

Трехфазный непосредственный инвертор для питания высокочастотного озонатора

ШАПИРО С.В., ЖИДКОВ В.В., ЗИНИН Ю.М.

Приводится описание устройства и принципа действия, результаты анализа, компьютерного моделирования и экспериментального исследования высокочастотного озонатора с полупроводниковым источником питания – инвертора с непосредственной связью. Установлен диапазон частотного регулирования напряжения на озонаторе, определяющим его производительность. Показано, что небольшая модуляция напряжения на озонаторе с частотой, в 6 раз повышающей частоту питающей сети, не оказывает существенного влияния на производительность озонатора.

Ключевые слова: непосредственный преобразователь частоты, частотные характеристики, регулирование мощности, барьерный разряд, коммутирующий контур

Аллотропная модификация кислорода – озон как сильный окислитель, известна достаточно давно [1]. Однако промышленное применение его началось лишь в 20 веке [2]. Первая озонаторная установка была смонтирована в 1906 г. на водоочистой станции в Ницце (Франция). У нас в стране первая озонаторная водоочистная станция была пущена в эксплуатацию в Санкт-Петербурге в 1911 г. [1]. Широкое применение генераторов озона началось лишь во второй половине 20-го века в Европе – сначала во Франции и Швейцарии, а затем в Германии, Италии и других странах. В США только за период с 1990 по 2000 гг. число водоочистных станций, оснащенных генераторами озона, возросло с 30 до 360 (во всех крупных городах) [3].

В статье описываются высокочастотные озонаторы достаточно большой мощности – до нескольких десятков киловатт, предназначенные для использования на промышленных предприятиях. В настоящее время известно несколько десятков разных технологий с использованием озона: для очистки сточных вод практически любых предприятий, предпосевной обработки семян [4], хранения овощей [5, 6], рыбоводства [7], золоторудной промышленности [2], производства полупроводников, жидких кристаллов, сверхпроводников, ферромагнитных пленок [1] и др. [2, 8]. Наряду с крупными промышленными корпорациями (Трейлигаз, Озония, Сименс, ЕМС и др.) существуют десятки малых фирм, специализирующихся на производстве

Results from an analysis, computer simulation, and experimental investigation of the frequency characteristics of a high-frequency semiconductor ozonizer powered from a direct-circuit inverter are presented. The frequency control range of the ozonizer output is determined. It is shown that a small modulation of voltage applied to the ozonizer with a frequency equal to six times the network frequency does not have an essential effect on the ozonizer output.

Key words: direct frequency converter, characteristics, control of power, capacitors, ozonizer, barrier discharge, switching loop

генераторов озона. При этом используются самые разнообразные физические методы его получения; наиболее экономически эффективной является технология с использованием барьерного электрического разряда [2], чаще всего реализуемая озонатором Сименса [1, 2] и его последующими модификациями. Основу конструкции такого озонатора составляют два расположенных концентрически цилиндрических электрода, разделенных диэлектрическим барьером и узким (не более 3 мм) полым промежутком, через который прокачивается кислород или кислородосодержащий газ (чаще всего осушенный воздух). Выделяющееся в активной зоне (полый промежуток между электродами и диэлектрическим барьером) при химической реакции превращения кислорода в озон тепло¹ способствует быстрому разложению образовавшихся молекул озона. Чтобы избежать этого, требуется интенсивное охлаждение электродов, как правило водяное.

В зависимости от степени возбуждения атомарного кислорода различают два вида реакций –

¹ Реакция превращения кислорода в озон в барьерном разряде состоит из двух стадий – сначала молекула кислорода O_2 диссоциирует на две возбужденные атомарные молекулы – $2O$ (эндотермическая реакция), а затем либо оба атома, либо один из них соединяется с молекулой O_2 (экзотермическая реакция). При этом потребление энергии на первой стадии больше, чем ее выделение на второй, т.е. в итоге процесс образования озона имеет эндотермический характер и для обеспечения протекания реакции необходимо затрачивать энергию (электроэнергию), что в конечном счете приводит к выделению в активной зоне тепла.

Герцберга и Шумана-Рунге. В свою очередь, степень возбуждения атомарного кислорода зависит от плотности энергии электрического поля в зоне барьерного разряда. В озонаторе Сименса, у которого электрическое поле в активной зоне равномерное, наибольшая доля молекул образуется под действием реакции Шумана-Ренге, характеризующейся энергией электрона 8,4 эВ. По данным [1], количество образуемого из воздуха озона при этом лежит в диапазоне 60–95 г/(кВт·ж).

