

С. В. Шапиро, В. В. Жидков

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ НЕПОСРЕДСТВЕННЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ПОВЫШЕННОЙ ЧАСТОТЫ ДЛЯ ГЕНЕРАТОРОВ ОЗОНА

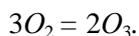
В статье дается описание и приводятся результаты компьютерного моделирования и экспериментального исследования высокочастотного полупроводникового озонатора с источником питания, представляющим собой инвертор с непосредственной связью. Определена зависимость производительности озонатора от частоты. Показано, что небольшая модуляция напряжения на озонаторе с частотой не оказывает существенного влияния на производительность озонатора. *Трехфазная звезда транзисторов; трехфазная звезда конденсаторов; озонатор; барьерный разряд; коммутирующий контур*

Наиболее эффективными генераторами озона при промышленном производстве озона являются озонаторы повышенной частоты (10–20 кГц) [1]. Высокая частота формируется полупроводниковыми преобразователями промышленной частоты в повышенную.

1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

В научно-исследовательской лаборатории кафедры физики Уфимской государственной академии экономики и сервиса разработан преобразователь трехфазного тока промышленной частоты в однофазный ток повышенной частоты с непосредственной связью, т. е. без звена постоянного тока [4, 5]. В качестве высокочастотного озонатора применяется многоэлектродная разрядная трубка (рис. 1), она состоит из: 1 – керамической трубки; 2 – низковольтного электрода; 3 – высоковольтных электродов.

Разрядная трубка выполнена из высококачественного керамического материала с минимально возможным размером пор [6]. Снаружи трубка покрыта тонким проводящим слоем, выполняющим функции низковольтного электрода. Активной зоной служит внутренняя полость разрядной трубки, наполненная кислородосодержащим газом (воздухом или кислородом). Кольцевой бегущий барьерный разряд, возникающий в области высоковольтных электродов, вызывает химическую реакцию превращения молекул кислорода в молекулы озона, в соответствии с молекулярным равенством



Из принципа действия озонатора следует, что количество вырабатываемого озона (его масса) прямо пропорциональна частоте электрических разрядов [1, 2]. При увеличении

мощности озонатора возрастает его нагрев, определяемый количеством тепла, выделяемого электрическими разрядами, поэтому в активную зону разрядной трубки подается предварительно охлажденный, например, методом Джоуля-Томпсона, кислородсодержащий газ [8].

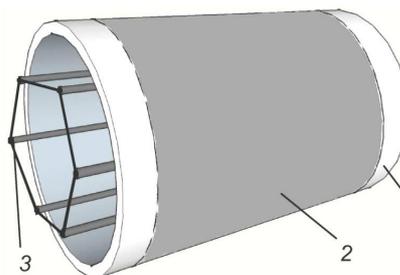


Рис. 1. Разрядная трубка многоэлектродного озонатора

Назначением источника питания озонатора является формирование высокочастотных импульсов напряжения (тока), способных инициировать появление высоковольтных разрядов в межэлектродном пространстве озонатора.

Принципиальная схема высокочастотного источника питания озонатора с трехфазным входом приведена на рис. 2.

Источник питания состоит из включенных в звезду встречно-параллельных транзисторов ($T_{A1} - T_{A2}$, $T_{B1} - T_{B2}$, $T_{C1} - T_{C2}$) и конденсаторов C_A , C_B , C_C . Лучи звезд подсоединены к фазам питающей сети A , B , C . Между центрами звезд (O_1 и O_2) включена коммутирующая цепь $L_K - C_K$ и согласующий трансформатор Tr , к вторичной обмотке которого присоединена нагрузка – разрядный блок озонатора, являющийся емкостной нагрузкой. Согласующий трансформатор преобразовывает напряжение u_H с выхода преобразователя (порядка 220 В) в напряжение, необходимое для питания разрядных трубок озонатора (порядка 10 кВ).

