

# 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 тепло<sup>1</sup> 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 –

<sup>1</sup> 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  $-10$ ,  $-20$  °С.

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 20–25 °С. 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 ( $T_{A1}-T_{A2}$ ,  $T_{B1}-T_{B2}$ ,  $T_{C1}-T_{C2}$ ) и конденсаторов  $C_A$ ,  $C_B$ ,  $C_C$ . Лучи звезд подсоединены к фазам питающей сети  $A$ ,  $B$ ,  $C$ . Между центрами звезд ( $O_1$  и  $O_2$ )

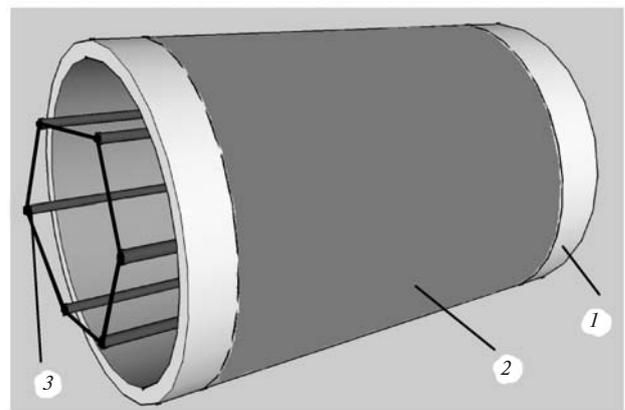


Рис. 1. Разрядная трубка многоэлектродного озонатора: 1 – керамическая труба (диэлектрический барьер); 2 – низковольтный электрод; 3 – высоковольтные электроды

включена коммутирующая цепь  $L_K-C_K$  и согласующий трансформатор  $Tr$ , 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  $C_K-L_K-w_{1Tr}$  ( $w_{1Tr}$  – первичная обмотка трансформатора  $Tr$ ), и по цепи нагрузки начинает протекать импульс тока

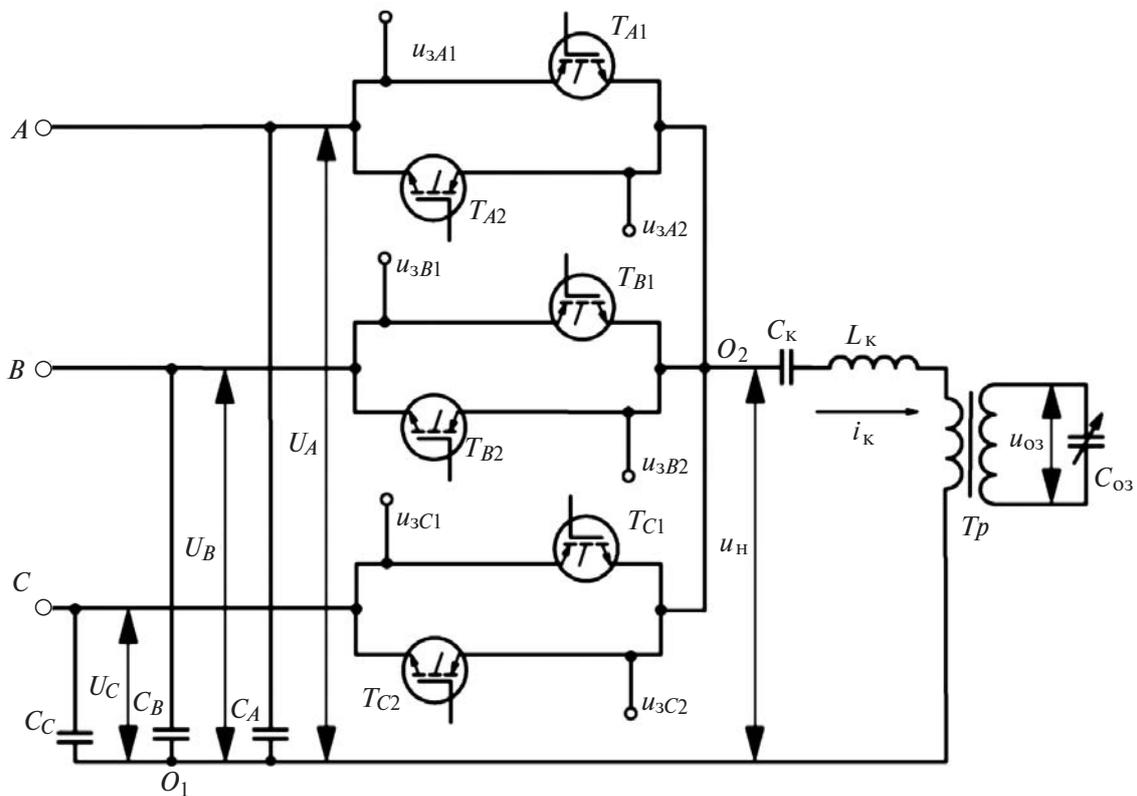


Рис. 2. Принципиальная схема генератора озона с высокочастотным источником питания (полупроводникового озонатора)