В исследовательской лаборатории кафедры физики Уфимской государственной академии экономики и сервиса разработан озонатор с бегущим барьерным разрядом (рис. 1) [9]. Особенность его конструкции заключается в том, что высоковольтный электрод представляет собой совокупность проводящих нитей (в наших озонаторах – из нержавеющей стали).

В таком озонаторе барьерный разряд в течение каждого полупериода изменения напряжения развивается следующим образом. Сначала по мере роста напряжения пробой (ионизация воздуха) происходит в слое, приближенном к высоковольтному электроду, а затем распространяется в более отдаленные слои (бегущий разряд). При этом сопротивление уже ионизированного слоя резко падает, разность потенциалов между внешней границей слоя и внутренней стабилизируется. Это приводит к тому, что доля атомарных молекул кислорода, обусловленных реакцией Герцберга, возрастает. Соответственно снижаются и энергетические затраты на производство озона. Однако основное преимущество нашего озонатора по сравнению с озонатором Сименса не в этом.

В 50-х годах прошлого столетия учеными МГУ Ю.В. Филипповым и Ю.М. Емельяновым была разработана электрическая теория производства озона в барьерном разряде, согласно которой производительность озонатора повышается прямо пропорционально частоте приложенного напряжения [10]. Но при этом также почти пропорционально возрастают удельные потери на единицу поверхности диэлектрического цилиндра, ограничивающего объем активной зоны, где происходит реакция $O_2 \rightarrow O_3$. В связи с этим в высокочастотных озонаторах пришлось применять водяное охлаждение как высоковольтных, так и низковольтных электродов [1], что существенно усложнило их конструкцию. Дело в том, что столб охлаждающей воды между высоковольтным и низковольтным электродами обладает гораздо более низким электрическим сопротивлением, чем сам озонатор, и по существу, закорачивает его.

В конструкции нашего озонатора благодаря существенному увеличению активной зоны по срав-

нению с озонаторами Сименса удалось осуществить воздушное охлаждение высоковольтных электродов методом Джоуля–Томсона [11]. При этом силикагелевые осушители воздуха играют двойную роль – не только абсорбента влаги, но и дросселя, обеспечивающего адиабатическое охлаждение воздуха, подаваемого в активную зону озонатора [11]. Воздух, подаваемый в эту зону, имеет температуру $-10 \text{ } ^\circ\text{C}$, $-20 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Поскольку низковольтные электроды, а вместе с ними и диэлектрический барьер, выполняемый из низкопористой керамики, как и в классическом варианте, охлаждаются водой, то температура озонвоздушной смеси на выходе из активной зоны не превышает $20\text{--}25 \text{ } ^\circ\text{C}$. При такой температуре согласно [1–3] обратная реакция преобразования $O_3 \rightarrow O_2$ длится несколько часов. Следовательно, в барботажную камеру озон доставляется практически без потерь.

Для получения высокой частоты наиболее эффективно использовать полупроводниковые преобразователи частоты [12]. Физические процессы в преобразователях (изменение токов и напряжений на его элементах) существенно зависят от тока озонатора, т.е. оба эти устройства представляют собой единую систему – высокочастотный озонатор с полупроводниковым источником питания или, более кратко, полупроводниковый высокочастотный озонатор [11–13].

На рис. 2 дана принципиальная схема описываемого озонатора. Поскольку сам генератор озона электрически представляет собой нелинейный конденсатор, он изображен на схеме конденсатором C_{O_3} .

Источник питания состоит из включенных по схеме звезды встречно-параллельных транзисторов ($T_{A1}\text{--}T_{A2}$, $T_{B1}\text{--}T_{B2}$, $T_{C1}\text{--}T_{C2}$) 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)

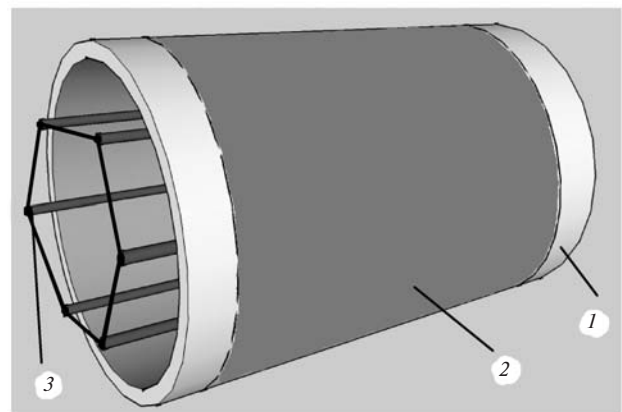


Рис. 1. Разрядная трубка многоэлектродного озонатора: 1 – керамическая труба (диэлектрический барьер); 2 – низковольтный электрод; 3 – высоковольтные электроды

включена коммутирующая цепь L_K-C_K и согласующий трансформатор T_p , к вторичной обмотке которого присоединен разрядный блок озонатора, являющийся емкостной нагрузкой. Согласующий трансформатор преобразовывает напряжение u_H с выхода преобразователя в напряжение, необходимое для питания разрядных трубок озонатора (порядка 10, 15 кВ).