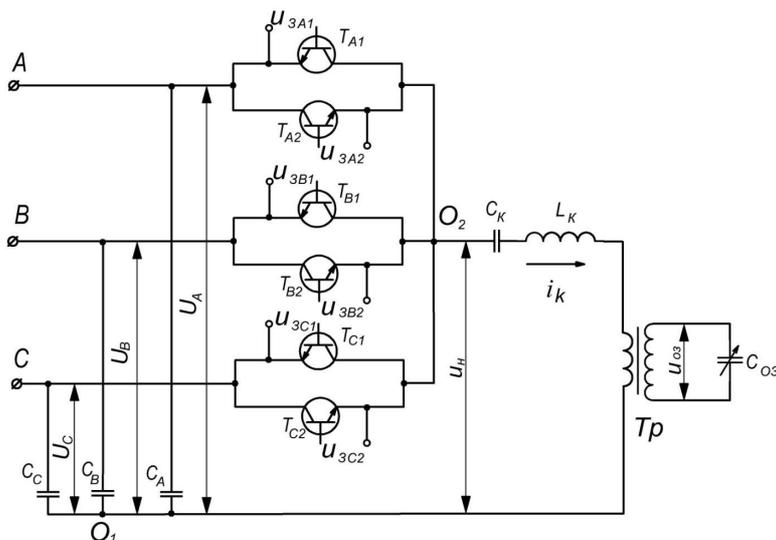


Рис. 2. Принципиальная схема высокочастотного источника питания озонатора

В схеме используются транзисторы серии IGBT, которые работают в ключевом режиме.

Принцип работы данного источника питания озонатора следующий: в момент времени 0 (рис. 3, а), когда напряжения на фазах В – u_B и С – u_C являются максимальными по абсолютной величине, происходит подача управляющего импульса на затвор транзистора T_{B1} . Происходит открытие транзистора, замыкается контур $C_K - L_K - Z_K$ и по цепи нагрузки начинает протекать отрицательный импульс тока i_K . Транзисторы включаются пакетами импульсов в соответствии с циклограммой приведенной на рис. 3, б) [3].

Коммутирующие реактивные элементы $L_K - C_K$ формируют полуволну тока i_K (рис. 4).

Параметры L_K и C_K выбраны таким образом, чтобы длительность полуволны Δt_B была меньше интервала открытия транзистора $t_{и}$. В свою очередь

$$t_{и} < 0,5 T_y = 1/2 f_{03}, \tag{1}$$

где T_y – период чередования управляющих транзисторами импульсов, связанный с частотой питания озонатора f_{03} указанным в формуле (1) соотношением. Величина $t_{и}$ принимается меньше $0,5 T_y$ для предотвращения возникновения короткозамкнутых цепочек в цепи коммутирующих транзисторов T_{A1}, \dots, T_{C2} .

Соотношение (1) между интервалами с открытым транзистором образует «паузы», т. е. интервалы, в течение которых ток i отсутствует. Через $0,5 T_y$ открывается транзистор T_{C2} и по цепи нагрузки снова протекает ток i_K , в другом направлении, обусловленным полярностью фазного напряжения u_C .

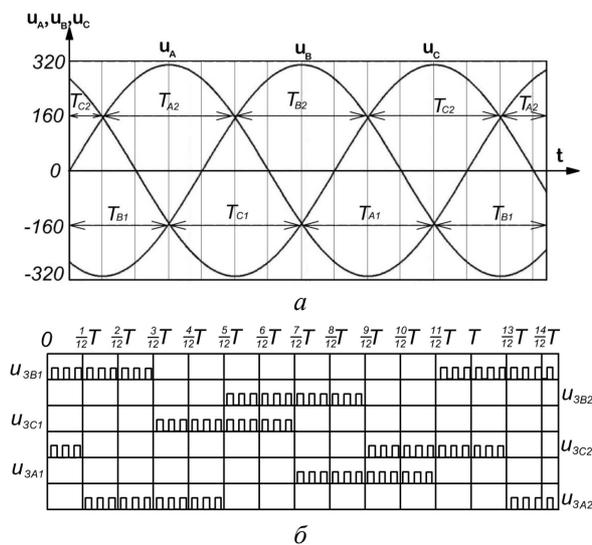


Рис. 3. Порядок работы транзисторов преобразователя: а – кривые изменения фазных напряжений сети; б – импульсы управления транзисторами преобразователя

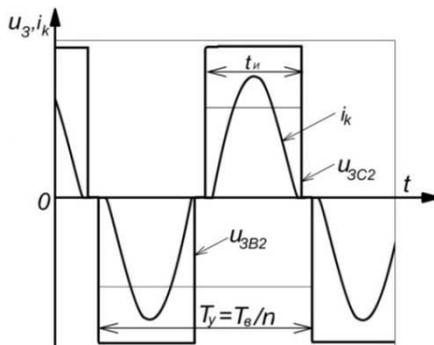


Рис. 4. Управляющие импульсы для одного периода выходного напряжения и ток коммутирующего контура i_K

Таким образом, на выходе преобразователя формируется напряжение u_H повышенной частоты f_{O3} – рис. 5.