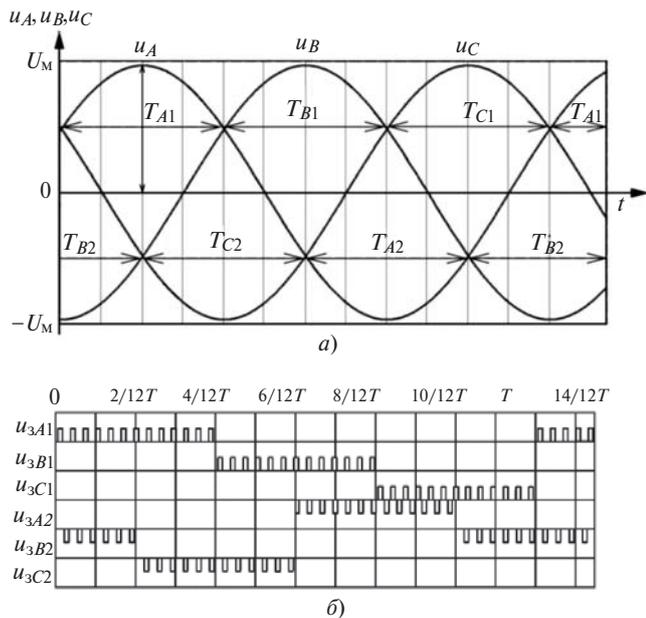


Рис. 3. Порядок работы транзисторов преобразователя: а – кривые изменения фазных напряжений сети; б – импульсы управления транзисторами преобразователя

$i_k$ . 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

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

т.е. менее чем на 0,1%.

На всех последующих интервалах значение  $\Delta u$  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

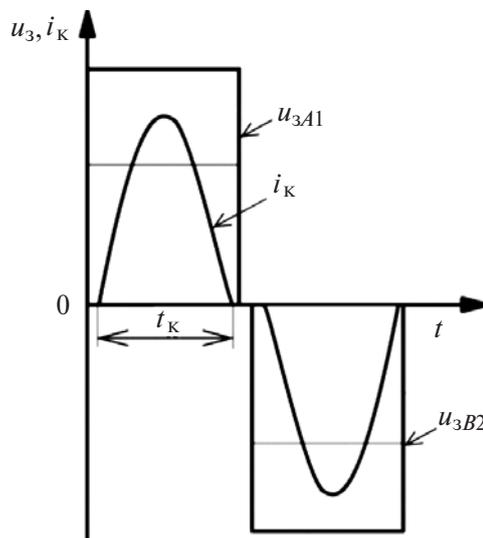


Рис. 4. Графики изменения импульсов напряжения управления и тока коммутирующей контуры для одного периода выходного напряжения

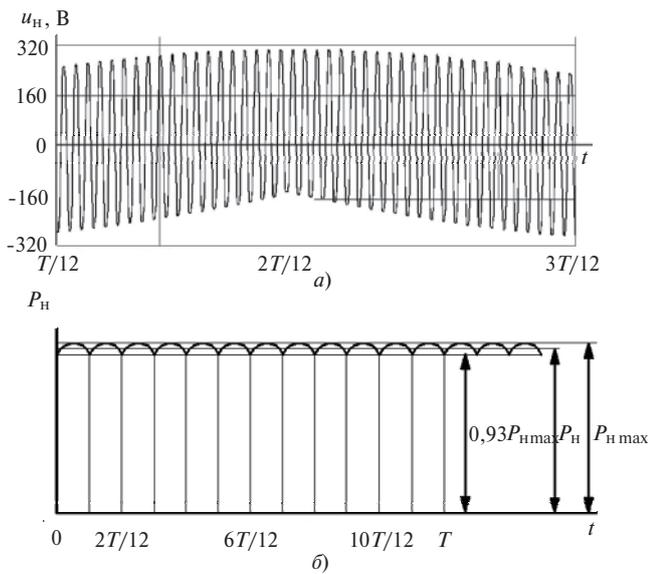


Рис. 5. Осциллограмма напряжения  $u_n$  на входе трансформатора источника питания озонатора (а), осциллограмма мощности озонатора  $P_n$  (б)