В схеме используются транзисторы серии IGBT с изолированным затвором, которые работают в ключевом режиме. В качестве конденсаторов C_A, C_B, C_C , образующих искусственную нулевую точку O_1 , используются обычные косинусные конденсаторы (используются на промышленных предприятиях для повышения низкого коэффициента мощности) [15]. Если по каким-либо причинам, например из-за превышения допустимого по техническим условиям тока высокой частоты через эти конденсаторы, использовать в качестве C_A-C_C косинусные нельзя, тогда по согласованию с энергоснабжающей организацией можно установить другие марки конденсаторов. Согласно п. 2.3.12 «Правил пользования электрической и тепловой энергией» эта энергоснабжающая организация должна оплачивать предприятию, установившему рассматриваемый озонатор, 25% дополнительной ставки двухставочного тарифа. Следовательно, использование озонатора не только обеспечит предприятие

необходимым озоном, но и позволит получить прибыль за поставку реактивной мощности энергосистеме.

Следует отметить и еще одно преимущество озонатора с непосредственным инвертором по сравнению с озонатором, питаемым автономным инвертором. В предложенном инверторе высшие гармоники, генерируемые транзисторными ключами, замыкаются по контурам $A-(T_{A1}, T_{A2})-O_2-O_1-C_A$; $B-(T_{B1}, T_{B2})-O_2-O_1-C_B$; $C-(T_{C1}, T_{C2})-O_2-O_1-C_A$ (рис. 2) и не выходят в питающую сеть. В автономном инверторе высшие гармоники тока, генерируемые входным выпрямительным мостом, протекают по питающей сети. Поэтому в случае питания озонатора автономным инвертором предприятие, использующее озонатор, вынуждено согласно указанным выше «Правилам» платить энергоснабжающей организации штраф [14].

Рассмотрим принцип работы данного источника питания озонатора. В момент времени 0 и на последующем интервале T_{A1} (рис. 3, а), когда напряжение на фазе $A-u_A$ является максимальным (по абсолютной величине), пакет управляющих импульсов подается на затвор транзистора T_{A1} . Происходит периодическое открытие транзистора, при котором замыкается контур $C_K-L_K-w_{1TP}$ (w_{1TP} – первичная обмотка трансформатора T_p), и по цепи нагрузки начинает протекать импульс тока