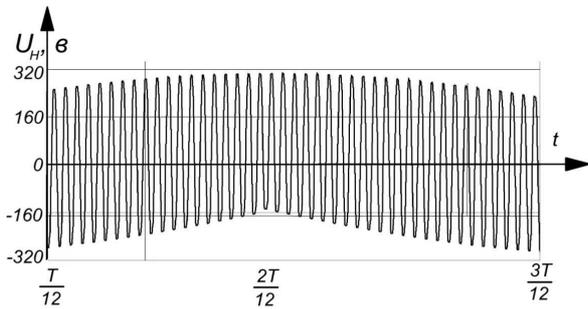


Рис. 5. Осциллограмма напряжения u_H на входе трансформатора источника питания озонатора

Осциллограмма мощности озонатора (P_H) показана на рис. 6.

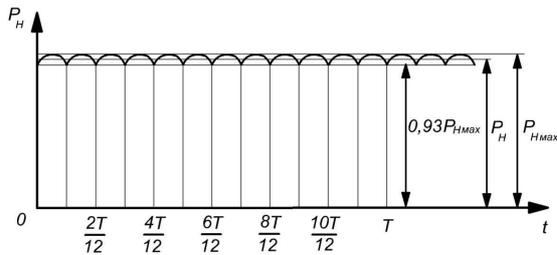


Рис. 6. Осциллограмма мощности озонатора P_H

Как видим, полуволна напряжения на выходе озонатора модулируется с частотой в 3 раза большей частоты питающей сети, при этом амплитуда модуляции колебания тока составляет от $0,703 U_{\Phi m}$ до $U_{\Phi m}$ ($U_{\Phi m}$ – амплитуда фазного напряжения сети).

Поскольку амплитуды модуляции положительной и отрицательной полуволны сдвинуты друг относительно друга на 30° , модуляция мощности P_H , подаваемой на озонатор, осуществляется с частотой, в 6 раз большей частоты сети. Амплитуда этой модуляции равна

$$0,5(1 - \cos^2 15^\circ) = 0,033 P_H.$$

Такая амплитуда модуляции практически не влияет на производительность озонатора.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для того чтобы составить схемотехническую модель, необходимо определить величины L_K и C_K , исходя из производительности озонатора, и, соответственно, номинальной мощности источника питания. Для этого составим операторную (в смысле изображения Карсена – Хеви-

сайда [7]) схему замещения инвертора (рис. 7) для интервала, при котором открыт транзистор T_{B1} . На этой схеме принято, что сопротивление нагрузки имеет активный характер, поэтому $Z_H(p) = Z_H$. Для схем, изображенных на рис. 7 и 8 необходимо отметить, что начальные значения тока i_K и напряжения u_{CK} равны нулю (см. рис. 4).

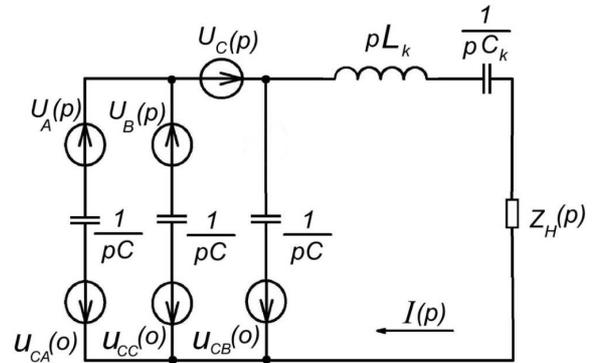


Рис. 7. Операторная схема замещения трехфазного инвертора при открытом транзисторе T_{B2} : где $U_A(p)$, $U_B(p)$, $U_C(p)$ – изображение фазных напряжений сети; $u_{CA}(0)$, $u_{CB}(0)$, $u_{CC}(0)$ – значения напряжений на конденсаторах звезды C_A , C_B , C_C в момент открытия транзистора $t_{B2} > pL_K$ и $1/pC_K$ – операторные сопротивления коммутирующих элементов, $I(p)$ – изображение тока i