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

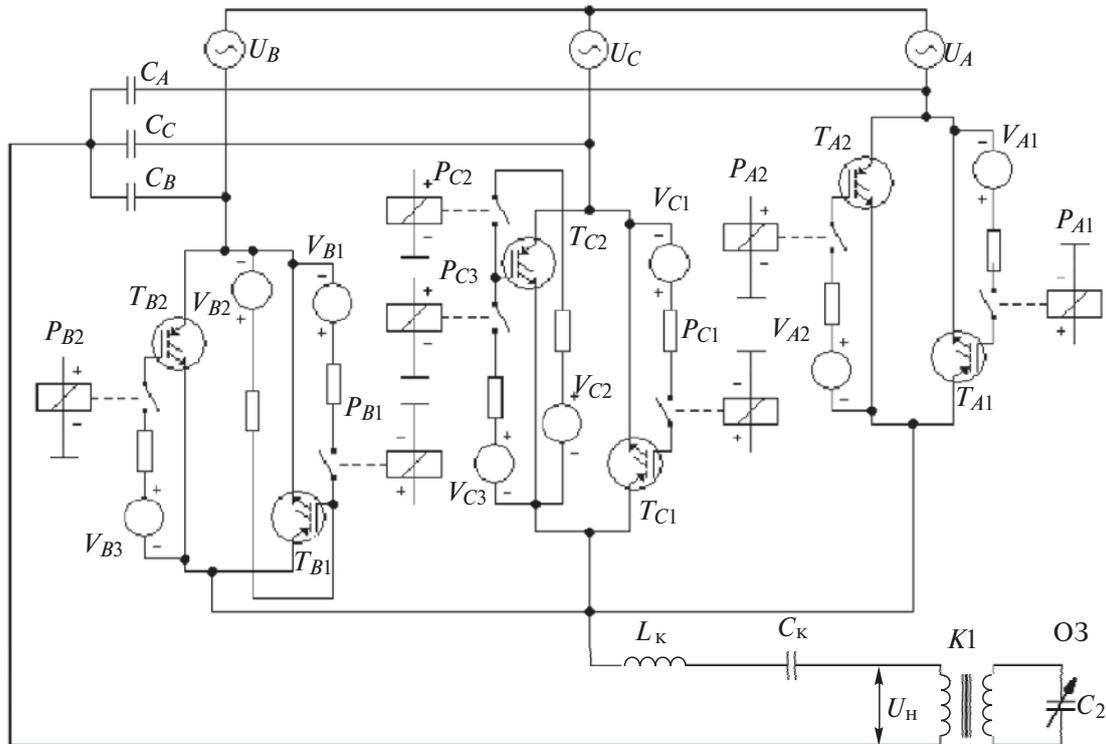


Рис. 6. Схематическая модель полупроводникового озонатора:  $T_{A1}, T_{A2}, T_{B1}, T_{B2}, T_{C1}, T_{C2}$  – IGBT транзисторы;  $V_{A1}, V_{A2}, V_{B1}, V_{B2}, V_{B3}, V_{C1}, V_{C2}, V_{C3}$  – генераторы управляющих импульсов  $u_3$  на транзисторы;  $P_{A1}, P_{A2}, P_{B1}, P_{B2}, P_{C1}, P_{C2}$  – 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

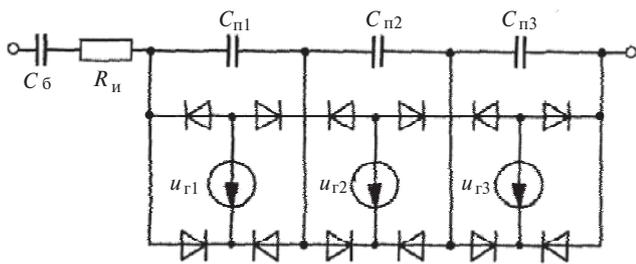


Рис. 7. Дискретная модель озонатора с бегущим барьерным разрядом:  $C_б$  – конденсатор, емкость которого равна емкости диэлектрического барьера;  $R_и$  – резистор, сопротивление которого представляет собой эквивалентное сопротивление ионизированной зоны;  $C_{п1}$ ,  $C_{п2}$ ,  $C_{п3}$  – конденсаторы, 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  $P_н$  изменяется от  $0,93P_{н\max}$  до  $P_{н\max}$ , 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

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

приведенная к первичной обмотке трансформатора  $Tr C_б = C_{оз} w_2^2 / w_1^2$ , 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  $0,1P_н$  до  $P_н$ , что достаточно для эффективного регулирования производительности озонаторов в промышленных условиях.

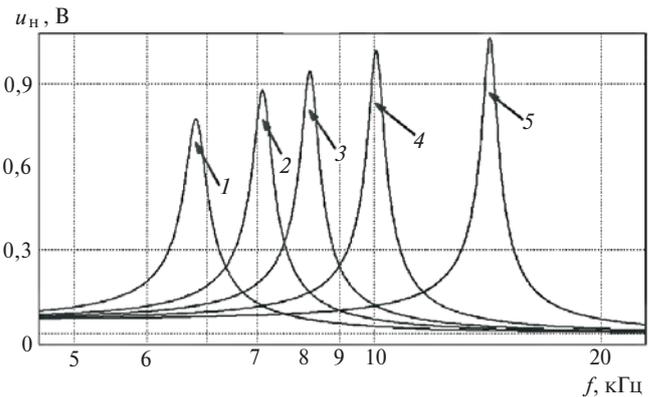


Рис. 8. Зависимость напряжения озонатора от частоты при значениях емкости  $C_K$ : 1 –  $C_K = 25$  мкФ; 2 – 20 мкФ; 3 – 15 мкФ; 4 – 10 мкФ; 5 – 5 мкФ

#### 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. Опубл. 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.*