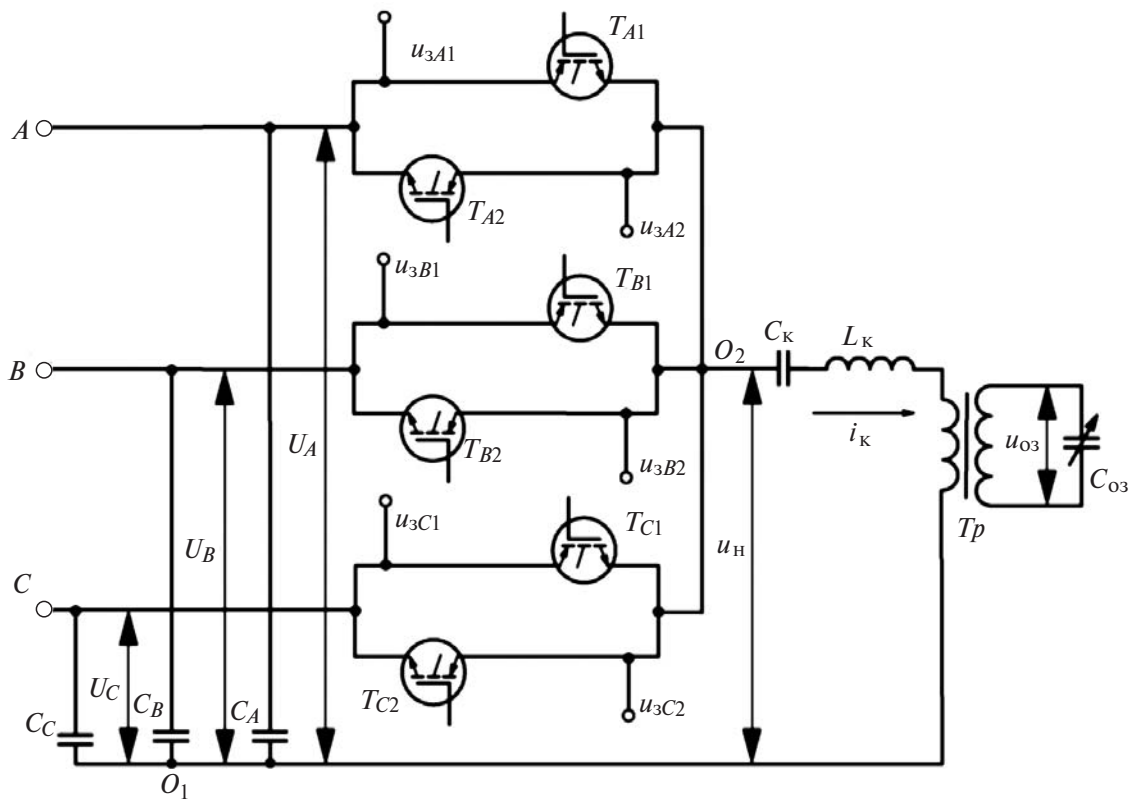


Рис. 2. Принципиальная схема генератора озона с высокочастотным источником питания (полупроводникового озонатора)

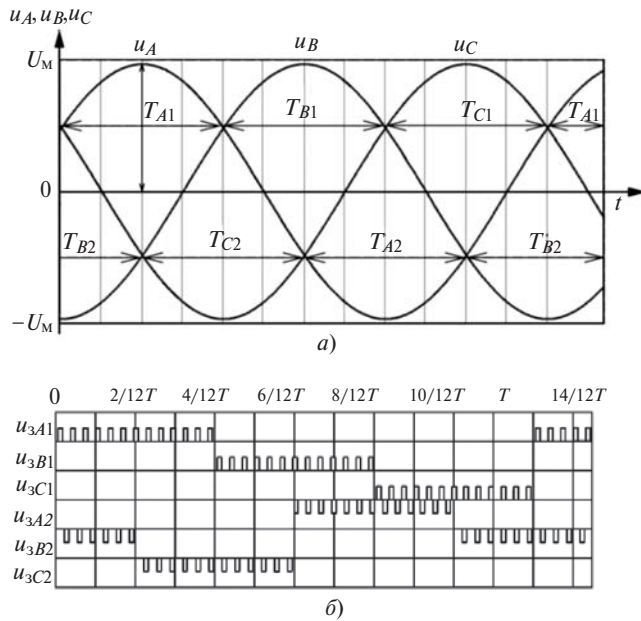


Рис. 3. Порядок работы транзисторов преобразователя: а – кривые изменения фазных напряжений сети; б – импульсы управления транзисторами преобразователя

i_k . Транзистор T_{A1} и все другие включаются пакетами импульсов в соответствии с циклограммой, приведенной на рис. 3,б. Период между двумя соседними импульсами $T_y = T/n$, где $T = 1/f$ – период изменения входного напряжения; n – кратность умножения частоты.

В течение интервала $0,5T_y$ фазное напряжение u_{A1} практически не меняется. В частности, при частоте f_{O3} , равной 10 кГц, это напряжение на первом интервале открытия от момента $t_1 = 0$ до момента $t_2 = 1/2f_{O3} = 0,5 \cdot 10^{-5}$ с изменится на величину

$$\Delta u = U_M \sin \frac{\pi}{3} + \frac{\pi \cdot 10^{-3}}{2} \cdot \frac{U_M}{\omega} \sin \frac{\pi}{3} \gg 0,76 U_M \cdot 10^{-2},$$

т.е. менее чем на 0,1%.

На всех последующих интервалах значение Δu еще меньше. Поэтому далее принимается, что в течение интервала $0,5T_y$ напряжение u_H постоянно.