Поскольку длительность интервала открытия транзистора $T_{B1} \Delta t_B$ значительно меньше периода изменения напряжения сети, принимаем, что u_A , u_B и u_C в течение этого интервала времени не меняются и поэтому

$$U_A(p) = u_A(0); U_B(p) = u_B(0); U_C(p) = u_C(0),$$

где $u_A(0)$, $u_B(0)$ и $u_C(0)$ – значения фазных напряжений сети в момент открытия T_{B2} . Ясно, что они равны напряжениям на конденсаторах звезды в этот же момент:

$$u_A(0) = u_{CA}(0); u_B(0) = u_{CB}(0); u_C(0) = u_{CC}(0).$$

Путем эквивалентных преобразований электрических цепей приходим к схеме рис. 8.

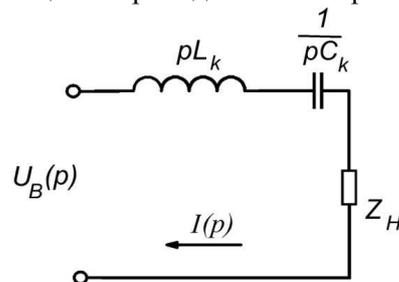


Рис. 8. Операторная схема после эквивалентных преобразований

Расчет этой схемы позволяет определить L_K и C_K следующим образом

$$L_K = \frac{DZ_H}{\omega_k}; \quad (2)$$

$$C_K = \frac{1}{\omega_k DZ_H}, \quad (3)$$

где ω_k – частота коммутации тока i , равная

$$\omega_k = (2,4 \div 2,6)\pi f_{оз}, \quad (4)$$

где D – добротность резонансной цепи нагрузки, обычно выбираемая равной 4÷5; Z_H – эквивалентное активное сопротивление цепи нагрузки, определяемое по формуле

$$Z_H = \frac{u_H^2}{P_H}, \quad (5)$$

где u_H – действующее значение напряжения на первичной обмотке трансформатора Tr (рис. 2), P_H – активная мощность, потребляемая озонатором. Величина $u_H = u_1 / \sqrt{3}$, где u_1 – линейное напряжение сети. Таким образом, мы получили значения $L_K = 25$ мкГн и $C_K = 10$ мкФ. Теперь нам необходимо определить требуемую мощность ИП озонатора. Мощность P_H определяется в зависимости от производительности озонатора [1]:

$$P_H = (18 \div 25) \Pi_{оз}, \quad (\text{Вт})$$

где $\Pi_{оз}$ – производительность озонатора, г/час.

Поскольку озонатор является частотно-зависимой нагрузкой, по отношению к источнику питания, нам необходимо произвести исследование частотных характеристик схемотехнической модели.

3. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Частотные характеристики комплекса – «трехфазный инвертор – нагрузка» моделировались в рамках программы MicroCAP v9 Demo. На рис. 9 изображена схемотехническая модель источника питания озонатора: $T_{A1}, T_{A2}, T_{B1}, T_{B2}, T_{C1}, T_{C2}$ – IGBT транзисторы; $V_{A1}, V_{A2}, V_{B1}, V_{B2}, V_{B3}, V_{C1}, V_{C2}, V_{C3}$ – генераторы управляющих импульсов u_3 на транзисторы; $P_{A1}, P_{A2}, P_{B1}, P_{B2}, P_{C1}, P_{C2}$ – переключатели, обеспечивающие подачу импульсов на транзисторы в заданный момент времени; C_A, C_B, C_C – звезда конденсаторов; C_K, L_K – коммутирующие элементы; U_A, U_B, U_C – источники питающего напряжения; Tr – согласующий трансформатор; R – токоограничительный резистор; оз – емкостная нагрузка.

На этой схеме трехфазная сеть моделируется при помощи трех источников синусоидальной ЭДС U_A, U_B, U_C с амплитудами синусоид равными 310 В и частотой 50 Гц соединенных концами в общую точку, при этом начальные фазы источников равны $0^\circ, 120^\circ$ и 240° соответственно. На транзисторы $T_{A1}, T_{A2}, T_{B1}, T_{B2}, T_{C1}, T_{C2}$ подаются пакеты импульсов u_3 от источников сигналов $V_{A1}, V_{A2}, V_{B1}, V_{B2}, V_{B3}, V_{C1}, V_{C2}, V_{C3}$. Время работы источника сигнала задается при помощи параметра время для начала фронта (он задает задержку включения генераторов $V_{A1} \dots V_{C3}$), а отключение производится при помощи системы программируемых переключателей $P_{A1}, P_{A2}, P_{B1}, P_{B2}, P_{C1}, P_{C2}, P_{C3}$. Измерения токов и напряжений производилось на эквивалентной нагрузке R_H с активным сопротивлением 5 Ом [9].

