 Гц (b); 550 Гц (c)
Fig. 3. Shape of inverter output high-voltage when gate trigger pulses repetition rate f is: 250 Hz (a); 460 Hz (b); 550 Hz (c)

При работе инвертора в РНТ тиристоры включаются в момент неполного разряда конденсатора С3. Из этого следует, что увеличение частоты следования управляющих импульсов в РНТ приведет к увеличению амплитуды выходного напряжения инвертора вплоть до $f \leq 1,25f_0$ (при этих условиях остаточный заряд на конденсаторе максимален; при $f > 2f_0$ происходит открытие второго тиристора до запираения первого и, как следствие, срыв инвертирования) [8–10]. Зависимость измеренного амплитудного значения высоковольтного напряжения на выходе инвертора от частоты управляющих импульсов показана на рис. 4.

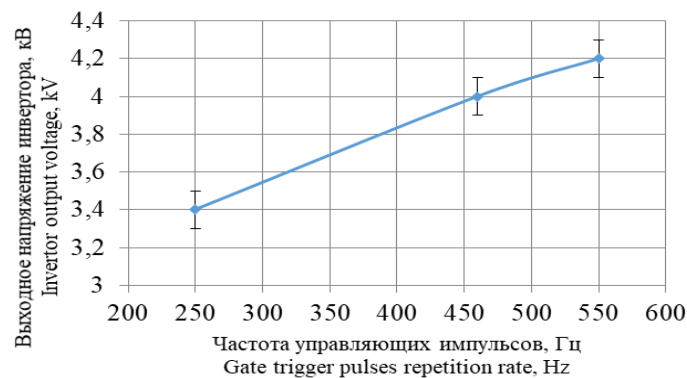


Рис. 4. Зависимость высоковольтного напряжения на выходе инвертора от частоты управляющих импульсов
Fig. 4. Dependency of the inverter output high-voltage on the gate trigger pulses repetition rate

Заклучение

Получены экспериментальные данные и изучена работа источника высоковольтного импульсного напряжения с использованием схемы полумостового резонансного инвертора с обратными диодами на нагрузку в виде разряда атмосферного давления барьерного типа в горизонтально расположенных кожухотрубчатых газоразрядных элементах.

В предварительных запусках представленный источник питания показал возможность стабильного регулирования мощности, отдаваемой в разряд, и, как следствие, регулирования концентрации озона в озono-воздушной смеси.

Список литературы

1. Автаева С.В. *Барьерный разряд. Исследование и применение*. Бишкек: КРСУ; 2009.
2. Fridman A., Gutsol A., Cho Y.I. Non-Thermal Atmospheric Pressure Plasma. *Advances in Heat Transfer*. 2007;40:1-142. DOI: 10.1016/S0065-2717(07)40001-6
3. Kohli R., Mittal K.L. *Developments in Surface Contamination and Cleaning – Contaminant Removal and Monitoring*. Oxford: William Andrew Publishing; 2013.
4. Huynh C.K., Mitchener J.C. Plasma versus ozone photoresist ashing: Temperature effects on process induced mobile ion contamination. *Journal of Vacuum Science & Technology B*. 1991;9:353. DOI: 10.1116/1.585574
5. Gardner W.L., Baddorf A.P., Holber W.M. Temperature and concentration effects on ozone ashing of photoresist. *Journal of Vacuum Science & Technology A*. 1997;15:1409. DOI: 10.1116/1.580551
6. Yi C.H., Kim T., Kim K.H., Kano W.S., Kim J.H., Hong S.K.. Atmospheric pressure plasma ashing for display manufacturing. *Japanese Journal of Applied Physics*. 2008;47:6965-6969. DOI: 10.1143/JJAP.47.6965
7. Suksri A., Karnchanalekha K., Tonmitra K., Apiratikul P. A comparative study on suitable high voltage sources for ozone generation. *2009 6th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*. 2009;2:296-299. DOI: 10.1109/ECTICON.2009.5137012
8. Томашевский Д.Н. *Автономные инверторы*. Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та; 2019.
9. Зиновьев, Г.С. *Основы силовой электроники*. Новосибирск: НГТУ; 2003.
10. Бальян Р.Х., Сиверс М.А. *Тиристорные генераторы и инверторы*. Ленинград: Энергоиздат; 1982.

References

1. Avtaeva S. [*Barrier discharge. Research and application*]. Bishkek: KRSU; 2009. (In Russ.)
2. Fridman A., Gutsol A., Cho Y.I. Non-Thermal Atmospheric Pressure Plasma. *Advances in Heat Transfer*. 2007;40:1-142. DOI: 10.1016/S0065-2717(07)40001-6
3. Kohli R., Mittal K.L. *Developments in Surface Contamination and Cleaning – Contaminant Removal and Monitoring*. Oxford: William Andrew Publishing; 2013.
4. Huynh C.K., Mitchener J.C. Plasma versus ozone photoresist ashing: Temperature effects on process induced mobile ion contamination. *Journal of Vacuum Science & Technology B*. 1991;9:353. DOI: 10.1116/1.585574
5. Gardner W.L., Baddorf A.P., Holber W.M. Temperature and concentration effects on ozone ashing of photoresist. *Journal of Vacuum Science & Technology A*. 1997;15:1409. DOI: 10.1116/1.580551
6. Yi C.H., Kim T., Kim K.H., Kano W.S., Kim J.H., Hong S.K.. Atmospheric pressure plasma ashing for display manufacturing. *Japanese Journal of Applied Physics*. 2008;47:6965-6969. DOI: 10.1143/JJAP.47.6965
7. Suksri A., Karnchanalekha K., Tonmitra K., Apiratikul P. A comparative study on suitable high voltage sources for ozone generation. *2009 6th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*. 2009;2:296-299. DOI: 10.1109/ECTICON.2009.5137012
8. Tomashevskiy D.N. [*Autonomous inverters*]. Ekaterinburg: UFU; 2019. (In Russ.)
9. Zinoviev G.S. [*Fundamentals of Power Electronics*]. Novosibirsk: NSTU; 2003. (In Russ.)
10. Balian R., Sivers A. [*Thyristor generator and inverters*]. Leningrad: Energoizdat; 1982. (In Russ.)

Вклад авторов

Барахоев А.Л. определил цели и задачи исследования, принял участие в обработке и интерпретации полученных результатов.

Тубольцев В.В. и Тихон О.И. приняли участие в снятии электрических характеристик.

Authors' contribution

Barakhoev A.L. defined the objectives of the research, took part in the processing and interpretation of research results.

Tuboltsev V.V. and Tikhon O.I. taken part in the measuring of electrical characteristics.

Сведения об авторах

Барахоев А.Л., аспирант кафедры электронной техники и технологии Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Тихон О.И., аспирант кафедры электронной техники и технологии Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Тубольцев В.В., магистрант кафедры электронной техники и технологии Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, П. Бровки, д. 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +375-44-760-08-74;
andreibarahoev@gmail.com
Барахоев Андрей Леонидович

Information about the authors

Barakhoev A.L., PhD Student of the Information Radiotechnologies Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Tikhon O.I., PhD Student of the Information Radiotechnologies Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Tuboltsev V.V., Master Student of the Information Radiotechnologies Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics.
tel. +375-44-760-08-74;
andreibarahoev@gmail.com
Barakhoev Andrey Leonidovich