Коммутирующие реактивные элементы $L_K - C_K$ формируют полуволну тока i_k , график которого представляет собой затухающую синусоиду (рис. 4):

$$i_k(t) = I_{K.M} e^{-d_k t} \sin w_k t, \quad (1)$$

где

$$I_{K.M} = U_A/R_K; \quad d_k = R_K/2L_K; \quad w_k = \sqrt{d_k^2 + \frac{1}{L_K C_K}}. \quad (2)$$

В этих формулах L_K – коммутирующая индуктивность, включающая в себя индуктивность рассеяния трансформатора Tp , R_K и C_K – эквивалент-

ные значения активного сопротивления и емкости выходной цепи инвертора – участка между центрами схем «звезд» транзисторов и конденсаторов O_1 и O_2 . Сопротивление R_K складывается из приведенного к первичной цепи сопротивления обмоток трансформатора Tp и активной составляющей сопротивления озонатора. Емкость C_K определяется по формуле

$$\frac{C_K C_{O3}}{C_K + C_{O3}}, \quad (3)$$

где C_{O3} – приведенная к первичной обмотке трансформатора Tp емкость озонатора.

Поскольку озонатор – нелинейный элемент, то величины R_K и C_{O3} меняются в достаточно больших пределах. Однако параметры L_K и C_K выбираются такими, что

$$C_{O3} = 5C_K; \quad 5R_K < \sqrt{L_K/C_K} \quad (4)$$

на всем диапазоне их изменения.

Из формул (2)–(4) нетрудно заключить, что при этом

$$C_{O3} = (0,8, 1,0)C_K; \quad w_k = \frac{0,9, 1,0}{\sqrt{L_K C_K}}; \quad d_k = (0, 0,1)w_k. \quad (5)$$

На рис. 4 приведены графики изменения импульсов напряжения управления u_3 и тока i_k для одного периода выходного напряжения преобразователя. Как видно, вслед за интервалом открытия транзистора T_{A1} открывается транзистор T_{B2} и по цепи $C_K - L_K - w_{TP}$ вновь протекает точно такой же, как в первом интервале, ток i_k , только с противоположным знаком. Таким образом, на выходе

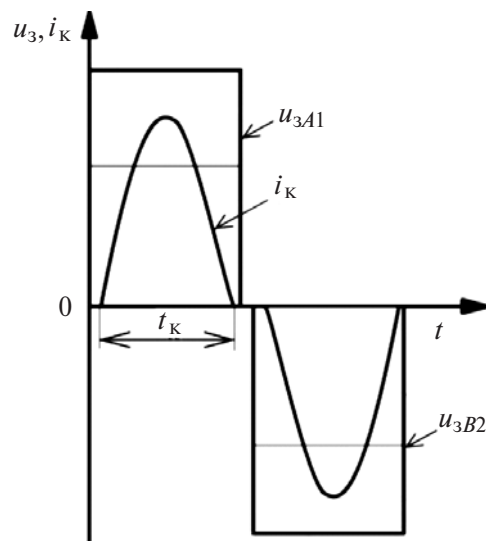


Рис. 4. Графики изменения импульсов напряжения управления и тока коммутирующей контуры для одного периода выходного напряжения

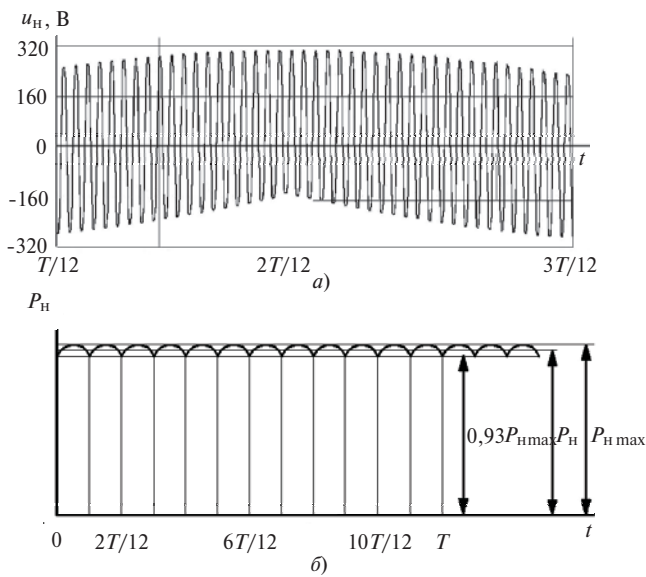


Рис. 5. Осциллограмма напряжения u_n на входе трансформатора источника питания озонатора (а), осциллограмма мощности озонатора P_n (б)

преобразователя формируется напряжение u_n повышенной частоты $f_{O3} = nf$ (рис. 5).