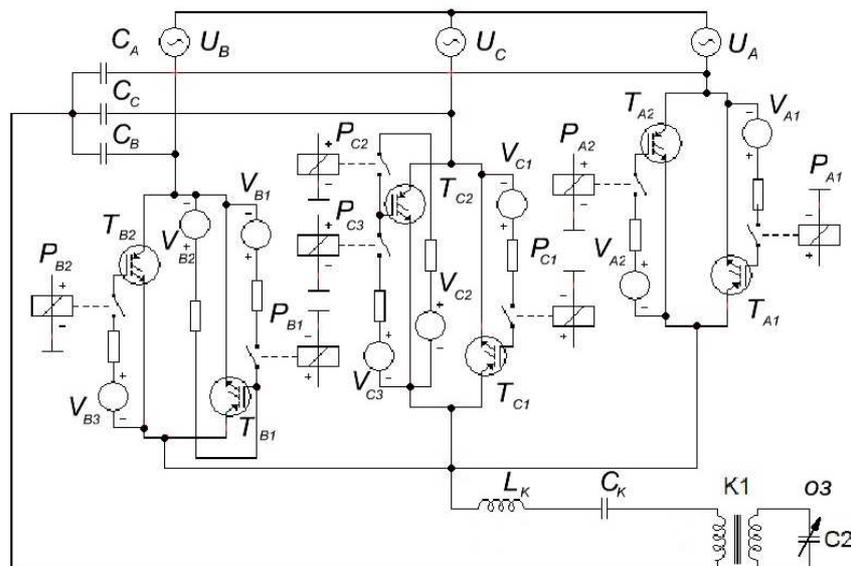


Рис. 9. Схемотехническая модель источника питания озонатора

В качестве переключающих элементов применены силовые транзисторы типа IRG4BC20U со следующими параметрами: $I_{\text{НОМ}} = 6,5 \text{ А}$, $U_{\text{НОМ}} = 600 \text{ В}$, данный транзистор относится к высокочастотной серии UltraFast speed, и предназначен для работы на частотах от 8 до 40 кГц. Величина емкости разделительных конденсаторов $C_A = C_B = C_C = 100 \text{ мкФ}$, $C_K = 10 \text{ мкФ}$, $L_K = 25 \text{ мкГн}$, $R_H = 5 \text{ Ом}$. Амплитудное напряжение фаз сети $u_A = u_B = u_C = 310 \text{ В}$, частота коммутации транзисторов $f_K = 10 \text{ кГц}$, частота сети $f = 50 \text{ Гц}$.

На рис. 10 и 11 приведены полученные на модели частотные характеристики источника питания. Рис. 10 показывает зависимость частотной характеристики от емкости C_K при значениях от 5 мкФ до 30 мкФ, а на рис. 11 показана зависимость частотной характеристики от индуктивности L_K при значениях от 4 мкГн до 50 мкГн. Частотные характеристики приведены в относительных координатах u_H^* , где за базовую величину принято напряжение одной фазы питающей сети.

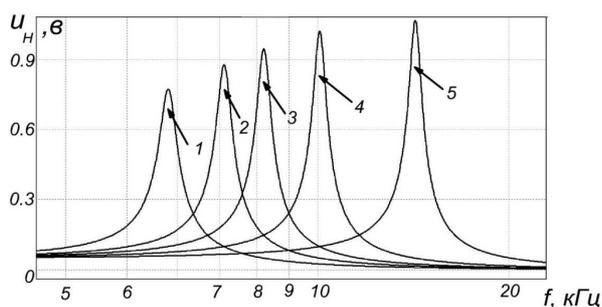


Рис. 10. Частотные характеристики ИП озонатора при изменении емкости C_K :
1 – $C_K = 25 \text{ мкФ}$; 2 – $C_K = 20 \text{ мкФ}$;
3 – $C_K = 15 \text{ мкФ}$; 4 – $C_K = 10 \text{ мкФ}$;
5 – $C_K = 5 \text{ мкФ}$