Параметры L_k и C_k определены таким образом, чтобы длительность полуволны t_k была меньше интервала открытия транзистора $t_{и}$. В свою очередь, для предотвращения возникновения короткозамк-

нутых цепочек в цепи коммутирующих транзисторов T_{A1}, \dots, T_{C2} должно выполняться неравенство

$$t_{и} < 0,5T_y = 1/2f_{O3}. \tag{6}$$

Соотношение (6) между интервалами с открытым транзистором объясняет возникновение «паузы», т.е. интервалов, в течение которых ток i_k отсутствует. Наличие пауз между длительностью t_k импульса тока i_k (рис. 4), шириной импульса открытия транзистора $t_{и}$ и полупериодами подачи импульсов T_y позволяет осуществить два вида управления напряжением U_{O3} : широтно-импульсное и частотное. В первом случае частота f_{O3} не меняется, а меняется ширина импульса управления $t_{и}$ в пределах $t_k < t_{и} < 0,5T_y$, а во втором частота f_{O3} меняется в пределах от $f_{O3 \max} = 1/2t_k$ до $f_{O3 \min}$ (практически до любого значения, превышающего частоту сети f не менее чем в 10 раз). Из этих двух видов управления в предлагаемых схемах озонаторов принят частотный вид управления, поскольку при этом диапазон регулирования выходной мощности значительно больше, чем при широтно-импульсном.

Осциллограммы напряжения на рис. 5 получены при исследовании действующей модели полупроводникового озонатора мощностью 0,9 кВт

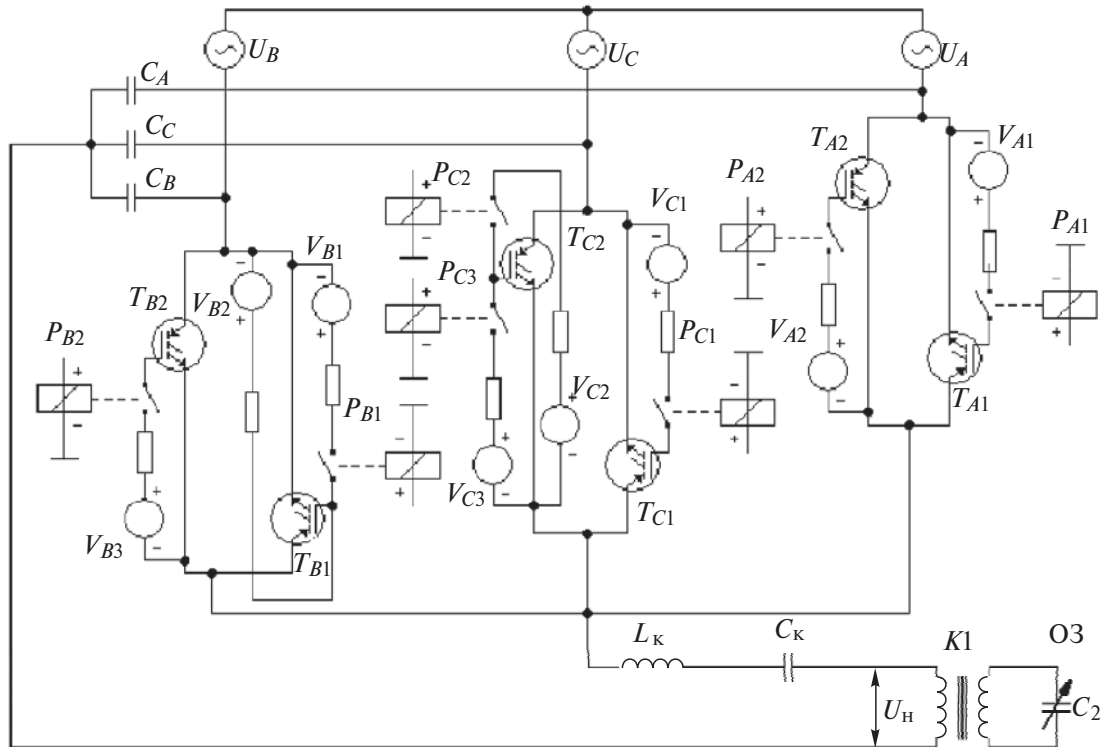


Рис. 6. Схематическая модель полупроводникового озонатора: $T_{A1}, T_{A2}, T_{B1}, T_{B2}, T_{C1}, T_{C2}$ – IGBT транзисторы; $V_{A1}, V_{A2}, V_{B1}, V_{B2}, V_{B3}, V_{C1}, V_{C2}, V_{C3}$ – генераторы управляющих импульсов u_3 на транзисторы; $P_{A1}, P_{A2}, P_{B1}, P_{B2}, P_{C1}, P_{C2}$ – переключатели, обеспечивающие подачу импульсов на транзисторы в заданный момент времени; C_A, C_B, C_C – конденсаторы, соединенные по схеме звезды; C_k, L_k – коммутирующие элементы; U_A, U_B, U_C – источники питающего напряжения; T_p – согласующий трансформатор; $O3$ – емкостная нагрузка

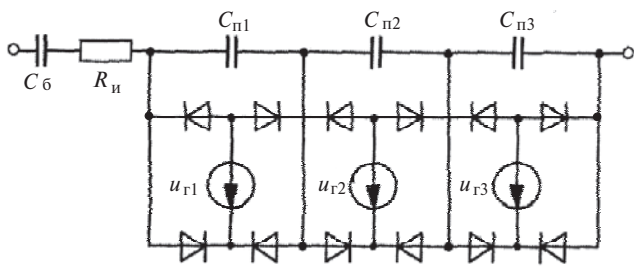


Рис. 7. Дискретная модель озонатора с бегущим барьерным разрядом: C_6 – конденсатор, емкость которого равна емкости диэлектрического барьера; $R_{и}$ – резистор, сопротивление которого представляет собой эквивалентное сопротивление ионизированной зоны; $C_{п1}$, $C_{п2}$, $C_{п3}$ – конденсаторы, емкость которых равна емкости активной зоны озонатора до того, как в ней произошла ионизация ($C_{п1}C_{п2}C_{п3}$); $u_{г1}$, $u_{г2}$, $u_{г3}$ – напряжения между высоковольтным и низковольтным электродами, при которых происходит сначала пробой участка вблизи высоковольтного электрода $u_{г1}$, затем в средней части $u_{г2} > u_{г1}$ и, наконец, всей активной зоны $u_{г3} > u_{г2}$

(производительность 50 г/ч). Из осциллограммы мощности этого озонатора (рис. 5,б) видно, что волна напряжения на выходе модулируется с частотой, в 6 раз большей частоты питающей сети, при этом мощность P_H изменяется от $0,93P_{H\max}$ до $P_{H\max}$, что практически не влияет на производительность озонатора [18].

Более подробное изучение процессов управления полупроводниковым озонатором проводилось на компьютерной модели, созданной в программе MicroCap V9 Demo (рис. 6) [18]. В качестве переключающих элементов использовались транзисторы типа IRG4BC20U высоковольтной серии UltraFast speed со следующими параметрами: $I_{ном} = 6,5$ А, $U_{ном} = 600$ В, $f = 8-40$ кГц. Значение емкости конденсаторов $C_A = C_B = C_C = 100$ мкФ, $C_K = 10$ мкФ; значение $L_K = 25$ мкГн. Амплитудное напряжение фаз сети $U_M = 310$ В, частота коммутации транзисторов $f_K = 10$ кГц.

Озонатор ОЗ на модели рис. 6 моделировался схемой, приведенной на рис. 7 [12]. При этом учитывалось, что минимальная емкость озонатора

$$C_{оз} = \frac{1}{\frac{1}{C_6} + \frac{1}{C_{п1}} + \frac{1}{C_{п2}} + \frac{1}{C_{п3}}},$$

приведенная к первичной обмотке трансформатора $Tr C_{г3} = C_{оз} w_2^2 / w_1^2$, больше емкости C_K в 4–5 раз.

На рис. 8 показана зависимость напряжения на конденсаторе C_K от частоты при изменении его емкости от 5 до 30 мкФ.

Из приведенных графиков можно сделать вывод, что с изменением рабочей частоты от 9 до 11 кГц выходная мощность озонатора изменяется от $0,1P_H$ до P_H , что достаточно для эффективного регулирования производительности озонаторов в промышленных условиях.

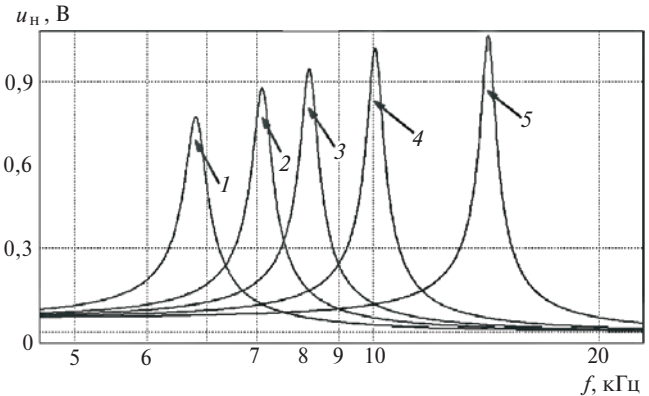


Рис. 8. Зависимость напряжения озонатора от частоты при значениях емкости C_K : 1 – $C_K = 25$ мкФ; 2 – 20 мкФ; 3 – 15 мкФ; 4 – 10 мкФ; 5 – 5 мкФ