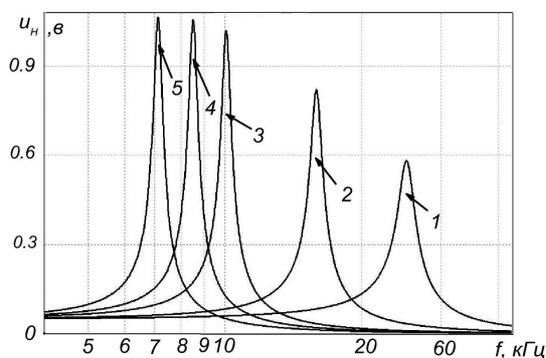


Рис. 11. Частотные характеристики ИП озонатора при изменении индуктивности L_K :
1 – $L_K = 50 \text{ мкГн}$; 2 – $L_K = 30 \text{ мкГн}$;
3 – $L_K = 25 \text{ мкГн}$; 4 – $L_K = 10 \text{ мкГн}$;
5 – $L_K = 4 \text{ мкГн}$

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Из приведенных графиков можно сделать вывод, что изменение рабочей частоты ИП в пределах от 9 до 11 кГц изменяет его выходную мощность в пределах от $0,1 P_H$ до P_H . Эти пределы достаточны для эффективного регулирования производительности озонаторов в промышленных условиях.

5. ПРИЛОЖЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полупроводниковые генераторы озона целесообразно использовать там, где необходимо применение экологически чистого дезинфектора для жидких и газообразных сред, а именно: в системах очистки питьевой воды, городских и промышленных сточных вод, для модификации смазочных материалов автотранспорта, в кожевном производстве.

ВЫВОДЫ

Применение полупроводникового умножителя с непосредственной связью позволяет сократить расход активных материалов, в первую очередь полупроводниковых приборов при питании высокочастотного озонатора.

Исследованный электротехнический комплекс «полупроводниковый умножитель частоты – высокочастотный озонатор» целесообразен потому, что равномерно нагружает все три фазы питающей сети при питании однофазной нагрузки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лунин В. В., Попович В. В., Ткаченко С. Н. Физическая химия озона. М.: МГУ, 1998.
2. Shapiro S. V. High frequency resonance ozonators as mono economical method to receive ozone (статья) // Proceedings regional conference of ozone generation and application to water and waste water treatment. Moscow, 1998.
3. Шапиров С. В. Способ управления преобразователем трехфазного напряжения в высокочастотное однофазное: А. с. № 1545307. Кл. 5H02 М 5/27. Опубликовано 23.02.1990, бюл. № 7.
4. Шапиров С. В., Киселев Р. В. Способ управления преобразователем трёхфазного напряжения в высокочастотное однофазное и устройство для реализации этого способа. Патент России № 233746 РФ, МПК H02 М 5/27. Заявл. 28.06.2007; опубликовано 27.10.2008.
5. Шапиров С. В., Воронов Б. А. Высокочастотный озонатор. Патент России № 275433 РФ, МПК

5 С 01 В13/11. Заявл. 15.04.92; опубликовано 20.03.97, бюл. № 8.

6. **Шапиро С. В., Дунаев С. А.** Парарезонансный способ стабилизации напряжения высокочастотного озонатора и устройство для его реализации. Патент России № 2196729 РФ, МПК 7 С 01 В 13/11. Заявл. 21.03.2000; опубл. 20.03.2003, бюл. № 2.

7. Электротехнический справочник: Том I / Под ред. В. Г. Герасимова и др. М.: МЭИ, 2003.

8. **Шапиро С. В., Амирханов А. Ш., Саенко А. Г.** Высокочастотный озонатор с бегущим барьерным разрядом // Электромеханика, электротехнические комплексы и системы: межвузовск. науч. сб. Уфа: УГАТУ, 2002.

9. **Разевиг В. Д.** Схемотехническое моделирование с помощью Micro-Cap 7. М.: Горячая линия-Телеком, 2003.

ОБ АВТОРАХ

Шапиро Семен Вольфович, проф., зав. каф. физики Уфимск. гос. академии экономики и сервиса. Д-р техн. наук по силовой электронике (г. Киев, 1991). Иссл. в обл. физики и техники высокочастотн. озонаторов.

Жидков Вячеслав Владимирович, асп. той же каф. Дипл. инженер (2007). Иссл. в обл. физики и техники высокочастотн. озонаторов.