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Луин В.В., Попович В.В., Ткаченко С.Н. Физическая химия озона. – М.: Изд-во МГУ, 1998.
2. Rice R.G., Netser A. Handbook of ozone technology and applications. – Kollingwood (USA): Ann Arbor sciences, 1982.
3. Overbeck Paul K. Growth of US water plants, using ozone. – Ozone news, 2000, vol. 28, № 1.
4. Толстикова Г.А., Яхин И.А., Исаев Р.Ф. и др. Применение озона в сельском хозяйстве. – Уфа: Изд. Уральского отд. РАН, 1992.
5. Временная технологическая инструкция по дезинфекции незагруженных плодо- и овощехранилищ, хранению картофеля и капусты свежей с применением озона. – Министерство торговли РСФСР, 1979.
6. Временная технологическая инструкция по хранению лука репчатого, чеснока и моркови с применением озона. – Министерство торговли РСФСР, 1981.
7. Жаворонков Н.Н., Васильков Г.В., Махно П.М. и др. Использование озона в рыбном хозяйстве. – Изд. ВДНХ СССР и Государственного агропромышленного комитета СССР, 1986.
8. Кривошипин И.П. Озон в промышленном птицеводстве. – М.: Росагропромиздат, 1988.
9. Патент РФ № 275433. Высокочастотный озонатор/С.В. Шапиро, Б.А. Воронов. – БИ, 1997, № 8.
10. Филиппов Ю.В., Емельянов Ю.М. Журнал физической химии, 1957, № 4, 7, 12; 1958, № 12; 1959, № 5, 10; 1962, № 8.
11. Shapiro S.V. High frequency resonance ozonators as mono economical method to receive ozone. – Proc. Regional conf. of ozone generation and application to water and waste water treatment (Moscow), 1998.
12. Шапиро С.В., Амирханов А.Ш., Саенко А.Г. Высокочастотный озонатор с бегущим барьерным разрядом. – Межвуз. науч. сб. «Электромеханика, электротехнические комплексы и системы». – Уфа: УГАТУ, 2002.
13. Шапиро С.В., Серебряков А.С., Пантелеев В.Н. Тиристорные и магнитотиристорные агрегаты питания электрофильтров очистки газа. – М.: Энергия, 1978.
14. Патент РФ № 2196729. Парорезонансный способ стабилизации напряжения высокочастотного озонатора и устройство для его реализации/С.В. Шапиро, С.А. Дунаев. – БИ, 2003, № 2.
15. Электротехнический справочник. Т. 1/Под ред. В.Г. Герасимова, П.Г. Грудинского, В.А. Лабунцова и др., 9-е изд. – М.: Изд-во МЭИ, 2003.
16. А.с. № 1545307. Способ управления преобразователем трехфазного напряжения в высокочастотное однофазное/С.В.Шапиро. – БИ, 1990, № 7.

17. Патент РФ № 233746. Способ управления преобразователем трехфазного напряжения в высокочастотное однофазное и устройство для реализации этого способа/С.В. Шапиро, Р.В. Киселев. Оpubл. 27.10.2008.

18. Разевиг В.Д. Схемотехническое моделирование с помощью MicroCap 7. — М.: Горячая линия — Телеком, 2003.

[20.08.10]

Авторы: Шапиро Семен Вольфович окончил электромеханический факультет Московского энергетического института в 1956 г. В 1991 г. защитил докторскую диссертацию «Основы проектирования и синтез частотно-регулируемых тиристорных источников питания электротехнологических установок повышенной частоты» в Институте электродинамики АН УССР. Профессор кафедры «Физика» Уфимской государственной академии экономики и сервиса (УГАЭС).

Жидков Вячеслав Владимирович окончил факультет техники сервиса УГАЭС в 2007 г. Аспирант кафедры «Физика» УГАЭС.

Зинин Юрий Михайлович окончил электромеханический факультет Уфимского авиационного института (ныне УГАТУ) в 1969 г., где в 1978 г. защитил кандидатскую диссертацию «Исследование и разработка элементов управления автономных инверторов повышенной частоты». Доцент кафедры «Электрооборудование летательных аппаратов и наземного транспорта» УГАТУ.